

令和元年台風 15 号による停電の長期化に伴う
影響と風水害に関する総合調査

令和元年度科学研究費助成事業 特別研究促進費

(研究課題番号：19K24677)

研究成果報告書

2021 年 3 月

研究代表者 丸山 喜久
(千葉大学大学院工学研究院 教授)

はじめに

令和元年（2019年）9月5日に南鳥島近海で発生した台風15号（Faxai）は、「非常に強い」勢力を保ったまま9月9日午前3時前に三浦半島を通過した。その後、東京湾を北東に進み、9日午前5時前に千葉県千葉市に上陸した。関東地方に「非常に強い」勢力を保ったまま台風が接近するのは極めて稀である。さらに、千葉市上陸時の中心気圧と最大風速は、それぞれ960 hPa、40 m/sと解析されており、台風15号は、統計開始以来、最も強い勢力で関東地方に上陸したとみられている。

今回の台風でとりわけ大きな被害を受けたのは、現代の社会活動を支えている電力システムである。東京電力管内の1都7県に渡って最大約934,900戸（2019年9月9日7:50時点）で停電が発生した。9月11日6:30時点で千葉県と神奈川県の一部を除き停電は解消されたが、千葉県では停電が長期化し、9月17日13:00時点で約67,200戸が未だ停電していた。さらに、停電の長期化の影響は深刻化し、熱中症による死者の発生、断水の長期化、携帯電話や固定電話回線等の通信障害など様々に波及し、停電災害と言える事態に陥った。

この台風によって、死者3名（2名の災害関連死者を含む）、負傷者150名の人的被害が発生した（2019年12月23日15:00現在）。また、千葉県を中心に神奈川県、東京都、茨城県など広範囲で7万棟以上の住家被害や230棟以上の床上・床下浸水の被害が生じている。この被害量は、昨年台風21号の被害を超えるものであった。さらに、首都圏の交通システムでは、台風による鉄道の運休や高速道路の通行止めが発生した。その影響を受け、成田空港では約14,000人が空港内に残り残されるなど非常に混乱した。海上では、貨物船同士の衝突や護岸の走錨被害が報告されている。

今回の台風によってもたらされた停電によって、電力依存社会の抱える脆弱性が次々と露見された。このことから、停電の長期化による影響波及に関する調査研究は、風水害の防災対策のみならず、今回と同様に大規模な停電が懸念される首都直下地震や南海トラフ巨大地震などの地震対策にも非常に重要な知見をもたらす。また、建築物、海岸・港湾施設、交通システムの被害について調査研究を実施することは、近年風水害が頻発し、その被害が激甚化している我が国の防災・減災対策の立案に大きく貢献できる。

そこで、令和元年度科学研究費助成事業「令和元年台風15号による停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査」（課題番号：19K24677）では、①停電の長期化の原因とその影響波及の解明（ライフライン分野）、②台風15号による被害発生の気象学的要因の解明（気象分野）、③建築物・工作物の被害メカニズムの解明および強風リスク評価（風工学分野）、④海岸・港湾施設の被害メカニズムの解明（海岸・港湾分野）、⑤内水被害の実態調査（水工学分野）、⑥航空交通システムへの影響の解明（航空交通分野）について、調査研究を実施した。本報告書は、その成果を取りまとめたものである。

本研究を行うにあたり、関係機関および台風の被害に遭われた方々には、調査等に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

研究組織

研究代表者 研究分担者	丸山喜久 能島暢呂 庄司学 永田茂 宮島昌克 大庭哲治 梶谷義雄 佐藤翔輔 筆保弘徳 小林文明 竹見哲也 飯塚聡 宮本佳明 益子涉 丸山敬 松井正宏 ガヴァンスキ江梨 野田稔 中嶋唯貴 西嶋一欽 Ana Maria Cruz 高橋徹 友清衣利子 劉ウエン 有川太郎 柴山知也 高木泰士 平石哲也 清野聡子 田中規夫 八木澤順治 竹林幹雄 大西正光 畑山満則 平田輝満 轟朝幸 大石哲	千葉大学・工学研究院・教授 岐阜大学・工学部・教授 筑波大学・システム情報系・教授 防災科学技術研究所・災害過程研究部門・主幹研究員 金沢大学・地球社会基盤学系・教授 京都大学・経営管理研究部・准教授 香川大学・創造工学部・教授 東北大学・災害科学国際研究所・准教授 横浜国立大学・教育学部・准教授 防衛大学校・応用科学群・教授 京都大学・防災研究所・准教授 防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部門・総括主任研究員 慶應義塾大学・環境情報学部・専任講師 気象庁気象研究所・台風・災害気象研究部・主任研究官 京都大学・防災研究所・教授 東京工芸大学・工学部・教授 大阪市立大学・工学研究院・准教授 高知大学・自然科学系理工学部・教授 北海道大学・工学研究院・准教授 京都大学・防災研究所・准教授 京都大学・防災研究所・教授 千葉大学・工学研究院・教授 熊本大学・先端科学研究部（工）・准教授 千葉大学・工学研究院・助教 中央大学・理工学研究科・教授 早稲田大学・理工学術院・教授 東京工業大学・環境社会理工学院・准教授 京都大学・防災研究所・教授 九州大学・工学研究院・准教授 埼玉大学・理工学研究科・教授 埼玉大学・理工学研究科・准教授 神戸大学・海事科学研究科・教授 京都大学・防災研究所・准教授 京都大学・防災研究所・教授 茨城大学・理工学研究科・准教授 日本大学・理工学部・教授 神戸大学・都市安全研究センター・教授
----------------	---	--

研究協力者

ライフライン：山崎文雄，上米良秀行，鈴木進吾，須藤三十三（防災科研），朱牟田善治，湯山安由美（電中研），多々納裕一（京大）

気象：及川義教，松本聡（気象庁），鷹野敏明（千葉大），岩下久人（明星電気），諸富和臣，嶋村重治（日本無線），和田章義，高野洋雄，嶋田宇大（気象研）

風工学：木村吉郎（東理大），中藤誠二（関東学院大），奥田泰雄，高館祐貴（建研），喜々津仁密（国総研），植松武是（北学大），石原孟（東大），高森浩治（構耐評），大風翼（東工大），山本佳嗣，吉田昭仁，金容徹（工芸大），宇田川智弘（損保協），篠原瑞生（東京海上日動），桑原健（損保ジャパン），堀江啓（インターリスク）

海岸・港湾：田島芳満（東大），平石哲也（京大），高島知行（早大），渡部真史（中大）

台風 15 号による停電被害の概要と災害間比較

Outline of Electric Power Outage and Recovery in Typhoon No.15 Disaster and Their Comparison among Other Recent Disasters

能島 暢呂*1

Nobuoto NOJIMA

Typhoon No.15 brought extremely strong winds to the Tokyo metropolitan area early on September 9, 2019. The most serious damage was electric power outage which continued longer than two weeks in Chiba Prefecture. First, this paper briefly summarizes the outline of damage caused by Typhoon 15. Next, physical damage to electric power supply facilities and electric power outage and recovery process are compiled on the basis of published documents and information by related organizations. Emphasis is placed on the issue of public information on the prospect for recovery of electricity which significantly underestimated the duration of outage. Several earthquakes, typhoons and flood disasters are compared in terms of damage and recovery of electric power supply services.

Keywords : *Typhoon No.15, outline of damage, electric power outage, recovery process, comparison of disasters*

1.1.1 台風 15 号による被害の概要

2019 年台風 15 号は、日本気象協会¹⁾によると、2019 年 9 月 5 日に南鳥島近海で発生し、日本列島に接近するにつれて東に進路を変え、9 日午前 3 時頃に三浦半島付近を通過して午前 5 時頃に千葉市付近に上陸した。千葉市で最大瞬間風速 57.5m を記録するなど首都圏に記録的な暴風をもたらし、甚大な被害が発生した。消防庁災害対策室のまとめ²⁾によると、2019 年台風 15 号による被害統計としては、死者 3 人（うち災害関連死者 2 人）、重傷者 13 人、軽傷者 137 人、住家全壊 391 棟、半壊 4,204 棟、一部破損 72,279 棟、床上浸水 121 棟、床下浸水 109 棟などとなっている（2019 年 12 月 23 日現在）。台風第 15 号は「令和元年 8 月 13 日から 9 月 24 日までの間の暴風雨及び豪雨による災害」として激甚災害に指定された（2019 年 10 月 17 日施行、台風第 10 号、13 号、17 号等を含む）。また気象庁により「令和元年房総半島台風」と命名された（2020 年 2 月 19 日付け³⁾。

台風 15 号は典型的な風台風であったため、瓦屋根の被害などの一部破損が突出して多いのが特徴であり、市原市におけるゴルフ練習場のネットの鉄柱倒壊や、水上メガソーラー発電所の太陽光パネルの破損・火災なども発生した。また倒木や土砂崩れのために各地で道路が寸断された。倒木が多かった理由の一つとして、千葉県に多い山武杉の森林にスギ非赤枯性溝腐病が蔓延しており、強風で多数が折損したことが挙げられている。

ライフライン・システムに関しては、電力施設が最大の被害を受け、千葉県を中心に約 93 万戸に及ぶ大規模な停

*1 岐阜大学工学社会基盤工学科 教授・工博

Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Engineering,
Gifu University, Dr.Eng.

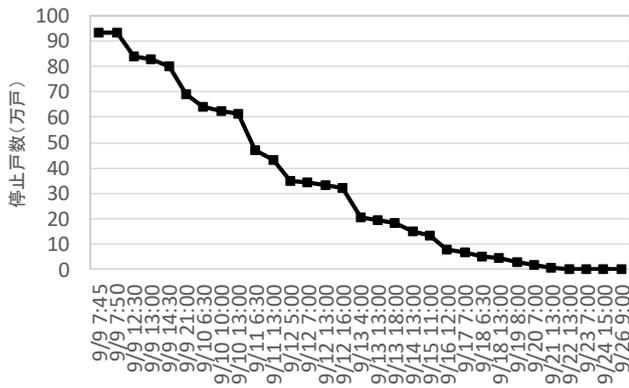
電が発生し、停電解消まで約 16 日間を要する異例の長期停電となった。その影響は、他の供給処理系・交通系・通信系のライフライン機能にも広く波及し、広範囲で市民生活・社会機能・産業経済活動が阻害された。関係省庁のまとめによると、断水は最大約 14 万戸、固定電話のり障回線は 3 社で最大約 17.7 万回線、携帯キャリア最大停止局数は 3 社で延べ約 2,800 局に及ぶ⁴⁾。また多数の鉄道路線が台風接近に備えて計画運休に入り、孤立状態となった成田空港では利用客など約 1.4 万人が一時滞留した。さらに、台風通過後には 30℃以上の暑い日が続いたことから、停電に伴う空調不能や断水による水不足は深刻な事態に発展した。報道によると上記の災害関連死者 2 人の原因は、停電による酸素吸入器使用不能（80 代男性）と停電が原因の熱中症（90 代女性）であった。停電のみを主要原因とした社会機能マヒに関しては停電解消とともに終息したものの、長期停電の社会全体への累積的影響はきわめて大きいものであった。

以下、本節ではまず 1.1.2 において、最大の被害となった停電と復旧対応の状況をまとめ、1.1.3 では特に問題となった復旧見込みの情報提供に関する状況をまとめる。さらに 1.1.4 では比較災害の観点から、他の台風・豪雨・地震災害における停電被害・復旧状況との比較を行い、台風 15 号の特徴と近年の災害における相対的な位置付けについて考察する。執筆にあたっては、経済産業省のウェブサイト情報⁵⁾、経済産業省に設けられたワーキンググループによる報告書^{6,7)}や検証資料⁸⁾⁻¹⁰⁾、東京電力ホールディングス(株)のウェブサイトにおけるプレスリリース¹¹⁾、ならびに、各電力会社提出の WG 資料¹²⁾⁻¹⁶⁾等を参照し、総合的に取りまとめた。

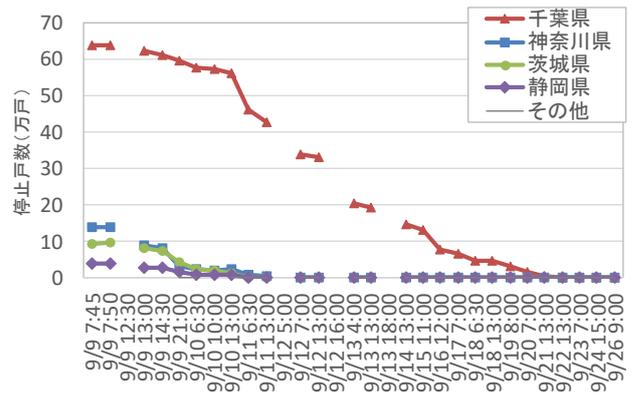
1.1.2 停電と復旧対応⁵⁾⁻¹⁴⁾

主な設備被害は、送電線鉄塔の倒壊 2 基、支持物の折損・倒壊等 1,996 本、架空線の断線・混線等 5,529 径間、変圧器の損傷・傾斜等 431 台である。特に電柱倒壊の原因は、倒木・建物倒壊（約 74%）、看板等の飛来物（約 14%）、土砂崩れ等の地盤影響（約 12%）による二次被害が大半であり、千葉県を中心に広域的に発生して長期間の停電の主要因となった。台風の接近に伴って、東京電力管内では千葉県を中心に停電が発生・拡大し、9 月 9 日 7 時 50 分時点で最大停電戸数約 934,900 戸となった。都県別の最大停電戸数は多い順に、千葉県 637,700 戸、神奈川県 141,500 戸、茨城県 99,200 戸、静岡県 40,200 戸、東京都 12,800 戸、埼玉県 4,100 戸、栃木県 1,300 戸であり、千葉県が約 68%を占めている。千葉県内の市区町村別停電戸数（9 月 9 日 13 時点）は多い順に、市原市 65,200 戸、君津市 37,700 戸、千葉市若葉区 34,000 戸、香取市 33,100 戸、八街市 33,200 戸、成田市 27,300 戸、富津市 26,200 戸などである。

東京電力管内および県別の停電戸数の解消過程⁵⁾を図 1.1.1 に示す。また最大停電戸数で正規化した復旧率を図 1.1.2 に示す。停電解消はかなり遅く、9 月 24 日 19 時に復旧率がほぼ 100%に達するまで約 16 日間を要した。ただしこれらの停電件数は高圧線の復旧状況に基づいており、低圧線や引込線の損傷による停電件数は含まれないため、停電がさらに長期化した需要家もある¹¹⁾。図 1.1.3(a)に復旧人員の推移⁵⁾を示す。台風接近前の 9 月 8 日 22 時には、事前対応として待機要員 2,250 名で第 1 非常態勢に入り、台風上陸後の 9 月 9 日 6 時には停電範囲が拡大したことから第 2 非常態勢に移行し、他電力会社からの応援要員を含めてピーク時には約 16,000 名の態勢となった。図 1.1.3(b)に応急給電のために派遣された高圧・低圧発電機車数の推移⁵⁾を示す。ピーク時には発電機車約 330 台体制で応急送電作業が行われた。

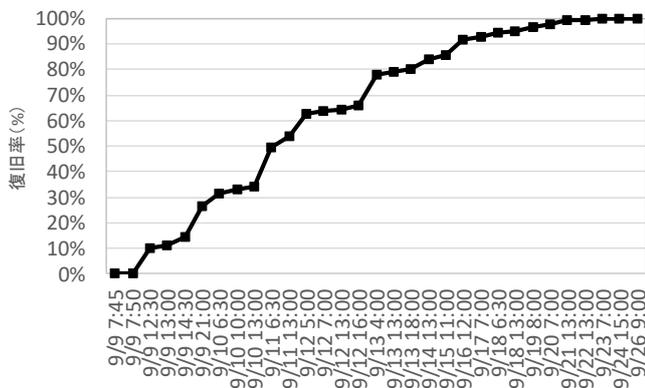


(a) 東京電力管内

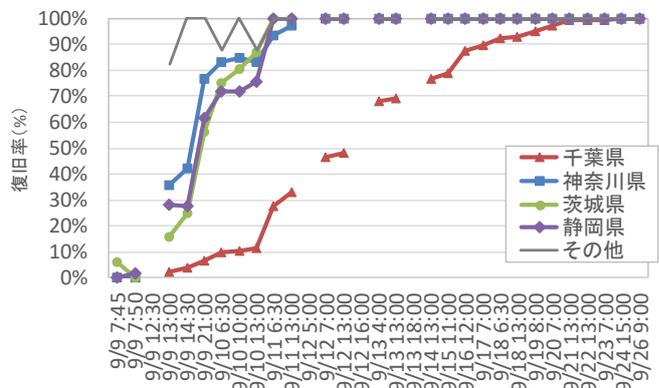


(b) 県別

図 1.1.1 停電戸数の解消過程



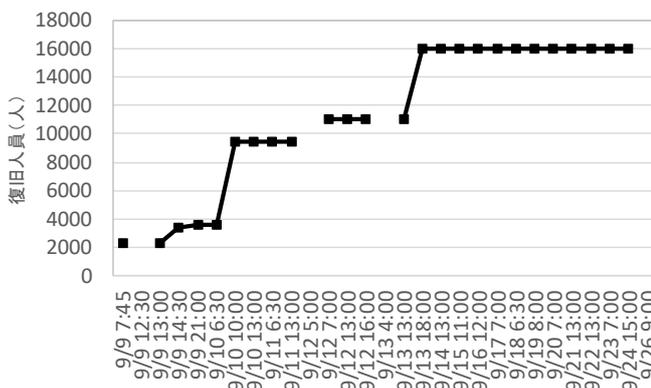
(a) 東京電力管内



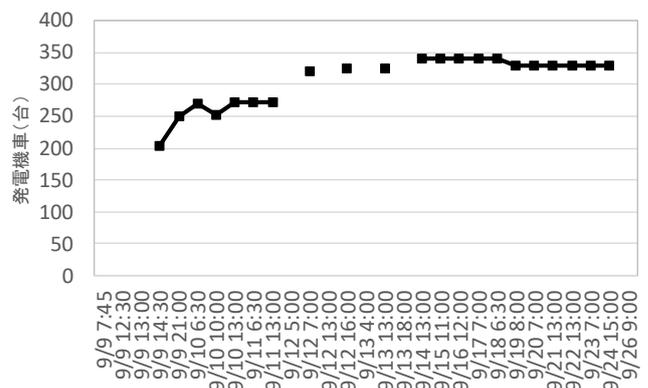
(b) 県別

図 1.1.2 復旧率 = (最大停電戸数 - 停電戸数) / 最大停電戸数の推移

(基準停電戸数：7時50分時点，千葉県・静岡県・その他のみ7時45分時点)



(a) 復旧人員



(b) 発電機車（高圧・低圧の合計）

図 1.1.3 東京電力と他電力会社応援事業者による復旧体制

初動期および復旧対応における課題として，以下の事項が挙げられる⁶⁾¹⁴⁾。

- (1) 被害状況の全容把握に時間を要したこと（広域・多数の配電設備被害の発生，巡視要員の不足，携帯電話の通信困難など現場との連絡手段不足，ドローン操縦者不足による活用遅れ等）

- (2) 倒木や土砂崩れ等による道路寸断のため進入困難な箇所が多かったこと（自治体・自衛隊への道路啓開の要請遅れ，倒木伐採・道路啓開・復旧工事など複雑化した工程管理の統制不足等）
- (3) 他電力応援要員や電源車の指揮体制の確立に時間を要したこと（受け入れ準備不足，リソース把握・配置の遅れ，電源車の接続工事や燃料補給の問題，電源車のニーズと派遣実績のミスマッチと低稼働率）
- (4) 低圧線の被害把握や復旧作業が停滞したこと（故障箇所の発見困難，高圧線復旧作業の優先，復旧要員不足，未通電の低圧需要家の特定困難）

1.1.3 復旧見込み情報の推移⁶⁾⁻¹⁴⁾

防災基本計画（令和元年5月改訂）には「ライフライン，交通輸送等の関係機関〔総務省，厚生労働省，経済産業省，国土交通省等〕は，復旧に当たり，可能な限り地区別の復旧予定時期の目安を明示するものとする」と定められている。台風15号の際には，当初の復旧見込みの精度が悪かったことが，結果として災害対応全般に大きな混乱をもたらした。まず9月9日に経済産業大臣から東京電力に対して，迅速・正確に復旧見込みの発信と早期復旧が指示された（その後9月11日に2回目）。1.1.2に示した理由により初動対応が困難を極めるなかで，過去の台風被害対応における復旧効率の実績と，最大限の要員投入を前提条件とした復旧見通しが策定され，9月10日17時に「今夜中に停電軒数が12万軒まで縮小」と公表された。しかし配電設備被害の全容把握ができていない段階での見通しであったため，予想以上の被害が明らかになった11日8時に「本日中にすべての停電が解消する見通しは立っておりません」と訂正され，さらに12日18時30分に「本日中に約40万軒まで縮小する見込み」とされた。その後明らかになった設備被害状況を踏まえ，13日18時に「千葉県市町村ごとの地域全体の停電復旧までに要する期間のイメージ」として下記の3段階の復旧見込み時期を示す方針が出された。

- (1) 第1地域（3日以内）：工事が比較的順調に進んでおり，現状の進捗状態であれば3日以内に概ね復旧できると見込んでいる地域
- (2) 第2地域（1週間以内）：設備の被害状況は確認できているが，停電解消に向けた工事量が多く，復旧までに時間を要する地域
- (3) 第3地域（2週間以内）：広範囲にわたって甚大な設備被害が生じており，点検・確認から工事着手・完了，復旧までに相当の作業と時間が見込まれる地域

9月14日23時には地区単位での停電軒数と復旧見込みの分類が公表された（図1.1.4）。その後，被害調査進捗が進むにつれて復旧見込みは定期的に更新された。9月24日19時と9月27日18時には，それぞれ翌日以降も復旧作業を継続する復旧困難箇所が公表された。復旧見込みの市区町村別概要に関して約4日半，地区別詳細に関して約6日間を要したことは，被害全容の早期把握および正確な復旧見込み情報の発信の両面で大きな教訓を残した。

既往災害における類似の復旧見込みの事例としては，2016年熊本地震における上水道復旧の事例が挙げられる⁴⁾。被害甚大地域における断水解消が遅れたため，厚生労働省は2016年4月29日以降，短期（1週間程度），中長期（2週間程度またはそれ以上），家屋等損壊地域（地震により家屋等が大きく損壊した地域で，地域の復興に合わせて水道も復旧・整備する予定のため復旧見込みの対象に含めない）の3段階に分類して公表した。また都市ガス供給システムに関しては，2018年大阪府北部の地震の際に，「復旧見える化システム」を通じて復旧進捗状況のマップ情報が提供されている⁴⁾。直接的な復旧見込み情報ではないものの，「供給停止（閉栓中）」，「道路面のガス管検査中」，「道路面のガス管修理中」，「お客様宅のガス設備検査・開栓実施中」，「完了」の5段階からなる復旧進捗状況を，利用者自らがWebGISで確認し，対応行動のための判断材料とすることができる。電力各社においても，停電範囲，停電理由，復旧見込み等に関する情報をWebGISで提供するシステム構築が進められつつあり，正確な情報提供が今後の課題である。

<別紙> 千葉県市区町村ごとの地域全体の停電復旧までに要する期間のイメージ

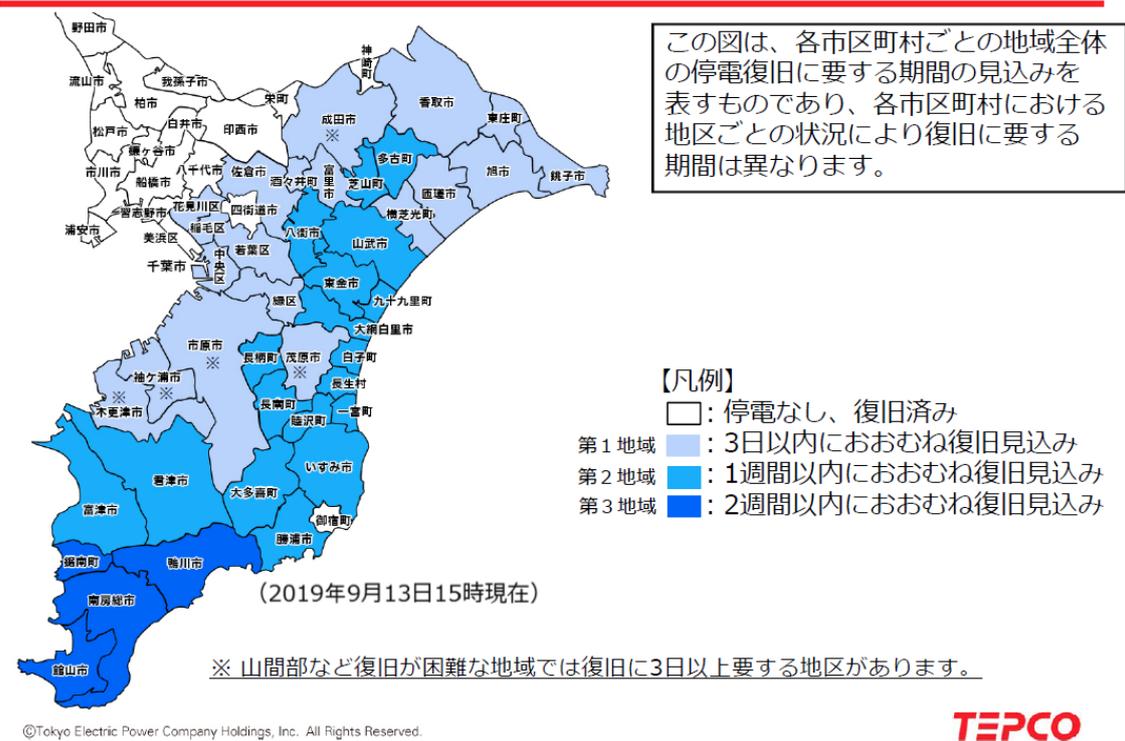


図 1.1.4 停電復旧見込みに関する情報発信の一例 (9月13日18時公表) (文献¹¹⁾より引用)

1.1.4 電力設備・停電被害の主要な指標の災害間比較

ここでは経済産業省まとめ資料⁶⁾、⁸⁾⁻¹⁰⁾および各社資料¹¹⁾⁻¹⁶⁾をもとにして、2018年台風21号(被災事業者:関西電力・中部電力)、2018年台風24号(同:中部電力・九州電力)、2019年台風15号(同:東京電力)、2019年19号(同:東京電力・中部電力・東北電力)の4回の台風災害を対象として、電力設備被害と停電状況の比較を行う。

図 1.1.5 は最大停電戸数を比較したものである。最多は2018年台風21号の約240万戸で、次いで2018年台風24号が約180万戸、2019年台風15号は約93万戸で3番目の規模である。2019年台風19号は最小の約52万戸という規模であった。ここでは対象外としたが、2015~2017年の台風・豪雨災害については、最大停電戸数の多い順に、2015年台風15号が約48万戸、2017年台風21号が約29万戸、2016年台風16号が約25万戸、2018年西日本豪雨が約7.5万戸、2016年台風10号が約5.5万戸となっている。2018~2019年の4台風はいずれもこれらより多く、台風・豪雨災害の激甚化の一端が停電被害の規模にも現れている。

図 1.1.6 は送配電設備の被害として、電柱の破損・倒壊等、および、架空線の断線・混線等の数を比較したものである。いずれの被害項目に関しても2019年台風15号は4災害中の最大規模となっており、1.1.2に記した倒木等による二次被害がいかに大きかったかが理解できる。これに次いで、同じく倒木による電柱倒壊が多発した2018年台風21号、河川氾濫による電気設備の冠水が多発した2019年台風19号となっている。2018年台風24号に関しては詳細不明であるが、電柱被害に関しては4台風で最小である(飛来物による電柱倒壊が多数)。

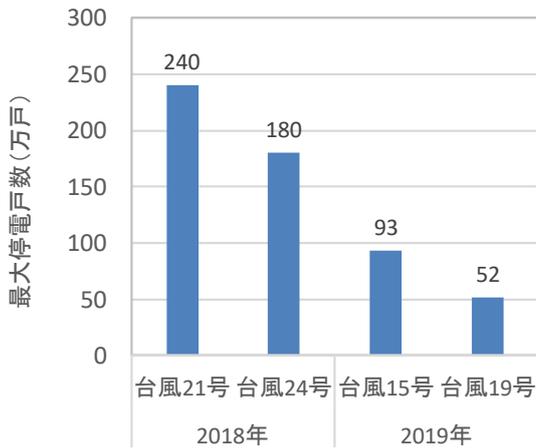


図 1.1.5 台風災害による最大停電戸数

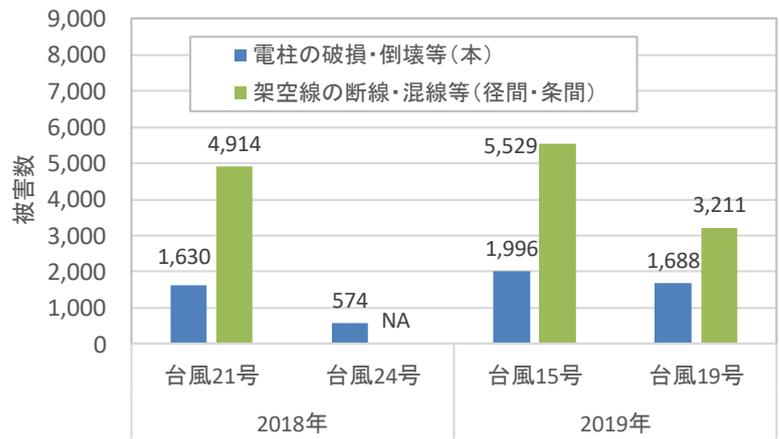


図 1.1.6 台風災害による送配電設備被害

図 1.1.7 は停電戸数の推移の比較であり、各台風における停電戸数のピーク時からの経過時間を横軸としている。復旧進捗が早い順に、2019年台風19号、2018年台風24号、2018年台風21号であり、いずれもピーク後の24時間において急速に停電が解消した後にそのペースが鈍化する傾向にある。一般に被害が軽微な地域では一旦停電したとしても系統復旧による通電が迅速に行われ、その後、一定の時間を要する被災設備の物理的復旧が行われるためである。一部で曲線が交差しているものの、最大停電戸数と復旧期間の長さには一定の関係が見られる。一方、2019年台風15号では一貫して停電解消のペースが遅いことが分かる。台風の進路の東側周辺に沿って配電設備被害が集中したことや、1.1.2に示した諸問題がその原因であり、復旧所要時間が最長となっている（加えて、後出の図 1.1.11 の注釈にあるように、東京電力の場合は自動的な再送電にあたる部分は停電戸数に含まれていないことも理由の一つである）。ピーク時から99%停電が復旧するまでの所要時間は、2018年台風21号で約120時間、2018年台風24号で約70時間、2019年台風19号で約100時間であるのに対して、2019年台風15号は、これらをはるかに上回る約280時間となっている。

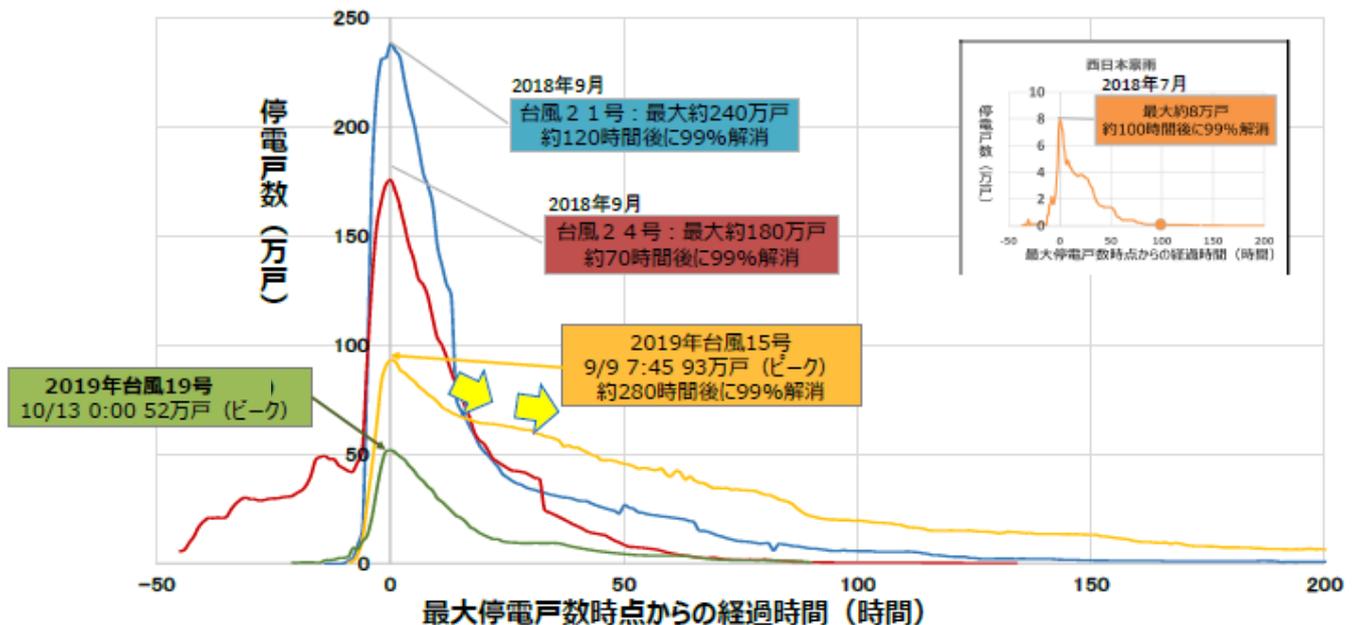


図 1.1.7 台風災害における停電戸数の推移（横軸：ピーク時からの経過時間）（文献⁹⁾より引用）

図 1.1.8(a)は電力の復旧対応人員数の比較である。自社・他社の合計で見ると、2019 年台風 19 号が圧倒的に多く、2019 年台風 15 号は次いで 2 番目であり、2018 年台風 21 号、2018 年台風 24 号と続き、停電規模や復旧所要時間とは相異なる傾向を示す。2019 年台風 19 号が最多となった理由としては、電力会社 3 社にわたる広域災害であったことに加えて、台風 15 号の教訓から東京電力では被害把握のための人員を 5 倍（200 班を 1,000 班）に増員したことなどが挙げられる。初動期にドローン機を活用して被害把握も効率的に進められ、復旧復旧見通しの公表は 1 日以内に行われた⁶⁾。一方、他社からの応援人員に限ってみると 2019 年台風 15 号が最多の 4,000 人となっており、広域支援が大規模に実施されたことを反映している。配備された発電機車数の比較を図 1.1.8(b)に示す。2019 年台風 15 号が最多であり、2019 年台風 19 号もこれに匹敵する規模である。台風 15 号の教訓から、応援要請および受け入れ態勢が整備されたことの成果と考えられる。

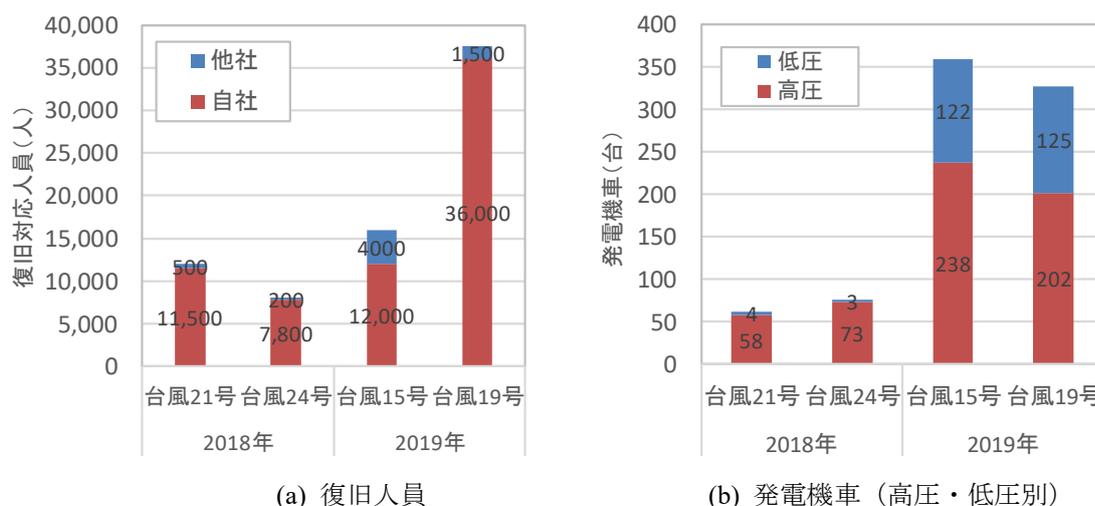


図 1.1.8 台風災害の電力復旧における復旧体制

上記の 4 つの台風災害に加えて、1995 年兵庫県南部地震、2004 年新潟県中越地震、2007 年新潟県中越沖地震、2011 年東北地方太平洋沖地震、2016 年熊本地震、2018 年大阪府北部の地震、2018 年北海道胆振東部地震、平成 30 年 7 月豪雨（西日本豪雨）災害を対象として⁴⁾、停電戸数および復旧率の推移を図示したものを、それぞれ図 1.1.9 および図 1.1.10 に示す。地震災害か台風・豪雨災害かを問わず、2019 年台風 15 号以外の事例では、約 3 日以内には復旧率がほぼ 90%に達し、停電は約 1 週間程度で終息している。道内全域停電のブラックアウトとなった 2018 年北海道胆振東部地震においても 2 日でほぼ停電は解消した。2011 年東北地方太平洋沖地震においては、津波被害が甚大であった地域の停電解消に長期間を要したため、やや後ろにずれ込んでいるが、2019 年台風 15 号の復旧進捗の遅さは群を抜いており、かなり特異な傾向を示していることが分かる。

2019 年台風 15 号への対応の初期段階において、早期停電解消という不正確な復旧見通しが立てられた背景には、ここに示したような過去の復旧事例があったように思われる。そこで、現場情報が網羅的に得られず被害全容の把握ができない場合の補完的措置として、停電ピークから一定期間の復旧実績に基づいてモデル推計を行い、復旧見通し策定の一助とする方法が検討されている⁶⁾⁹⁾。図 1.1.11 は、停電解消過程のモデル推計結果の一例を示したものである。ここでは、停電ピークから 24~36 時間までの復旧実績に基づいて、復旧ペースのトレンドが指数関数的に減衰することをを用いてモデル推計を行うことで、その後の復旧実績を一定の精度で再現できることが明らかにされた。今後、衛星画像やビッグデータ、AI の活用とあわせて、正確な復旧見通しの策定、巡視計画および復旧作業計画の立案に役立てられることが期待される⁶⁾⁹⁾。

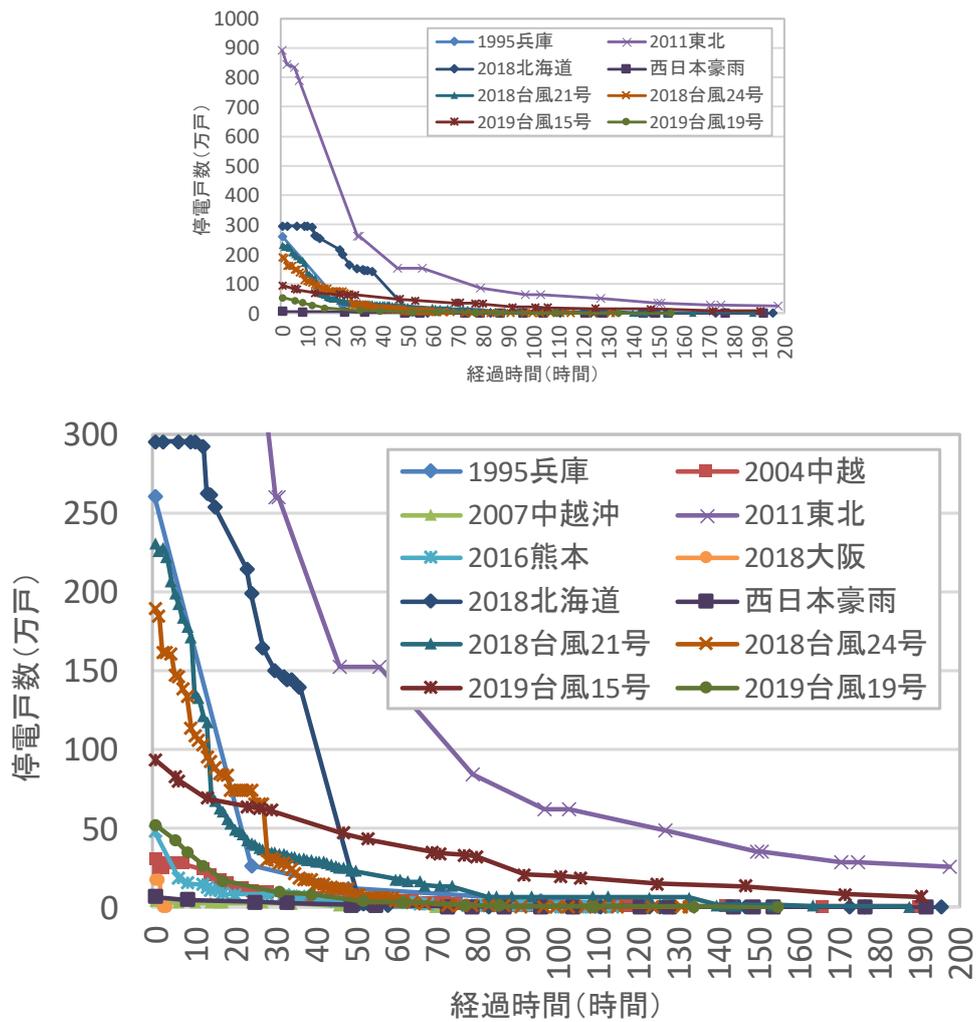


図 1.1.9 主な地震災害と近年の台風・豪雨災害における停電戸数の推移（上段：全体表示，下段：300 万戸まで）

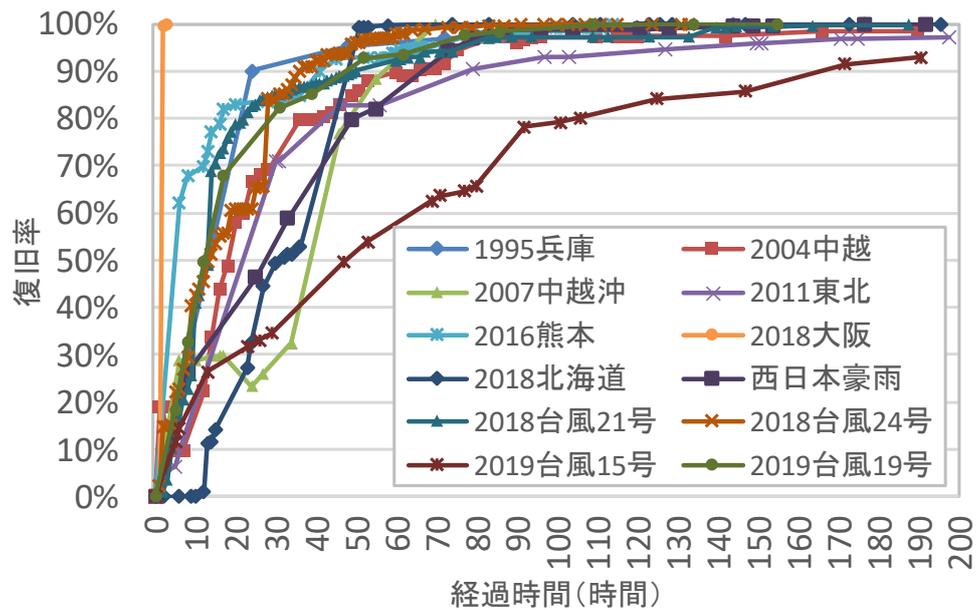


図 1.1.10 主な地震災害と近年の台風・豪雨災害における停電復旧率の推移

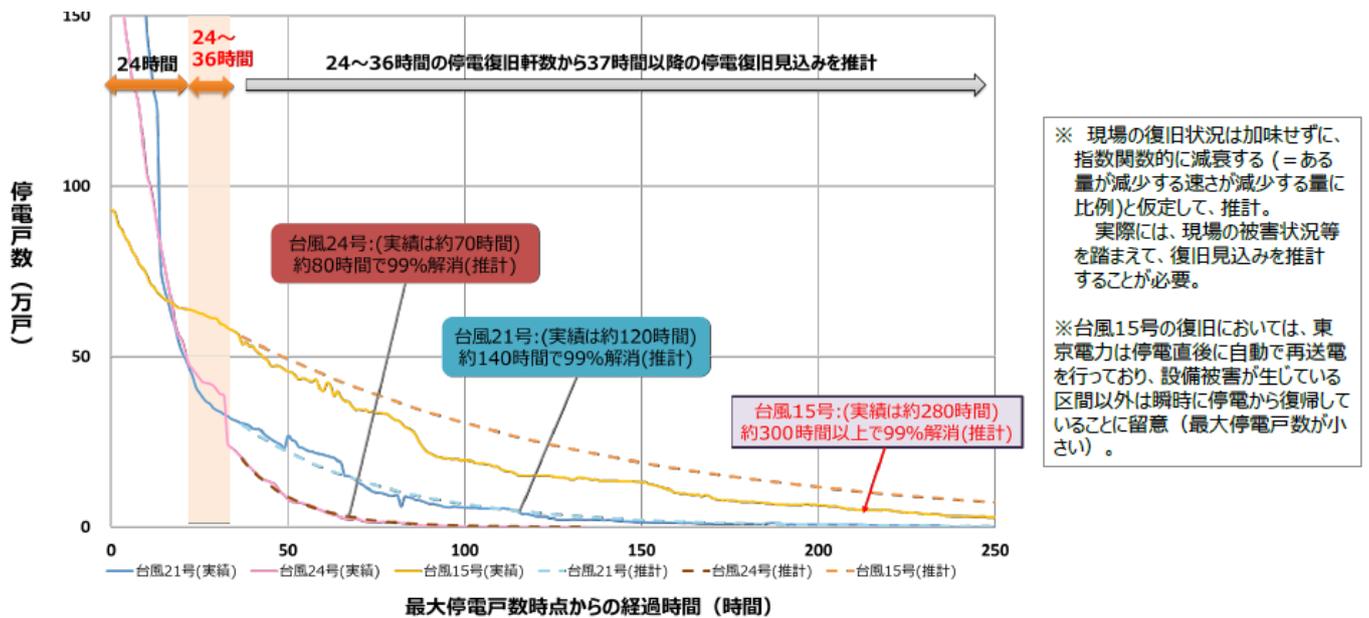


図 1.1.11 網羅的な情報収集ができない場合の復旧見通しの策定手法 (文献⁹⁾より引用)

参考文献

- 1) 日本気象協会：台風15号(2019年9月10日)。<https://tenki.jp/forecaster/deskp/2019/09/10/5895.html>
- 2) 消防庁災害対策室：令和元年台風第15号による被害及び消防機関等の対応状況(第40報), 2019年12月23日。
- 3) 気象庁：令和元年に顕著な災害をもたらした台風の名称について, 2020年2月19日。
https://www.jma.go.jp/jma/press/2002/19a/20200219_typhoonname.html
- 4) 能島暢呂・加藤宏紀：令和元年(2019年)台風15号におけるライフライン復旧概況(時系列編), 2019年9月27日。
http://www1.gifu-u.ac.jp/~nojima/take_out_LLEQreport.htm
- 5) 経済産業省：令和元年台風第15号による被害・対応状況について(9月9~19日), 2019年9月。
https://www.meti.go.jp/press/archive_201909.html
- 6) 経済産業省総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会/産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 合同 電力レジリエンスワーキンググループ：台風15号の停電復旧対応等に係る検証結果取りまとめ, 2020年1月。
- 7) 経済産業省産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 令和元年台風15号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ：中間報告書, 2020年1月21日。
- 8) 経済産業省：台風15号に伴う停電復旧プロセス等に係る検証について, 第5回電力レジリエンスWG資料2019年10月3日。
- 9) 経済産業省：台風15号・19号に伴う停電復旧プロセス等に係る個別論点について, 第6回電力レジリエンスWG資料2019年10月17日。
- 10) 経済産業省産業保安グループ：近年の自然災害に伴う送配電設備の被害状況について, 第1回事故調査検討WG資料, 2019年11月5日。
- 11) 東京電力ホールディングス(株)：プレスリリース, 台風15号による東京電力パワーグリッド(株)サービスエリア内の設備被害および停電状況について(9/9-10), 同 停電の復旧計画について(9/9-10), 同 復旧見通しについて(9/11-12), 同 停電状況について(9/24-25), 同 停電の復旧状況について(9/27), 千葉県市町村ごとの地

域全体の停電復旧までに要する期間および今後の対応について（9/14, 17, 21），2019年9月．
<http://www.tepco.co.jp/press/release/2019/>

- 12) 東京電力ホールディングス(株)・東京電力パワーグリッド(株)：台風15号に伴う停電復旧対応の振り返り（中間整理），（検証骨子），第7,9回電力レジリエンスWG資料，2019年10月31日，12月5日．
- 13) 東京電力パワーグリッド(株)：停電復旧に向けた対応等について（報告），2019年10月11, 25日．
- 14) 東京電力ホールディングス(株)：台風15号対応検証委員会報告書（最終報告），2020年1月16日．
- 15) 東北電力(株)：台風19号に伴う停電復旧対応の振り返り，第8回電力レジリエンスWG資料，2019年11月19日．
- 16) 中部電力(株)：台風19号に伴う停電復旧対応の振り返り，第8回電力レジリエンスWG資料，2019年11月19日．

電力施設の被害と停電状況

Damage to Power Supply Facilities and Power Outages due to Typhoon No. 15 (2019)

永田 茂*¹, 鈴木 進吾*², 須藤 三十三*³, 丸山 喜久*⁴*Shigeru NAGATA, Shingo SUZUKI, Satomi SUDO, Yoshihisa MARUYAMA*

In Typhoon No. 15 that landed in the Kanto region in September 2019, strong winds and heavy rain caused damage such as breakage and collapse of two steel towers and 1996 power poles in the jurisdiction of TEPCO. The impact of the typhoon has led to a total of 935,000 blackouts in Chiba, Shizuoka, Yamanashi, Kanagawa, Ibaraki, Gunma, Tochigi, Tokyo and Saitama prefectures. The restoration of the power outage took about two weeks, except in some areas where restoration was difficult, affecting other lifelines such as telecommunications and water supply. In this report, the results of surveys on damage to power transmission and distribution facilities and power outages caused by Typhoon No.15 were compiled using public data from the Ministry of Economy, Trade and Industry, power pole damage data and power outage history data from TEPCO Power Grid Co., Ltd.

Keywords : *Typhoon No.15, power supply facility, physical damage, power outage*

1.2.1 はじめに

2019年9月に関東地方に上陸した台風15号では、強風と激しい雨によって東京電力管内で鉄塔2基の倒壊、1996本の電柱の傾斜、折損・倒壊被害が発生した。また、この台風の影響によって、千葉県を中心に、静岡県、山梨県、神奈川県、茨城県、群馬県、栃木県、東京都、埼玉県で最大停電戸数93.5万軒の停電が発生した。この停電の復旧には、一部復旧困難地域を除いて約2週間の期間を要したことから、通信、水道など他のライフラインにも影響を与えた。

広域かつ大規模停電によって地域生活や地域経済活動に甚大な影響が発生したことを受けて、東京電力ホールディングス(株) (以下、東京電力とする) では、今後の災害対応能力向上を目的として「台風15号対応検証委員会報告書(最終報告)(2020年1月16日)」¹⁾を取りまとめている。また、経済産業省 電力レジリエンスワーキンググループでは、事実関係の整理や今後の電力供給のレジリエンス強化を目的として「台風15号の停電復旧対応等に係

*1 (国研) 防災科学技術研究所 災害過程研究部門 主幹研究員・工博	Senior Research Fellow, Disaster Resilience Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr.Eng.
*2 (国研) 防災科学技術研究所 災害過程研究部門 副部門長・博士(情報学)	Deputy Manager, Disaster Resilience Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr. Informatics.
*3 (国研) 防災科学技術研究所 災害過程研究部門 主幹研究員・博士(情報学)	Senior Research Fellow, Disaster Resilience Research Division, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr. Informatics.
*4 千葉大学大学院融合理工学府 教授・博士(工学)	Prof., Department of Urban Environment Systems, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

る検証結果取りまとめ（2020年1月10日）」²⁾を公開している。さらに、経済産業省「令和元年度台風15号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループは、鉄塔や電柱の損壊事故原因の調査、現行基準の適切性と今後対策を目的として中間報告書、（2020年1月21日）」³⁾を公開している。

本報告では、東京電力と経済産業省の公開データ、東京電力パワーグリッド(株)(以下東京電力PGとする)から提供していただいた電柱被害データ、また同社が公開している停電履歴データを用いて、台風15号による送配電施設被害と停電状況を定量的に示すことを主眼として被害概要を取りまとめた。なお、電柱被害に関しては、気象庁による台風15号の観測記録、強風の再現シミュレーション結果、内閣府災害時情報集約支援チーム（ISUT: Information Support Team)が作成した倒木等の発生状況等⁴⁾との関係についても検討を行っているが、現時点で先行する報告書^{1)~3)}で示された内容を上書きするような検討結果は得られていない。また、停電の分析に使用した東京電力PGの停電履歴データ⁷⁾に関しては、上記の先行する報告書²⁾で述べられているように、停電情報システムが高圧線をモニタリングしているため、高圧線より下の低圧・引込線の損傷が原因となる停電はカウントされないなどの課題があることを明記しておく。

1.2.2 電力送配電施設の被害

送変電施設の被害は表 1.2.1 に示すように、主な被害は鉄塔 2 基の倒壊である¹⁾。鉄塔の倒壊は、図 1.2.1 に示すように富津火力発電所と新木更津変電所を結ぶ 66kv 系統木内線の No.78,79 の鉄塔 2 基であり、No. 80 鉄塔の一部部材が変形する被害が発生した。経済産業省の中間報告書³⁾によれば、被害状況と風況シミュレーションに基づく応答解析の結果から、No.78 鉄塔付近で地形効果によって局地的に風速が増速されたことによって鉄塔基部の部材が降伏したことが原因とされている。

表 1.2.1 送変電施設の被害集計¹⁾

送電設備			変電設備	
鉄塔		電線	がいし	がいし
倒壊	腕金・部材変形	素線切れ	破損	破断
2 基	2 基	2 条	1 連	1 相

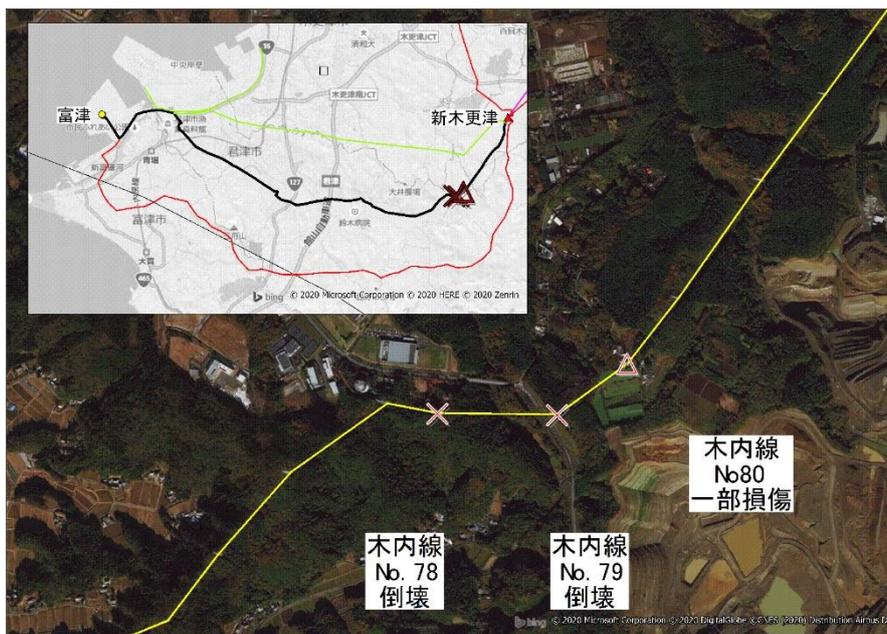


図 1.2.1 木内線（66kv 系統）の鉄塔倒壊（No.78,79）、一部損傷（No.80）の発生位置¹⁾

配電施設の被害としては、表 1.2.2 に示すように電柱 1,996 本が傾斜、折損・倒壊するとともに、電線が 5,529 径間で断線・混線等が発生した¹⁾。配電施設で被害が顕著であった電柱に関して市町ごとの総本数分布、被害本数分布、被害形態別の被害割合、被害率(被害本数/総本数)分布を図 1.2.2 に示した。千葉県内の市町ごとの総本数は、千葉市が最大で 9.2 万本、その他の市町は概ね数万本～数千本となっている。電柱の被害本数が最も多かったのは市原市の 184 本であり、台風通過経路に近接した君津市、袖ヶ浦市、南房総市、木更津市、富津市で 100 本以上の被害が発生した。100 本以上の電柱被害が発生した市町のうち折損・倒壊本数の割合が 60%以上と高くなったのは、君津市 71%、南房総市 66%であった。また、市町ごとの被害率(被害本数/総本数)は、いずれの市町も 1%以下であり、被害率の高かったのは袖ヶ浦市で 0.75%、香取郡多古町 0.69%、君津市 0.58%などであり、被害本数が最大の市原市は 0.3%であった。

表 1.2.2 配電施設の被害集計表¹⁾

架空線			地中線		
電柱 (折損・倒壊等)	電線 (断線・混線等)	変圧器 (損傷・傾斜等)	地上機器 (浸水等)	地上機器 (損傷・傾斜等)	ケーブル (損傷等)
1,996 本	5,529 径間	431 台	0 台	1 台	0m

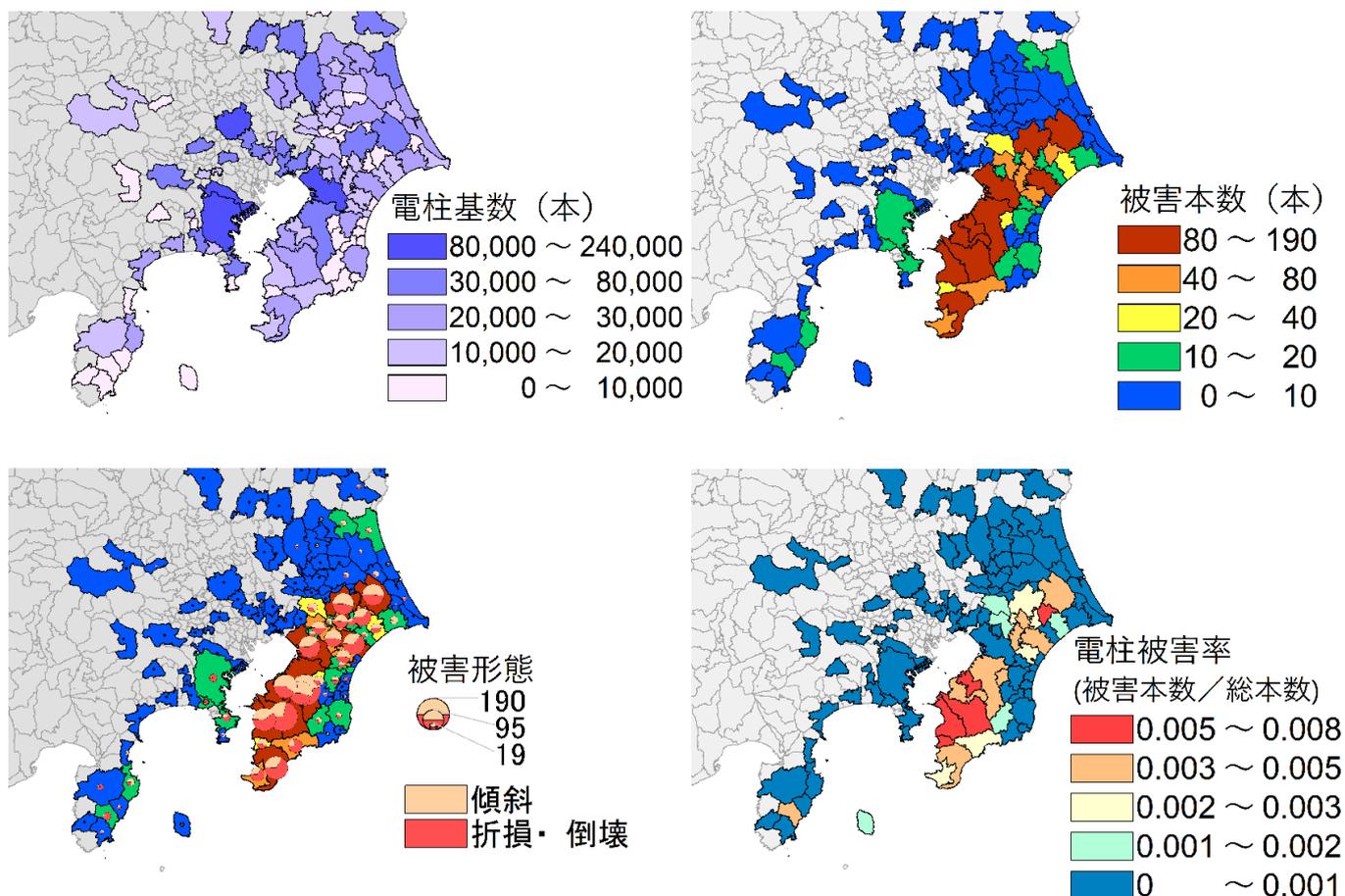


図 1.2.2 市町ごとの電柱の総本数、被害本数、被害形態別割合、被害率

図 1.2.3 には、図 1.2.2 に示した市町ごとの電柱被害率と気象庁観測点における最大瞬間風速の状況を示した。この図からも分かるように台風 15 号による電柱被害は風速だけでは説明できないため、図 1.2.4 に示すように倒木や建物倒壊の影響、飛来物、地盤の影響などの被害発生要因を考慮した分析を行う必要がある。内閣府災害時情報集約支援チーム (ISUT : Information Support Team) では、復旧活動支援を目的として、電力・通信施設の復旧障害となる倒木や土砂崩れ等の地図を作成しているが⁴⁾、この倒木・土砂崩れ地図と電柱被害率の重ね合わせを行ったところ電柱被害率と倒木や土砂崩れと非常に高い相関が見られたことから、風況データに加えて倒木や土砂崩れ等の要因を加味した検討の必要性を確認している。

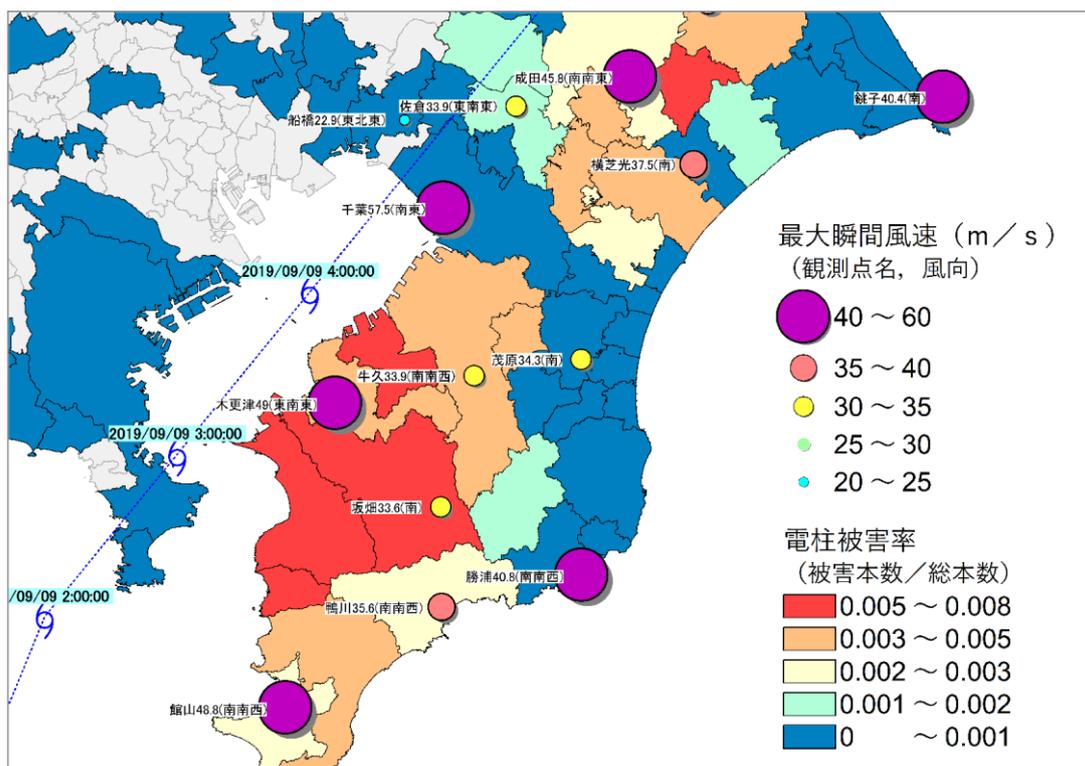


図 1.2.3 市町ごとの電柱被害率と気象庁の最大瞬間風速 (m/s)

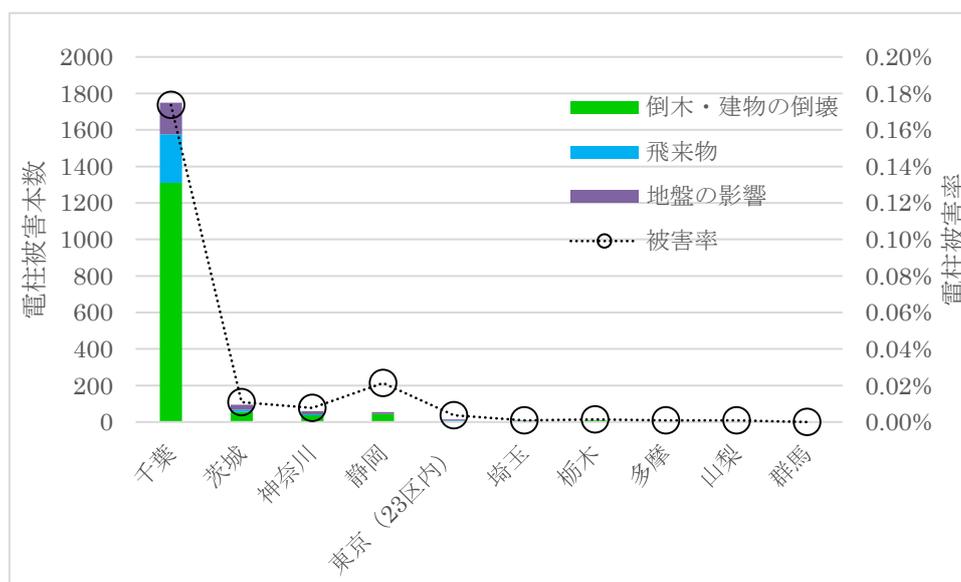


図 1.2.4 都県・地域別及び被害要因別の電柱被害本数と電柱被害率^{1), 3)}

1.2.3 停電の発生状況

東京電力の報告書¹⁾によれば、9月9日8時に東京電力管内で最大停電軒数93.5万軒を記録し、9月24日19時の時点で復旧困難箇所および引込線損傷箇所を除き停電復旧と報告されている。図1.2.5には、経済産業省のニューズリリース²⁾と内閣府の災害情報³⁾の数値データをもとに停電戸数（公開情報の通り「戸」を使用、9月8日22時時点の停電戸数を概ね0として作図）の変遷を図示した。この図に示すように、台風通過から3日後の9月12日には東京電力管内の停電戸数と千葉県県の停電戸数がほぼ一致していることから、千葉県以外では一部の復旧困難地域を除いて停電が解消したことが分かる。

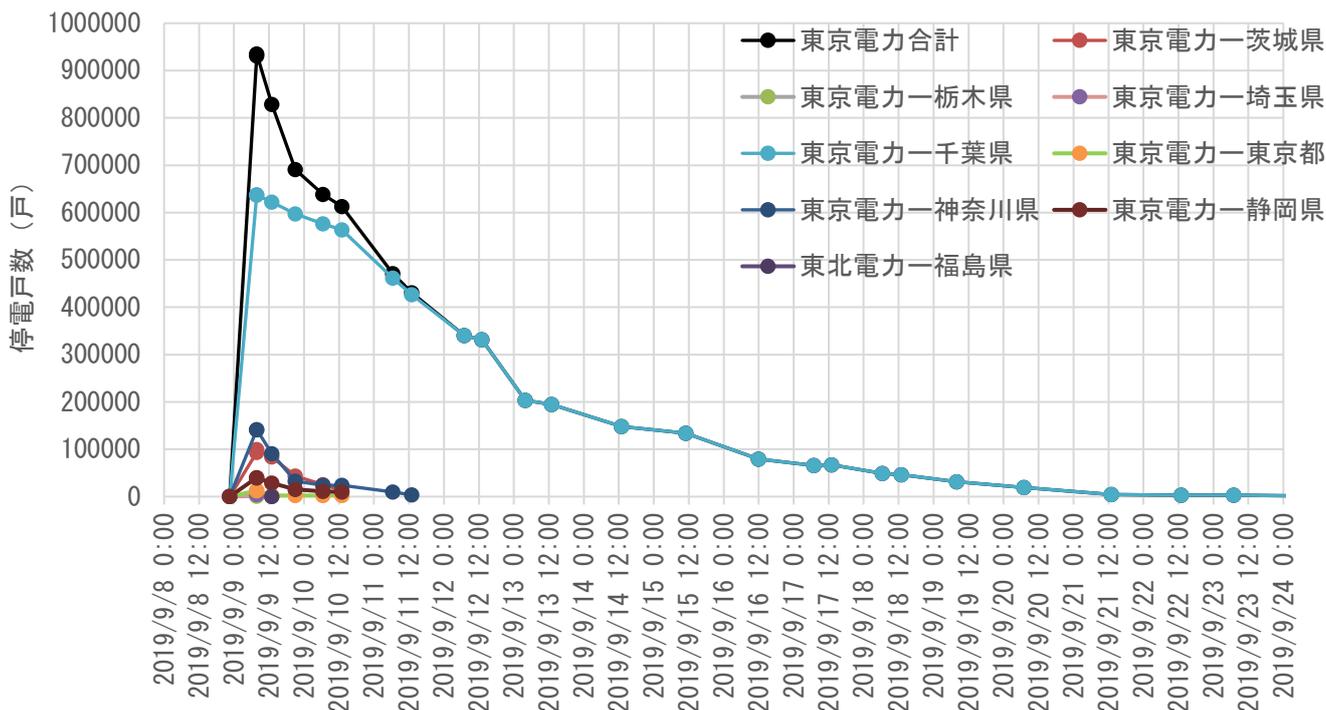


図 1.2.5 台風 15 号による東京電力管内の停電戸数の推移

以下には、東京電力PGが公開している停電履歴データ⁴⁾をもとに停電時間、停電影響の面的分布を可視化した。公開データには、停電の発生及び復旧日時、住所（都県名・市区町村名・地区、最小分解能は概ね町丁、字界）、停電軒数、停電理由が含まれており、住所を用いたジオコーディングによって求めた緯度・経度を代表地点として停電状況を可視化した、なお、可視化に際しては、2019年12月3日時点の停電履歴データを用いており、停電理由が「台風の影響」、「風雨の影響」、「弊社設備への樹木等の接触」、「弊社設備への飛来物の接触」、及び停電時間が「5分以上の停電」を対象とした。

図1.2.6には、地区ごとの最大停電時間（日）の分布を示した。房総半島の西側を中心に、7日以上が多数分布しており、市原市、八街市、袖ヶ浦市、君津市、富津市、鋸南町、南房総市、館山市、長生郡長柄町などで2週間以上停電が継続した地区が多数見られた。これらの地区は、電柱被害率が相対的に高い市町に含まれていることが分かる。図1.2.7には、2019年9月9日0時0分から9日23:59分までに停電が発生した全地区（赤色）と9月10日23:59分、9月16日23:59分、9月24日23:59分までに停電が解消した地区（緑色）を示している。同じ地区で停電が複数回発生したことが確認されているが、9月9日中に発生した初期の停電は、1日後でもあまり復旧が進まず、1週間後でも内陸部の一部地区で復旧していないことが分かる。なお、前述したように、東京電力のシステ

ムでは、高圧線の通電状況はモニタリングできるが、低圧線や引込線の異常に関しては認識できない課題が指摘されており、筆者らが停電履歴データに基づいて行った現地調査でも停電発生の有無や停電時間が食い違う地区が確認されていることを明記しておく。

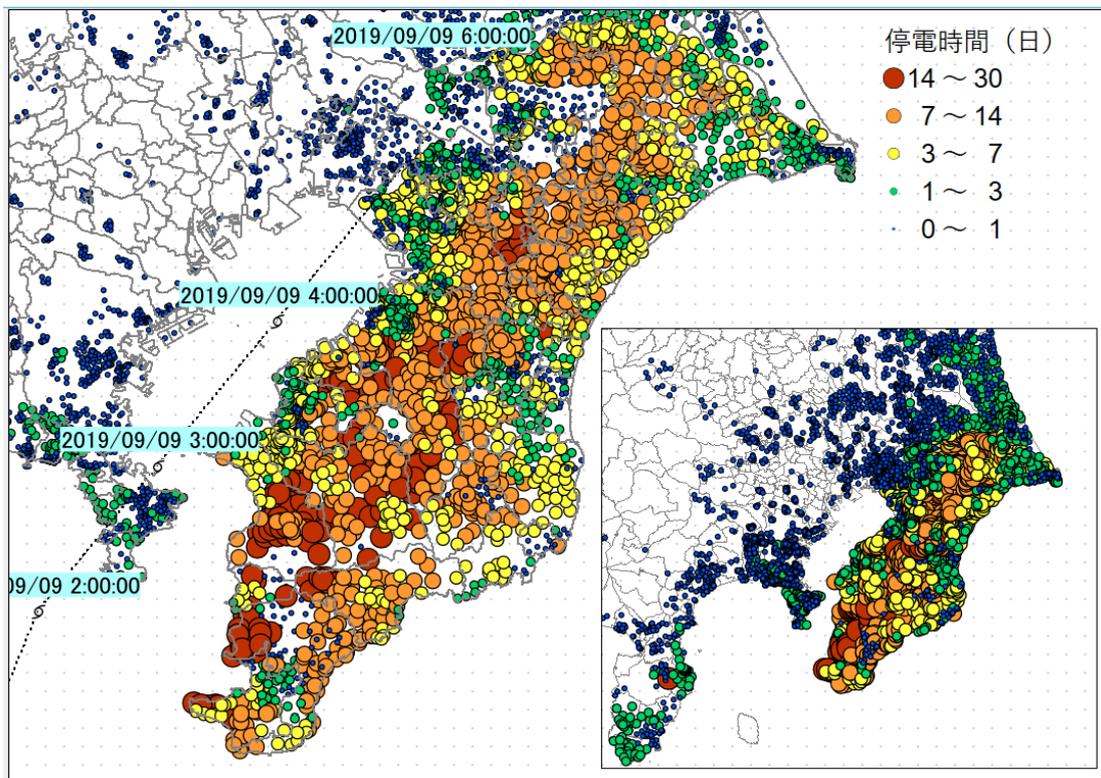


図 1.2.6 台風 15 号による東京電力管内の地区別の最大停電時間（日）の分布

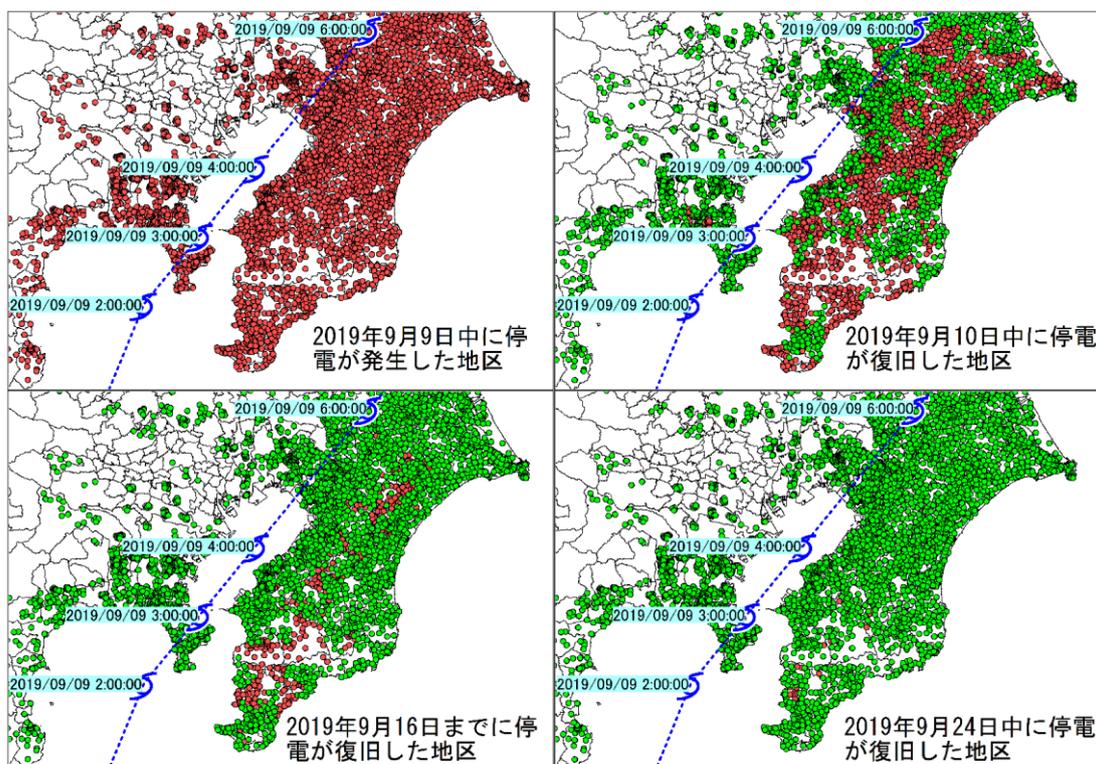


図 1.2.7 台風 15 号による東京電力管内の停電発生地区と停電解消時期の分布

図 1.2.8 には、地区ごとの停電軒数（軒）と最大停電時間（日）の積を停電影響指標として考え、停電影響の大きさを可視化した。千葉市内は相対的に停電軒数は多かったが停電時間は短時間であったため、千葉県全体で見ただけの場合の影響指標は相対的に小さい地区が多く、房総半島の内陸部や山間部では停電軒数は少ないが停電時間が長期化したために相対的に影響が大きな地区が点在する結果となった。

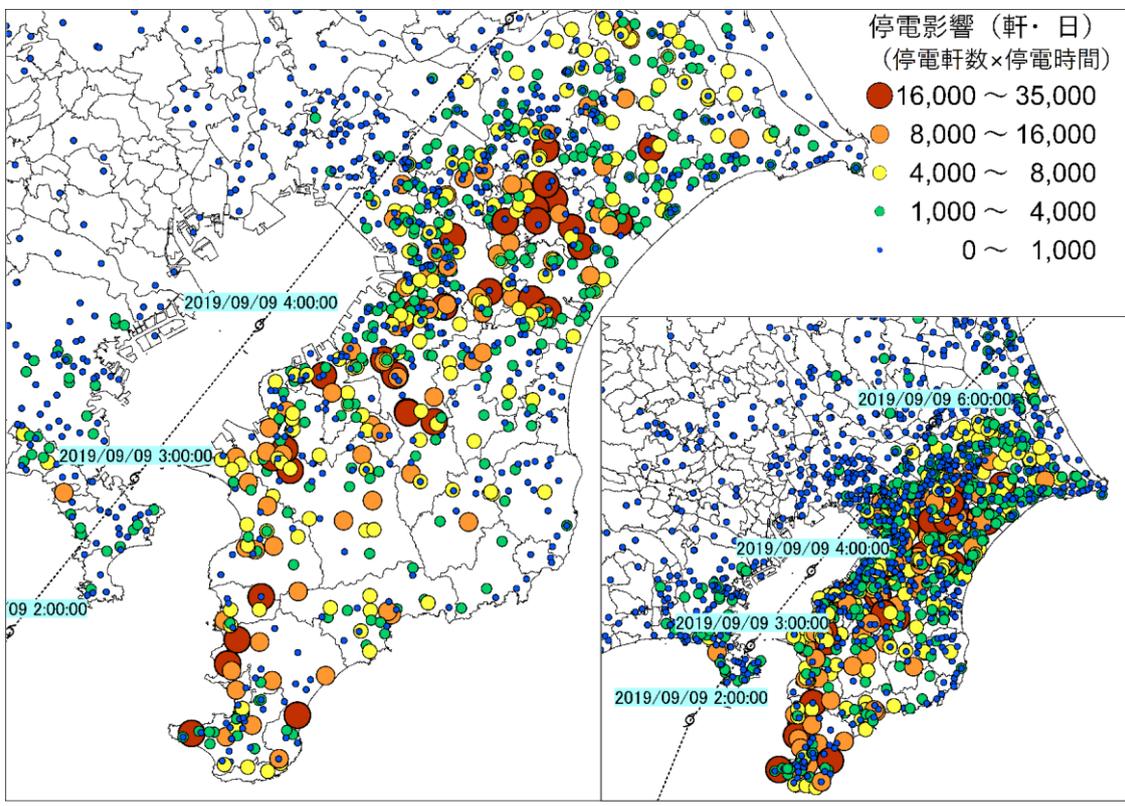


図 1.2.8 台風 15 号による東京電力管内の地区別の停電影響（停電軒数（軒）×停電時間（日））の分布

1.2.4 復旧対応について

復旧対応体制に関しては、東京電力の復旧対応人数が約 16,000 名、他電力からの応援人数が約 4,000 名、特に初動対応は約 6,010 名、巡視 200 班との情報が公開されているが¹⁾、経時的な詳細な復旧対応体制に関しては今後の調査によるところが大きい。

一方、停電が顕著であった東京電力の千葉エリアにおける電源車の配置数、稼働数、稼働率のデータが公開されており、図示すると図 1.2.9 のようになる。また、千葉エリアの停電状況と電源車の稼働率を重ね合わせると、図 1.2.10 のようになる。全般的に稼働率が低いように見えるが、発災当初は「電源車の把握に対する指揮運用体制の未整備、電源車接続に必要な工事体制の構築が十分ではなく、電源車の配置に時間を要したこと」が課題として挙げられており、稼働率が 40%を超えた 16 日以降は「要請を受けたが系統復旧等により、配備不要となったものも多数あったためであり、電源車の出向依頼に対してはほぼ対応ができた」ことが明らかになっている^{1) 2)}。

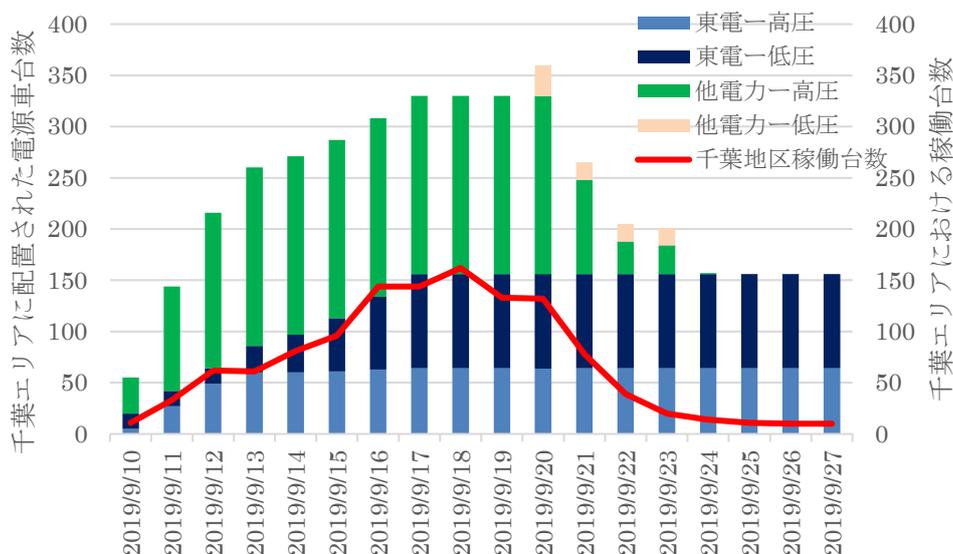


図 1.2.9 台風 15 号において東京電力千葉エリアに配置された電源車台数と稼働台数



図 1.2.10 台風 15 号における東京電力千葉エリアの停電状況と電源車の稼働率

1.2.5 まとめと今後の対応

本報告では、公開情報に基づいて台風 15 号による東京電力管内の送変電施設、配電施設の被害概要を整理するとともに、被害が顕著であった電柱に関しては東京電力 P G の市町別の被害データをもとに被害発生状況を整理した。また、東京電力 P G が公表している停電履歴データを用いて、停電発生及び復旧状況を整理した。今後は、詳細な風況データ、倒木データなど今回整理した施設被害データの関係を分析することにより、施設の被害予測モデルを構築する予定である。また、風況データ、倒木データ、施設被害データと停電データを分析することによって、停電発生や停電時間の予測モデルに関する検討も行い、今後の台風災害の対策検討に活用することを考えている。

謝辞

東京電力パワーグリッド(株) 千葉総支社様には市町単位の電柱本数、被害形態別の被害本数データを提供いただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 東京電力ホールディングス株式会社：台風 15 号対応検証委員会報告書（最終報告），2020 年 1 月 16 日。
- 2) 経済産業省：総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会／産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 合同 電力レジリエンスワーキンググループ 台風 15 号の停電復旧対応等に係る検証結果取りまとめ，2020 年 1 月 10 日。
- 3) 経済産業省：令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ＜中間報告書＞，2020 年 1 月 21 日。
- 4) 内閣府：国と地方・民間の「災害情報ハブ」推進チーム，第 8 回（令和 2 年 2 月 12 日）資料 1 ISUT(Information Support Team)の活動報告，<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/saigaijyouhouhub/dai8kai/pdf/shiryo1.pdf>，（2020 年 3 月 20 日最終閲覧）。
- 5) 経済産業省：ニュースリリースアーカイブ，https://www.meti.go.jp/press/archive_201909.html，（2020 年 3 月 20 日最終閲覧）。
- 6) 内閣府：防災情報のページ，災害情報，令和元年台風第 15 号に係る被害状況等について，<http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon15/index.html>，（2020 年 3 月 20 日最終閲覧）。
- 7) 東京電力パワーグリッド株式会社：停電情報，停電履歴情報，<http://teideninfo.tepco.co.jp/day/teiden/>，（2019 年 12 月 3 日最終閲覧）。

千葉県内の上水道施設への停電の影響

Functional Damage to Water Supply Systems in Chiba Prefecture due to Power Outage

丸山 喜久*¹

Yoshihisa MARUYAMA

A powerful typhoon Faxai, the 15th typhoon in 2019, made landfall in Tokyo's neighboring Chiba Prefecture around 5:00 a.m. on September 9. It caused severe structural damage especially in the southwestern part of Chiba Prefecture. It also triggered extensive and continued power outage in Chiba Prefecture. This study investigated the functional damage to water supply systems in Chiba Prefecture because of the power outage. In Japan, it is anticipated that extensive power outages may occur after the Tokyo Inland and the Nankai Trough earthquakes in the near future. This study will be helpful to establish a resilient water supply system against future earthquakes.

Keywords : Typhoon No. 15 in 2019, water supply system, power outage, Chiba Prefecture

1.3.1 はじめに

令和元年台風 15 号（令和元年房総半島台風）は、非常に強い勢力のまま関東地方に接近し、9 月 9 日午前 3 時ごろに三浦半島を通過、9 日午前 5 時前に千葉市付近に上陸した¹⁾。上陸時の勢力は中心気圧 960 hPa、最大風速 40 m/s と推定されており、関東地方に上陸した台風の中では最強クラスであった²⁾。

この台風の影響で、千葉県では大規模な停電が発生した。千葉県防災危機管理部の集計³⁾では、9 月 9 日 10 時 30 分時点で最大約 64 万軒で停電した。停電の影響は様々に波及し、千葉県の上水道システムも機能支障に陥り、県内の 15 事業体 22 市町で断水が発生した。本研究では、停電による上水道システムの影響について調査し、その結果を報告する。

1.3.2 千葉県の水道事業の概要

専用水道を除く水道事業は表 1.3.1 のように区分される。千葉県の水道用水供給事業は、九十九里地域水道企業団、北千葉広域水道企業団、東総広域水道企業団、印旛郡市広域市町村圏事務組合、南房総広域水道企業団、かずさ水道広域連合企業団の 6 事業体で行われている（図 1.3.1）⁴⁾。県営水道は、現在末端給水事業を行っており、水道用水供給事業は行っていない。県営水道は、北千葉広域水道企業団とかずさ水道広域連合企業団から用水供給を受けており、給水区域の一部に供給されている。県営水道による給水人口は、県内の給水人口（5,962,748 人）の約

*¹ 千葉大学大学院工学研究院 教授・博（工） Prof., Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr.Eng.

表 1.3.1 水道の区分

区分		定義	経営・管理主体
水道事業	上水道事業	一般の需要に応じて水を供給する事業で給水人口 5,001 人以上のもの	原則として市町村
	簡易水道事業	一般の需要に応じて水を供給する事業で給水人口 101 人以上 5,000 人以下のもの	
水道用水供給事業		水道事業者に対して水道用水を供給する事業	原則として地方公共団体（都道府県，一部事務組合等）

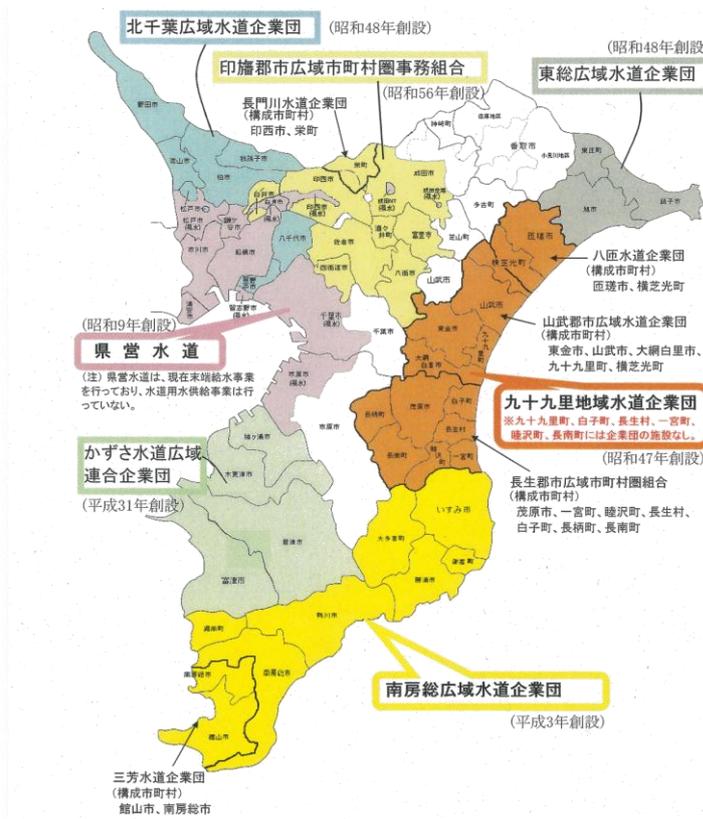


図 1.3.1 千葉県内の水道用水供給事業給水対象区域図

半分 (50.8%) の 3,027,417 人を占める (平成 29 年度時点)。

千葉県内の水道施設について述べると、平成 29 年度時点の基幹管路 (導水管, 送水管, 配水本管) の耐震適合性のある管の割合は 55.6% (総延長 2,307.2 km のうち 1,283.8 km) である。耐震対策が施されている浄水施設能力は約 1,057 千 m³/日であり、浄水施設能力約 2,722 千 m³/日のうち 38.8% を占める。耐震対策が施されているポンプ場施設能力は約 7,436 千 m³/日であり、ポンプ場施設能力約 16,567 千 m³/日のうち 44.9% である。配水池容量は 53.1% で耐震対策済みである (全容量約 1,859 千 m³ のうち約 986 千 m³)。非常用自家発電設備は自然流下方式を除いた給水に電力が必要な 910 施設のうち、349 施設 (約 38%) に設置が済んでいる (表 1.3.2)。

1.3.3 台風 15 号による被害の概要

台風 15 号の影響で千葉県内では 15 事業者 22 市町で断水が発生した。県内の断水戸数は 133,474 戸に達した。主

表 1.3.2 千葉県内の水道施設の非常用自家発電設備の設置状況（2019年9月時点）

水道施設	給水に電力が必要な施設数	自家発電設備の設置数
取水・導水施設	375	100
浄水施設	139	104
配水施設	177	127
加圧ポンプ所	219	18

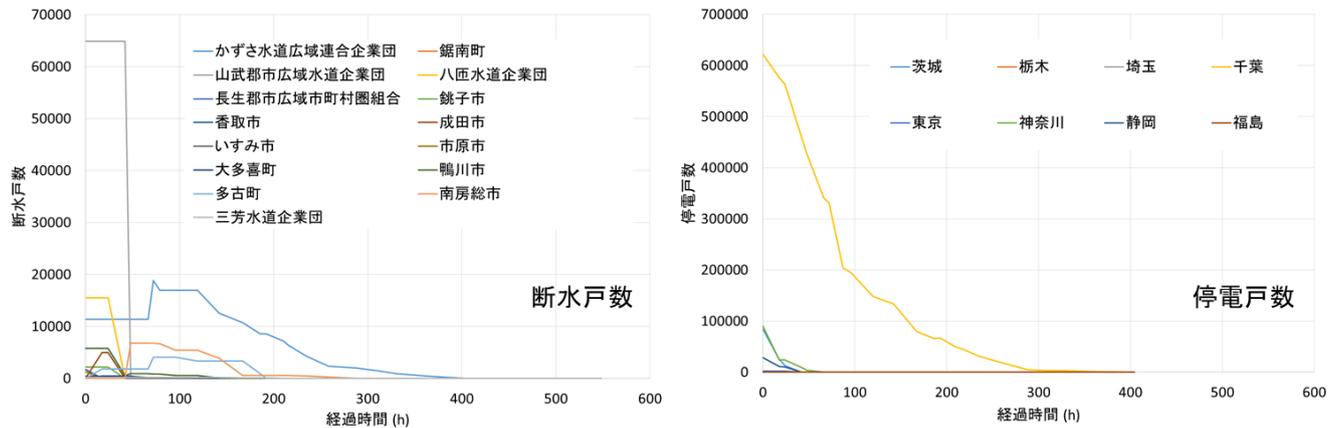


図 1.3.2 千葉県内の断水戸数と停電戸数の推移（経過時間の起点：2019年9月9日13:00）

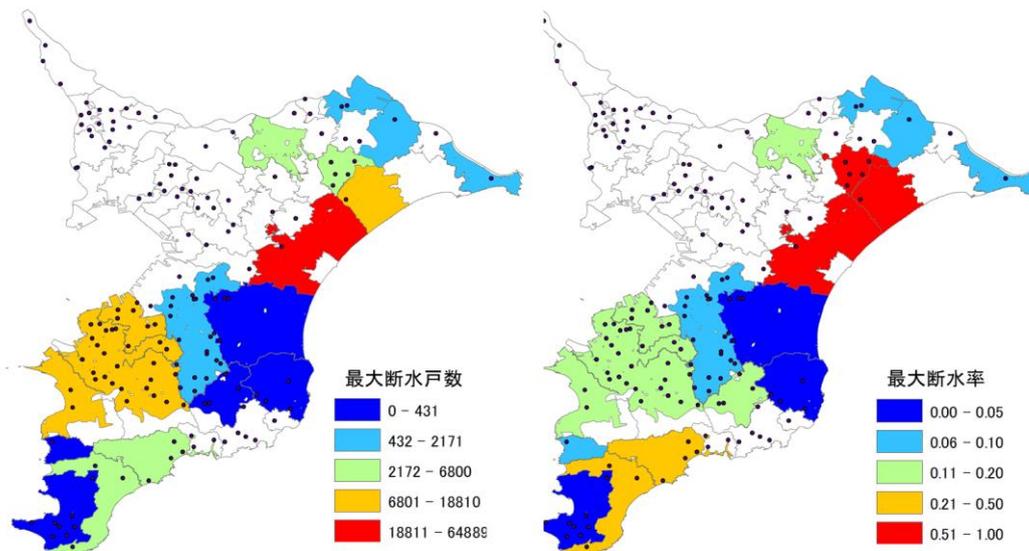


図 1.3.3 千葉県内の最大断水戸数と最大断水率

な内訳は、山武郡市広域水道企業団で約 65,000 戸、かずさ水道広域連合企業団で約 19,000 戸、八匠水道企業団で約 16,000 戸などである。断水期間は 9 月 9 日から最長で 9 月 25 日までの 17 日間となった。

図 1.3.2 に、内閣府のとりまとめた被害状況⁵⁾に基づき作成した千葉県内の断水戸数と各都県の停電戸数を示す。2019 年 9 月 9 日 13:00 時点では千葉県内の停電戸数は約 62 万戸に達したが、停電は解消され 9 月 22 日 13:00 時点では約 3,100 戸に減少した。停電戸数の減少に伴い断水戸数も減少し、9 月 22 日 12:00 時点ではかずさ広域水道企業団で 1,500 戸、鋸南町で 2 戸となった。

図 1.3.3 に千葉県内の水道事業者ごとの最大断水戸数と最大断水率を示す。水道事業者ごとの給水戸数は、ホーム

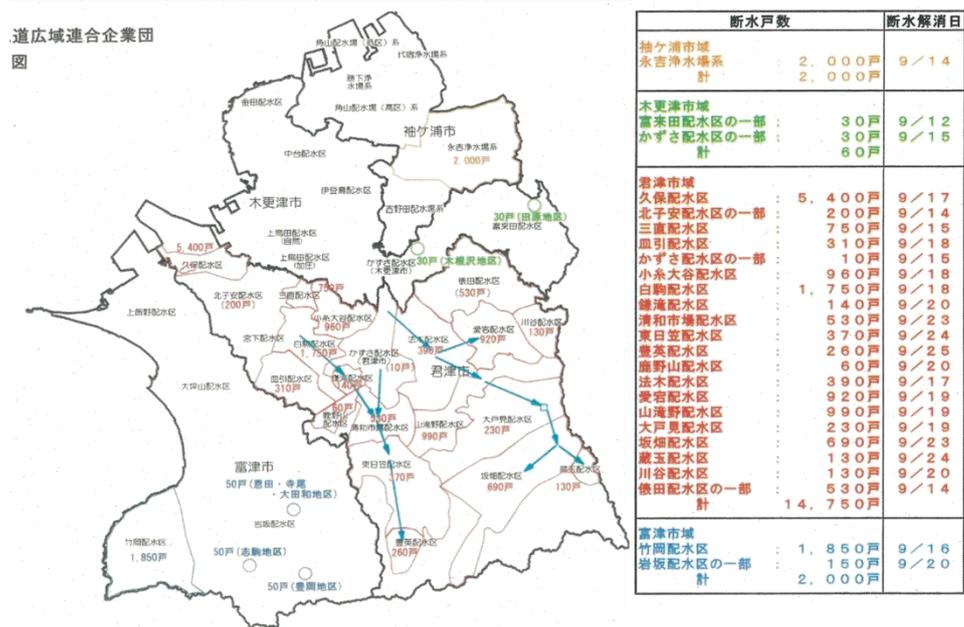


図 1.3.4 かずさ水道広域連合企業団における配水区域図と断水状況

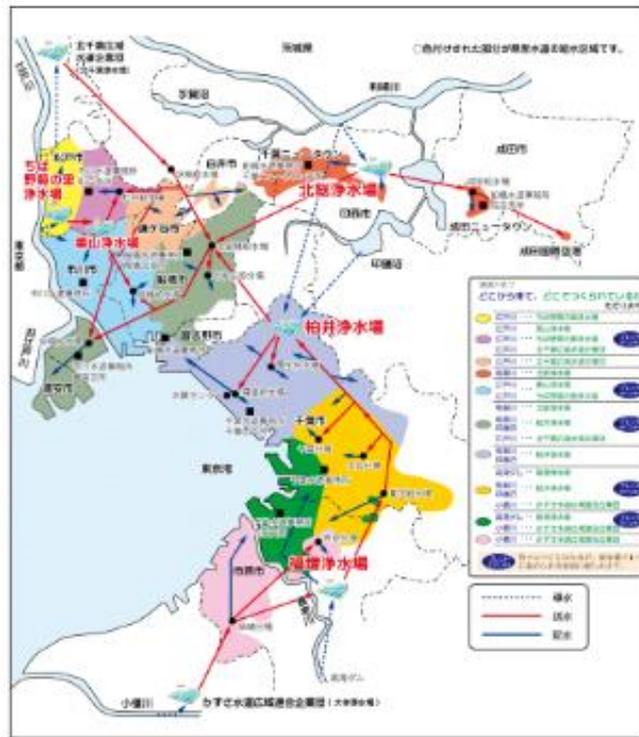


図 1.3.5 千葉県営水道の給水区域

ページなどを参照して定めた。山武郡市広域水道企業団では、給水区域内のほぼ全戸数である約 65,000 戸が 9 月 9 日から 11 日にかけて断水した。この地域の用水供給事業を担う九十九里地域水道企業団で、一部の浄水場が停電の影響で機能停止に陥ったため、給水区域内の全域で断水となった。また、八匠水道企業団でも給水区域内のほぼ全戸数である 15,500 戸が 9 月 9 日から 10 日にかけて断水した。この断水も九十九里地域水道企業団の用水供給が停止したためである。

木更津市、君津市、富津市、袖ヶ浦市を給水区域とするかずさ水道広域連合企業団では、9 月 9 日から 25 日まで

表 1.3.3 給水車の派遣状況

(a) 千葉県水道事業体

事業体名	応援先	給水車 派遣台数	派遣期間	事業体名	応援先	給水車 派遣台数	派遣期間
県企業局	山武郡市広域 水道企業団	6	9/9~9/11	習志野市	多古町	5	9/11~9/15
	多古町	2	9/10		かずさ水道広域 連合企業団	2	9/17~9/18
	南房総市	20	9/11~9/19		小 計	7	9/11~9/18
	千葉市	7	9/12~9/17	我孫子市	多古町	5	9/11~9/15
	かずさ水道広域 連合企業団	21	9/13~9/24		八匳水道企業団	2	9/9~9/10
	小 計	56	9/9~9/24		小 計	7	9/9~9/15
野田市	山武郡市広域 水道企業団	2	9/9~9/10	柏市	多古町	6	9/11~9/15
	かずさ水道広域連 合企業団	15	9/13~9/20		鴨川市	2	9/15~9/16
	小 計	17	9/9~9/20		小 計	8	9/11~9/16
八千代市	山武郡市広域 水道企業団	3	9/9~9/11	松戸市	多古町	5	9/11~9/15
	多古町	12	9/11~9/16	四街道市	かずさ水道広域 連合企業団	4	9/13~9/16
	小 計	15	9/9~9/16	旭市	八匳水道企業団	2	9/9~9/10
流山市	多古町	8	9/10~9/13	合 計		129	9/9~9/24

(b) 県外水道事業体

都道府県	応援先	給水車 派遣台数	派遣期間	都道府県	応援先	給水車 派遣台数	派遣期間
東京都	山武郡市広域水道企業団	4	9/9~9/10	水戸市	山武郡市広域水道企業団	2	9/9~9/10
	かずさ水道広域連合企業団	9	9/14~9/16	ひたちなか市	山武郡市広域水道企業団	1	9/10
	小 計	13	9/9~9/16	東海村	山武郡市広域水道企業団	1	9/10
横浜市	かずさ水道広域連合企業団	23	9/11~9/19	坂東市	山武郡市広域水道企業団	1	9/11
川崎市	かずさ水道広域連合企業団	8	9/11~9/14	茨城県南 水道企業団	山武郡市広域水道企業団	1	9/11
日立市	山武郡市広域水道企業団	2	9/9~9/10	土浦市	山武郡市広域水道企業団	1	9/11
	南房総市	4	9/13~9/16	古河市	山武郡市広域水道企業団	1	9/11
	小 計	6	9/9~9/16	日立太田市	南房総市	1	9/16
高萩市	南房総市	3	9/13~9/15	合 計		62	

(c) 自衛隊および国土交通省

事業体名	自衛隊	国土交通省
市原市	16	0
かずさ水道広域連合企業団	6	15
八匳水道企業団	2	0
山武郡市広域水道企業団	12	0
長生郡市広域市町村圏組合	9	0
鴨川市	0	2
南房総市	0	2
合 計	45	19

※病院や社会福祉施設への給水を行ったものや、市町村の防災部局から県の危機管理課に要請したものを除く。

の17日間断水した。台風上陸後の9月9日から停電による断水が発生し、9月12日7:30時点で約11,000戸で断水が続いていた。その後、12日13:00時点で、停電による取水量不足によって配水池の水位が低下し、新たな断水が発生した。その結果、最大約19,000戸で断水した。かずさ水道広域連合企業団の給水区域での詳細な断水解消日は図1.3.4の通りである。特に君津市で断水の影響が大きく、最大で約15,000戸が断水し、最長で9月25日まで断水



図 1.3.6 電源車の配備状況

が継続した。断水が長期化した原因としては、停電が予想以上に長引いたことに加えて、非常用自家発電設備が設置されていない浄水場等の機能停止や、配水池等の送水ポンプや増圧ポンプ等の機能停止およびその電源確保に時間を要したことなどが挙げられる。

千葉県営水道の給水人口は約 300 万人で県内の全給水人口の約半分（50.8%）を占める⁴⁾。県営水道の給水区域⁶⁾を図 1.3.5 に示す。県営水道は県北西部など 11 市で水道事業を行っている。このうち市原市の福増浄水場は、二回線受電により電源の信頼性は高めていたが、台風 15 号による停電の影響を受けた。約 50 時間停電が続いたものの、非常用自家発電設備が稼働し、浄水機能が失われることはなかった。台風 15 号の際には、県営水道の給水区域で断水は生じなかったが、一部の高層建物では停電の影響で貯水槽以降のポンプ等が停止し、断水となることがあった。今後同様の事態が発生することも考えられるため、停電時に活用できる直結給水栓を住民に充分周知することなどの対策が必要である。

1.3.4 応急復旧活動の概要と今後の課題

2019 年 9 月 9 日から発生した断水を受けて、表 1.3.3 のように県内水道事業者（129 台）、県外水道事業者（62 台）、自衛隊（45 台）および国土交通省（19 台）から給水車が派遣された。千葉県企業局保有の給水車が最長で 9 月 24 日まで応急給水活動を行った。

千葉県では 14 台の電源車を確保し、かずさ水道広域連合企業団、山武郡市広域水道企業団、多古町へ配備した。それぞれ、浄水場等の電源、非常用自家発電設備のバックアップや発電機の代替として使用された（図 1.3.6）。しかし、医療施設、社会福祉施設と並行して要請があり、直ちに設置されないことがあった。そのため、電源車の設置に向けた調整中に復電した施設もあった。また、設置する施設と電源車の規格が合わない事態もあった。

台風 15 号の際の応急復旧活動における課題としては、以下の点が挙げられる。千葉県では一つの市町村で複数の水道事業者が水道事業を行っている場合があるため、応急給水活動を行う際の調整を充分に行うことが重要である。また、応援要請に関しても水道事業者と市町村の連携が不可欠であり、事前協議が必要である。今回の台風では、停電が長期化したため通信手段が途絶し、現地の被害状況の収集が困難であった。同様の事態に備えて、情報収集手段の多様化が重要である。さらに、非常用自家発電設備のための燃料確保が困難であった。停電時に対応できる給油所が少なく、特に重油を取り扱っている事業所が少なかった。燃料協定を締結するなど、事前対策が有効と考えられる。

謝辞

千葉県企業局，千葉県総合企画部水政課，かずさ水道広域連合企業団の関係者の方々には，ヒアリング調査に応じていただいた。記して，謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：令和元年 台風第15号に関する情報 第72号，2019.
- 2) ウェザーニュース：【速報】台風15号 千葉県付近に上陸 関東では過去最強クラス，<https://weathernews.jp/s/topics/201909/090055/>
- 3) 千葉県：千葉県防災ポータルサイト，http://www.bousai.pref.chiba.lg.jp/portal/PUB_VF_Detail_Docs
- 4) 千葉県総合企画部水政課：平成29年度 千葉県の水道，2019.
- 5) 内閣府：令和元年台風第15号に係る被害状況等について，<http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon15/index.html>
- 6) 千葉県営水道：県営水道の給水区域，<https://www.pref.chiba.lg.jp/suidou/souki/2nd-page/area.html>

通信設備の被害と停電による影響

Physical Damage to and Functional Impacts on Telecommunications Facilities from Typhoon No. 15

庄司 学*¹, 永田 茂*², 皆川 大雅*³*Gaku SHOJI, Shigeru NAGATA, Taiga MINAKAWA*

This study examined physical damage to and functional impacts on telecommunications facilities in Chiba Prefecture, Japan, that were exposed to Typhoon No. 15, which made landfall in September 2019. We aimed to assess damage to the facilities managed by Nippon Telegraph and Telephone East (NTT EAST) and to confirm the extent of affected telecommunication services supplied by those facilities as well as determine the functional disruption to telecommunication buildings by the related electric-power failures. We also set out to show quantitatively, in time series, the physical impact on telecommunication poles and cables due to the associated strong winds, the slope and road failures during the passage of the typhoon, and the number of failed lines between the telecommunication buildings and the supplied units, as reported by users. Regarding damage to mobile-phone communication facilities managed by SoftBank, we focused on the characteristics of disruption to mobile-phone communication across the served communication areas in Chiba Prefecture and analysed the data in time series. Finally, we gathered information on responses made and damage countermeasures introduced immediately after the event by both NTT EAST and SoftBank, particularly from an engineering perspective, and started discussions in preparation for anticipated communication-infrastructure damage by a future typhoon disaster.

Keywords : *Typhoon No. 15, physical damage, functional impact, telecommunications facility, mobile-phone communication facility, strong wind, slope and road failures, power failure*

1.4.1 はじめに

台風 15 号による通信設備のサービス影響と物理的被害の概要を示すとともに、それらに対する対応・対策と復旧状況について明らかにする。通信設備は、東日本電信電話株式会社（NTT 東日本）の固定電話伝送網とソフトバン

*1 筑波大学システム情報系 教授・博（工）	Prof., Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, Dr.Eng.
*2 防災科学技術研究所 主幹研究員・工博	Senior Chief Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr.Eng.
*3 筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生・学士（工学）	Grad. Student, Department of Engineering Mechanics and Energy, University of Tsukuba, B.Eng.

ク株式会社（SoftBank）の携帯電話通信設備を対象とした。以降の 1.4.2 から 1.4.4 では NTT 東日本の設備被害の特徴を、1.4.5 と 1.4.6 では SoftBank のそれらを論ずる。NTT 東日本の設備被害についてはウェブの公開情報¹⁾²⁾に示された数値や図表に依った。以降の本節に示す図は全て文献 2)に示された情報に基づき筆者らが作成したものである。SoftBank の設備被害についてはヒアリング調査（2019 年 11 月 12 日）と同様にウェブの公開情報³⁾により得られた情報である。なお、通信ケーブルや電柱等の設備被害には「罹災」や「罹障」、個別ユーザーである「お客様」の設備被害には「故障」という用語を用いているが、これらの用語の使い方は上記の文献での使い方に原則従っている。

1.4.2 固定電話関連（NTT 東日本）のサービス影響並びに非常用電力による通信ビル機能の維持

図 1.4.1 は、発災後からの固定電話関連の影響回線数の推移を示す。影響回線数はアナログ電話、ひかり電話（以上、電話系サービス）、及び、光アクセスサービスの罹障回線数を指しており、「お客様宅と通信ビル間の回線切断等による影響数」は含まれていない。従って、通信ビルによって供給し得るサービス容量の変化を表しており、以降で述べる停電（商用電源の枯渇）による通信ビルへの機能的な影響の度合いを示している。9 月 9 日 13 時から同 21 時までは罹障回線数はゼロであったものが、図 1.4.1 より、翌 9 月 10 日 7 時に電話系サービスに約 3.2 万回線、光アクセスサービスに約 2.2 万回線の影響が報告され、9 月 11 日 7 時において電話系サービスが約 10.2 万回線、光アクセスサービスが約 7 万回線のピークを迎えている。この結果、約 17.2 万回線を罹障回線数の最大値ととらえることができる。このようなサービスへの影響に対して全国から非常用電源を配備する等して順次、回復をはかり、9 月 12 日 7 時には電話系サービスが約 2.6 万回線、光アクセスサービスが約 3.2 万回線まで罹障回線数は低減している。9 月 13 日 14 時には、停電が発生し商用電源が復旧していないエリアにおいても、非常用電源の配備により、全ての通信ビル機能で復旧が完了している。

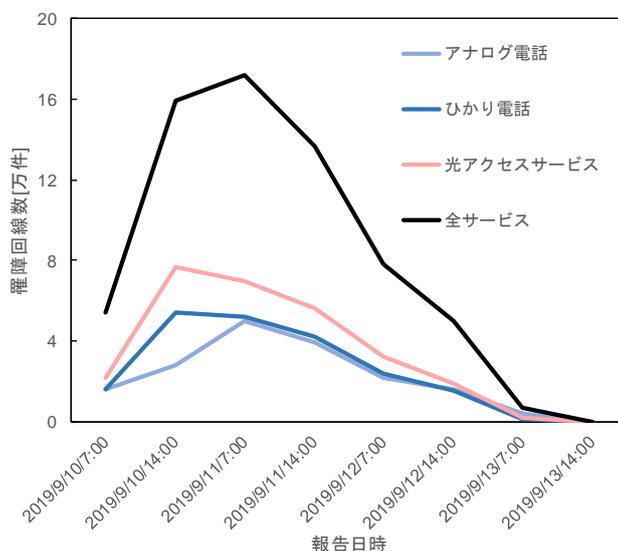


図 1.4.1 罹障回線数の時間的推移

通信ビルにおけるバッテリーや移動電源車等の予備電源の稼働状況（図中、黄色）と「予備電源の維持が困難となることによりサービス提供に影響が生じる可能性のあるビル」（赤色）、「予備電源の維持が困難となるおそれのあるビル」（ピンク色）、及び、「非常用電源の枯渇により、サービス提供に影響が生じているビル」（灰色）の空間分布を発災後からの時系列で示した結果が図 1.4.2 及び図 1.4.3 である。これらの図と文献 2)の第 17 報によれば、管内 211 の通信ビルに対して、9 月 9 日 21 時には停電の長期化に伴って予備電源により通信ビル機能を維持している

ビルが 125 ビル、内、移動電源車等による電源供給ビルが 10 ビルであったものが、上述の罹障回線数のピークを示した 9 月 11 日 7 時には予備電源により通信ビル機能を維持できていたビルは 43 ビルに激減し、内、35 ビルが移動電源車等による電源供給により機能維持をはかれたものの、結果的に最大 67 ビルにおいて電源枯渇によりサービス利用が不可となった。9 月 12 日 7 時には、予備電源の中でもバッテリーによる電源供給が枯渇してすべてを移動電源車等による電源供給にシフトし、それらによる電源供給は最大 45 ビルに達した。上記の 9 月 13 日 14 時には、商用電源の回復が進み、移動電源車等による 32 の電源供給ビルを残し、通信ビルが供給し得るサービス容量は全て回復している。移動電源車は最終的に全国から 75 台が緊急配備される結果となった。

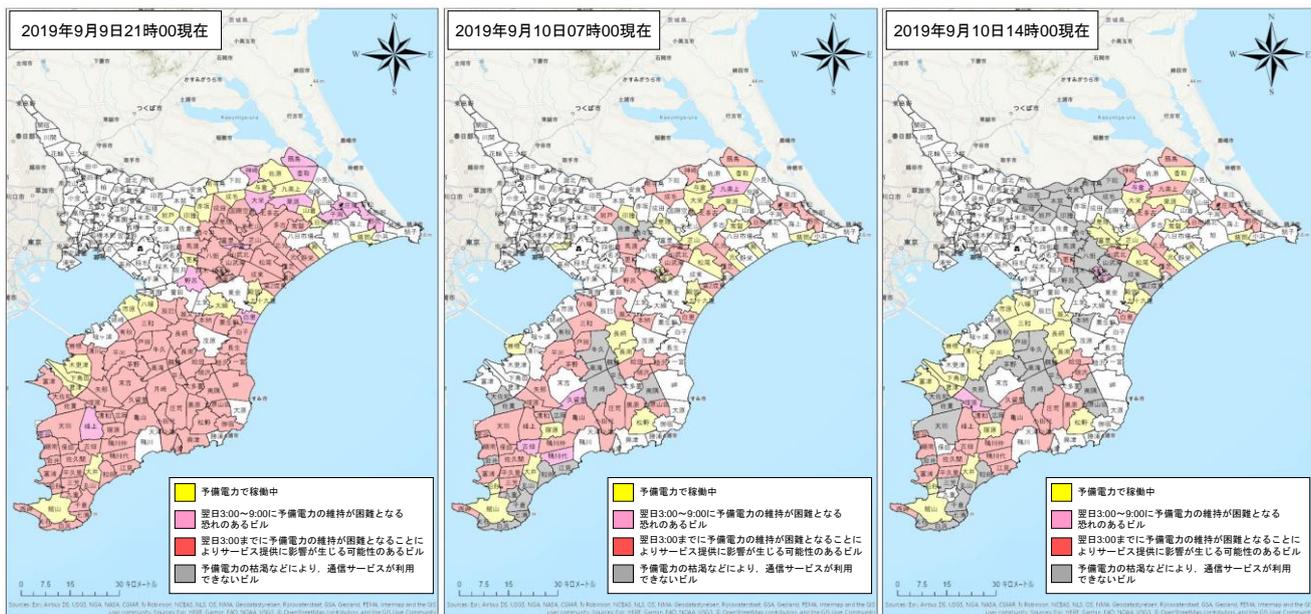


図 1.4.2 停電による通信ビル機能の時空間的な影響：9 月 9 日と 9 月 10 日

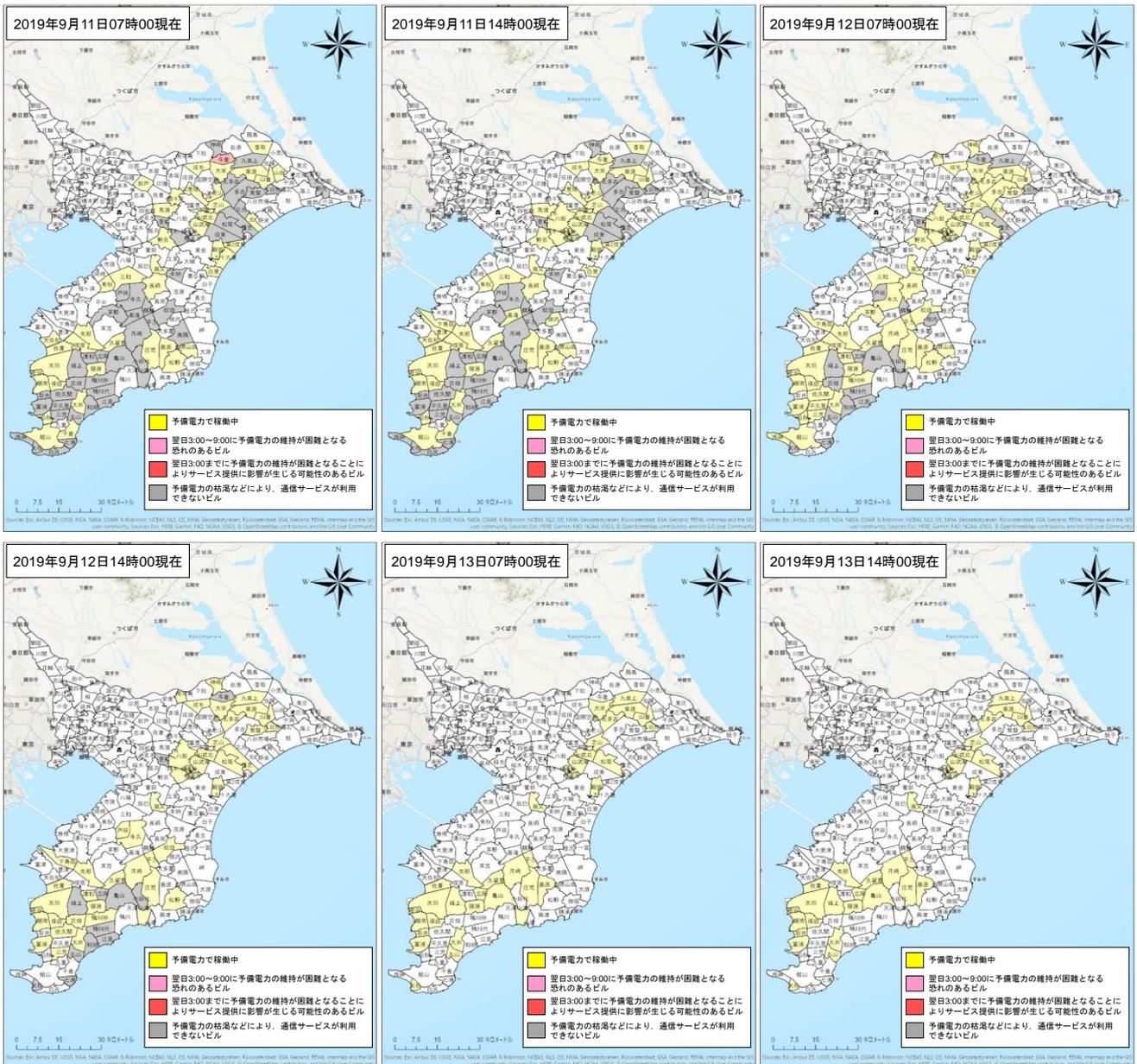


図 1.4.3 停電による通信ビル機能の時空間的な影響：9月11日から9月13日まで

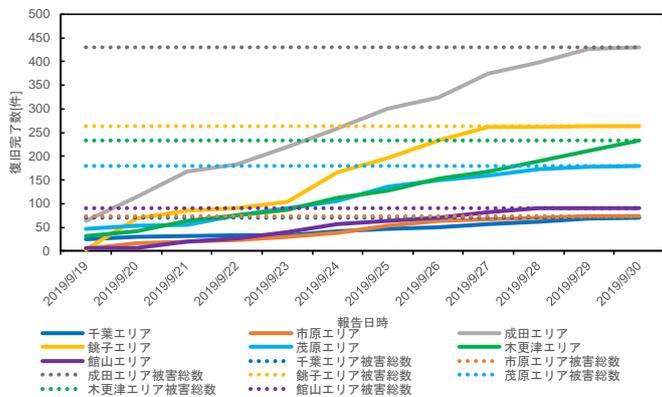


図 1.4.4 電柱並びにケーブル等の復旧完了数の時間的推移

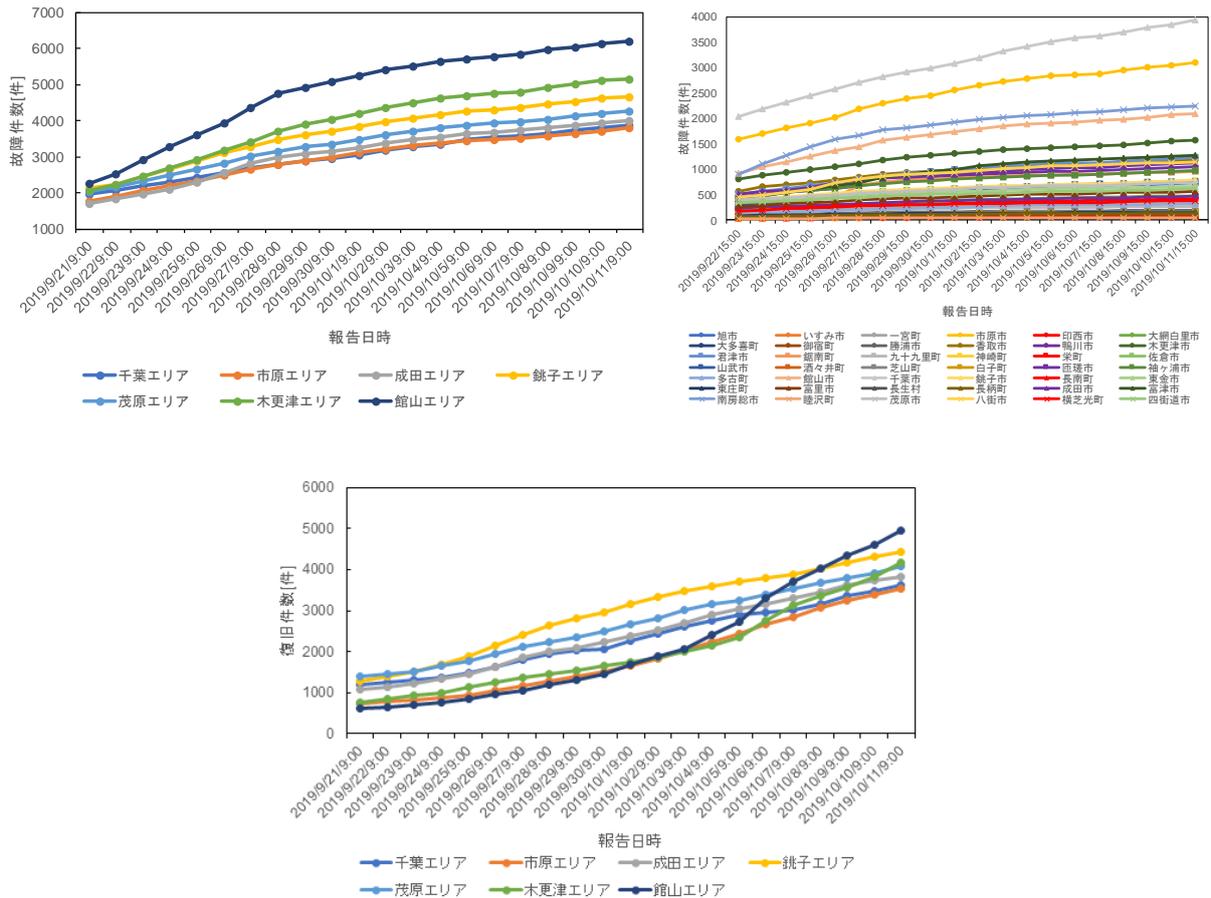


図 1.4.5 故障件数並びに復旧件数の累計値の時間的推移

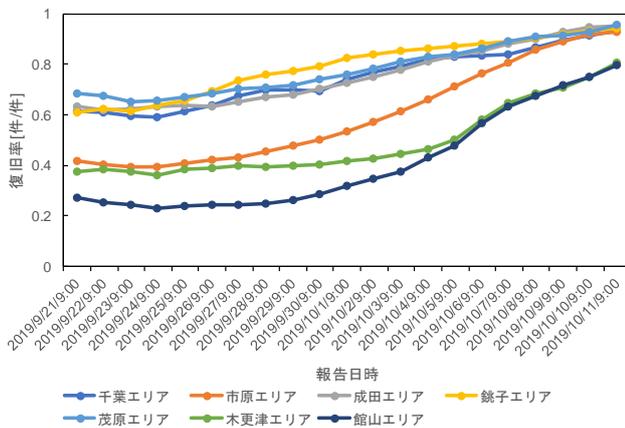


図 1.4.6 復旧率の時間的推移

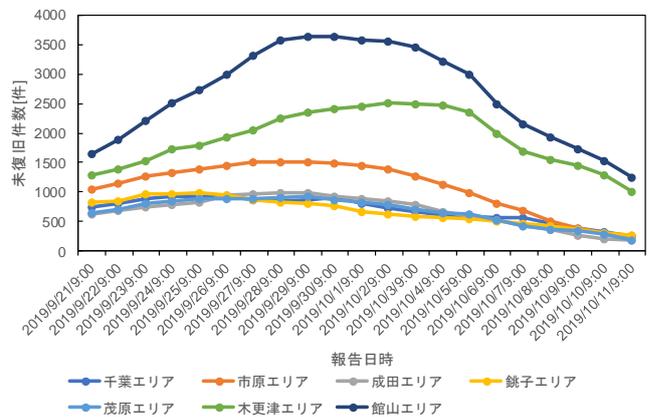


図 1.4.7 未復旧件数の時間的推移

1.4.3 電柱やケーブル等の罹災状況、及び、故障件数の推移

図 1.4.4 は、通信ビルから利用者間に位置する電柱並びにケーブル等の復旧完了数の時間的推移を保守エリア別に示した結果である。なお、斜面崩壊等により道路の通行支障が生じている「立ち入り禁止エリア」は除外されている。また、利用者の宅内の引き込み線等の故障により、サービス影響が生じる場合があるが、これらの件数は図 1.4.4 にはカウントされていない。図 1.4.4 によれば、9 月 18 日時点までに成田エリア：430 箇所、銚子エリア：264

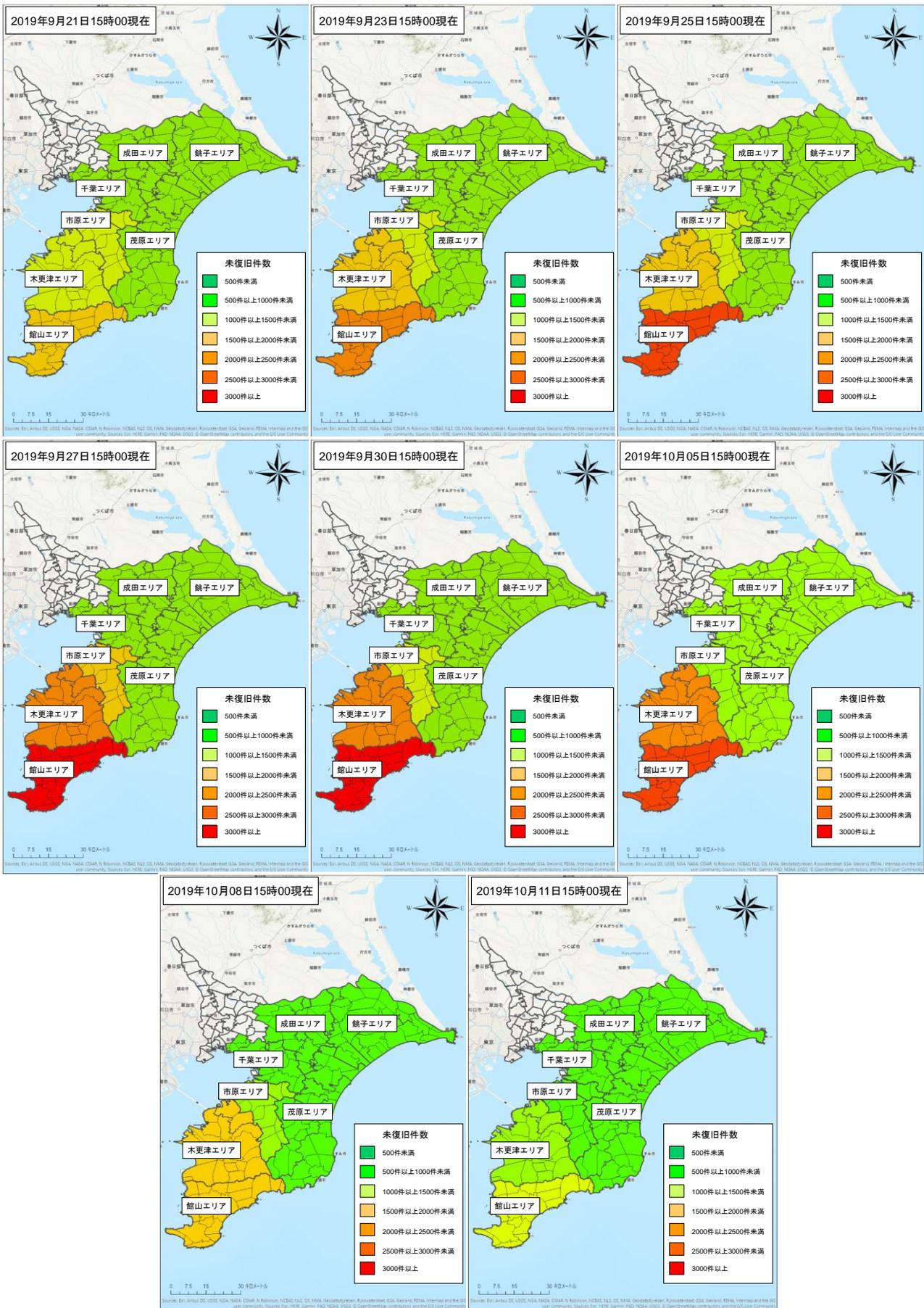


図 1.4.8 未復旧件数の時空間的な推移

箇所、千葉エリア：70箇所、市原エリア：73箇所、茂原エリア：180箇所、木更津エリア：233箇所、館山エリア：91箇所の合計1,341の罹災箇所数が確認され、9月27日時点では銚子エリア、市原エリア、茂原エリア、及び、館山エリアにおいて9割前後復旧し、9月28日時点で成田エリアがおよそ9割復旧している。9月30日には全てのエリアで復旧が完了しているが、復旧時間を最後まで要したのは千葉エリアと木更津エリアであった。

1.4.2 に示した通信ビルが機能的に回復してもこのような電柱やケーブル等の配線系の設備の復旧がなされない、利用者は通信アクセスができないため、利用者サイドの支障を最も実態に即して表した指標が図1.4.5に示す故障件数に係る時間的推移である。故障件数は、主に113番の故障受付等を通じて、「お客さまからのご申告等に基づき確認ができた故障件数（回線数）」と定義されている。図1.4.5は9月21日から日ごとに覚知されていく故障件数並びに復旧件数をそれぞれ累計した結果である。10月11日における累計の件数が各エリアの故障件数並びに復旧件数の総数となる。復旧件数を故障件数で除して復旧率と定義し、同期間における復旧率の経時変化を示した結果が図1.4.6である。図1.4.7は故障件数の中の未復旧件数を同期間において示した結果である。この様子を時空間的に示した結果が図1.4.8である。

図1.4.5から図1.4.8によれば、各エリアにおいて、9月21日から10月11日までに復旧率は漸増するものの、日ごとに覚知されていく故障件数が復旧件数を上回り、いわゆる復旧が追い付かない状況に陥り、各エリアにおいて未復旧件数がある段階まで増加しピークを迎え、その後、復旧が進捗して10月11日までは未復旧件数が一定レベルにまで低減していることがわかる。また、累計の故障件数が多かった館山エリアと木更津エリアにおいては日々覚知されていく故障件数が復旧件数を大きく上回り、未復旧件数が9月29日あるいは10月4日まで増加し続け、復旧率がなかなか改善されなかった結果、復旧が大きく長期化したことが明らかである。台風15号による固定電話の設備被害に対する復旧過程の大きな特徴と言えよう。

1.4.4 復旧対応とサービス影響に対する対策

文献2)の第17報によれば、全国から人員等が集められ、9月20日時点において約7,600人体制で、上述した通信設備被害やサービス影響に対して復旧にあたった。

発災直後の9月9日より、千葉県内全域において約7,000台の公衆電話の無料化が実施され、被災自治体からの要請のもと、災害時用公衆電話（特設公衆電話）が9月12日から10月11日まで避難所等に設置された。また、9月13日から千葉県全域で約2,100箇所の光ステーション（Wi-Fiアクセスポイント）が無料開放され、この措置は10月11日まで継続された。113番の故障受付の繋がりにくさを解消するために、千葉エリアの故障受付者を9月11日からは5倍に増員し故障受付の応答率を高めるとともに、被災自治体の役場等の社外においても故障受付窓口を設置する等して対応した。

1.4.5 携帯電話（SoftBank）の停波の状況

発災直後の9月9日13時30分においては、停波基地局数は592、エリア支障は18の市町村に及んだ。被害が甚大であったのは、千葉県の館山市、南房総市、富津市、君津市、鴨川市の5市である。これは主に、強風そのものや強風による飛来物・倒木、及び、斜面崩壊や道路損壊等によって、電柱並びにケーブルの伝送路に物理的な支障が生じたためである。その後、継続的な停電による影響（停電支障）を受け、翌9月10日7時において停波基地局数は759に及び、エリア支障は52の市町村まで拡大し停波のピークを示した。電力の復電や次項に示す応急復旧活動により、9月11日には停波基地局数は600まで低減させることができ、エリア支障の市町村も同様に30前後まで大きく低減された。9月12日と9月13日には1日におよそ100の停波基地局数が解消され、9月18日17時38分をもって、エリア支障が生じていた全ての市町村で応急復旧が完了した。

1.4.6 停波に対する対応と対策

復旧までにかかわった人員は10日間延べ6,042人を要した。2人で1班を構成し計1,916班の復旧態勢で臨んだ。復旧ベースキャンプを千葉県におき、停波及び停電に対する対応として、移動基地局車、移動電源車、可搬型基地局、可搬型衛星アンテナ、可搬型発電機、等の応急復旧機材を合計480台投入した。これらの応急復旧機材の最大運用数は334台であった。また、避難所等への支援箇所は19箇所に及んだ。充電設備を38台、固定型電話(3G)を9台、無線Wi-Fiを12箇所、千葉県全域において無線スポットを開放して支援を行った。

応急復旧において支障が生じた点として、倒木や電柱の倒壊、及び、道路崩壊・損壊・冠水によって車両が通行不可となった箇所が多数存在したことである。このような道路の物理的な被害に伴う通行止めやその結果生じ得る渋滞等の道路交通状況に関する情報連携をはかるべく、関係組織が集まる災害対策本部にてリエゾンを通じた更なる連携強化が課題の一つとなった。応急復旧に関わる様々な組織(国、自治体、通信会社、電力会社等)の関連部局への情報のアクセスルートを明確にし、一元化していく枠組みが一層求められよう。

謝辞

東日本電信電話株式会社(NTT東日本)の設備被害については、NTTアクセスサービスシステム研究所の田中実氏、板坂浩二氏、奥津大氏、伊藤陽氏をはじめ災害対応に関係する組織の皆様方より、情報提供に多大なご尽力をいただき、各種情報を多々精査していただきました。また、ソフトバンク株式会社(SoftBank)の設備被害については、SoftBankの関係組織の皆様方に多くの貴重な情報提供をいただきました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 総務省：令和元年台風第15号関連情報、令和元年台風第15号による被害状況等について、第1報～第37報、https://www.soumu.go.jp/r01_taifudai15gokanrenjoho/ (2020.3.20 参照)
- 2) 東日本電信電話株式会社：報道発表資料、台風15号の被害に対するサービス影響等について、第1報～第38報、<https://www.ntt-east.co.jp/release/> (2020.3.20 参照)
- 3) ソフトバンク株式会社：お知らせ 2019年9月18日、台風第15号による携帯電話ネットワークへの影響と全復旧に向けて実施した取り組みについて、https://www.softbank.jp/corp/news/info/2019/20190918_02/ (2020.3.20 参照)

停電と断水が医療機能に与えた影響

Impact of Stoppage of Power and Water on Performance of Hospitals

宮島 昌克*¹, 芹川 由布子*²,

Masakatsu MIYAJIMA, Yuko SERIKAWA

A questionnaire survey for hospitals affected by Typhoon Faxai (2019) in Japan was done and impact of damage to lifeline on medical functions was studied. The questionnaire survey sheets were mailed to 349 hospitals then responses were obtained from 87 hospitals in Chiba Prefecture. Therefore, the questionnaire collection rate was 24.9%. The results of this survey indicate that the stoppage of power mostly affected to the medical function in the lifeline function damage. However, an alternative electricity reduced the effect of power outage on performance of hospitals. The capacity of the alternative electricity should be reviewed.

Keywords : stoppage of power, stoppage of water, performance of hospital

1.5.1 はじめに

わが国はこれまでに多くの自然災害に見舞われ、その度に大きな被害が発生してきた。災害時において、医療機関は救命救急活動を実施する重要な拠点施設となる。しかし、医療機関も当然被害を受けるため、医療機能を維持し、救命救急活動を迅速に行うためにも、医療機能の低下度合いを把握することは重要である。2016年熊本地震や2018年北海道胆振東部地震におけるアンケート調査結果^{1)・2)}においても、ライフライン機能被害が医療機能被害に及ぼす影響は大きく、断水、停電により影響を受けた医療機関は被害発生機関のうち70%近く報告されており、多くの医療機関で休診・転院などの対応がとられた。

これまでのライフライン機能被害は地震だけでなく台風の際にも発生しており、今後、日本において予想される台風に対し、医療施設が十分な医療機能を発揮できれば、被災地において人的被害を最小限に抑えることが可能であると考えられる。しかしながら、これまでに台風災害による医療機関の被害をテーマにした研究は少ないため、台風15号による医療機関の被害を詳しく調査し、ライフライン被害による医療機能の制限・影響の有無を明らかにする必要がある。そこで本研究では、台風によるライフライン機能被害が医療機能に与える影響の要因を分析することを目的とし、台風15号による被害が甚大であった千葉県を対象にアンケート調査を実施した。

*1 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
教授・工博

Prof., School of Geosciences and Civil Engineering,
Faculty of Science and Engineering, Kanazawa University, Dr. Eng.

*2 松江工業高等専門学校環境・建設工学科
助教・博士(工学)

Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering,
National Institute of Technology, Matsue College, Dr. Eng.

1.5.2 アンケート調査の概要

アンケートを実施する上で有意なデータを得るために、建物被害や停電・断水といったライフライン機能被害が生じた千葉県を調査対象地域とした。対象とする医療機関は千葉県医師会に所属している 2061 の医療機関より、病院、医療センター・メディカルセンター241 機関と、5 名以上の協力医師が所属している医院、クリニック、診療所 108 機関の合計 349 機関を選定しアンケート調査を行った。2019 年 12 月 25 日よりアンケート用紙を送付し、87 医療機関から回答を得たので、回収率は 24.9%であった。

調査項目は、台風災害時の被害と医療機能被害の関係として考えられる「ライフライン機能被害」、「設備被害(構造物被害を含む)」、「医療機器被害」、「被災直後の医療活動」、「病院諸元」から成る 5 項目を設定した。回答の得られた医療機関の属性として、病床数区分による病院割合割合を図 1.5.1 に、全国における病床数区分による病院割合³⁾を図 1.5.2 に示す。病院は機能別に以下のように分類される。①特定機能病院として高度医療を提供し、医療技術の開発・評価を行い、研修ができる病院。400 床以上の病床を有し、厚生労働大臣によって承認される。②地域医療支援病院として医療機器などを一般病院や診療所と共同で利用し、かかりつけ医を後方支援する病院。200 床以上の病床数を持ち、都道府県知事によって承認される。③特定機能病院、地域医療支援病院以外の病院。このように病院の分類には病床数が用いられており、今回の調査で回答が得られた医療機関の病床数と全国における病床数の割合には大きな差はなく、アンケートより得られた被害状況は一般的な結果として適用できると考える。

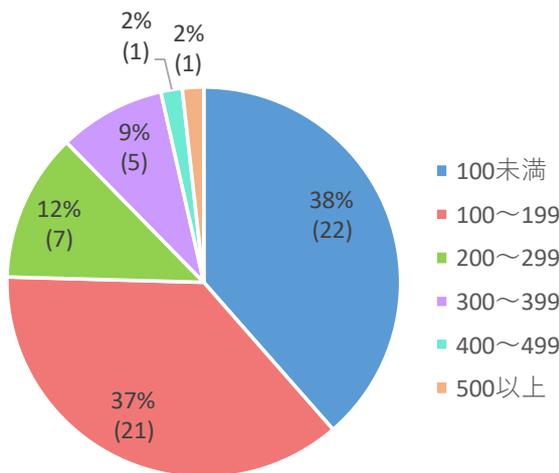


図 1.5.1 病床数別の割合

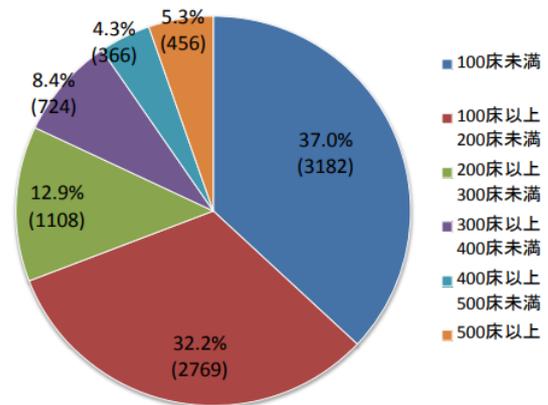


図 1.5.2 全国における病床数別の割合³⁾

1.5.3 ライフライン機能被害が医療機能に及ぼす影響

図 1.5.3 にアンケート送付先の分布とライフライン機能被害の有無を示す。赤で示した箇所では被害が生じており、青で示した箇所では無被害であった。緑で示した箇所は不明である。ライフライン機能被害の有無を図 1.5.4 に示す。本研究ではアンケート結果を整理するため、被害率、影響率を以下のように定義する。

$$\text{被害率}(\%) = \frac{\text{被害発生機関数}}{\text{全回答機関数}} \times 100$$

$$\text{影響率}(\%) = \frac{\text{被害により医療機能への影響が生じた機関数}}{\text{被害発生機関数}} \times 100$$

全回答機関 87 件のうちライフライン機能被害ありと回答した機関は 23 件であり、被害率は 26%となった。地図上のプロット位置からは千葉県の広範囲でライフライン機能被害が発生していたことがわかる。

図 1.5.5 に医療機能へ影響を及ぼしたライフライン機能被害の項目別回答数を示す。回答数の最も多い項目は停電であり、次いで断水という結果となった。電波塔の被災による電波障害やインターネット不通、携帯電話不通なども医療機能に影響を及ぼしていた。台風直撃時の医療機器の使用を避けるために、人工透析治療の時間調整や診療時間の変更を行った機関もあった。図 1.5.6 にライフライン機能被害による医療機能への影響の有無を示す。6項目全てにおいて医療機能への影響率が80%を超えていることから、ライフラインが途絶えた場合、医療機関は通常の機能を果たせなくなると考えられる。停電が医療機能に影響を及ぼさなかったと回答した機関は、停電の期間を自家発電等の代替設備を用いるなどの対応策がとられていた。

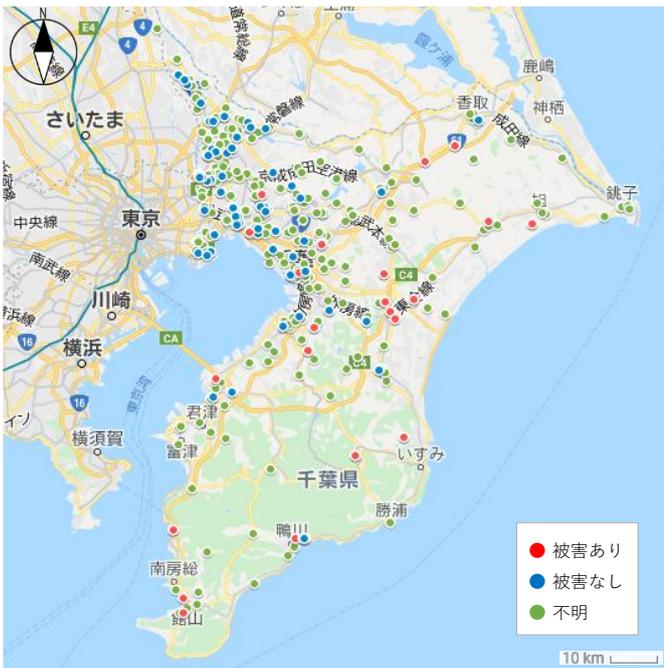


図 1.5.3 アンケート送付先とライフライン機能被害の有無

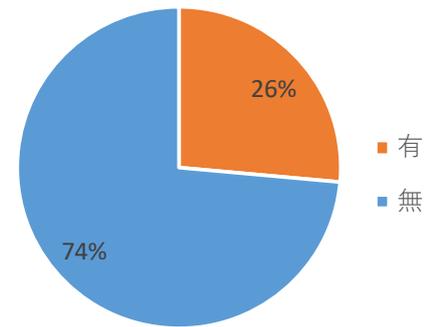


図 1.5.4 ライフライン機能被害の有無

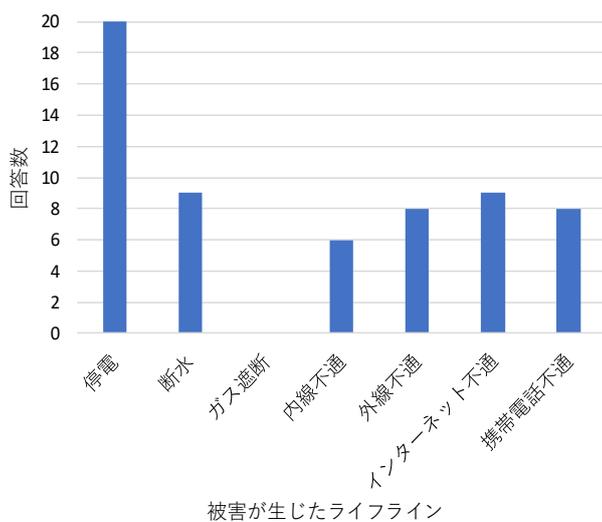


図 1.5.5 ライフライン機能被害の項目別回答数

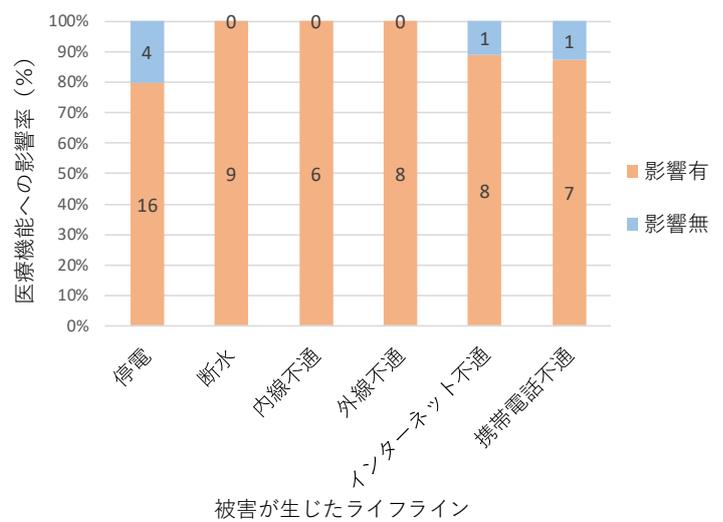


図 1.5.6 ライフライン機能被害による医療機能への影響の有無

1.5.4 設備の使用制限が医療機能に及ぼす影響

ライフライン機能被害により生じた設備の使用制限の有無を図 1.5.7 に示す。設備の使用制限があったと回答した機関は 84%であった。図 1.5.8 に使用が制限された設備の項目別回答数を示す。回答数の最も多かった設備は通信関連(LAN 等)であり、次いで照明設備、室内電源であった。このような被害の主な要因は停電である。

図 1.5.9 に設備使用制限による医療機能への影響の有無を示す。影響率が最も高い設備は放射線関連機器であり、86%となった。検査機器や放射線関連機器の使用不可により、外来の診療を制限または休診したと回答した機関が多く、これらの設備が医療機能に与える影響率は高いと言える。次いで、室内電源 82%，通信関連(LAN 等)78%と影響率が高い結果となった。停電時に自家発電や非常電源コンセント、非常灯などの代替設備を使用している機関が多くあったが、平常時の電力量の全てをまかなうことはできず、設備の使用が制限された。夜間の停電や 2 時間程度の停電の場合は自家発電等と使用することで医療機能への影響はなかったと回答している。通信関連については医療機関での復旧が困難であるため、影響率が高くなったと考えられる。

また、今回の台風による設備への直接的な被害は、室外機の転倒・破損が挙げられた。この被害によりエアコンが故障し病室の温度が上昇した。胚培養室の温度も上昇し、胚の管理にも影響が生じた。雨漏りやガラスの破損などの構造被害もあったが、医療機能への影響はなかった。

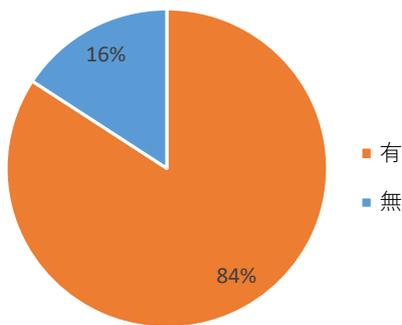


図 1.5.7 設備の使用制限の有無

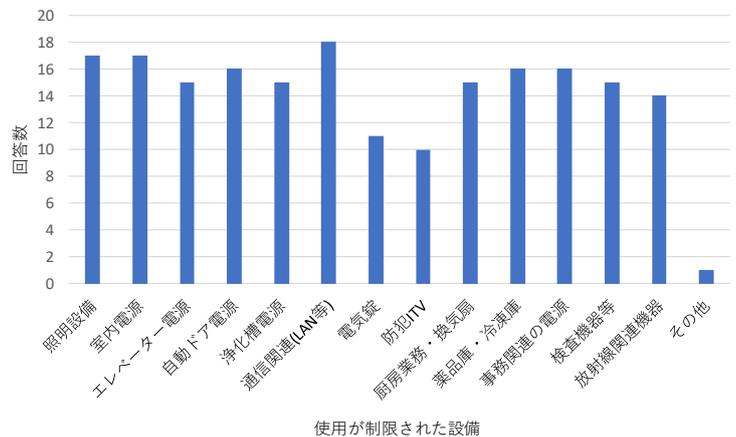


図 1.5.8 使用が制限された設備の項目別回答数

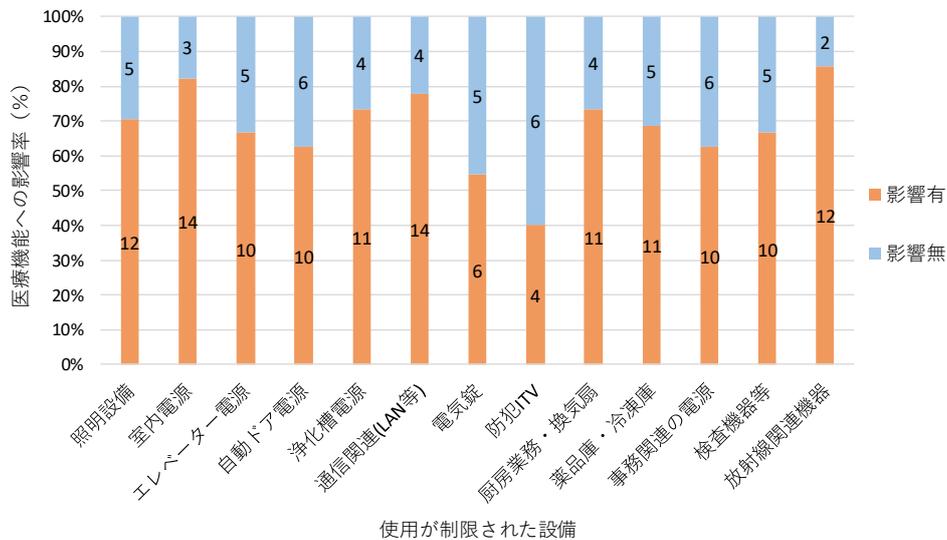


図 1.5.9 設備使用制限による医療機能への影響の有無

1.5.5 代替設備と医療機能

ライフライン被害が医療機能へ及ぼす影響を軽減するために最も重要となるのがライフライン機能被害時に電力等を確保することができる代替設備の保有である。図 1.5.10 に代替設備保有の有無を示す。ライフライン機能被害の有無に関わらず、代替設備の保有について調査したところ全体の 70%(61 機関)が何らかの代替設備を保有していると回答した。

図 1.5.11 に代替設備の種別ごとの回答数を示す。ここでの代替設備とは、電気、上水道、ガス、固定電話、携帯電話の 5 つに分類されている。電気の代替設備では、自家発電装置や非常用電源、非常灯などが多く挙げられた。断水に対しては地下水や井戸水、飲料水の確保がされていた。固定電話と携帯電話については、通信災害時優先電話や市の災害医療本部と直結したアマチュア無線などを持っている機関があった。図 1.5.12 に病床数別の代替設備保有の有無を示す。病床をもたない医療機関では、代替設備の保有率が 33%と低いことがわかる。病床をもつ医療機関では保有率が 87%と高い結果となったが、200 床を超える場合でも代替設備を保有していない機関もあることがわかる。

代替設備使用による医療機能への影響の低減を明らかにするため、ライフライン機能被害と代替設備の関係を図 1.5.13 に示す。ライフライン機能被害があったと回答した機関の 14%が代替設備を使用したことで、医療機能への影響がなかったと回答した。しかし、半数は代替設備を使用したが無影響であったと回答している。これについては、保有していた代替設備の容量が十分でなかったためと考えられる。

停電による内線・外線の不通、電波塔の被害によるインターネット・携帯電話の通信不通については発電機や非常用携帯電話等で対応していたが、医療機能に影響があったと回答している機関が多かった。代替設備を有しているが使用せずに影響があったという 18%については、代替設備も台風の被害をうけ使用できなかったことや、保有していた代替設備ではないライフラインに被害があった(断水への対策はされていたが停電が発生、自家発電機は有しているが断水が発生)などの理由から使用に至らなかった。これらの事例より、様々な災害に長時間対応できる代替設備の保有が医療機能を維持するうえでの重要な役割を果たすと考えられる。

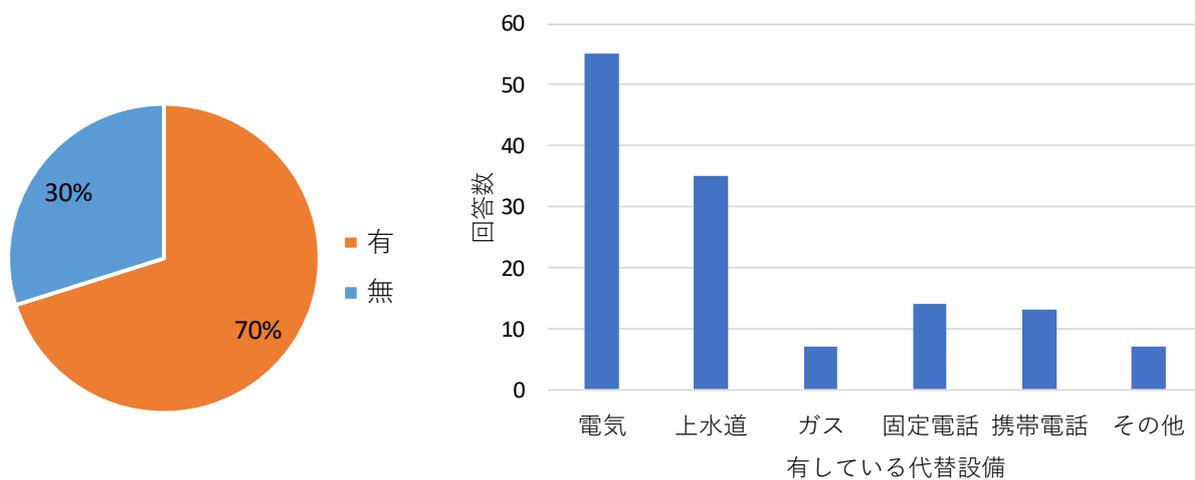


図 1.5.10 代替設備保有の有無

図 1.5.11 代替設備の種別

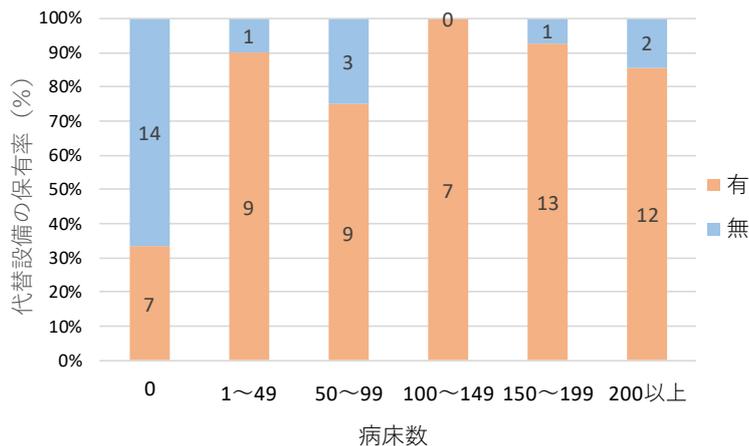


図 1.5.12 病床数別代替設備の保有の有無

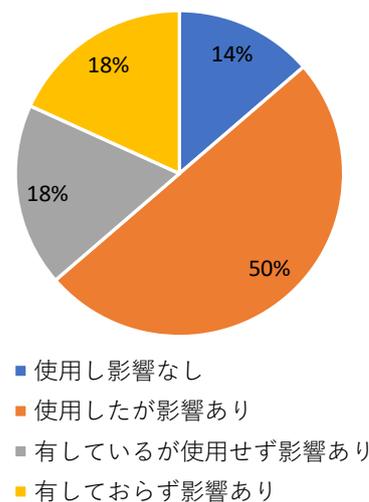


図 1.5.13 ライフライン機能被害と代替設備

1.1.6 まとめ

本調査では、台風によるライフライン機能被害が医療機能に与える影響の要因を分析することを目的とし、建物被害や停電・断水といった被害が生じた千葉県を対象にアンケート調査を実施した。アンケート結果より、ライフライン被害による医療機能の制限、医療機能への影響の有無が明らかになった。

医療機能に最も影響を及ぼしたライフライン機能被害は停電であり、次いで断水という結果となった。電波塔の被災による電波障害やインターネット不通、携帯電話不通なども発生し、6項目のライフライン機能被害全てにおいて医療機能への影響率が80%を超えていた。ライフライン機能被害があった医療機関の中で、設備の使用制限があったと回答した機関は84%であった。最も多かった設備は通信関連(LAN等)であり、次いで照明設備、室内電源であった。このような被害の主な要因は停電である。

ライフライン被害が医療機能へ及ぼす影響や設備の使用制限を軽減するために最も重要となるのが、被災時に電力等を確保することができる代替設備の保有である。ライフライン機能被害の有無に関わらず、代替設備の保有について調査したところ全体の70%が何らかの代替設備を保有していると回答した。有している代替設備の種類は電気が最も多く、自家発電装置や非常用電源、非常灯などが挙げられた。しかし、病床をもたない医療機関では代替設備の保有率が33%と低いことがわかる。病床をもつ医療機関では保有率が87%と高い結果となった。代替設備を用いることで、医療機能への影響がなかったと回答している機関もあるが、使用したが影響があったという機関が半数であった。これらの事例より、様々な災害に長時間対応できる代替設備の保有が医療機能を維持するうえでの重要な役割を果たすと考えられる。

参考文献

- 1) 野口亮輔, 宮島昌克: 2016年熊本地震における医療機関の被害が医療機能に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 73, pp. 753-760, 2017.
- 2) 野口亮輔, 宮島昌克: 2018年北海道胆振東部地震におけるライフライン機能被害が医療機能に及ぼす影響, 自然災害科学 Vol.38, 特別号, pp. 123-132, 2019.
- 3) 厚生労働省: 第3回病床機能情報の報告・提供の具体的な在り方に関する検討会 資料5, https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/other-isei_127371.html (2020年3月18日アクセス)

ライフライン停止による生活支障の実態

A Survey on Daily Living Disruption Caused by Lifeline Suspension

佐藤 翔輔*¹*Shosuke SATO*

The web questionnaire survey was conducted to survivors affected by Typhoon Faxai (2019) in order to clarify situation of daily living disruption and the characteristics. The results are summarized as follows. 1) “Washing clothes” is the highest degree of daily living disruption of all daily living activities. 48.2% of survivors (answerers) could not response with alternatives during period of electricity outage. 2) Daily living disruption degrees of “washing clothes”, “telecommunication” and “bathing activity” in old age is higher than young age. The old affected people seem to be not able to move to outside of electric outage area and to not have portable battery for telecommunication tool. 3) However, elderly people could get creative with what they had and alternative water, heat and light source to do “cooking.”

Keywords : *daily living disruption, lifeline suspension, alternative way, disaster survivor's life*

1.6.1 はじめに

台風 15 号 (Faxai) では、電力システムが大きな被害を受け、特に千葉県では停電が長期化し、そのような状況の中で熱中症による死者の発生、断水の長期化、携帯電話や固定電話回線等の通信障害など様々に波及した。本節では、停電の長期化にともなう生活への波及、いわゆるライフライン停止に起因する生活支障の実態について明らかにすることを目的とする。

1.6.2 方法

台風 15 号において発生していた生活支障の実態をマクロに捉えるために、インターネットによる質問紙調査を実施した。調査対象は、千葉県の市原市、香取地域、海匝地域、山武地域、君津地域、安房地域に居住者で、株式会社サーベイリサーチセンターの WEB アンケートシステムの登録モニターに対しての配信型クローズド調査によって行った。

調査実施期間は、2020 年 1 月 17 日 (金) ～1 月 20 日 (月) の 4 日間で、2,000 サンプルの有効回答を得た。地域別で見ると、市原市で 525 票 (26.3%)、香取地域で 137 票 (6.9%)、海匝地域で 211 票 (10.6%)、山武地域で 302 (15.1%)、君津地域で 624 票 (31.2%)、安房地域で 201 票 (10.1%) であった。回答者の性別は男性が 60.5%、女

*1 東北大学災害科学国際研究所 准教授・博士 Assoc. Prof., International Research Institute of Disaster Science,
(情報学) Tohoku University, Dr. of Informatics

性が 39.6%で、年代は 20 代以下が 7.6%、30 代が 18.0%、40 代が 25.2%、50 代が 24.5%、60 代が 17.2%、70 代以上が 7.7%であった。ライフラインの停止状況で見ると、停電があったのは 73.6%、断水があったのは 31.7%、ガス停止があったのは 3.5%であり、ガス停止による生活支障の発生は少ないと考えられる。

生活支障の発生状況については、7 種類の生活活動について、復旧時期と低下度^{1),2)}という指標で評価する。7 種類の活動は先行している調査・研究^{1),3)}にもとづいて、1) 料理、2) トイレ (用便)、3) 洗面・歯みがき、4) 入浴、5) 洗濯、6) 夜間、暗い中での生活、7) 通信 (電話・メール・インターネット等) とした。復旧時期については、「台風 15 号の襲来後、次にあげるようなことについて、ふだんどおりできるようになったのはいつ頃ですか。」という設問で、日にち (単一回答) を問うた。低下度は、「次にあげるようなことがふだんどおりにできない間、ふだんとは違う方法や違うもので補うなどを含めて、それらを行うことができましたか。」という設問で、「1. 十分にできた」「2. おおむねできた」「3. どちらともいえない」「4. あまりできなかった」「まったくできなかった」の 5 段階で回答を得た。それぞれの選択肢について、0, 2.5, 5, 7.5, 10 の値 (重み) を与えて、どれだけ生活に支障があったかという状況を点数で評価する。

1.6.3 結果・考察

図 1.6.1 に、各生活活動の復旧時期について、回答者の累積割合の時系列変化を示す。図 1.6.1 には、影響が少なかったと考えられるガス以外の、電気と水道の復旧の過程も併記している。洗面・歯みがきとトイレ (図 1.6.1 の上部) は、台風来襲当日に支障が発生した割合は 4 割を下回り (図 1.6.1 左端)、それ以外の生活活動は 5 割以上の回答者に支障が発生しており (図 1.6.1 左端)、その後の復旧割合のスピードも大きく異なる。生活活動とライフライン (電気、水道) の復旧の累積推移を見ると、支障が発生した割合が多かった料理、通信、夜間暗い中での生活、入浴、洗濯では、水道の復旧過程ではなく、電気の復旧の過程と連動している様子が見てとれる。このことから、台風 15 号でのライフライン停止による生活支障への影響は停電が大きく関連していたことが推察できる。

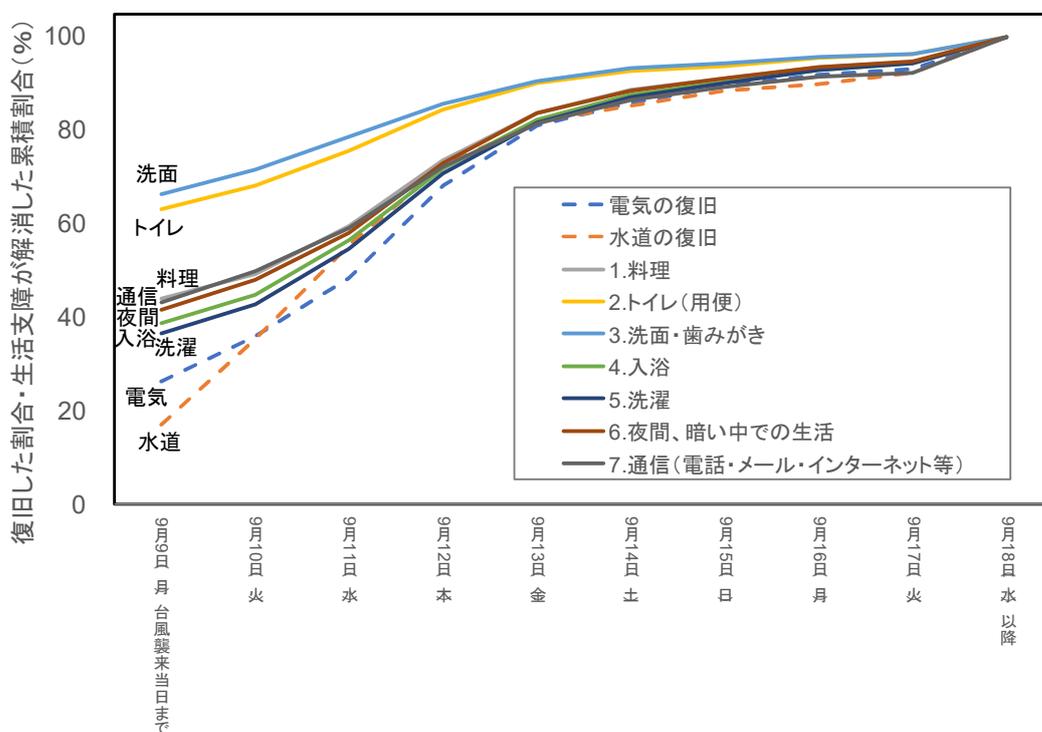


図 1.6.1 生活活動とライフラインの復旧割合の時系列変化

図 1.6.2 に各生活活動の低下度の平均値を示す。参考・比較として、先行して同じ指標を用いて調査された 2018 年北海道胆振東部地震での結果³⁾も併記する。左側から、台風 15 号（千葉県）での低下度が高かった順に生活活動の種類を並べている。台風 15 号では、洗濯、通信、入浴に低下度が高く、これらで大きな生活支障が発生していたことがわかる。このような結果は、同じく大規模な停電が発生した北海道胆振東部地震でも同様である。トイレ、洗面・歯みがきにおいては、北海道胆振東部地震に比べて低下度が 2 倍以上の高い結果になっている。断水の発生は、台風 15 号（千葉県）で 31.7%、北海道胆振東部地震（札幌市）で 25.5%³⁾と台風 15 号の方が多かった。また、札幌市では地震発生から 4 日目で水道の復旧率は 98.4%（先行調査 3）における回答者）であったのに対して、本調査における千葉県では台風来襲から 4 日目で水道の復旧率は 72.4%にとどまっており、7 日目（1 週間）経過しても 88.5%と断水も長期化した。このことが、千葉県において水道と関連しているトイレと洗面・歯みがきの支障が多かったことが背景にあると考えられる。

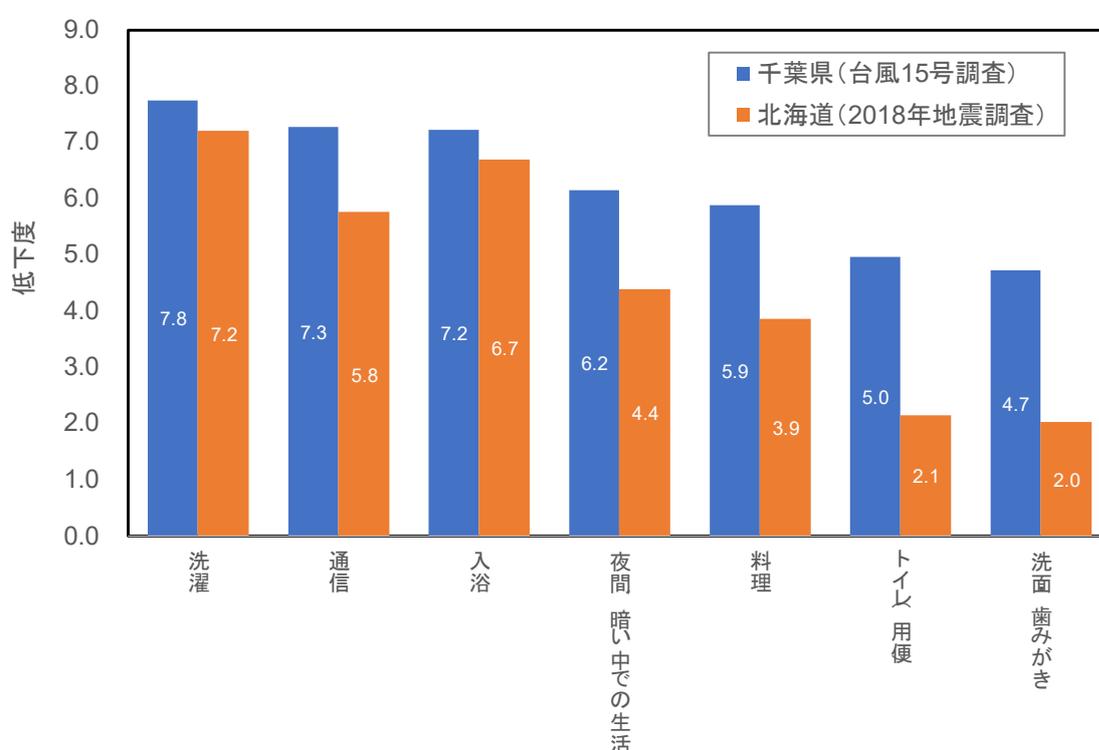


図 1.6.2 生活活動ごとの低下度の平均値

図 1.6.3 に、各生活活動の低下度の平均値を年代別で示す。分散分析の結果、洗濯は 5%水準で、入浴と通信は 1%水準で年代による有意差が確認された（それぞれ最大値と最小値の差は、0.8, 1.1, 1.6）。この 3 つの生活活動は、年代が高いほど低下度が大きく、生活支障の度合いが高かったことがわかる。以上 3 つの生活活動のほか、有意差は認められなかったものの、低下度の最大値と最小値の差が次点に大きかったのは料理で 30 代と 60 代の差で 0.6 であった。以上 4 つの生活活動の生活支障の度合いについて、年代で差が発生した背景に関する考察については、「ふだんどおりにはできない期間に、工夫や機転で対応できたこと」の内容を踏まえて後述する。

なお、回答者の個人属性として性別で低下度の平均値を比較したが、明瞭な差（性別差）は確認されなかった。

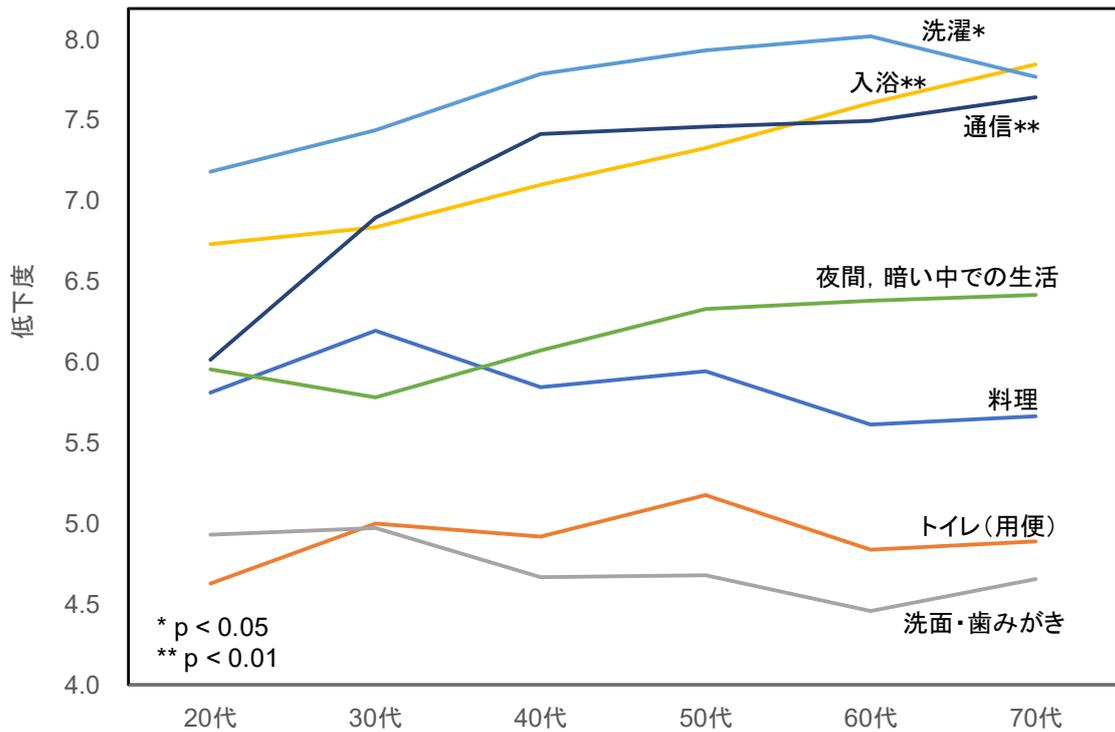


図 1.6.3 生活活動ごとの低下度の平均値 (年代別)

図 1.6.4 に、洗濯がふだんどおりにはできない期間に、工夫や機転で対応できたことについて複数回答で問うた結果を示す。約半数の回答者が「何もできなかった (がまんした)」が 48.2% と最も多い。これは、後述する通信、入浴、料理における「何もできなかった」という回答比率に比べても、もっとも高い比率であり、洗濯の低下度が最も高かったという結果 (図 1.6.2) と整合する。次に回答比率が高いのは、「水 (常温) で手洗いした」が 28.8%、「その他」が 19.3% であった。「その他」の中には、電気が復旧しているエリアの知人宅やコインランドリーと利用したり (例「知人宅で早めに停電が解除した所を借りた」「停電復旧した地域のコインランドリー等を利用しました」)、太陽光発電システムで電気を供給した (例「太陽光発電の予備電源が使用できたので、日中に洗濯機が回せました」) などの回答があった。広域に移動が困難な被災者、高齢者などの自動車をもたない方は、知人宅やコインランドリーを利用するという代替手段をとることが難しい。図 1.6.2 において、洗濯で年代差があった背景には、このような要因が考えられる。

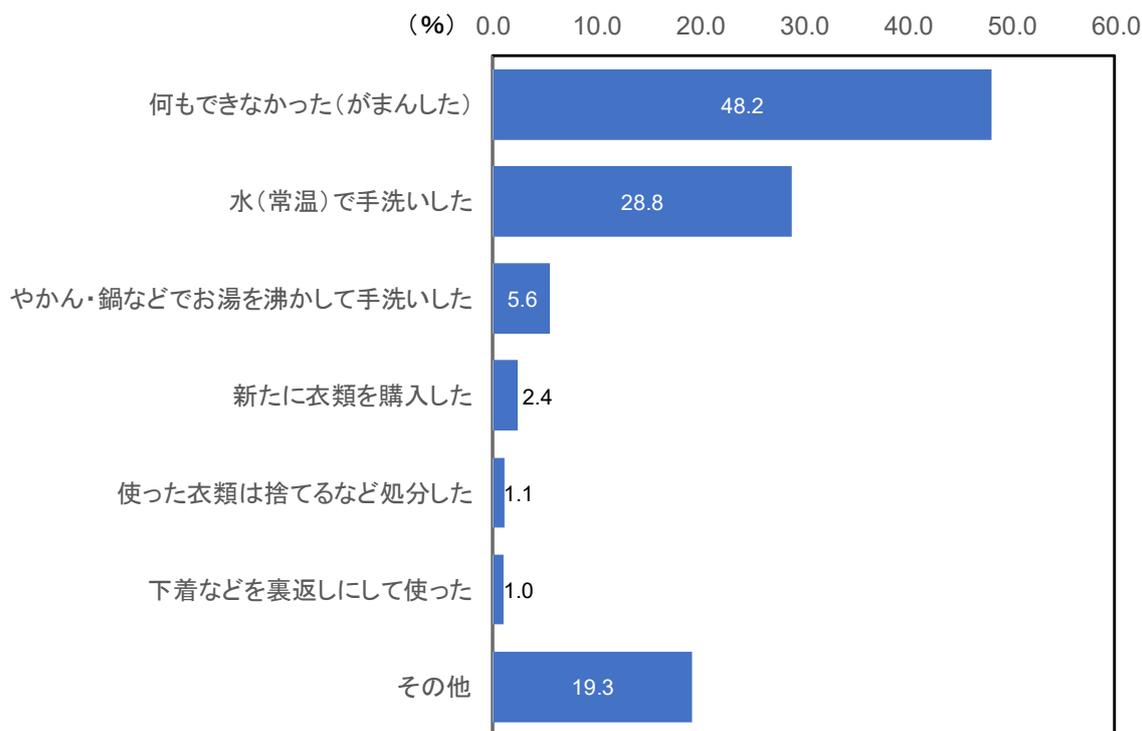


図 1.6.4 洗濯がふだんどおりできない期間に、工夫や機転で対応できたこと

図 1.6.5 に、通信がふだんどおりできない期間に、工夫や機転で対応できたことについて複数回答で問うた結果を示す。上位は「携帯電話やスマートフォンの利用を控えた」「携帯電話やスマートフォンの予備バッテリーでなんとかした」のほか、「何もできなかった(復旧をまった)」と対応できなかったという回答も多い。情報通信手段として災害時に有効とされている「ラジオを使用した」は 22.1%にとどまった。年代別で見ると、「携帯電話やスマートフォンの予備バッテリーでなんとかした」と回答したのは、30代が 34.8%、20代以下が 31.3%であったのに対して、70代以上は 18.8%と最も低い。「携帯電話やスマートフォンを省エネモードにして対応した」は、20代以下が 19.8%、30代が 16.1%であるのに対して、70代では 7.9%であった。「何もできなかった」は、70代以上で 31.7%と最も多い。このことから、高齢者は携帯電話やスマートフォンの予備バッテリーを所持していなかったり、省エネモードを活用することができず、対応できず通信における支障が高まった(低下度が高くなった)ことが推察される。「その他」の中には、自動車から充電した(例「車で充電をした」)、太陽光発電システムで電気を供給した(例「太陽光発電で日中に充電した」)などの回答があった。

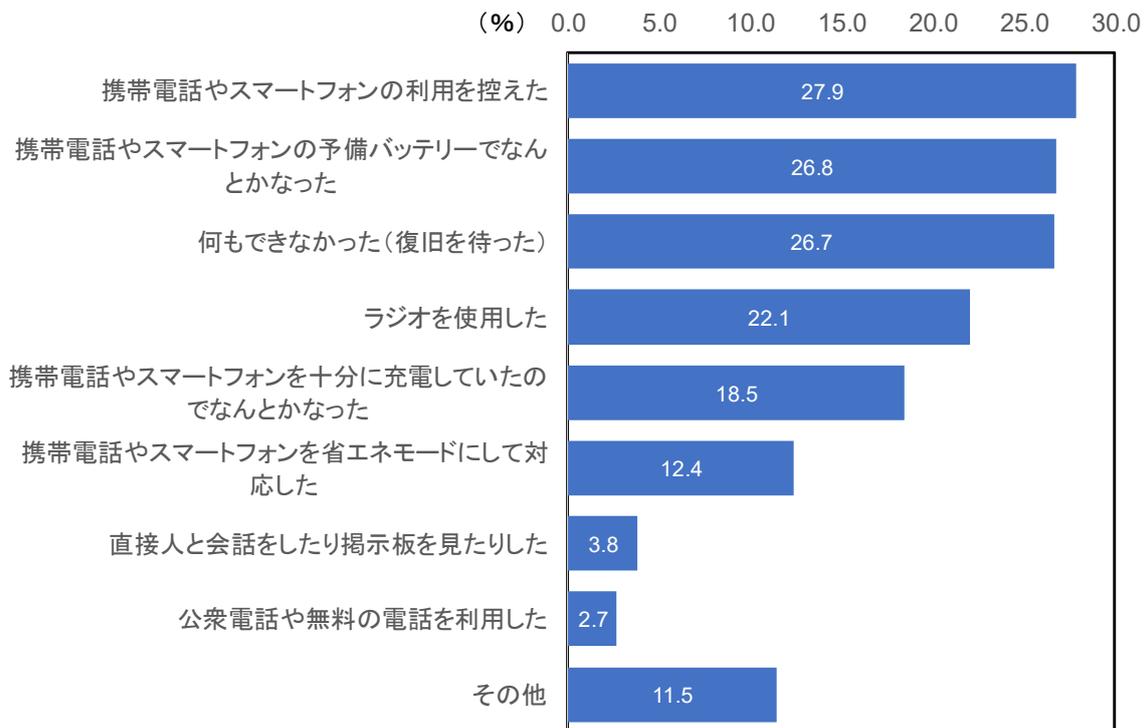


図 1.6.5 通信がふだんどおりできない期間に、工夫や機転で対応できたこと

図 1.6.6 に、入浴がふだんどおりできない期間に、工夫や機転で対応できたことについて複数回答で問うた結果を示す。最も多かったのは「水（常温）で体を洗った」で 36.9%であった。「友人・親戚宅のお風呂を利用した」が 22.2%で次点であり、「洗濯」同様に停電が解消しているエリアの地縁・血縁による共助によって対応していた被災者も一定数いたことが分かった。入浴の支障に対して「何もできなかった（がまんした）」は 16.2%であった。年代別で見ると、「友人・親戚宅のお風呂を利用した」と回答したのは、20 代以下・30 代ともが 32.7%であったのに対して、60 代は 16.5%、70 代以上は 18.0%と低い。「何もできなかった」は、60 代以上で 23.9%と最も多い。このことから、洗濯と同様に、停電エリア以外の友人・親戚宅への移動が困難なことから、高齢の方が入浴の代替手段がとりづらかったことが考えられる。

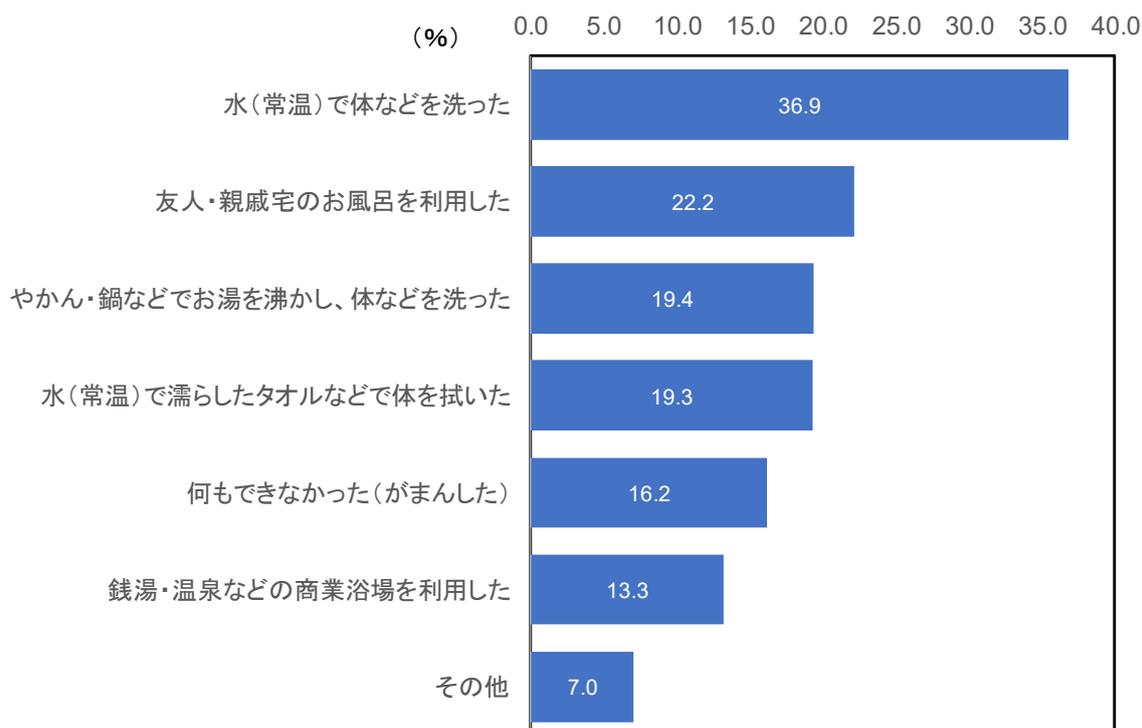


図 1.6.6 入浴がふだんどおりにはできない期間に、工夫や機転で対応できたこと

図 1.6.7 に、料理がふだんどおりにはできない期間に、工夫や機転で対応できたことについて複数回答で問うた結果を示す。「ローソクや懐中電灯などで夕食をとった」が 51.8%、「明るいうちに、料理・食事・片付けを済ませた」が 33.7%と、停電によって灯りがとれなかったことが夕食に影響していたことがわかる。「電気を使わないで、ガスで料理した」が 40.7%、「電気炊飯器を使わないで、ガスで炊飯した」が 14.2%とガスによって料理熱源を確保していた回答者も多かった。「何もできなかった(がまんした)」は 6.5%と、前述の洗濯、通信、入浴に比べて最も少ない。料理の代替手段についても、年代間で差が見られる。「洗い物を減らす工夫をした」「明るいうちに、料理・食事・片付けを済ませた」が 20 代以下で(それぞれ、32.6%、39.1%)、「友人・親戚宅やレストランを利用した」が 30 代で最も多い(32.3%)。一方で「井戸水などを汲んできた」「ローソクや懐中電灯などで夕食をとった」「問題はあったが、ほぼふだんどおりできた」は 70 代以上で(それぞれ、14.4%、62.2%、12.2%)、「電気を使わないで、ガスで料理をした」「電気炊飯器を使わないで、ガスで炊飯した」「冷蔵・冷凍食品の鮮度を保つ工夫をした」「家にあったふだんづかいの食材を活用した」は 60 代で最も高い(それぞれ、46.2%、17.5%、34.9%、32.5%)。60 代・70 代以上では、若い世代に比べて、「あるもので」「代替的な水源・熱源・光源」で対応した人が多いことがわかる。

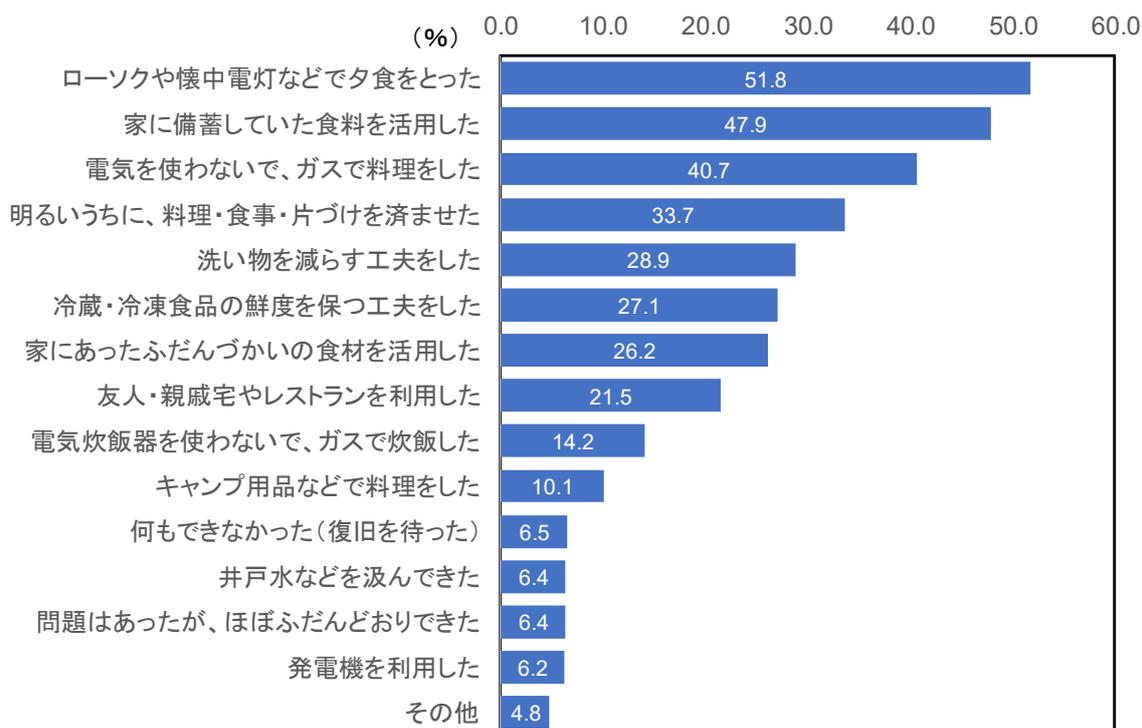


図 1.6.7 通信がふだんどおりにできない期間に、工夫や機転で対応できたこと

1.6.4 まとめ

台風 15 号において発生していた生活支障の実態を把握するために、インターネットによる質問紙調査を千葉県の住民に対して実施した。その結果は、次のようにまとめられる：

- 生活活動のうち、「洗面・歯みがき」と「トイレ（用便）」については、台風来襲当日に支障が出たものの、ふだんどおりにできるようになった割合も、それ以外の生活活動に比べて早く回復していた。
- 生活活動のうち、「料理」「通信」「夜間暗い中での生活」「入浴」「洗濯」がふだんどおりにできるようになった割合は、停電の解消と連動していた。
- 生活活動のうち「洗濯」は、代替手段をとることができず「何もできなかった（がまんした）」住民が約半数と最も多く、最も支障が発生していた。
- 生活活動のうち、「洗濯」「通信」「入浴」については年代によって支障の程度が異なっていた。「洗濯」と「入浴」は、停電エリア外の知人・親戚宅（地縁・血縁）や商用施設を利用するうえで移動手段を要することから、高齢層でこのような代替手段がとれずに低下度が高まったと考えられる。「通信」は、予備バッテリーを保持していなかったり、省エネモードを活用できずに、高齢層で低下度が高まったと考えられる。
- 生活活動のうち、「料理」は高齢層においては、井戸水の利用、ローソクで灯り確保、ガスでの調理（炊飯を含む）、家にあるふだんづかいの食材や冷蔵・冷凍食品といった「あるもので」「代替的な水源・熱源・光源」で対応した人が多かった。

生活支障として影響の大きかった「洗濯」や「入浴」への対応については、停電エリア外（電気が復旧しているエリア）への地縁・血縁が重要であったことから、居住地よりもやや遠い知人・親戚等と日頃からのつながりをもっておく必要があることが示唆される。また、前述したように、自由回答の中から、太陽光発電システムや自動車からの電気供給によって対応していた被災者が一定数存在していたことは特筆すべき事項である。このような代替的な電気供給の仕組みが、被災生活において果たす役割は大きいと考えられる。また、料理への対応について年代

間で方法に差が見られた点については、「年代」ではなく「世代」の差である可能性が十分に考えられる。本調査結果は、ライフライン停止状況下の中でも、それに代わる手段によって対応できるという文化（災害文化の一部）が徐々に衰退していく可能性を示唆している。

参考文献

- 1) 塩野計司，宮野道雄，小坂俊吉：地震による生活支障の評価とその応用（1）－評価指標の構成と1995年兵庫県南部地震での事例調査－，自然災害科学，Vol. 19，No. 2，pp. 241-256，2000.
- 2) 佐藤翔輔，塩野計司：地震によるライフライン停止と住宅損傷を考慮した短期的避難需要の評価モデル－生活支障の計量評価を利用した震害波及過程の記載－，地域安全学会論文集，No. 5，pp. 299-308，2003.
- 3) 株式会社サーベイリサーチセンター：北海道胆振東部地震における大規模停電などに関するアンケート，11p.，2019.

企業活動への影響

Impacts on Business Activities

梶谷 義雄*¹, 黒田 望*², 妹尾淳史*², 多々納 裕一*³

Yoshio KAJITANI, Nozomu KURODA, Atsushi SENOO, Hirokazu TATANO

This report summarized the impacts of Typhoon Faxai (2019) on business activities in Chiba prefecture, Japan. The typhoon induced a long-term power outage (around two weeks at maximum) in the Bousou Peninsula in Chiba. In addition, other typhoon and heavy rains also hit the same region in the following month. Our post-disaster business survey clarifies the sizes of damages in an industrial sector, including inventory losses due to the power outage. As a result, it is shown that 77% of damage costs stem from facility damages and 6% from inventory losses due to the outage in our samples. These estimates should be refined by analyzing business interruption losses which would be 50% additional costs at maximum up to the end of 2019 fiscal year.

Keywords : *industrial sector, economic impacts, typhoon, power outage, strong winds*

1.7.1 はじめに

令和元年9月5日発生した房総半島台風(台風15号)は、千葉県南部に位置する房総半島一帯の企業活動に影響を及ぼした。建屋の損壊や設備の被害だけでなく、長期的な停電による影響も大きかったと考えられる。その後も10月12日に伊豆半島に上陸した令和元年東日本豪雨(台風19号)と低気圧等による大雨(10月24日~10月26日)によって、立て続けに影響を受けた企業も存在し、地域経済活動への影響はさらに大きくなった。9月の千葉県の鉱工業生産指数(季節調整済み)は、前月比3.4%減少し、消費増税の影響も大きい。その後も8月の生産水準には回復していない(確認範囲:2019年12月迄)¹⁾。3件の災害による千葉県の商工業(中小企業)への被害額は305億7200万円と推計されている²⁾。また、農林水産業への被害は最も甚大であり、被害額は752億5900万円にのぼった³⁾。観光業への影響も大きく、県全体における2019年9月の観光施設(43施設)の入込客数は29%、宿泊施設(24施設)の宿泊客数は9.5%(対前年同月比)減少した。特に、南房総地域(袖ヶ浦市や木更津市以南を中心とする地域)の被害は大きく、入込客数が49%、宿泊客数が33.6%と大幅に減少している⁴⁾。

以降では、著者らが実施した企業調査の一次集計結果に基づき、令和元年の一連の風水害がもたらした千葉県の企業活動への影響について報告する。とりわけ、今回の風水害の特徴ともいえる房総半島台風による長期停電の影

*1 香川大学創造工学部創造工学科 教授・工博 Prof., Dept. of Engineering and Design, Kagawa University, Dr.Eng.

*2 京都大学大学院情報学研究科 大学院生・学士(工学) Grad. Student, Graduate School of Informatics, Kyoto University, B.Eng.

*3 京都大学防災研究所 教授・工博 Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr.Eng.

響、ならびに異なる風水害毎の影響の大きさに関する規模感について焦点をあてながら集計を行った結果について紹介する。

1.7.2 房総半島地域における調査対象企業の概要

事業所を対象とした調査は、2020年2月1日から3月1日にかけて実施した。対象地域は市区町村別の建物被害発生状況から絞り込み、562事業所（回収率約8.5%）からの回答を得た。回収率には含めていないが、電話での「被災なし」との回答も多く、「被災状況は同地区内においてもまばら（木更津市の事業所等）」となっているような地域も多いと考えられる。10件以上の事業所から回答のあった市町村は、回答数の多い順に南房総市（72件）、市原市（64件）、茂原市（55件）、木更津市（29件）、多古町（20件）、香取市（20件）、東金市（20件）、富津市（20件）、鋸南町（17件）、八街市（16件）、大網白里市（16件）、旭市（14件）、山武市（14件）、匝瑳市（12件）、鴨川市（11件）、となった（地域不明は50件以上）。図1.7.1は、業種別の回答事業所の従業員数のシェアを経済センサスデータ¹⁾と比較したものになる。センサスでは、対象地域の従業員数は425177人となり、これは千葉県全体の約20%に相当する。対して、回答を得た事業所の従業員数は11021人であり、抽出率は2.59%となる¹⁾。アンケートでは、センサス上のシェアの大きな産業種別から回答が得られているが、食品加工業、化学工業、非鉄金属、金属製品産業をはじめ、製造業のウェイトが占める割合はセンサスに比べて大きくなっている。

1.7.3 被害状況に関する集計結果

各事業所の被害状況については、建物や設備などの直接被害の有無、操業能力や売上の回復状況、停電を含めた回復に影響を与えた要因等の調査を行った。直接被害については、被害を受けた風水害の種別だけでなく、建物の被災度判定、被害を受けた設備の種類等についても回答をいただいた。表1.7.1に風水害種別の直接被害ならびに平均操業停止日数を示す。9月に発生した房総半島台風の影響が最も大きく、直接被害の件数や操業停止日数が最も

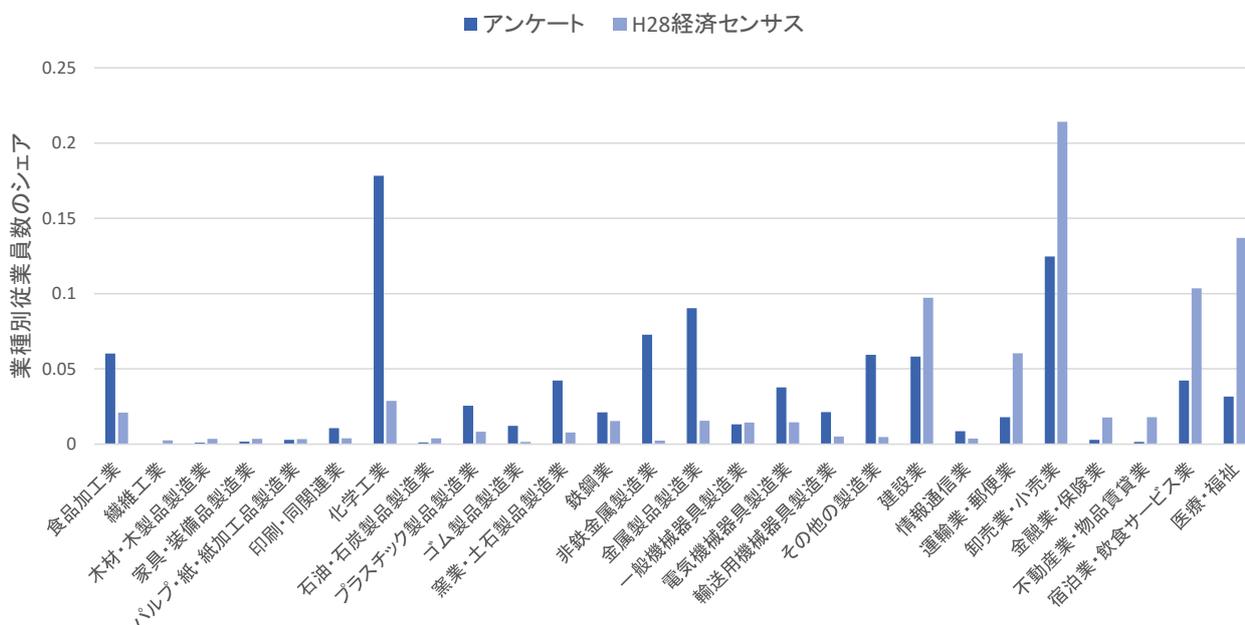


図 1.7.1 業種別従業員数のシェアの比較（対象市町村限定）

¹⁾ センサスでは市原市と木更津市をあわせて対象地域の3割を超える従業員数となるが、アンケートではそのウェイトは低く、より被害の集中している房総半島南部地域からの回答が多いといえる。

大きい。直接被害は、建物の被害が多くなっており、一部損壊が全災害を含めて319件、半壊以上は49件となる。特に、一部損壊の建物を中心に、屋根（268件）、壁（168件）、窓ガラス（151件）と非構造部材の被害件数が多くなっている。東日本豪雨と低気圧等による大雨に関しては、東日本豪雨の方が若干直接被害を受けた事業所数が多いが、平均操業停止日数は低気圧等による大雨の方が長い結果となった。浸水を受けた事業所は、雨の吹込みによる事業所内の冠水なども含めて、全ての災害をあわせて93件あったが、このうち53件は低気圧等による大雨において発生していることが、操業停止の長期化に影響を及ぼしている要因と考えられる。なお、平均操業停止日数は、一部事業の操業を開始するまでの期間を表し、操業能力が災害前の状態に回復する期間は製造業で17.7日、非製造業で17.7日となる（未復旧は除く）。完全復旧にはより長い日数を要している事業所が多い。

表1.7.2は、各事業所がそれぞれの風水害によって被害を受けたかについて集計を行った結果を示す。ここでは直接被害がなくても売上げの低下などの間接的な被害を受けた災害も対象となる事業所に被害をもたらしたものと集計している。被災パターンは様々であり、各災害の組み合わせによって各事業所が複雑な影響を受けている可能性が高い。特に、房総半島台風による影響を受けた事業所429件のうち約4割に相当する188件において、その後の風水害による被害も受けている。

図1.7.2は、回答を得た全事業所の被害額について、復旧費用等の項目別にシェアを算出した結果を示す。ここでは売上げの減少は含んでいない。本図より、建物や設備の復旧費用が大部分を占めていることが分かる。何らかの損失が発生した事業所を対象に、1件当たりの建物ならびに設備の復旧費用を推計すると、製造業で890万円、非製造業で764万円となった²。復旧資金の調達に影響があった事業所は56件存在し、操業状態が元に戻っていない

表 1.7.1 風水害別の直接被害と平均操業停止日数³

風水害名	直接被害のあった事業所	平均操業停止日数
房総半島台風 (①)	396	7.83
東日本豪雨 (②)	144	1.98
低気圧等による大雨 (③)	121	3.26

表 1.7.2 複数の風水害による被災パターン別の事業所の件数

被災パターン	件数
房総半島台風 (①) のみ	241
東日本豪雨 (②) のみ	14
低気圧等による大雨 (③) のみ	22
①と②	81
①と③	41
②と③	7
①, ②, ③全て	66
大きな被害なし	89

²千葉県が中小企業を対象とした調査²⁾では、南房総市・鋸南町で1件あたり482万円となっている。被害を受けた事業所数は18658件と推計されている。

³ その他の図表についても同様であるが、2020年3月20日時点の原データの集計結果であり、回答単位の間違い等の見直しにより数字は変化する可能性がある。

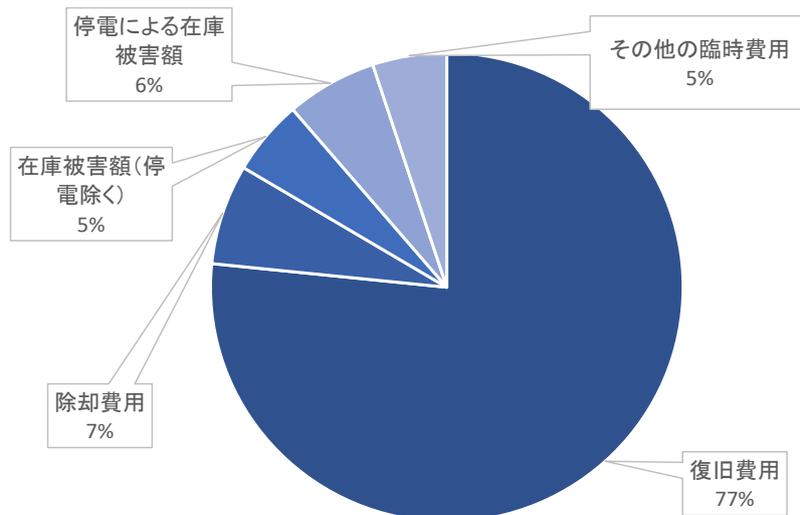


図 1.7.2 直接被害額と災害後の対応費用の内訳 (%)

事業所も存在する。また、屋根の修理などの専門業者が不足しており、109 件の事業所において修理等が滞った（ている）ことが報告されている。

復旧費用や除却費用を除くと、停電による在庫被害額が全体の 6%と大きくなる。本調査では、368 件の事業所において停電の被害が報告されており、平均停電時間は 101 時間と長い。在庫被害の大きさは、業態、停電時間、気温によって大きく異なることが予想されるが、本調査では宿泊・飲食サービス業（在庫被害率 58.9%）、卸売・小売業（同 22.4%）、食品加工業（同 20.2%）などにおいて、被害件数と被害額が大きくなる。2018 年に発生した北海道胆振東部地震における停電被害においても同業種において同様の被害が発生しており、一般的な傾向といえる。なお、売り上げの減少額は調査時点までの集計で、直接被害と臨時費用の合計の 51%程度になっており、被害額はさらに膨らむことになる。

その他、被害額や復旧日数などの集計結果では分からない、より具体的な企業の被害ならびに災害対応事例の一部を表 1.7.3 に示す。基本的には 9 月の房総半島台風時の企業の対応となるが、1 番目の事例についてのみ、3 件の風水害による被害を被った事業所（食品製造業）を対象としている。この事例では、強風による被害とその復旧にあたり、業者や資材の入手が困難であったため、操業能力の回復に長期間要している。2 番目の事例（その他の製造業）では、停電の解消は 4 日後となったが、電力供給が復旧した後も設備の点検に時間を要し、週末を挟んで操業までに 1 週間かかっている。このような災害対応は、比較的多くの事業所で直面したことが予想される。3 番目の事例（宿泊・飲食サービス業）は停電に伴う在庫の被害事例となるが、道路網の混雑によって応急対応が阻害されたことが報告されている。最後の事例においても、道路が不通となっている山間部に近い地域のケースであるが、停電が 2 週間続いただけでなく、通信にも 1 ヶ月程度の障害が発生しているなど、操業において困難な状況が発生したことがうかがえる。その他の事例においても、各企業が直面した被害状況は様々であるが、建物や設備の被害だけでなく、停電がどの時点で解消したかや通信・道路などのその他のインフラの復旧状況が、在庫被害や操業停止日数を決める大きな要素となっている。

表 1.7.3 各事業所の被害・復旧の概要

	業種	被害・復旧の概要
1	製造業（食品）	強風による被害が多発した。外周フェンス・物置小屋等の倒壊，飛散。倒木，シャッター全壊，一部電源喪失。早期復旧を目指したが，復旧業者多忙，資材入手困難などにより完全復旧までに4か月強を要した。
2	製造業（その他）	初日は，出勤時の段階で停電，工場機能は不能となる。全員の安否確認後，被害状況を確認し，清掃作業。翌日に発電機をリースし，事務所機能のみ回復（電話は使用不可）。4日後に電気が回復。電気ヒーターの停止により温度回復を待つてからの動作確認となり，試し運転・製造物の確認が完了したのが夕方。土日を挟んで1週間後より通常営業開始。
3	非製造業（宿泊・飲食）	停電により商品食材がダメになった。冷蔵庫にドライアイスを入れ対応しようとしたが，道路の混雑により氷店にドライアイスが届かず対応することが難しかった。
4	非製造業（卸売・小売）	倒木による道路復旧は地元住民と3日かけて自力で復旧した。停電の復旧に2週間かかり，通信機能の復旧には，1か月程度かかった。1か月間，携帯電話のみの営業となり，大変苦労した。

1.7.4 まとめ

本節では，房総半島台風を中心に令和元年の風水害による千葉県企業の企業活動への影響について，現時点での整理を行った。その後発生した東日本豪雨と低気圧等による大雨を含めた複数の風水害が同地域に被害を及ぼしたことや同時期の消費増税の影響もあり，各災害の実態についてはアンケート調査等を用いたミクロな分析が必要となる。一次分析に留まるが，事業所を対象としたアンケート調査からは，一連の風水害による被害規模，停電による在庫被害などの被災実態が明らかとなった。今後の課題として，今回の災害から得られた教訓を整理する共に，風速，浸水状況，業態，事業所規模などを踏まえ，被害発生の要因や回復特性を明らかにしていくことが重要となる。

謝辞

ヒアリングやアンケート調査にご協力いただきました千葉県の事業所の関係諸氏に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 千葉県・総合企画部：千葉県鉱工業指数（平成31年/令和元年），
<https://www.pref.chiba.lg.jp/toukei/toukeidata/koukougyou/h31/h31.html#monthly>（閲覧日：令和2年3月19日）。
- 2) 千葉県・商工労働部：台風15号，台風19号，10月25日の大雨の影響による中小企業被害について，
<https://www.pref.chiba.lg.jp/bousai/bousai/documents/saitaihonbu19.pdf>（発表日：令和元年11月13日）。
- 3) 千葉県：第3回 令和元年房総半島台風・東日本台風及び10月25日の大雨千葉県災害復旧・復興本部会議資料，
https://www.pref.chiba.lg.jp/bousaik/fukkyu-fukkou/documents/kaigisiryou_200319.pdf（開催日：令和2年3月19日）。
- 4) 千葉県・商工労働部観光企画課：平成元年9月における観光客の入込状況について，
<https://www.pref.chiba.lg.jp/kankou/toukeidata/kankoukyaku/r1sepirikomi.html>（発表日：令和元年11月29日）。
- 5) 千葉県・総合企画部：平成28年（2016年）経済センサス—活動調査結果<確報>，
<https://www.pref.chiba.lg.jp/toukei/toukeidata/keizai-census/28katsudo-kakuhou.html>（閲覧日：令和2年3月20日）。

電柱倒壊・損傷と無電柱化に対する受容意識への影響

Collapse / Damage of Utility Poles and
Social Acceptance of Undergrounding and Utility Pole Removal Project大庭 哲治*¹*Tetsuharu OBA*

The purpose of this study is to examine the changes in the social acceptance of Chiba prefecture citizens and the pre- and post-differences after grasping the collapse / damage situation of utility poles caused by Typhoon No.15 in 2019. For this purpose, this study conducted a literature survey and a web questionnaire survey. As a result, it was confirmed that utility pole damage was severe on the east side of this Typhoon passing through Tokyo Bay, and that the overhead line was severely damaged, while the underground line was hardly damaged. In addition, the proportion of Chiba residents who think it is necessary to promote the maintenance of utility poles is increasing by about 20% before and after the disaster, and about 60% of respondents are considering to promote the undergrounding and utility pole removal project as the most effective countermeasure in order to prevent the recurrence of large-scale power outages.

Keywords : *collapse / damage of utility poles, social acceptance, undergrounding and utility pole removal project*

1.8.1 はじめに

2019年9月9日の未明から昼にかけて関東地方を通過した令和元年台風15号は、強い風雨による家屋被害や倒木、大雨や高波による浸水等の被害のみならず、各種ライフラインにも大きな被害が及び、千葉県を中心に大規模な停電が発生するなど、甚大な被害と大きな混乱をもたらしたことは記憶に新しい。特に、大規模停電が長期化した理由の1つとして、各地で発生した電柱の相次ぐ倒壊や損傷の被害とその復旧の遅れが指摘されている¹⁾。

約3,500万本もの電柱が林立しているわが国では、毎年約7万本のペースで電柱が増加を続けており²⁾、無電柱化の進捗率は、欧米諸国や近隣のアジア各国と比較しても大きく遅れている。近年、地方自治体が取り組む無電柱化に対して、国による後押しが着実に図られつつあるものの、無電柱化を推進していく上では、低コスト化手法の早期実用化とともに、地域住民の無電柱化に対する理解と関心を深め、社会的受容性を高めていく必要がある。

無電柱化に対する社会的受容については、これまで、学術研究³⁾のみならず、国・地方自治体が実施する意識調査⁴⁾などを通じて、その把握が試みられてきた。しかしながら、これらの多くは、各地域を対象に、無電柱化に対する平時の社会的受容性を1回限りの調査で把握することに留まっている。平時ではない災害を経験した広域の地

*1 京都大学大学院経営管理研究部 准教授・博士 (工学) Assoc. Prof., Graduate School of Management, Kyoto University, Ph.D.(Eng.).

域住民に対して、大規模停電や電柱倒壊・損傷による被災経験、さらには関連報道への接触程度の違いが、無電柱化に対する受容意識にどのような影響を及ぼしているのか、被災前後でどのように受容意識が変化しているのかについては、明らかにされていない。

そこで本稿では、令和元年台風15号を対象に、千葉県内で発生した電柱倒壊・損傷の被害状況をデータや文献に基づいて客観的に把握した上で、甚大な被害を受けた千葉県民を対象に、Webアンケート調査を通じて、無電柱化に対する受容意識と被災前後での変化を定量的に明らかにすることを目的とする。

1.8.2 台風15号による電柱倒壊・損傷の被害状況

(1) 電柱倒壊・損傷の被害状況

経済産業省の電力レジリエンスワーキンググループが2020年1月にとりまとめた“台風15号の停電復旧対応等に係る検証結果取りまとめ⁵⁾”によれば、表1.8.1に示すように、東京電力管内で計1,996本の電柱が折損・倒壊・傾斜等の損壊被害を受けており、そのうち約88%が千葉県内に集中している。これらの損壊の原因としては、倒木・建物の損壊、飛来物、地盤の影響による二次被害が多く、特に多くは倒木・建物の損壊であることがわかる。また、表1.8.2に示すように、架空線と地中線での被害状況を比較すると、架空線の被害が甚大である一方で、地中線の被害は、整備率が架空線と比較して低いことを差し引いても、地上機器1台のみとほぼ被害を受けていないことがうかがえる。このような結果は、2018年9月に近畿地方で甚大な被害をもたらした台風21号においても、同様の結果を示している。

表 1.8.1 電柱損壊の原因

エリア		栃木	群馬	茨城	埼玉	千葉	東京 (23区)	東京 (多摩)	神奈川	山梨	静岡	合計
損壊数		9	0	94	9	1,750	15	3	59	2	55	1,996
電柱損壊 の原因	倒木・建物の倒壊	9	0	57	8	1,311	6	3	37	2	44	1,477
	飛来物	0	0	9	0	263	3	0	6	0	0	281
	地盤の影響	0	0	28	1	176	6	0	16	0	11	238

出典：経済産業省(2020)電力レジリエンスワーキンググループ資料

表 1.8.2 電気設備の被害状況

架空線			地中線		
支持物 (折損・倒壊等)	架空線 (断線・混線等)	変圧器 (損傷・傾斜等)	地上機器 (浸水等)	地上機器 (損傷・傾斜等)	ケーブル (損傷等)
1,996本	5,529経間	431台	0台	1台	0m
《参考：関西電力 台風21号による配電設備被害》台風21号対応検証委員会報告(平成30年12月13日)抜粋					
支持物	架空線	変圧器	地上機器	地上機器	ケーブル
1,343本	4,914経間	362台	38台	0台	544m

出典：国土交通省(2019)無電柱化事業説明資料

(2) 千葉県内の被害状況

電柱の損壊数が最も多い千葉県内の被害状況について、その詳細を図1.8.1に示す。図1.8.2に示すような電柱の倒壊・損傷が各地で発生しており、特に、東京湾を通過した台風15号の進路東側(安房, 君津, 千葉・市原, 印旛,

香取地域)において、大きな被害が集中していることがうかがえる。

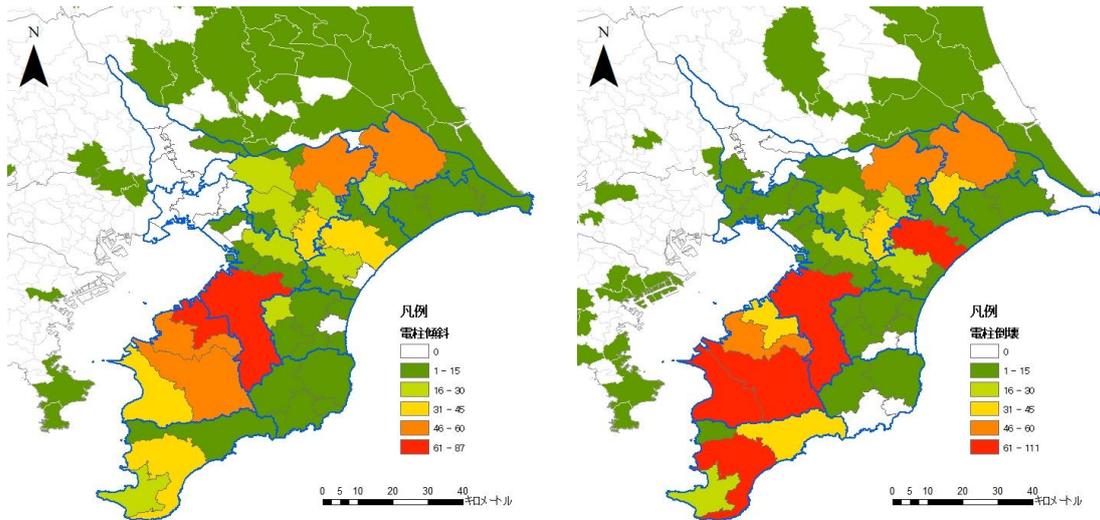


図 1.8.1 電柱の被害状況 (左：傾斜, 右：倒壊)

出典：東京電力パワーグリッド(株)による提供データを独自集計・表示

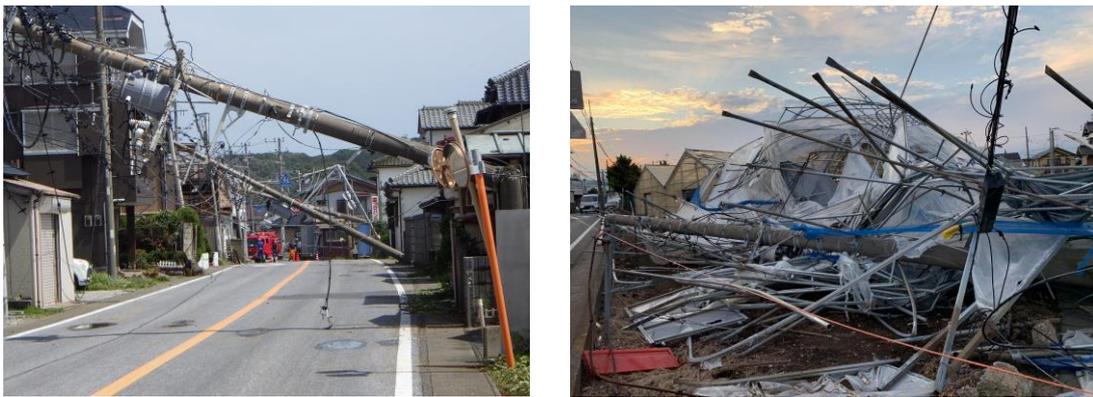


図 1.8.2 電柱の倒壊・損傷 (左：館山市, 右：船橋市)

出典：国土交通省, NPO 法人電線のない街づくり支援ネットワークより提供

1.8.3 台風 15 号による被災経験を踏まえた千葉県民の無電柱化に対する受容意識の変化

(1) Web アンケート調査の概要

(株)クロス・マーケティングの千葉県内に居住する登録モニターに配信を行う形式で、Web アンケート調査を実施した。調査期間は、2020 年 3 月 4 日(水)から 3 月 8 日(日)の 5 日間で、20 歳以上 80 歳未満の男女を対象に、人口構成比と地域特性を踏まえ、11 地域区分で割り付けを行うことで、有効な 2,500 件の回答を得ている。調査内容は、1)個人属性、2)停電・通信障害及び電柱倒壊・損傷の被害状況、3)無電柱化に対する受容意識の 3 つで大きく構成されている。

(2) 基礎集計の結果

2,500 件の回答者属性を表 1.8.3 に示す。性別では男性が 64.2%、年代別では 50 代が 27.4%で、それぞれの属性において、高い構成比率を示している。

表 1.8.3 回答者属性

属性名				属性名			
	属性名	回収数	構成比(%)		属性名	回収数	構成比(%)
全体		2,500	—	全体		2,500	—
性別	男性	1,604	64.2	世帯人数別	1人	372	14.9
	女性	896	35.8		2人	843	33.7
年代別	20代	122	4.9		3人	653	26.1
	30代	318	12.7		4人	436	17.4
	40代	592	23.7		5人	139	5.6
	50代	684	27.4		6人以上	57	2.3
	60代	510	20.4	世帯年収別	300万円未満	418	16.7
	70代	274	11.0		300~500万円	497	19.9
職業別	会社員	965	38.6		501~700万円	367	14.7
	公務員	89	3.6		701~1,000万円	395	15.8
	自営業	195	7.8		1,001~1,500万円	182	7.3
	主婦(家事専業)	289	11.6		1,501~2,000万円	40	1.6
	学生	18	0.7	2,001万円以上	19	0.8	
	パート・アルバイト	350	14.0	わからない・答えたくない	582	23.3	
	無職	518	20.7	住宅形態別	持家(戸建)	1,637	65.5
	その他	76	3.0		持家(共同住宅)	312	12.5
	居住地域別	千葉市・市原市	360		14.4	賃貸(戸建)	75
葛南地域		360	14.4		賃貸(共同住宅)	403	16.1
東葛飾地域		360	14.4		寮・社宅	27	1.1
印旛地域		360	14.4	その他	46	1.8	
香取地域		50	2.0	居住年数別	5年未満	372	14.9
海匝地域		150	6.0		5-10年未満	330	13.2
山武地域		200	8.0		10-15年未満	352	14.1
長生地域		150	6.0		15-20年未満	319	12.8
夷隅地域		50	2.0		20-25年未満	296	11.8
安房地域		100	4.0		25年以上	831	33.2
君津地域		360	14.4				

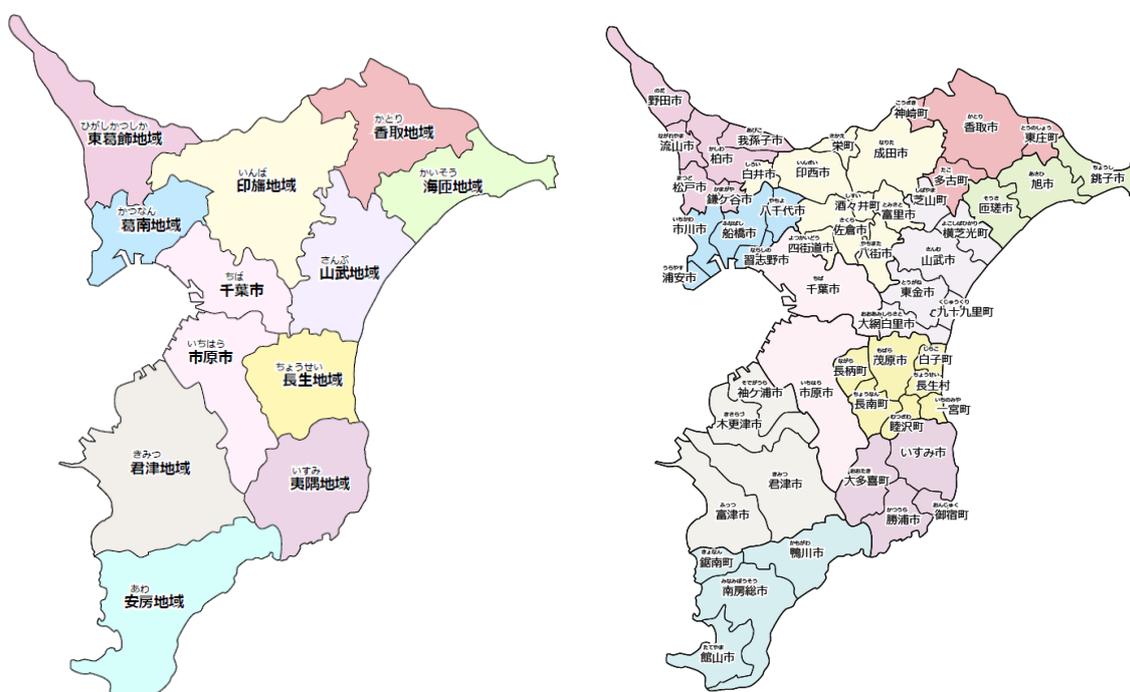


図 1.8.3 地域割付区分

出典：千葉県 <https://www.pref.chiba.lg.jp/kouhou/kids/chi-bakun/sorakara/shichouson.html>

停電被害，通信障害，電柱損壊の被害の有無をクロス集計と併せて図 1.8.4，図 1.8.5 に示す。回答者の約 48%が停電被害，約 33%が通信障害の被害を受けていることがわかる。また，回答者の約 13%の住まい周辺において，電柱損壊の被害がみられる。

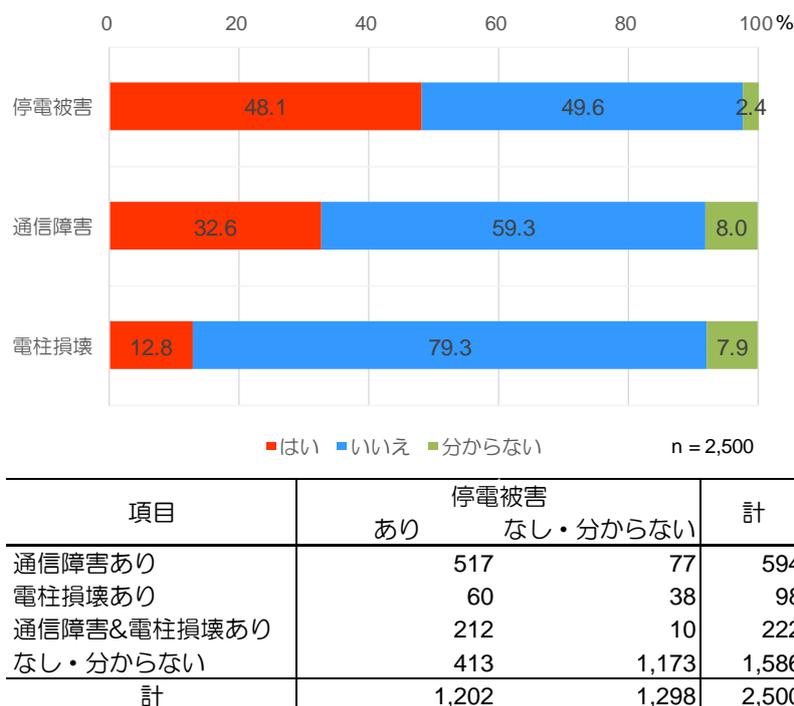


図 1.8.4 停電被害，通信障害，電柱損壊の被害有無

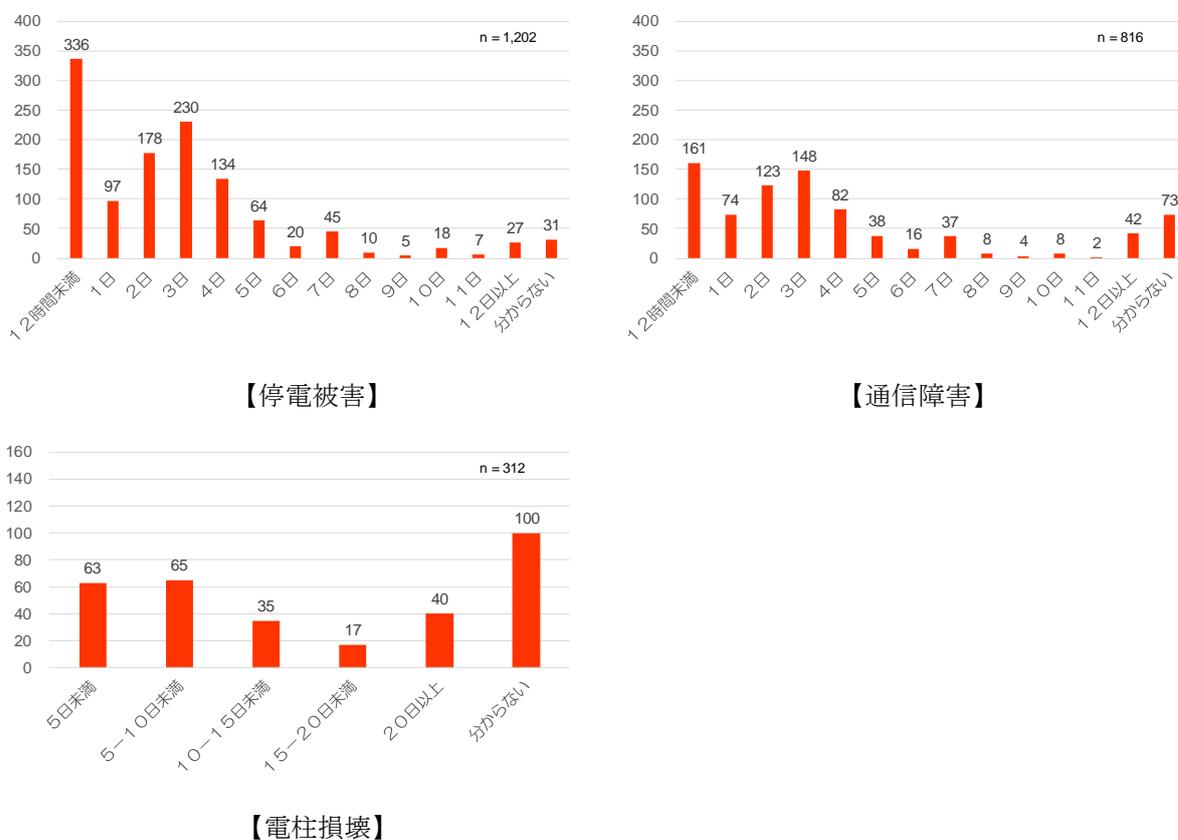


図 1.8.5 停電被害，通信障害，電柱損壊の復旧期間の分布

再発防止に有効な対応策として、回答者が最も有効と考えている対応策、次いで有効と考える対応策を図 1.8.6 に示す。最も有効と考えている対応策としては、“無電柱化”が全サンプル 2,500 のうち 62.3%を占めている。続いて、次いで有効と考えている対応策としては、“電柱・鉄塔の強度強化”が 24.8%，次いで、“電源等の分散化”が 21.4%と続いている。

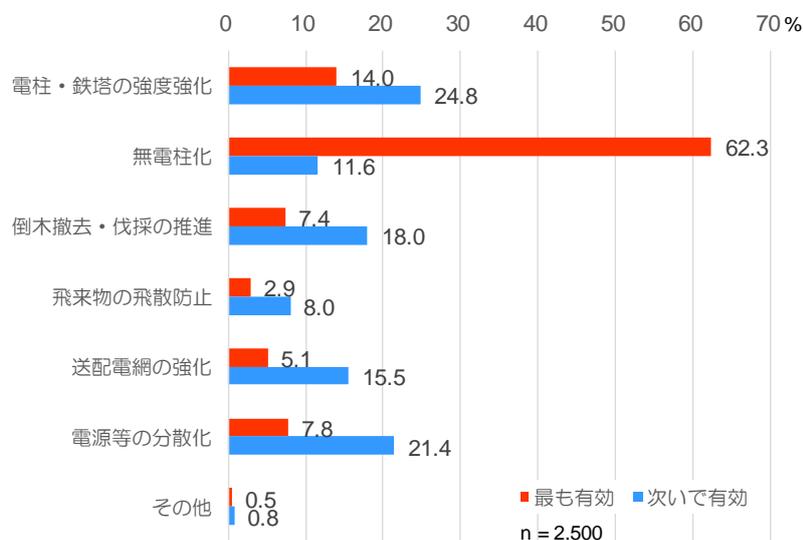


図 1.8.6 再発防止に有効な対応策（最も有効，次いで有効）

回答者の無電柱化に対する認知度を図 1.8.7 に示す。“言葉・内容ともによく知っている”が 42.5%，“少し知っている”が 39.7%と続いており，回答者の 8 割強が無電柱化を少なからず認知していることがうかがえる。

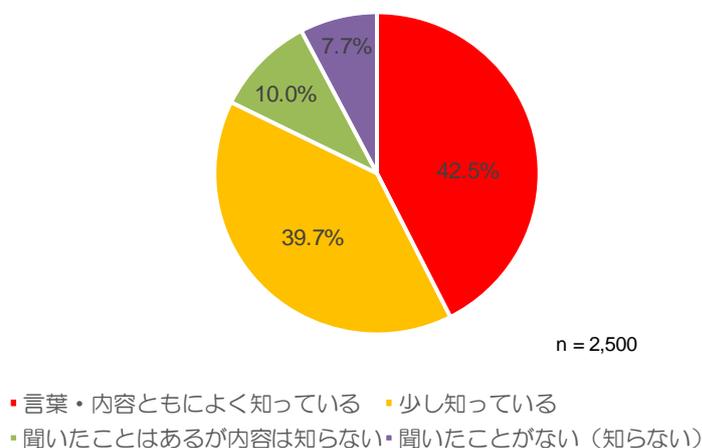


図 1.8.7 無電柱化の認知度

被災以降の無電柱化に関する情報の接触機会の有無と接触媒体を図 1.8.8 に示す。約 27%の回答者が無電柱化に関する情報に接しており，接触媒体の内訳としては，テレビが最も多く，次いで，インターネット，新聞の順となっている。

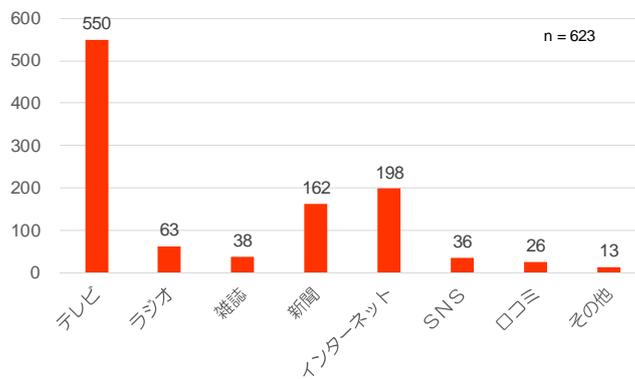
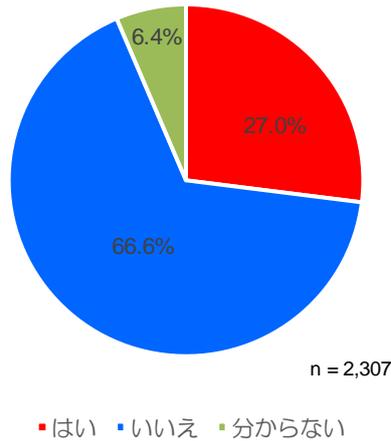


図 1.8.8 被災以降の無電柱化に関する情報の接触機会の有無（下図は複数選択可）

被災前後における無電柱化整備推進の必要性と変化度合いを図 1.8.9 に示す。被災前は“極めて必要”が 9.2%，“必要”が 19.9%，“やや必要”が 20.8%で、半数近くの回答者が少なからず必要性を感じている。一方で、被災後は“極めて必要”が 25.7%，“必要”が 31.2%，“やや必要”が 16.1%で、少なからず必要性を感じる回答者が 2 割ほど増加している。特に、“極めて必要”は 16.5 ポイントの増加，“やや必要”は 11.3 ポイントの増加である。

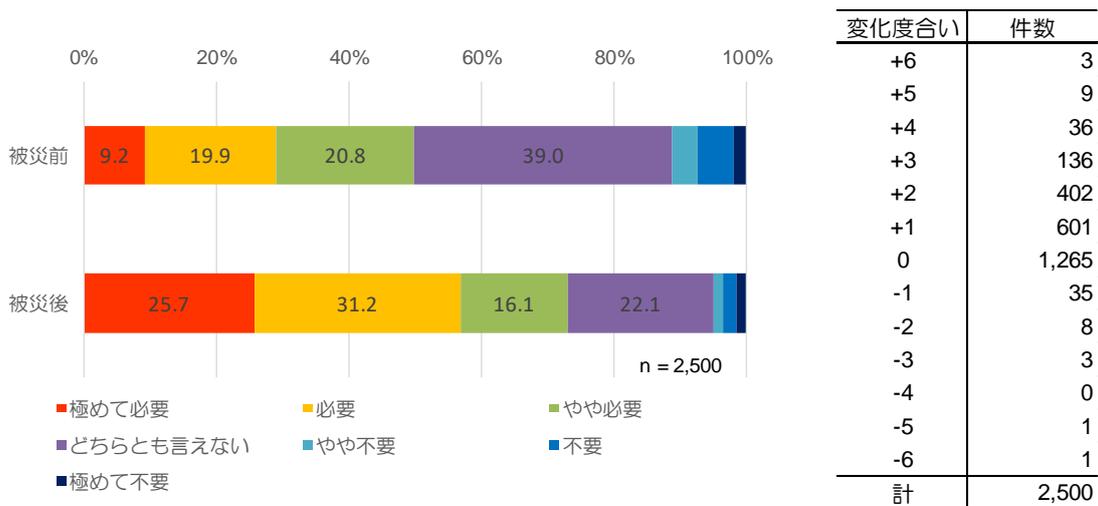


図 1.8.9 被災前後における無電柱化整備推進の必要性と変化度合い

被災前後における無電柱化整備推進の必要性について、停電被害ありの回答者となし/分からないの回答者間での比較を図 1.8.10, 図 1.8.11 に、電柱損壊ありの回答者となし/分からないの回答者間での比較を図 1.8.12, 図 1.8.13 に示す。

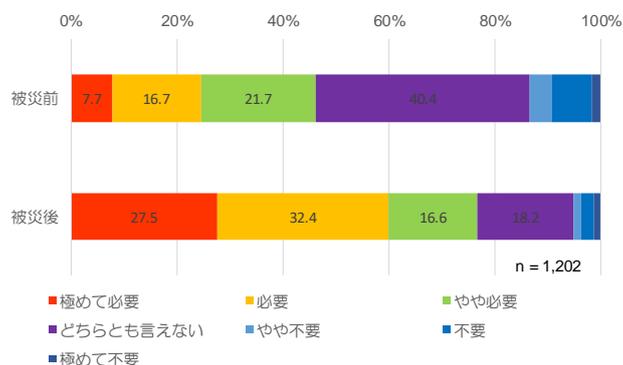


図 1.8.10 停電被害ありの回答者の必要性

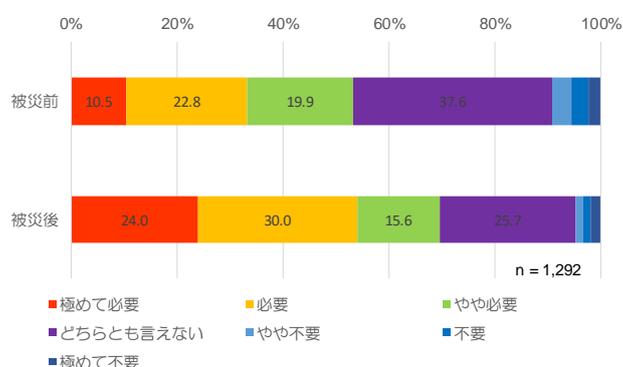


図 1.8.11 停電被害なし/分からないの回答者の必要性

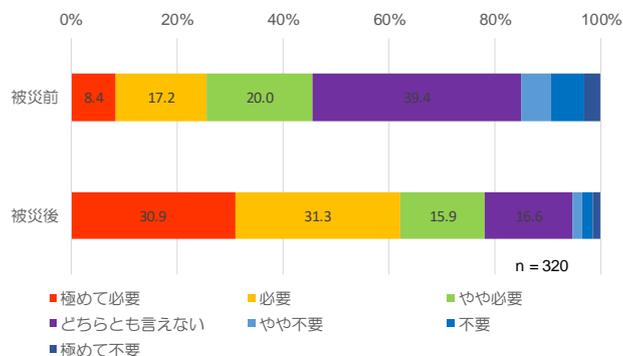


図 1.8.12 電柱損壊ありの回答者の必要性

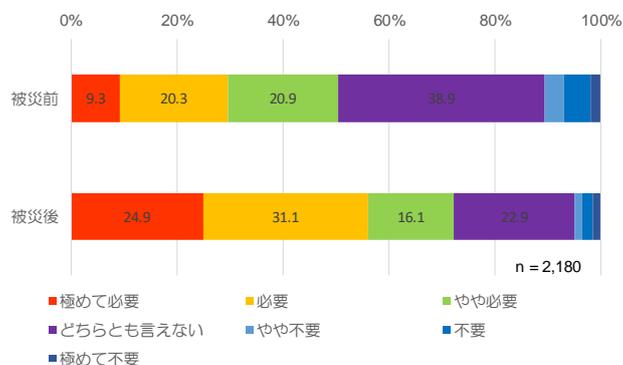


図 1.8.13 電柱損壊なし/分からないの回答者の必要性

また、情報接触ありの回答者となし/分からないの回答者間での比較を図 1.8.14、図 1.8.15 に、千葉県内の地域性を考慮して、千葉市・市原市の回答者と君津地域の回答者間での比較を図 1.8.16、図 1.8.17 に示す。

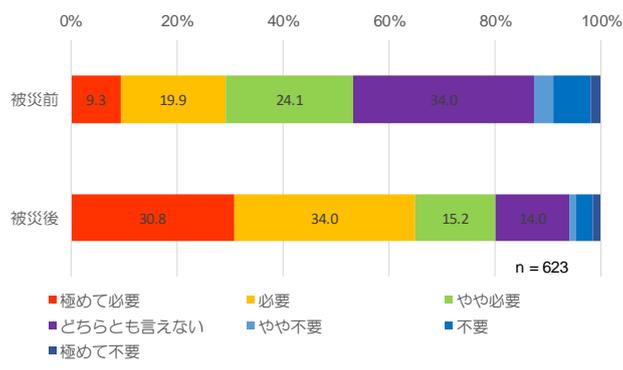


図 1.8.14 情報接触ありの回答者の必要性

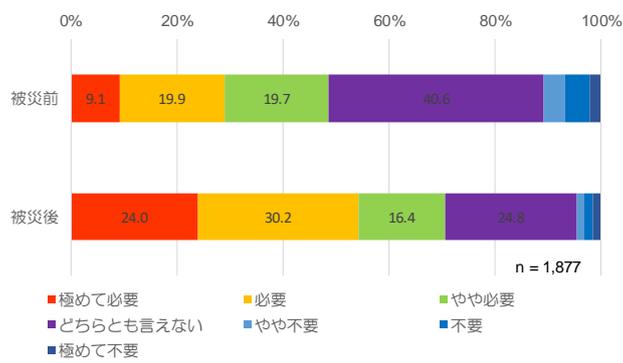


図 1.8.15 情報接触なし/分からないの回答者の必要性

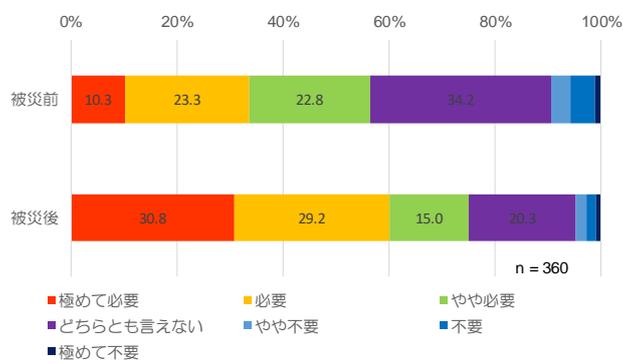


図 1.8.16 千葉市・市原市の回答者の必要性

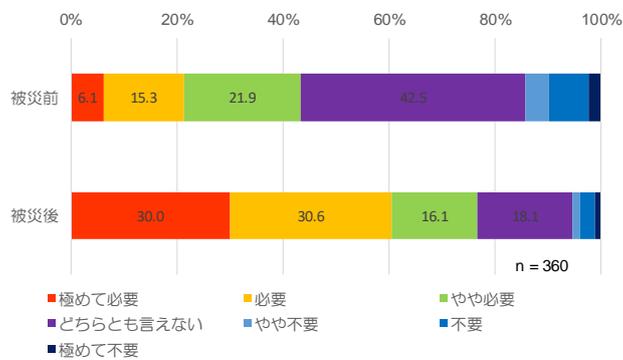


図 1.8.17 君津地域の回答者の必要性

無電柱化に期待する効果を図 1.8.18 に示す。期待する割合は“防災性の向上”(60.0%)，“ライフライン（電力・通信等）の安定供給”(58.1%)，“交通安全の向上”(44.0%)，“景観形成・美観向上”(37.4%)の順に続いている。

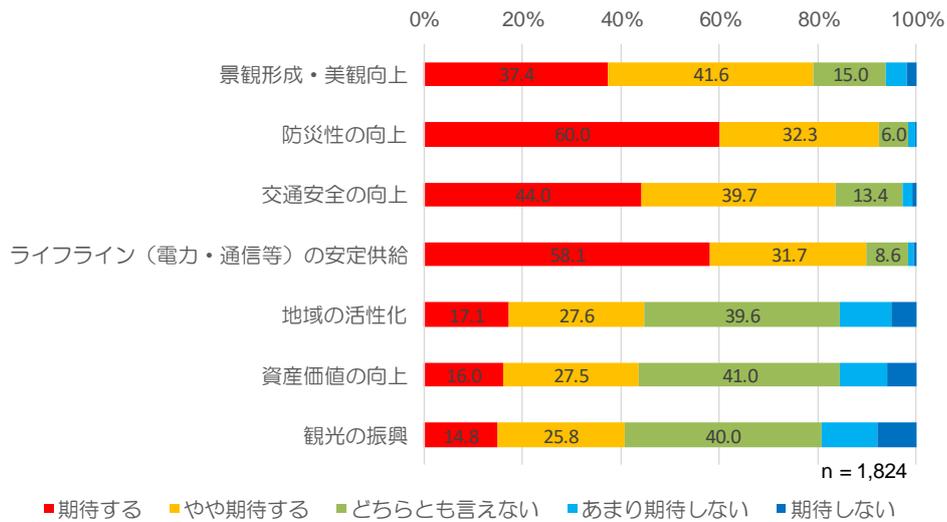


図 1.8.18 無電柱化に期待する効果

無電柱化整備を優先すべき道路を図 1.8.19 に示す。優先する割合は，“災害避難路”(52.9%)の割合が大きく、次いで，“歩行者・自転車通行量の多い道路”(38.5%)，“通学路”(36.7%)，“車両交通量の多い道路”(36.5%)，“幅が狭い道路”(34.9%)の割合が大きい。

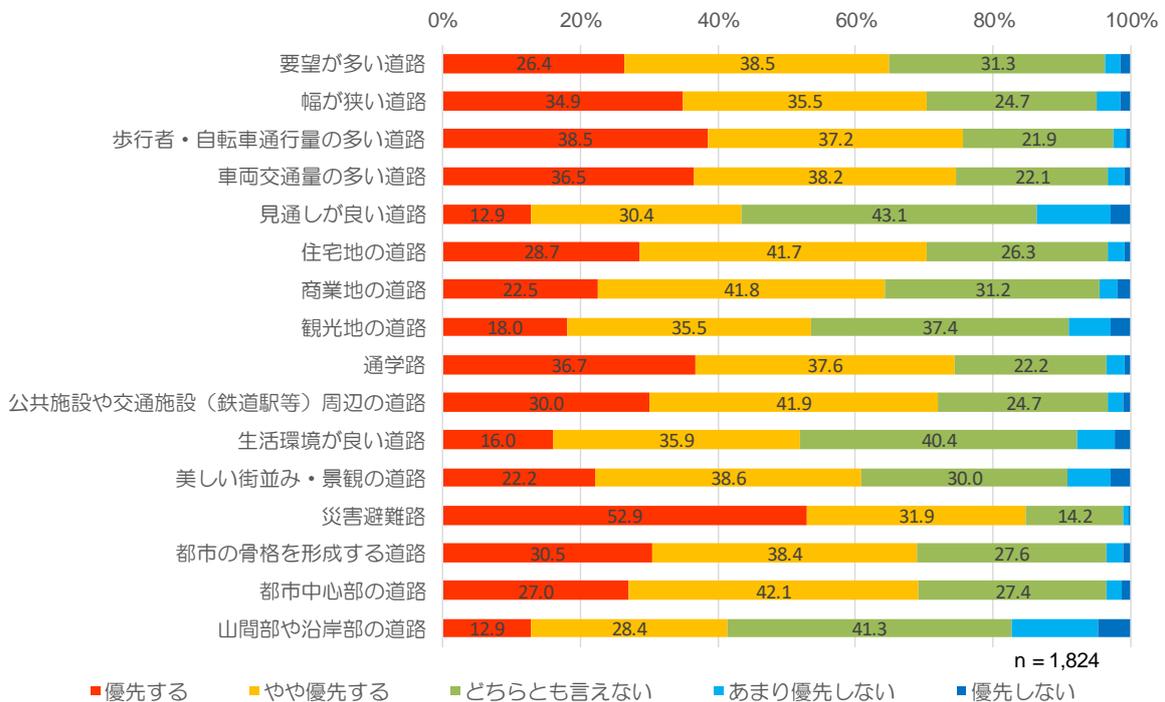


図 1.8.19 無電柱化整備を優先すべき道路

1.8.4 おわりに

本研究は、令和元年台風 15 号による電柱損壊の被害状況を把握した上で、千葉県民の無電柱化に対する社会的受容性と被災前後の受容性の変化を明らかにすることを目的に、文献調査ならびに Web アンケート調査を実施した。その結果、東京湾を通過した台風 15 号の進路東側で電柱損壊の被害が大きく、また、架空線の被害が甚大である一方で、地中線はほぼ被害を受けていないことを確認した。また、千葉県民は、無電柱化整備の推進を少なからず必要と感じている割合が、被災前後で 2 割ほど増加していること、さらには、約 6 割の回答者が大規模停電の再発防止に最も有効な対応策として、無電柱化を考えていることを明らかにした。

千葉県全体の無電柱化率は 1%程度（平成 29 年度末）で、全国平均にも届いていない⁶⁾。Web アンケート調査で明らかにした千葉県民の社会的受容性の高さを鑑みれば、千葉県内の無電柱化整備を推進してレジリエンス強化を図っていくことが求められる。なお、本稿では Web アンケート調査結果の基礎集計及びクロス集計に留まっているため、計量経済分析などの更なる分析を通じて社会的受容性の因果的要因を明らかにすることが今後の課題である。

謝辞

東京電力パワーグリッド株式会社配電部無電柱化推進グループの辻孝之氏、ならびに、国土交通省道路局環境安全・防災課の望月拓郎氏には、令和元年台風 15 号に伴う電柱倒壊・損傷に関するデータや電線類地中化に関するデータをご提供頂きました。また、NPO 法人電線のない街づくり支援ネットワーク事務局長の井上利一氏には、Web アンケート調査票の質問項目についての的確なアドバイスを頂きました。ここに深く謝意を表します。さらに、Web アンケート調査にご協力頂いた多くの皆様に、深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 経済産業省 資源エネルギー庁：「台風」と「電力」～長期停電から考える電力のレジリエンス, 2020-01-23
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/typhoon.html>
- 2) 国土交通省 電柱本数の推移 https://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/chicyuka/chi_13_03.html
- 3) 例えば、岡田英哲, 日比野直彦, 森地 茂：電線類地中化事業に対する周辺住民の意識と評価, 土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vo.45, 2012.6.
- 4) 例えば、国土交通省北陸地方整備局 <http://www.hrr.mlit.go.jp/road/mudenchu/enquete/index.html>
- 5) 経済産業省 電力レジリエンスワーキンググループ-台風 15 号の停電復旧対応等に係る検証結果取りまとめ, 2020.1. https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/resilience_wg/pdf/20200110_report_01.pdf
- 6) 国土交通省 http://www.mlit.go.jp/road/road/traffic/chicyuka/chi_13_02.html
- 7) 経済産業省 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会 令和元年度台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ-中間報告書, 2020.1. https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/tettou/pdf/20200121_report_01.pdf
- 8) NPO 法人電線のない街づくり支援ネットワーク：電柱のないまちづくり, 学芸出版社, 2010.
- 9) 小池百合子, 松原隆一郎：無電柱革命, PHP 研究所, 2015.
- 10) NPO 法人電線のない街づくり支援ネットワーク[編著]：無電柱化の時代へ, かもがわ出版, 2018.

台風 15 号の発生・発達における環境場の影響

Contribution of large-scale environments on genesis and development of Typhoon 1915

筆保 弘徳*1・及川 義教*2・永戸 久喜*3・嶋田 宇大*4・和田 章義*5・吉田 龍二*6・宮本 佳明*7

Hironori FUDEYASU, Yoshinori OIKAWA, Hisaki EITO, Udai SHIMADA, Akiyoshi WADA, Ryuji YOSHIDA, Yoshiaki MIYAMOTO

This study examined the contribution of large-scale environments on genesis and development of Typhoon Faxai (2019), using the best track, Early stage Dvorak analysis result, Japan Meteorological Agency-Typhoon genesis score and typhoon intensity forecast scheme based on statistical hurricane intensity prediction scheme. The environments for its genesis stage was associated with the easterly wave pattern with upper-cold low. Higher sea surface temperature and upper-ocean heat content contributed significantly into rapid intensification of Faxai during its development stage. The environment of small vertical shear contributed to less decaying process during its mature stage, resulting in intense Faxai while making landfall on Japan.

Keywords : *the contribution of large-scale environments, EDA, JMA-TGS, TIFS*

2.1.1 はじめに

2019 年台風 15 号 (T1915 と記す) は、観測史上最強クラスの勢力で日本に上陸し、千葉県を中心に関東に甚大な被害をもたらした。T1915 の発生から上陸するまでの特徴は以下の 3 点である。

- ① 発生期では、長い期間顕著に発達をせずに西進した
- ② 発達期では、水平サイズが小さい構造のまま北西進し、急速発達をした
- ③ 成熟期では、日本接近・上陸後も衰弱が顕著ではなかった

これらの特徴を持ち、T1915 は勢力が衰えることなく関東に接近・上陸したことで、甚大な被害が引き起こされた。

*1 横浜国立大学教育学部 准教授・理博	Associate Prof., Faculty of Education, Yokohama National University, Dr. Sci.
*2 気象庁アジア太平洋気象防災センター 予報官	Senior Scientific Officer, Tokyo Typhoon Center, Japan Meteorological Agency
*3 気象庁アジア太平洋気象防災センター センター長	Head, Tokyo Typhoon Center, Japan Meteorological Agency, Senior researcher, Typhoon Research Department, Dr. Sci
*4 気象庁気象研究所台風研究部 主任研究官・理博	Senior researcher, Typhoon Research Department, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Dr. Sci
*5 気象庁気象研究所台風・災害気象研究部第一研究室長・理博	Head, The First Laboratory, Department of Typhoon and Severe Weather, Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Dr. Sci
*6 コロラド大学ボルダー校 CIRES、研究員・理論博	University of Colorado Boulder, CIRES, Research Scientist II Dr. Sci
*7 慶応義塾大学、講師・理博	Assistant Prof. Faculty of Environment and Information Studies, Keio University, Dr. Sci

これらをもたらした要因は、台風の構造・強度変化をもたらす環境場と台風内部プロセスにある。

本研究は T1915 をとりまく環境場に注目する。特に、従来の研究による環境場の影響は定性的な考察にとどまっているが、本研究では定量的に示すことを目的とする。台風のライフサイクルに対する環境場の寄与を定量的に示す手法を確立することは、過去や将来の他の台風と比較するためにも有効となる。その目的のために、本研究はベストトラックと早期ドボラック法の結果、台風発生環境場診断手法 Typhoon Genesis Scores (TGS: Yoshida and Ishikawa 2013¹¹⁾) の気象庁 (Japan Meteorological Agency; JMA) 版である JMA-TGS と、統計力学的強度予報 Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS: DeMaria and Kaplan 1994²⁾) の気象庁版である気象庁強度予報ガイダンス Typhoon Intensity Forecast scheme based on SHIPS (TIFS: Yamaguchi et al. 2018³⁾; 嶋田と大和田 2019⁴⁾; Ono et al. 2019⁵⁾) を用いる。そして、T1915 の発生・発達・成熟期の環境場を定量的に示して、上記の特徴 3 点についての要因を明らかにする。

2.1.2 用いるデータと手法

本研究は、T1915 の位置と強度について、ベストトラックと気象庁が独自で開発した早期ドボラック法 (Early stage Dvorak Analysis; EDA) を用いる。気象庁気象衛星センターは、客観的に解析して発生した雲システムが台風へと発達するかどうかを判定する EDA を開発した (土屋他 2000⁶⁾)。そして、EDA は検証を重ねて改良された後 (上野 2002⁷⁾; 寺坂他 2007⁸⁾; Kishimoto 2007⁹⁾)、衛星台風解析業務が気象衛星センターから気象庁予報課に移管されたことに伴い、2007 年から現業でも利用されるようになった。現在の EDA は、発生初期の熱帯擾乱の解析 (中心位置・強度) 及び発達の可能性を判定する。ベストトラックで用いられるドボラック法 (Dvorak 1984¹⁰⁾) は、台風に発達する可能性がある雲域は、その台風になる約 1 日~1.5 日前に「活発な対流雲からなる低気圧性に湾曲した雲列や雲バンド」が形成され、この特徴を持つ雲システムを T 数 1.0 と定義している。具体的な T 数 1.0 の条件は、①雲システムは 12 時間以上持続していること、②中心位置 (Cloud System Center; CSC) の推定精度は直径 2.5 度以内でその CSC は現在時刻まで 6 時間以上継続していること、③CSC から概ね 2.0 度以内に -31°C 以下の濃密な雲域に存在し、この濃密な雲域の大きさは概ね直径 1.5 度より大きいことである。EDA では、この T 数 1.0 の 3 条件を 5 つの条件に分離し、T 数=0.0、0.5、1.0、1.5 に細分している。3 条件未満の場合は T 数=0.0、4 条件を満たす場合は T 数=0.5、5 条件を満たす場合は T 数=1.0、5 条件を満たし更に発達する場合は T 数=1.5 と解析される。EDA の時間間隔は 6 時間であり、ベストトラックの場合は日本接近時で 6 時間未満の時間間隔のデータもあるが、本研究では統一するためにベストトラックでも 6 時間間隔として用いる。

本研究では、T1915 の発生期の環境場を、気象庁版の TGS である JMA-TGS を用いる。気象庁予報部 (1990)¹¹⁾ や Ritchie and Holland (1999)¹²⁾ は、北西太平洋における台風発生をもたらす環境場には決まったパターンがいくつかあることを指摘している。Ritchie and Holland (1999) は、1984 年から 8 年間の TC 発生事例について、対流圏下層の東西風の水平風シアライン、東西風の合流域、モンスーンジャイア内、偏東風波動、先行台風により形成されるロスビー渦列の 5 つに分類し、そのパターンごとに合成図を作成して台風発生環境場の平均的な描像と統計値を明らかにした。さらに Yoshida and Ishikawa (2013) は、Ritchie and Holland (1999) の統計結果を基にして、熱帯低気圧発生環境場を診断する手法 TGS を開発した。この手法は、ある指標を設けて熱帯低気圧ごとの発生環境場パターンを定量的に見積もることができる。さらに、複合的なパターンのケースでも、それぞれの指標から割合で見積もることができる。JMA-TGS は従来の TGS とは異なり、EDA で最初に検出された時点の位置と時間に注目して、気象庁全球モデルの結果から台風発生環境場を準リアルタイムで診断する。

本研究では、T1915 の発生期から発達期の環境場の解析に TIFS の結果を用いる。TIFS についての詳細は第 2.3 章を参照されたい。

2.1.3 T1915 の強度変化の概要

ベストトラックによると、T1915 は9月4日18時(世界標準時)に南鳥島近海で台風の強度に達した(図2.1.1)。実況では9月5日15時に発生を発表している。EDAによると、台風となる前からこの熱帯低気圧は確認されていて、8月29日12時に日付変更線より東で熱帯低気圧 EDA024 (以降内容に合わせて EDA024 と T1915 を使い分ける)として初めて検出した。この EDA024 は、台風発生になるまで6日間も顕著な発達も衰弱もなかったことになる(特徴①)。Fudeyasu et al.(2020)¹³⁾によると、EDA で検出された熱帯低気圧の寿命は台風強度に到達する場合は1.4日、到達できずに消滅するもので1.2日なので、EDA024 は平均よりも異常に長く存在したことになる。また、衛星雲画像の解析(図略)によると、CSC を含む雲システムの水平サイズは小さかった。

EDAによると、EDA024 は検出後も平均時速約20kmで西進する。その期間の強度はT数=0.5でほぼ変わらなかった。9月2日00時からベストトラックも解析を開始し、4日18時に台風強度に達する。その後もしばらくT1915は緩やかな発達する(特徴①)。そして、6日頃から7日12時にかけて時速約30kmと速度を上げて北西進し、非常に強い勢力まで急速に発達した。気象庁は台風急速発達(Rapid intensification: RI)の定量的な定義を定めていないものの、24時間で中心気圧が20hPa下回ることから、本研究ではT1915はRIが起きたと考えている(特徴②)。また、その時の30kt長軸半径が150nmと水平サイズは平均よりも小さい(特徴②)。

日本にまで接近した7日18時に中心気圧は955hPaに達して、T1915において最大の勢力に到達した。そして、8日12時までと比較的長い期間の成熟期となった(特徴③)。移動速度も時速約20kmと落とし、移動方向も北東へと転向した。8日18時ごろに神奈川県三浦半島を通過し、中心は東京湾を通りながら20時ごろに千葉市に上陸した。上陸後は衰弱期になるものの、衰弱期に見られる台風の構造変化は目立たなかった(特徴③)。移動速度も時速約40kmと上げて北東進して、太平洋にぬけて10日03時には台風は温帯低気圧となった。

2.1.4 T1915 発生期の環境場

図2.1.2は、熱帯低気圧 EDA024 が最初に検出された8月29日12時のJMA-TGSによる850hPaの風の間とスコア値を示す。EDA024 は図の赤星で示し、図左下はスコア値である。偏東風波動パターンのスコア値0.04のみが算出されていて、他のスコアはゼロである。つまり、T1915の発生環境場は、副次的なパターンがない100%の偏東風波動のパターンと診断された。偏東風波動のトラフの軸を緑点で示している。

Fudeyasu and Yoshida (2018)¹⁴⁾ はTGSと過去35年の台風事例の統計解析から、発生環境場パターン毎で比べた台風の特徴を調べている。偏東風波動パターンで発生した台風は他のパターンと比べて、①発生位置が平均よりも北東域であること、②発生時の水平サイズが小さいこと、③発生期やその後は西進する、という特徴を持つことを示している。T1915もこれらの特徴を持っていたので、偏東風波動パターンで発生する典型的な台風といえる。また、Fudeyasu et al. (2020) は、TGSと9年間のEDA結果を用いた統計解析により、偏東風波動パターンで発生した熱帯低気圧が台風強度まで達する割合(45%)は、他のパターン(55%)よりも低いと示している。T1915は、台風強度にまで発達しにくい環境場の中で、台風強度に至ったことになる。

T1915の発生環境場で特徴的なもう一つは、EDA024からみて北西の上層に寒冷渦が存在していることである。この寒冷渦は図2.1.2の紫星印で示す。台風発生前から、中緯度から南西へ伸びたトラフから切り離されたもので、渦の中心は寒気を持っていた(図2.1.3左上)。この寒冷渦は西進するEDA024と並列してゆっくりと西進していて、ほぼEDA024の北西500~1000km付近に位置していた(図2.1.3右上)。Fudeyasu and Yoshida (2019)¹⁵⁾ は、38年間の台風発生環境場を調べて、台風発生時に寒冷渦が存在した場合としない場合を調べている。その結果、約9%の事例で台風の北西に寒冷渦があり、寒冷渦が存在する場合は存在しない場合よりも上層の発散場や鉛直シアや対流有効位置エネルギー(CAPE: convective available potential energy)の点で、発生環境場が好条件になることを示し

ている。T1915 の場合も、台風発生率が低い偏東風波動パターン環境場であったが、寒冷渦が加わることで台風発生環境に適していたと考えられる。

図 2.1.4 は、ベストトラックと TIFS の 6 時間予報の中心気圧と、その主要な説明変数の発達寄与値である。ベストトラックと TIFS の 6 時間予報の中心気圧を比べて等しいことから、その説明変数を用いる。T1915 の発生期では、海面水温 (SST: Sea surface temperature、時間平均した 6 時間後の気圧変化量は $-2.9 \text{ hPa}/6\text{hr}$) や海洋貯熱量 (OHC: Ocean Heat Content) ($-2.3 \text{ hPa}/6\text{hr}$) が発達に寄与 (中心気圧を示しているのがマイナス方向が発達を意味する) している。しかし、非線形の効果が衰弱に寄与していて、発達の寄与とほぼ釣り合っているために発達も衰弱も顕著ではなかったと考察される。

2.1.5 T1915 発達期の環境場

T1915 は、発生期から発達期初期にかけて、偏東風によって 155E 付近まで約 7 日間かけて西進する (図 2.1.1)。上層の寒冷渦も T1915 の北西とともに西進していたが (図 2.1.3 右上)、9 月 5 日頃から寒冷渦は T1915 から西へ離れて (図 2.1.3 左下)、T1915 は北上を始める。そして、T1915 は急激な発達 RI をする。図 2.1.4 によると、発達期では SST や OHC が大きく貢献している。平均をすると、海面水温 SST ($-2.8 \text{ hPa}/6\text{hr}$) と OHC ($-2.7 \text{ hPa}/6\text{hr}$) とともに鉛直シアも発達に寄与 ($-2.2 \text{ hPa}/6\text{hr}$) する。鉛直シアが発達に寄与するというのは、鉛直シアが平年よりも小さいことを意味する。図 2.1.5 で示すように、台風経路上での SST や OHC は非常に高い。

Fudeyasu and Yoshida (2018) は、日本への上陸数の全体の平均割合は約 13% に対して、偏東風波動パターンでは約 5% とであり、偏東風波動パターンで発生した台風が日本に上陸することは稀だと指摘している。一方で、Fudeyasu and Yoshida (2019) によると、発生時に寒冷渦が存在する台風の場合は、日本上陸割合は約 20% となり、存在しない場合よりも高くなることを示している。T1915 も偏東風波動パターンの影響だけでなく、北上する段階では T1915 のほぼ西に位置した寒冷渦の循環の影響を一部受けて北上したと考えられる。また、Yoshida and Fudeyasu (2020)¹⁶⁾ で示した平年的な偏東風波動域よりも、T1915 に関する偏東風波動域がいつもよりも北偏していることも注目すべき点である。つまり、北偏した偏東風波動域により台風が日本に接近しやすかった。

Fudeyasu and Yoshida (2018) は偏東風波動パターンで発生した台風は、他のパターン (平均は約 14%) と比べて RI 発生率は比較的低い (約 11%) と示した。T1915 はその統計的特徴とは異なり、北上しながら急速に発達する RI を起こしている。前述のように偏西風パターンでは珍しく台風が北上して、その環境場では SST と OHC の発達への影響が大きい (Wada and Chan 2008¹⁷⁾) ことが考えられる。さらに、T1915 の構造的特徴により内部プロセスも影響していると考えられる。つまり、偏東風波動パターン特有の乾燥した環境場にいたことで、Fudeyasu and Wang (2011)¹⁸⁾ が示す内部プロセスを通して台風の水平サイズが小さくなる。そして、Miyamoto and Takemi (2015)¹⁹⁾ や Miyamoto and Nolan (2018)²⁰⁾ の RI メカニズムを考えると、RI のオンセットは水平サイズが小さい方が始まりやすいと考察される。つまり、水平サイズが小さい方が RI に好ましく、そのためにも環境場は乾燥しているほうが良いことになる。Fudeyasu et al. (2018)²¹⁾ は、37 年間の台風の統計解析を行い、RI をする台風としない台風の環境場の違いを調べた。その結果、RI をする台風の環境場の方が RI をしない方よりも乾燥していたが、その統計的な結果と今回の事例は一致する。

2.1.6 T1915 成熟期の環境場

T1915 は日本に接近・上陸時に成熟期を迎える。図 2.1.4 によると、成熟期では SST ($+0.7 \text{ hPa}/6\text{hr}$) と OHC ($+0.8 \text{ hPa}/6\text{hr}$) が衰弱の寄与に変わるが、鉛直シアは発達に大きく寄与 ($-2.7 \text{ hPa}/6\text{hr}$) する。SST と OHC は海面の効果であるため、温暖ではない海域や上陸することで、負の効果に転ずる。注目すべきは、鉛直シアの正の効果である。

鉛直シアが弱かった理由は、図 2.1.3 右下のように上層ジェットが北偏していたことである。

また、鉛直シアが発達に寄与すということを言い換えれば、台風の構造がまだしっかりあり、台風としての発達過程が続いたことを意味する。その日本接近時の内部構造については第 2.3、2.6、2.8 章で紹介する。

2.1.7 まとめ

本研究では、ベストトラックや EDA の結果と JMA-TGS と TIFS を用いて、T1915 の発生・発達・成熟期の環境場の寄与を定量的に示した。発生期から発達期前半まで T1915 は顕著に発達しなかったが（特徴①）、台風発生環境場は偏東風波動パターンであり、その統計的な特徴を T1915 は持っていた。発生期における上層の寒冷渦の存在、または偏東風波動の北偏により、台風は西進しながら日本に接近する。その後、T1915 は発達期を迎えて RI が発生したが（特徴②）、高い SST と OHC という環境場が大きく貢献した。また、T1915 のサイズが小さいことで、内部プロセスが重要な役割を果たしたと考えられる。一方、成熟期から衰弱期では、衰弱過程が弱くなる環境場であった（特徴③）。T1915 が日本に接近・上陸することで SST と OHC は衰弱の寄与が変わるが、それに匹敵する鉛直シアの小ささが発達に寄与していたことで、T1915 の勢力が衰えなかった。

本研究で用いた解析手法は、今後の台風ライフサイクルに対する環境場を評価するアプローチとして有用になると期待される。

謝辞

本調査を進めるにあたり、貴重な観測データを迅速に提供くださった気象庁アジア太平洋気象防災センターの関係者に深く感謝いたします。また、科学研究費助成事業特別研究促進費の助成を得て行われました。さらに、科学研究費補助金（17H02956、17K14398、19H00705、19H05696）や文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラムの支援を一部受けました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Yoshida, R. and H. Ishikawa: Environmental factors contributing to tropical cyclone genesis over the Western north Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 451-467, 2013.
- 2) DeMaria, M., and J. Kaplan, A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, 9, 209-220, 1994.
- 3) Yamaguchi, M., H. Owada, U. Shimada, M. Sawada, T. Iriguchi, K. D. Musgrave, and M. DeMaria., Tropical Cyclone Intensity Prediction in the Western North Pacific Basin using SHIPS and JMA/GSM. *SOLA*, 14, 138-143, 2018.
- 4) 嶋田宇大, 大和田浩美, SHIPS. 気象研究所技術報告, 82, 4-19, 2019.
- 5) Ono, M., S. Notsuhara, J. Fukada, Y. Igarashi, and K. Bessho, Operational Use of the Typhoon Intensity Forecasting Scheme Based on SHIPS (TIFS) and Commencement of Fiveday Tropical Cyclone Intensity Forecasts. Technical Review No. 21. RSMC Tokyo Typhoon Center, 2019.
- 6) 土屋昭夫, 三河哲也, 菊池明弘, 台風へと発達する雲システムの早期判別法について. 気象衛星センター技術報告, 38, 13-19, 2000.
- 7) 上野忠良, 台風へと発達する雲システムの早期判別結果(2000,2001 年)と南シナ海で台風が発達した雲システムの周辺場にみられる特徴, 気象衛星センター技術報告, 41, 1-14, 2002.
- 8) 寺坂義幸, 中西達郎, 西村修司, 「台風へと発達する雲システムの早期判別法」の精度検証と雲システムが台風が発達するまでの経過時間, 気象衛星センター技術報告, 48, 45-54, 2007.
- 9) Kishimoto, K., T. Nishigaki, S. Nishimura, and Y. Terasaka, Comparative study on organized convective cloud systems detected

- through early stage Dvorak analysis and tropical cyclones in early developing stage in the western North Pacific and the South China Sea. RSMC Tokyo—Typhoon Center Tech. Review, 9, 14 pp. 2007.
- 10) Dvorak, V. F., Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech. Rep. NESDIS 11, 47 pp. 1984.
 - 11) 気象庁予報部, 予報作業指針台風予報, 7-13pp, 1990.
 - 12) Ritchie, E. A., and G. J. Holland, Large-scale patterns associated with tropical cyclogenesis in the western Pacific. Mon. Wea. Rev., 127, 2027–2043, 1999.
 - 13) Fudeyasu H., R. Yoshida, M. Yamaguchi, H. Eito, C Muroi, S Nishimura, K Bessho, Y. Oikawa, and N Koide, Development conditions for tropical storms over the western North Pacific stratified by large-scale flow patterns, JMSJ,97, 439-45, 2020.
 - 14) Fudeyasu H., and R. Yoshida, Western North Pacific Tropical Cyclone Characteristics Stratified by Genesis Environment, Mon. Wea. Rev.,146, 435 - 446, 2018.
 - 15) Fudeyasu. H and R. Yoshida, Statistical Analysis of the Relationship between Upper Tropospheric Cold Lows and Tropical Cyclone Genesis over the Western North Pacific, J. Met. Soc. Japan, 97, 439-451, 2019.
 - 16) Yoshida R. and H. Fudeyasu, How Significant are Low-level Flow Patterns in Tropical Cyclone Genesis over the Western North Pacific?, MWR,148, 559-576, 2020.
 - 17) Wada, A. and J. C. L. Chan, Relationship between typhoon activity and upper ocean heat content, Geophysical Research Letters, 35, L17603, 2008.
 - 18) Fudeyasu, H., and Y. Wang, Balanced contribution to the intensification of a tropical cyclone simulated in TCM4: Outer core spinup process. J. Atmos. Science., 68, 430-449, 2011.
 - 19) Miyamoto, Y. and T. Takemi, A Triggering Mechanism for Rapid Intensification of Tropical Cyclones. J. Atmos. Sci., 72, 2666-2681, 2015.
 - 20) Miyamoto, Y. and D.S. Nolan, Structural Changes Preceding Rapid Intensification in Tropical Cyclones as Shown in a Large Ensemble of Idealized Simulations. J. Atmos. Sci., 75, 555-569, 2018.
 - 21) Fudeyasu H., K. Ito, and Y. Miyamoto, Characteristics of tropical cyclone rapid intensification over the Western North Pacific, Journal of Climate, 24, 8917-8930, 2018.

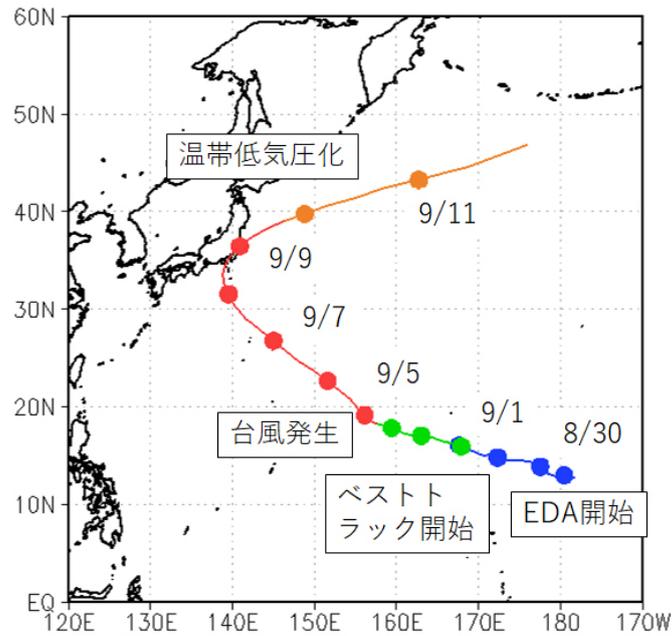


図 2.1.1 T1915 のトラック。青から緑が EDA の結果。緑からはベストトラックの結果。赤は台風強度。オレンジが温带低気圧化以降のトラック。

Fig. 2.1.1 Track of T1915.

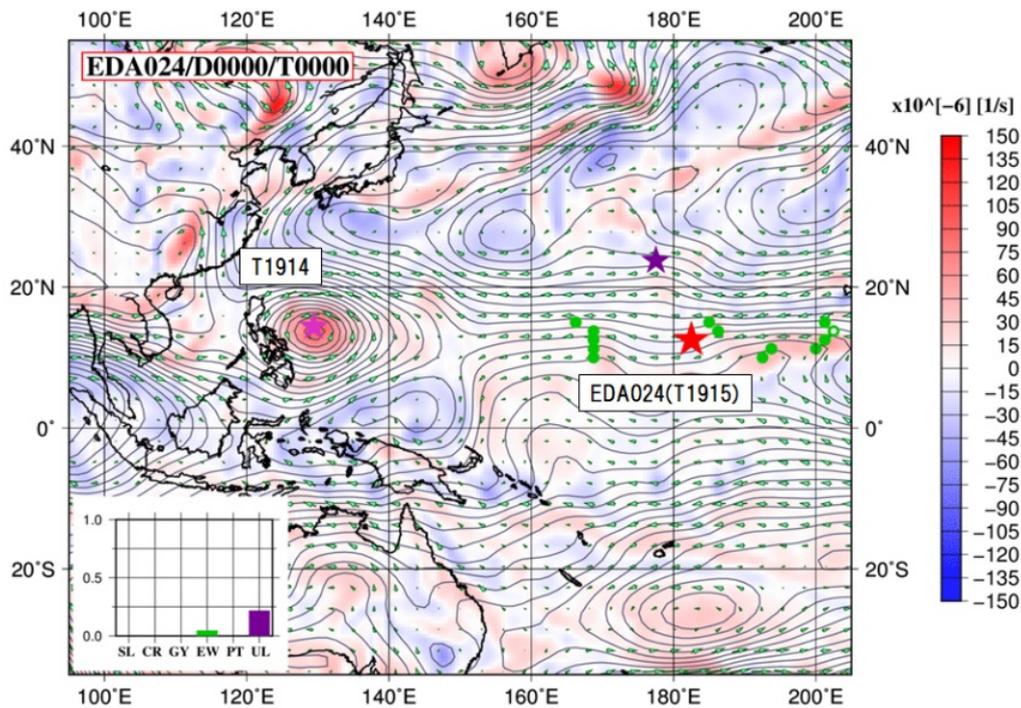


図 2.1.2 8月29日12時におけるEDA024の位置(赤星)。3日前の850hPa面の水平風と流線関数(コンター)と渦度(影)。左下はJMA-TGSスコア値。

Fig. 2.1.2 The result of JMA-TGS at 12 UTC 29th August 2019.

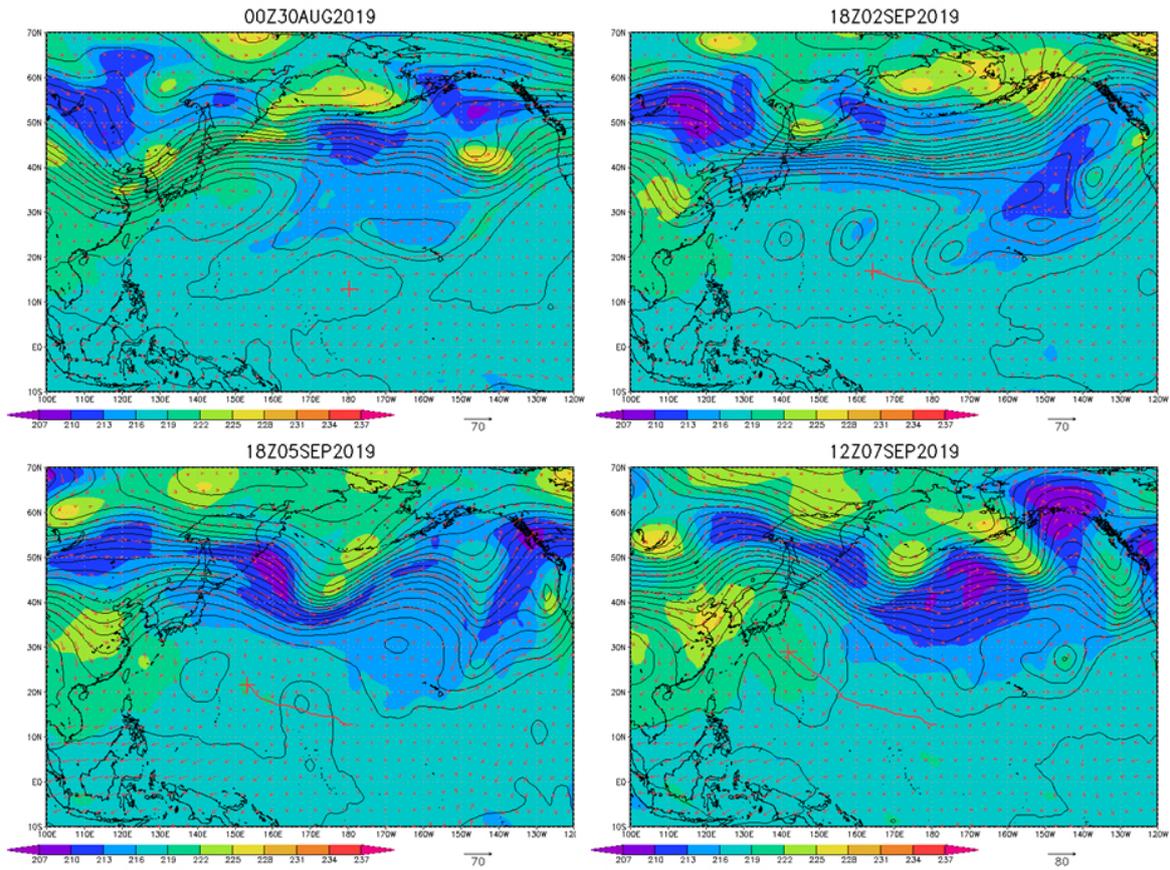


図 2.1.3 200hPa 高度 (コンター) と温度場 (シェイド)。赤線がその時間までの T1915 のトラック。

Fig. 2.1.3 Distributions of 200-hPa height (contour) and temperature (shaded).

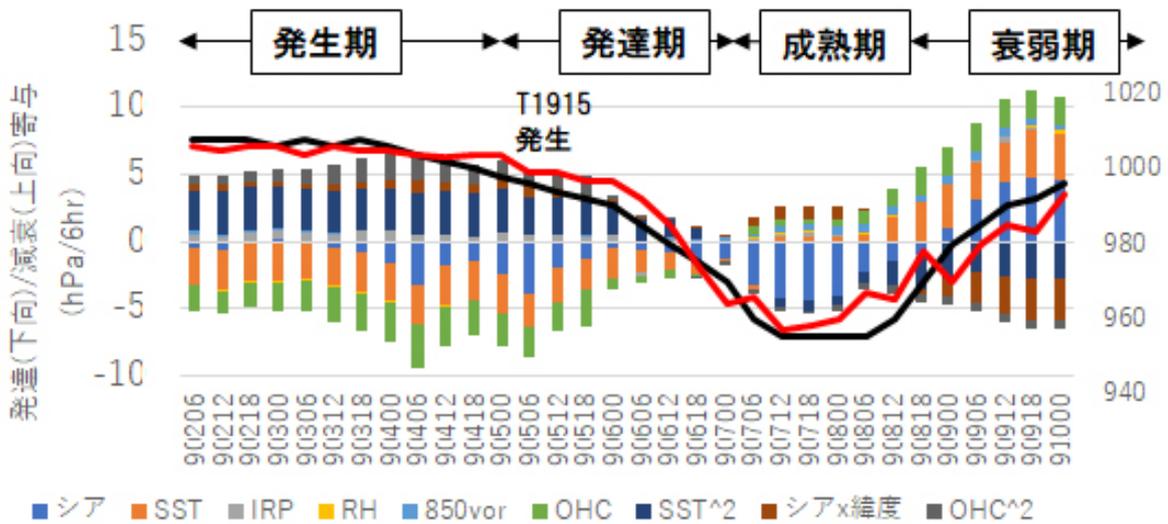


図 2.1.4 TIFS の 6 時間予報による T1915 強度変化による主要説明変数の中心気圧への寄与値時間変化。実線はベストトラック (黒) と TIFS (赤) による中心気圧。

Fig. 2.1.4 The result of TIFS for T1915.

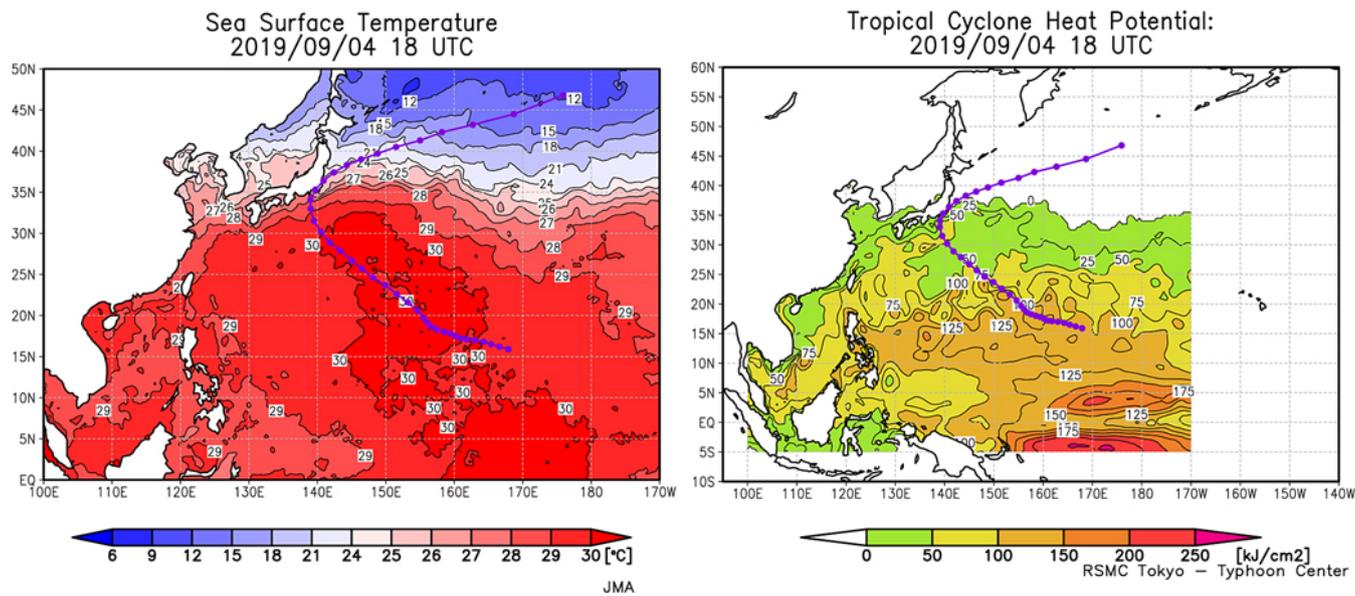


図 2.1.5 2019年9月4日18時の海面水温とTCHP。紫の線はT1915のトラック。

Fig. 2.1.5 Distributions of (left) SST and (right) TCHP at 18UTC 4th September 2019.

地上観測データを用いた暴風・突風の解析

Analysis of Strong Winds and Gusts associated with Typhoon Faxai (2019) using Surface Observations

益子 渉^{*1}

Wataru MASHIKO

This study examined the characteristics of strong winds and gusts associated with Typhoon Faxai (2019) during its approach to and landfall over the Kanto region using the surface observations. Faxai possesses an axisymmetric structure on the mature stage, such as the overall rainfall distribution, developed eyewall, and eye, in spite of the passage over the Kanto region in midlatitude. Extreme maximum winds and gusts were observed in the inner-core region, especially around the developed eyewall region. The typhoon with such a structure as Faxai, which passes over the Kanto region, is quite rare, and is only Typhoon Danas (2001) since 1994.

Keywords : strong winds, gusts, surface observation

2.2.1 はじめに

2019 年台風第 15 号は千葉県千葉市付近に上陸し、気象庁ベストトラックデータとして上陸時の記録が始まった 1991 年以降において最も強い勢力で関東に上陸した台風となり、関東地方を中心に多くの地点で観測史上 1 位の最大風速・最大瞬間風速を記録した。これにより、房総半島を中心に 7 万棟以上の住家被害（令和元年 12 月 5 日 内閣府「令和元年台風第 15 号に係る被害状況等について」）や大規模停電が発生するなど甚大な被害が生じた。本研究では、気象庁アメダスによる地上観測データ等を用いて、台風第 15 号に伴う暴風・突風の実態を明らかにすることを目的とする。

2.2.2 2019 年台風第 15 号の特徴

台風第 15 号は、約 7 m/s のゆっくりとした速さで東京湾を通過し、その後強い勢力で 9 日 5 時前に千葉県千葉市付近に上陸した。その後は、北東進して茨城県を通過し、鹿島灘へ抜けていった（図 2.2.1）。最大風速（10 分平均風速）は神津島村で 43.4 m/s、千葉市で 35.9 m/s、羽田で 32.4 m/s、最大瞬間風速（3 秒平均風速）は神津島村で 58.1 m/s、千葉市で 57.5 m/s、木更津市で 49.0 m/s を観測するなど、関東地方を中心に多くの地点で観測史上 1 位の記録を更新した。これらの強風は台風のトラック近傍の左右両側で観測されていたことが分かる（図 2.2.1a, b）。全般に沿岸部や島嶼部で風速が大きくなっているが、千葉や木更津などでは東南東から南東の風となっており、陸側からの風にも関わらず記録的な強風となっていたのも特徴の一つである。

*1 気象庁気象研究所 台風・災害気象研究部
主任研究官・理博

Senior Researcher, Department of Typhoon and Severe Weather Research,
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, Dr. Sci.

アメダスの各観測点において観測された最大風速・最大瞬間風速を台風中心・移動方向に対して相対的にプロットしたものを図 2.2.1c, d に示す。但し、台風の進行方向が図の上向きである。これによると、台風中心を通る東西線付近に集中してプロットされており、多くの地点で台風の最接近時に最大風速・最大瞬間風速が観測されていたと言える。また、強い最大風速・最大瞬間風速は台風中心近傍に集中しており、かつ台風中心近傍の進行方向左側を含め全象限にわたって見られるのが特徴である。これは発達した台風のコア構造を有していたことを示唆している。

台風が千葉市付近に上陸した頃の気象庁レーダーによる降水分布を見ると、台風は全体的に軸対称に近い構造をもっていたことが分かる（図 2.2.2）。そして、台風の眼に対応した無降水域や、それを取り囲む発達した眼の壁雲に対応した強雨域も見られる。

台風中心が通過したと思われる千葉特別地域観測所の時系列を図 2.2.3a に示す。レーダー画像と対応させると、最大瞬間風速 57.5 m/s が観測されたのは、進行方向前面の眼の壁雲が通過したタイミングであったことが分かる。その後、眼の中に入ると風速は弱まり、気圧の最小が観測され、5 時過ぎには後面の眼の壁雲の通過に伴い再び風が強まっていた。これらのことから台風は、軸対称に近い構造や眼、眼の壁雲に伴う強風域など、関東上陸時でも発達した成熟期の台風構造（e.g., Jorgensen 1984¹⁾, Willoughby 1988²⁾）を有していたと言える。

図 2.2.3b は木更津における地上の時系列であり、千葉特別地域観測所同様に眼の壁雲の通過に伴って 49.0 m/s の最大瞬間風速が観測されている。この時の突風率（最大瞬間風速/10 分平均風速）は 2.17 と極めて大きな値であった。風向の変化をみると、大きな変動は見られず、この突風は竜巻のような旋回風に伴うものではなかったと言える。このような突風性の強風は、木更津や千葉の時系列において 5~10 分周期で観測されており、何らかの数 km スケールの現象（例えば、水平ロール構造（Wurman and Winslow (1998)³⁾）が副次的に風速を強化していたことを示唆している。こういった現象の解明が今後の課題である。

2.2.3 近年の顕著な被害をもたらした 2018 年台風第 21 号・2019 年台風第 19 号との比較

ここでは近年顕著な暴風をもたらした 2018 年台風第 21 号と 2019 年台風第 19 号との比較を行う。

2018 年台風第 21 号は近畿地方に暴風によって甚大な被害をもたらしたが、強風は主に進行方向右側で発生していたことが分かる（図 2.2.4d, e）。台風の移動速度は 17.3m/s と速く、観測された最大風速の風向は南南西が多く、これは台風の移動方向に沿ったものであるとともに、紀伊水道に沿った方向であり、これらの要因が大きく影響したと考えられる。レーダーでは全体的に軸対称に近い構造を保持し眼の無降水域も見られるが、活発な対流域は前方側に集中し、台風の南側では対流がかなり弱まってきているのが分かる（図 2.2.4f）。特に強い最大風速が観測されたのは台風の進行方向右側後面であり（図 2.2.4e）、活発な対流域とは必ずしも対応していなかったと言える。和歌山市では 57.4 m/s の最大瞬間風速が観測されたが、台風中心付近の活発な対流域の通過後のタイミングで降水はほとんど観測されておらず、下降流にともなう上空の運動量輸送が強風の原因であると考えられる。これらのことから近畿地方に暴風をもたらした時の台風の構造は成熟期のものとは異なり、崩れかけていたと言える。

2019 年台風第 19 号については、移動速度が 12.8m/s と極端に速くはなかったが、進行方向右側に集中して強風が観測されていたことが分かる（図 2.2.4a, b）。台風中心が相模湾に達する頃には、台風の構造は大きく崩れ、台風の西側や南側では対流が極端に弱まっていたことが分かる（図 2.2.4c）。

これらのことから 2019 年台風第 15 号は、近年の顕著な暴風被害をもたらした上陸台風とは異なり、上陸時でも発達した成熟期の台風の構造をもっていたと言える。

2.2.4 東京湾付近を通過した過去の台風との比較

関東へ襲来する台風において2019年台風第15号のように発達した成熟期の構造を維持したものはどのくらい稀であるのかを明らかにするために、まず1994年以降に東京湾付近を通過した台風について気象庁ベストトラックデータを用いて抽出を行った(図2.2.5)。その結果、熱帯低気圧、温帯低気圧化したものを含めると計15個であった(表2.2.1)。2019年台風第15号はベストトラックによる最大風速は80ktと最も強くなっているが、2019年台風19号や2017年台風第21号と比べても決して突出した値ではないことが分かる。また、中心気圧で見れば、2017年台風第21号や2002年台風21号と比べて同程度かむしろやや高いことが分かる。

抽出されたすべての台風に対して、アメダスで観測された最大風速を台風中心・移動方向に対して相対的に表示したものを図2.2.6に示す。(但し、2008年以前は10分値データ、それ以降は1分値データを使用している。20m/s以上の風に対して両方のデータの存在する地点で比較をすると、その差は平均1.6%でほとんど結果に影響しないことを確認している。)2019年台風第15号のように発達した台風のコア構造を有したものを抽出するために、台風中心から半径25km以内において最大風速25m/s以上が観測された台風を抽出すると、2019年台風第19号、2019年台風第15号、2004年台風第22号、2001年台風第15号の4つしかないことが明らかになった。この内、2019年台風第19号は2.2.3節で述べたように上陸時の構造は崩れており、残りの2004年台風第22号と2001年台風第15号の構造について以下に示す。

2004年台風第22号は19.5m/sという速い速度で北東し、伊豆半島に上陸した後、東京湾を通過していった。最大風速は網代で39m/s、石廊崎で30m/s、最大瞬間風速は石廊崎で67.6m/s、網代で63.3m/s、横浜で39.9m/sなどが観測されていた。これらの顕著な強風は台風の移動速度が速いにもかかわらず、進行方向左側においても発生している(図2.2.6)。その時の地表付近の気温の分布をみると、台風の進行方向左側では中心付近を含め冷気で覆われ、通常の台風構造とは大きく異なっていたことが分かる(図2.2.7a)。関東平野における進行方向左側の強風は主に下層の冷気と地形の影響により生じたことが明らかにされている(Mashiko 2008)⁴⁾。その時の台風の構造をレーダーで見ると、台風の南側において降水域がなくなっており、台風構造は大きく崩れていたことが分かる(図2.2.7b)。

2001年台風第15号については、台風中心近傍に集中して強い最大風速が観測されていた(図2.2.6)。この時の地表付近の風と温度場をみると、関東平野にはシアや温度傾度はほとんど存在していなかったことが分かる(図2.2.8a)。レーダーで台風の構造をみると、2019年台風第15号よりもコンパクトではあるが、軸対称に近い構造をしており、台風の眼や眼の壁雲のようなものも確認できる。上空の総観場をみても、傾圧性を伴ったジェット気流は北海道付近に位置していた(図略)。2001年台風第15号は2019年台風第15号よりも、コンパクトで弱いながら、2019年台風第15号と同様に成熟期の台風の構造を有していたと言える。

2.2.5 まとめ

2019年台風第15号は関東上陸時でも軸対称に近い構造をもち、台風の眼や眼の壁雲を伴い、発達した成熟期の台風の構造を有していた。これにより眼の壁雲付近を中心に、台風中心近傍において顕著な最大風速が観測されていた。このような構造を有して東京湾付近を通過する台風は稀であり、1994年以降のデータを用いて調べたところ、2001年台風第15号以来であったことが分かった。しかし、2004年台風第22号のように台風の構造が崩れかけていても、2019年台風第15号に匹敵するような顕著な強風をもたらす場合があるので、こういった台風にも注意が必要である。

参考文献

1) Jorgensen, D. P., 1984: Mesoscale and Convective-Scale Characteristics of Mature Hurricanes. Part II. Inner Core Structure

of Hurricane Allen (1980), J. Atmos. Sci., 41, 1287–1311,

- 2) Willoughby, H. E., 1988: The dynamics of the tropical hurricane core. Aust. Meteor. Mag., 36, 183–191.
- 3) Wurman, J., and J. Winslow, 1998: Intense sub-kilometerscale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran. Science, 280, 555–557.
- 4) Mashiko, W, 2008: Formation Mechanism of a Low-Level Jet during the Passage of Typhoon Ma-on (2004) over the Southern Kanto District. J. Meteor. Soc. Japan, 86, 183-202.

表2.2.1 1994年以降に図2.2.5の矩形の領域を通過した台風のリスト(熱帯低気圧、温帯低気圧化したものを含む)。気象庁ベストトラックデータをもとに、領域に入った時の台風の中心気圧、移動速度、最大風速を示す。

Table 2.2.1 List of the typhoons that passed over the red rectangular region in Fig 2.2.5 since 1994. The central pressure, translation speed, and maximum from JMA’s best track data are also described.

台風	中心気圧 (hPa)	移動速度 (m/s)	最大風速 (kt)
2019年19号	961	12.8	74
2019年15号	960	7	80
2017年21号	955	22.1	75
2016年9号	977	11.5	63
2015年6号	996	26.6	ET
2014年18号	966	22.2	65
2010年9号	1004	8	TD
2005年11号	975	9.8	65
2004年23号	989	12.7	ET
2004年22号	965	19.5	70
2002年21号	959	15.8	71
2002年7号	975	20.5	60
2001年15号	970	7	55
2001年11号	982	11.8	45
1998年5号	966	16.3	59

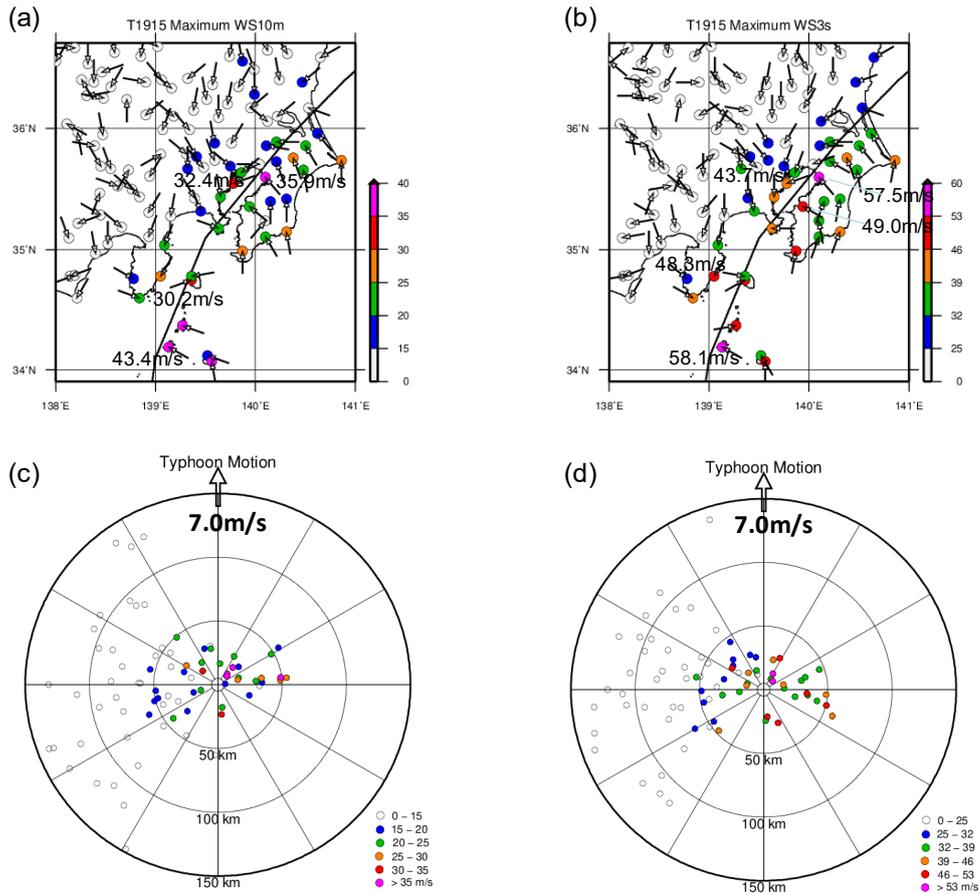


図 2.2.1 アメダスにおける 2019 年台風第 15 号 (T1915) に伴う (a) 最大風速・風向 (10 分平均)、最大瞬間風速・風向 (3 秒平均) の分布。(c) アメダスの各観測点で観測された最大風速を台風中心・移動方向に対して相対的に表示。図の上方が台風の移動方向で、太数字は台風の移動速度を示す。(d) (c) に同じ。但し、最大瞬間風速。
 Fig. 2.2.1 Distributions of (a) maximum 10-min mean wind and (b) maximum 3-s mean wind observed by Automated Meteorological Data Acquisition System (AMeDAS) during the passage of Typhoon Faxai (2019). Spatial distribution of (c) the maximum 10-min mean wind and (d) the maximum 3-s mean wind relative to the typhoon center. Note that the top of the sheet is the direction of the typhoon motion and numeral is the translation speed.

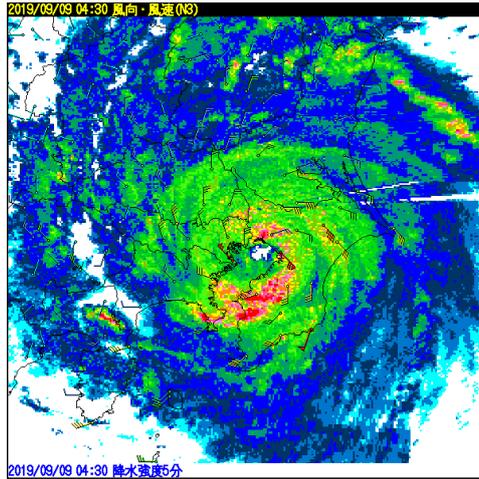


図 2.2.2 2019 年 9 月 9 日 04:30JST の気象庁レーダーによる降水強度の分布。矢羽はアメダスによる 10 分平均風を示す。

Fig. 2.2.2 Rainfall intensity estimated by radar reflectivity at 04:30 JST on Sep. 9, 2019. Barbed arrows denote surface winds.

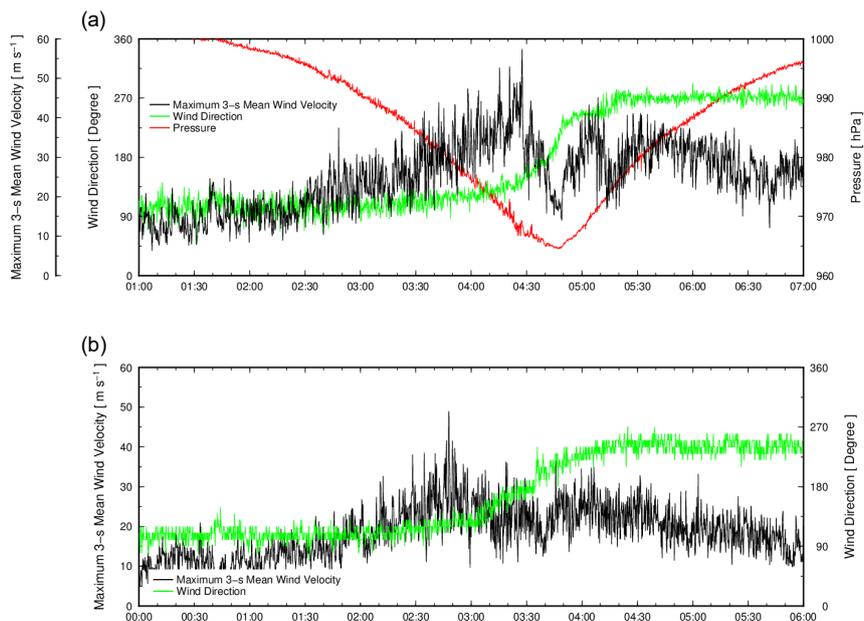


図 2.2.3 (a) 千葉特別地域観測所における 3 秒平均風速・風向、気圧の時系列。(b) 木更津における 3 秒平均風速・風向の時系列。

Fig. 2.2.3 (a) Time series of 3-s wind speed and wind direction, and pressure at Chiba observatory. (b) Time series of 3-s wind speed and wind direction at Kisarazu weather station.

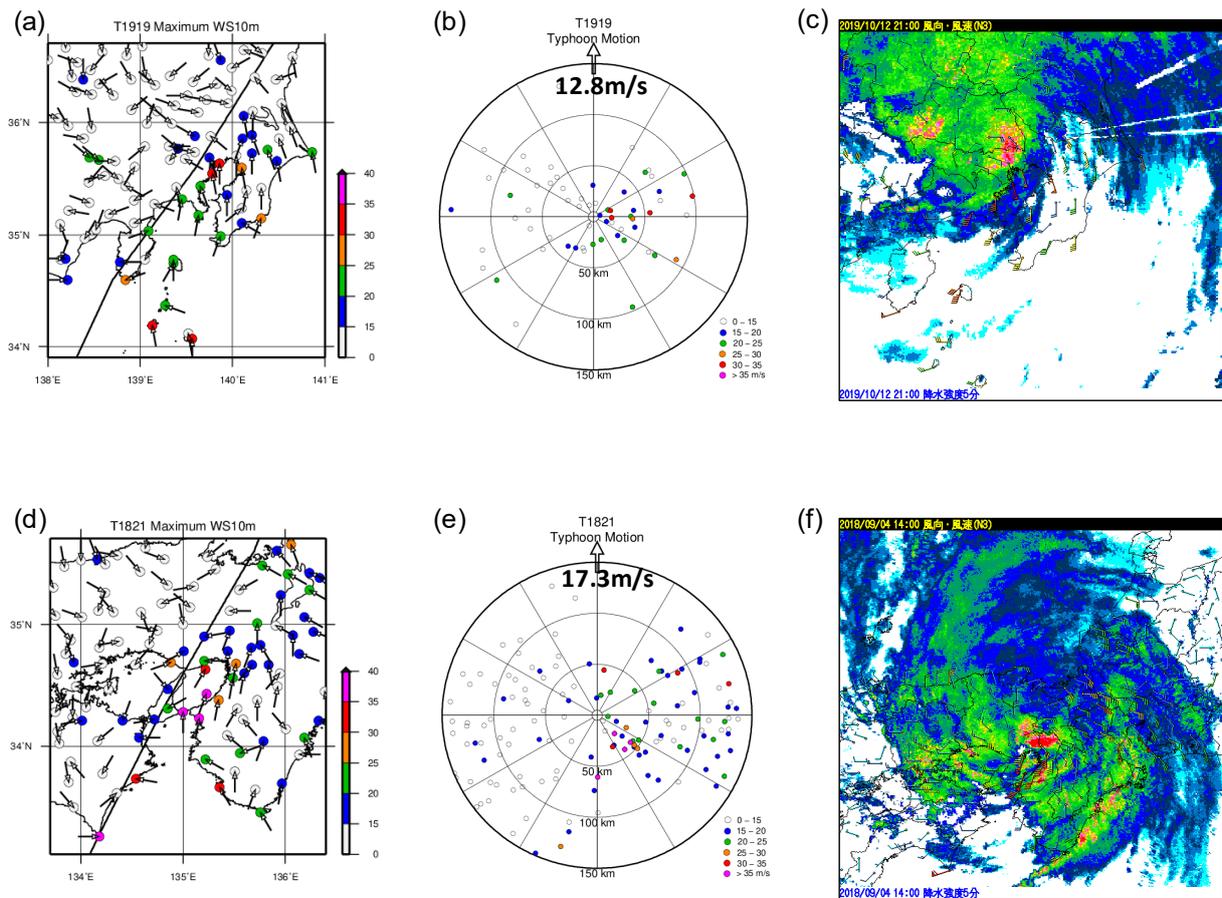


図 2.2.4 (a) 図 2.2.1 (a) に同じ。但し 2019 年台風第 19 号。(b) 図 2.2.1 (c) に同じ。但し 2019 年台風第 19 号。
(c) 図 2.2.2 に同じ。但し、2019 年 10 月 12 日 21:00JST。(d) 図 2.2.1 (a) に同じ。但し 2018 年台風第 21 号。
(e) 図 2.2.1 (c) に同じ。但し 2018 年台風第 21 号。(f) 図 2.2.2 に同じ。但し、2018 年 9 月 4 日 14:00JST。
Fig. 2.2.4 (a), (b) As in Fig 2.2.1 (a) and (c), but for Typhoon Hagibis (2019). (c) As in Fig 2.2.2, but at 21:00 JST on Oct. 12, 2019. (d), (e) As in (a) and (b), but for Typhoon Jebi (2018). (f) As in (c), but at 14:00 JST on Sep. 4, 2018.

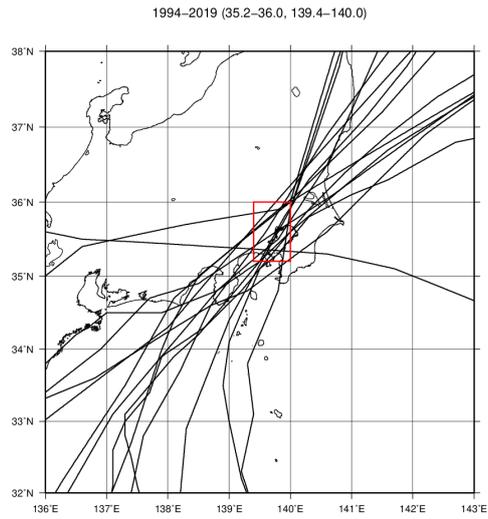


図 2.2.5 気象庁ベストトラックデータをもとに 1994 年から 2019 年までに図中の赤枠域を通過した台風の経路（一部、熱帯低気圧、温帯低気圧化したものを含む）。

Fig. 2.2.5 Tracks of the typhoons that pass over the red rectangular region from 1994 to 2019 according to JMA's best track data.

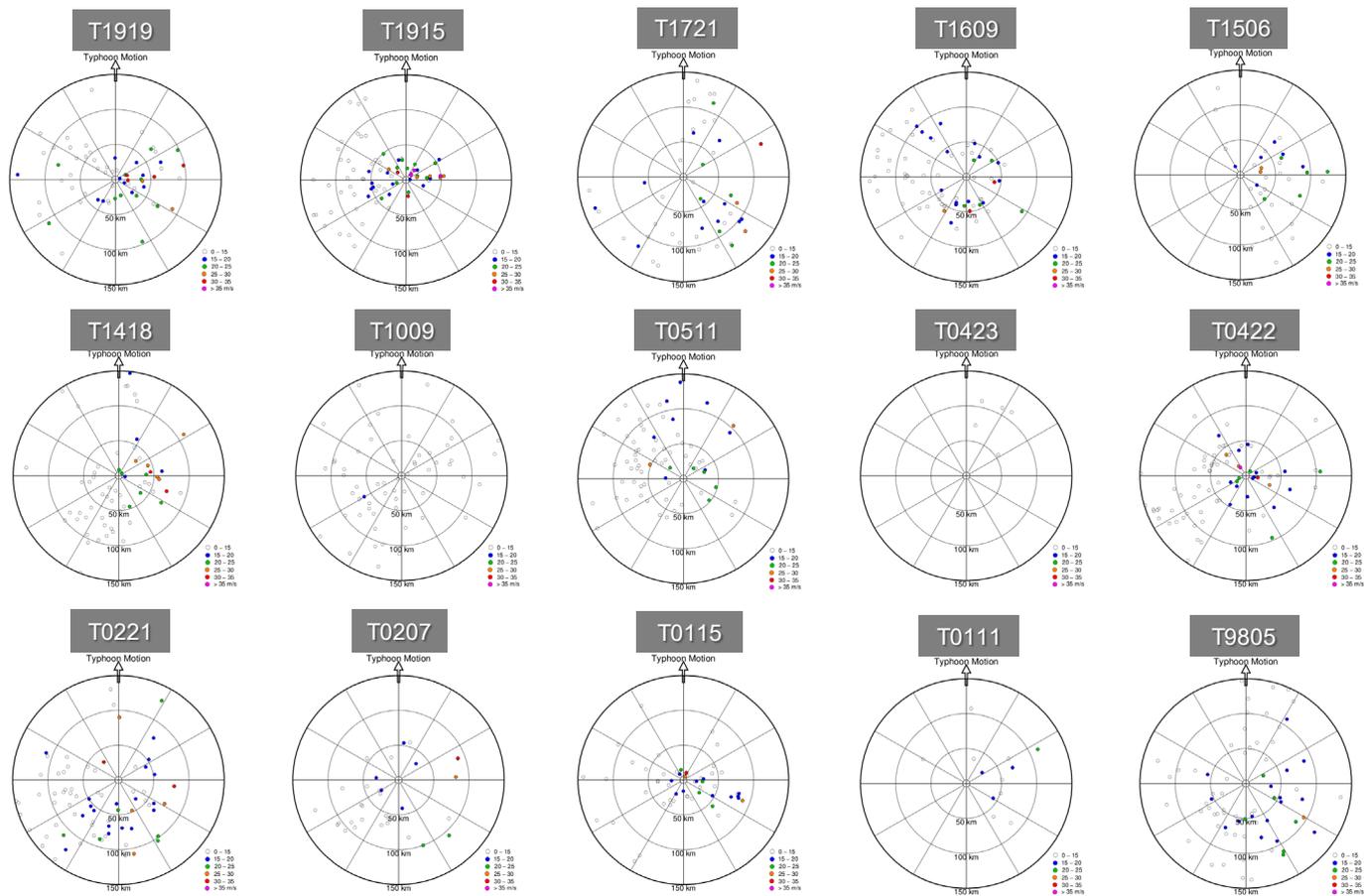


図 2.2.6 表 2.2.1 に掲載した台風に対して、アメダスで観測された最大風速を台風中心・移動方向に対して相対的に表示したもの。図の上方が台風の移動方向を示す。

Fig. 2.2.6 Spatial distribution of the observed maximum 10-min mean wind relative to the typhoon center as . Note that the top of the sheet is the direction of the typhoon motion.

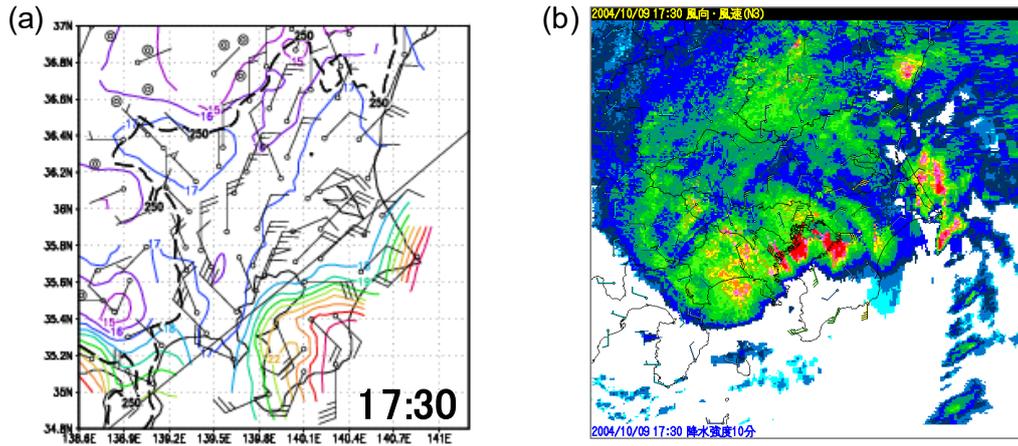


図 2.2.7 (a) 2004 年 10 月 9 日 17:30JST における地上風 (矢羽) と気温 (コンター) の分布。実線は 2004 年台風第 22 号の経路を示す。(b) 2004 年 10 月 9 日 17:30JST における気象庁レーダーによる降水強度の分布。矢羽はアメダスによる風を示す。

Fig. 2.2.7 (a) Surface winds (barbed arrows) and temperature (contours) at 17:30 JST on Oct. 9, 2004. Solid line indicates the track of Typhoon Maon (2004). (b) Rainfall intensity estimated by radar reflectivity at 17:30 JST on Oct. 9, 2004. Barbed arrows denote surface winds.

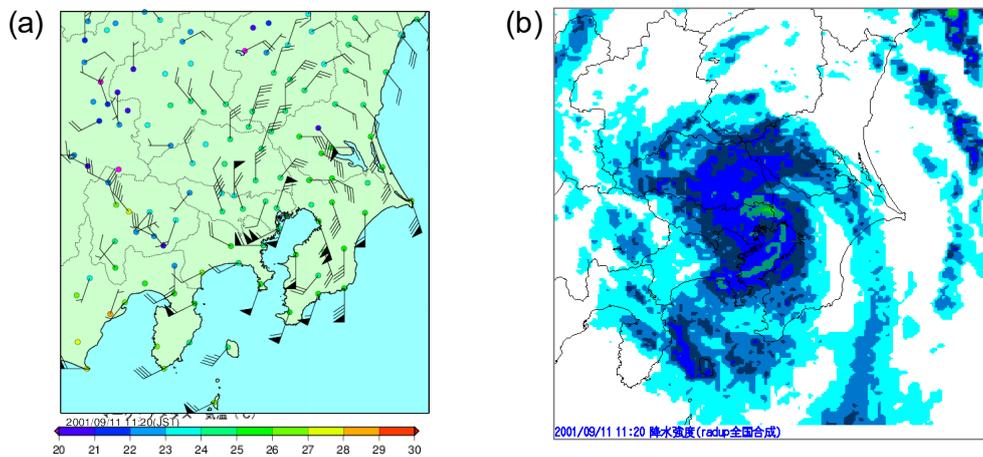


図 2.2.8 (a) 2001 年 9 月 11 日 11:20JST における地上風 (矢羽) と気温 (カラー) の分布。(b) 2001 年 9 月 11 日 11:20JST における気象庁レーダーによる降水強度の分布。

Fig. 2.2.8 (a) Surface winds (barbed arrows) and temperature (colored dots) at 11:20 JST on Sep. 11, 2001. (b) Rainfall intensity estimated by radar reflectivity at 11:20 JST on Sep. 11, 2001.

2.3

ドップラーレーダーを用いた台風上陸時の構造変化の解析

Doppler radar analysis of structural changes of Typhoon Faxai at landfall

嶋田 宇大*¹

Udai SHIMADA

Environmental conditions of Typhoon Faxai (2019) during intensification and evolutions of the structure before and after landfall were examined. Faxai intensified over the area with a sea surface temperature of 30 °C under very weak (less than ~5 m/s) vertical wind shear. These conditions are, in general, favorable for intensification. It is noteworthy, however, that Faxai intensified in spite of the fact that Faxai was surrounded by dry air and underneath a synoptic scale, upper-level high, which suppressed upper-level divergence. Faxai reached its maturity with a very compact structure and then made landfall in the Kanto district without little weakening. The storm experienced eyewall replacement cycles twice when it moved near the Izu islands and just after it moved off Ibaraki. After the storm moved to Tokyo bay, the eyewall contracted rapidly, but a rainband extending from the eyewall developed over the Boso peninsula. The earth-relative wind field was asymmetric due to its forward speed (7m/s), leading to an increase in wind speed over the Boso peninsula, which was located on the right side of the track. Furthermore, the storm-relative wind field showed that the location of a local wind maximum changed from the front side to the south-east side of the storm after it moved to Tokyo Bay. Consequently, it is estimated that the south of the Boso peninsula at 2-km altitude had been exposed by wind speed greater than 50 m/s for up to 2 hours. It is known that the highest gust wind speed observed at the surface is comparable to 2-km wind speed in the coastal region. Thus, it is suggested that gust winds over 40 m/s, which were frequently observed at Tateyama, could have happened everywhere along the western coast of the Boso Peninsula. Finally, a dry boundary layer model suggests that some rainbands can be explained by the effects of storm motion and land-sea roughness contrast around Tokyo Bay.

Keywords : *landfalling tropical cyclones, Doppler radar analysis*

2.3.1 はじめに

2019 年台風第 15 号は、9 月 8 日から 9 日にかけて、非常に強い勢力で伊豆諸島を北上し、関東地方に接近・上陸した。各地で風速 20m/s 以上の暴風が観測され、千葉県南部を中心に観測史上 1 位の最大風速や最大瞬間風速が記録された。この暴風により各地で甚大な被害が発生した。しかしながら、地上の観測点が限られているため、観測のない地域ではどの程度の風が吹いていたか不明であり、風速と被害の関係は明らかになっていない。これらを明らかにするためには、台風の風の面的分布の実態把握が不可欠である。

*1 気象庁気象研究所台風研究部 主任研究官

Senior researcher, Typhoon Research Department,
Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

一般に日本に接近・上陸する台風は衰弱期である。2018年台風第21号も非常に強い勢力で上陸したが、衰弱期であった。しかし、台風第15号は、北緯20度から30度までの海域で発達し、衰弱せずに非常に強い勢力のまま関東地方に接近した点で、他の典型的な日本接近台風と異なる事例であった。台風第15号がどのような環境場で発達し関東地方に接近したのか、どのような構造的特徴を有していたのかを明らかにすることは、今後の台風の予測精度向上に不可欠である。

本研究の目的は、気象庁レーダー等の観測データを用いて、台風が伊豆諸島を北上していた最盛期から、台風が関東地方に上陸し再び海上に進むまでの間における、台風の降水分布や風速場の特徴を明らかにすることである。さらに環境場の特徴を調べ、台風の構造との関係について考察する。

2.3.2 使用データと解析手法

本研究で使用したデータは、気象庁東京レーダーデータ、気象庁降水強度データ、気象庁空港地上気象観測データ（最大瞬間風速及び海面更正気圧）、気象庁55年長期再解析（JRA-55）、及び気象庁強度予報ガイダンス（TIFS, Yamaguchi et al. 2018; 嶋田と大和田 2019; Ono et al. 2019）データである。最大瞬間風速は3秒平均風速の1分以内の最大値である。JRA-55及びTIFSデータは台風周辺の環境場情報を得るために使用した。

第3節で示す台風スケールの風速場はGBVTD法（Lee et al. 1999）及びGVTD法（Jou et al. 2008）を東京レーダーデータに適用して得た。台風の中心点からレーダーサイトまでの距離で決まる半径領域内ではGBVTD解析を、その外側領域ではGVTD解析を行った。GBVTD解析及びGVTD解析は単ドップラー速度データから台風風速場を解析する手法である。得られる風速の空間解像度は接線風速で最大波数3までしか得られないため、二台のレーダーデータを使用したDual解析より解析精度の不確実性が大きい。しかしGBVTD解析及びGVTD解析では、台風周辺の風分布が広い領域で得られるため、台風の構造変化プロセスの研究で使用されてきた(e.g., Shimada et al. 2018)。本調査では、風速場の解析を9月8日1500UTCから9月9日0400UTCまで行った。ドップラー速度データの観測密度の制約から、高度1kmから10kmまでの1km間隔で風速場を解析した。得られた風速は30分移動平均をかけてノイズを除去した。

本研究では5分毎の風速場データを扱うため、台風の中心位置は気象庁ベストトラックのものではなく、最大風速半径（RMW）の水平スケールの循環中心点と定義し、循環中心点探査手法（Bell and Lee 2012）で算出した。

台風第15号の場合、RMWが時間によって激しく変化していたため、最初に複数のRMWを設定してそれぞれの場合で全期間にわたって中心点を抽出した。そして、その時々の実際のRMWに合わせて、抽出した中心点を選択した。客観抽出できなかった時刻は、第一推定値（期間前半は主観で設定し、後半は気象庁の速報解析の中心点を利用）の中心点をそのまま利用した。最後に選択した中心点に対し、30分移動平均をかけて滑らかな台風トラックを作成した。

2.3.3 解析結果

この節では、台風第15号の構造を特徴づけるに至った環境場条件について最初に報告する。その後にドップラーレーダーデータの解析を通じ、台風第15号の構造的特徴を示す。

(a) 環境場条件

図2.3.1は気象庁強度予報ガイダンスで使用されている環境場変数及び台風の最大風速の時系列を示す。表2.3.1に変数の定義を記す。この変数は各時刻における気象庁全球モデル（GSM）の解析値（GANAL）から算出された値である。台風が発達していた9月5日18時から9月7日18時に注目すると、台風は海面水温が30度もあり、ほぼ5m/s以下の非常に小さな鉛直シアの環境場で発達していた。海洋貯熱量は発達後半に50 kJ/cm²以下になったも

の、特に悪影響はなかったとみられる。後で述べるように、台風第 15 号はコンパクトな構造で、風速の強い範囲が限定されていたため、海面水温さえ暖かければ、多少海の中が冷たくても影響はなかったのではないかと推察される。

図 2.3.1b を見ると、台風第 15 号は一見発達には不利な環境場にあったことがわかる。台風の周辺の湿度は 60% 以下で、発達後半にかけて低下していた。上層 200hPa の発散は比較的小さい時間が多く、特に発達後半は負になっていた。これは台風周辺の上層大規模場が沈降場になっていたことを示す。この環境場条件は、統計的には最大風速の増加と中心気圧の低下に不利な条件とされている（嶋田と大和田 2019）。また、850hPa の渦度も発達後半に負になっており、台風周辺の大規模場が太平洋高気圧の影響で高気圧性循環にあったことを示す。この環境場条件は、統計的には中心気圧の低下に不利な条件とされている（嶋田と大和田 2019）。一方、最大風速の増加には有利に働きうる。大規模場の低気圧性渦度が小さいほど、台風のスケールが小さいことを意味し、中心気圧は高くなりうる一方、気圧の勾配は大きく風速が大きくなりやすいためである。

表 2.3.1. 変数リスト.

説明変数	説明
Vmax	最大風速
OHC	海洋貯熱量
RHMD	700–500 hPa 相対湿度 (%) (r=200–800 km)
SHDC	850–200-hPa 間の鉛直シア (r=0–500 km)
Z850	850-hPa 高度の絶対渦度 (r=0–1000 km)
D200	200-hPa 高度の発散 (r=0–1000 km)

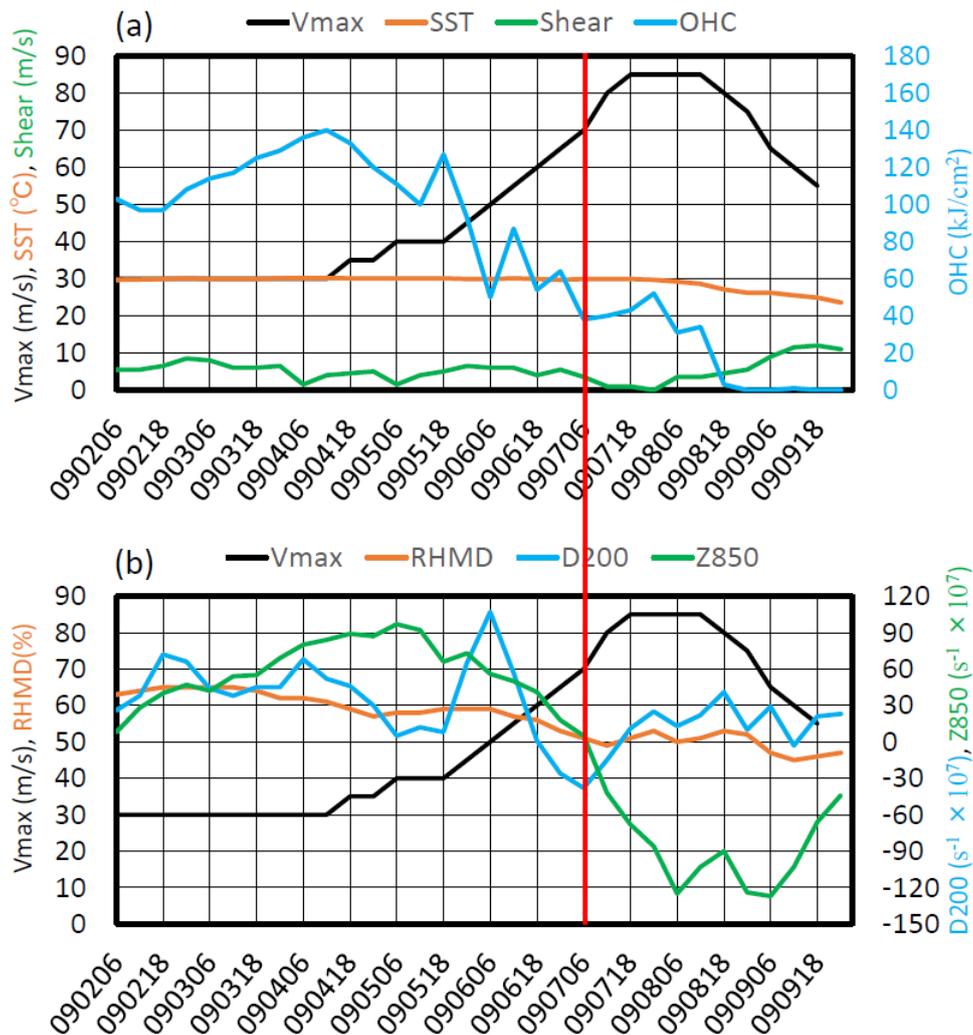


図 2.3.1 気象庁強度予報ガイダンスで使用されている環境場変数の一部及び台風の最大風速の時系列. 環境場変数は気象庁全球モデル (GSM) の初期値 (GANAL) から計算されたものである.

では以上のような環境場の特徴はどのような総観場によってもたらされたのだろうか。ここでは、特異な環境場を特徴づける 4 つの変数の分布を示す。図 2.3.2a, b は 9 月 7 日 6 時の水平スケール 1000 km 以下の擾乱成分をフィルターアウトした高度 200hPa の高度場及び 200-850hPa の高度間の鉛直シアを示す。台風は総観スケールの大規模場で見ると、上層の高気圧のほぼ真下に存在していた。このおかげで台風は 4 m/s 以下の非常に小さな鉛直シア場にあった。一方、対流圏中層 (高度 500hPa) では、総観規模の上層高気圧の存在により、台風の周囲が湿度 50% 以下の乾いた空気に取り囲まれていた (図 2.3.2c)。これは大規模場が沈降場にあったことと整合的である。Wang (2009) は数値実験を通じ、熱帯低気圧の外側領域の降水活動を人工的に抑制した場合、気圧の動径勾配が大きくなり、最大風速が増加することを示した。台風第 15 号もこの中層乾燥空気が台風の外側領域の対流活動を抑制しサイズをコンパクトにした一方、気圧勾配の増大により風速増大につながったことが推察される。したがって台風第 15 号の場合、乾燥空気は衰弱に効くのではなく、むしろ最大風速の増大に寄与していた可能性が考えられる。一方、海面潜熱フラックスは太平洋高気圧と台風の間、東風の影響により、台風進行方向前面 (アップシア左側) で大きな値となっていた。この海面潜熱フラックスの配置は、より軸対称な対流活動の形成に有利に働いたと考えられる (e.g., Rappin and Nolan 2012)。

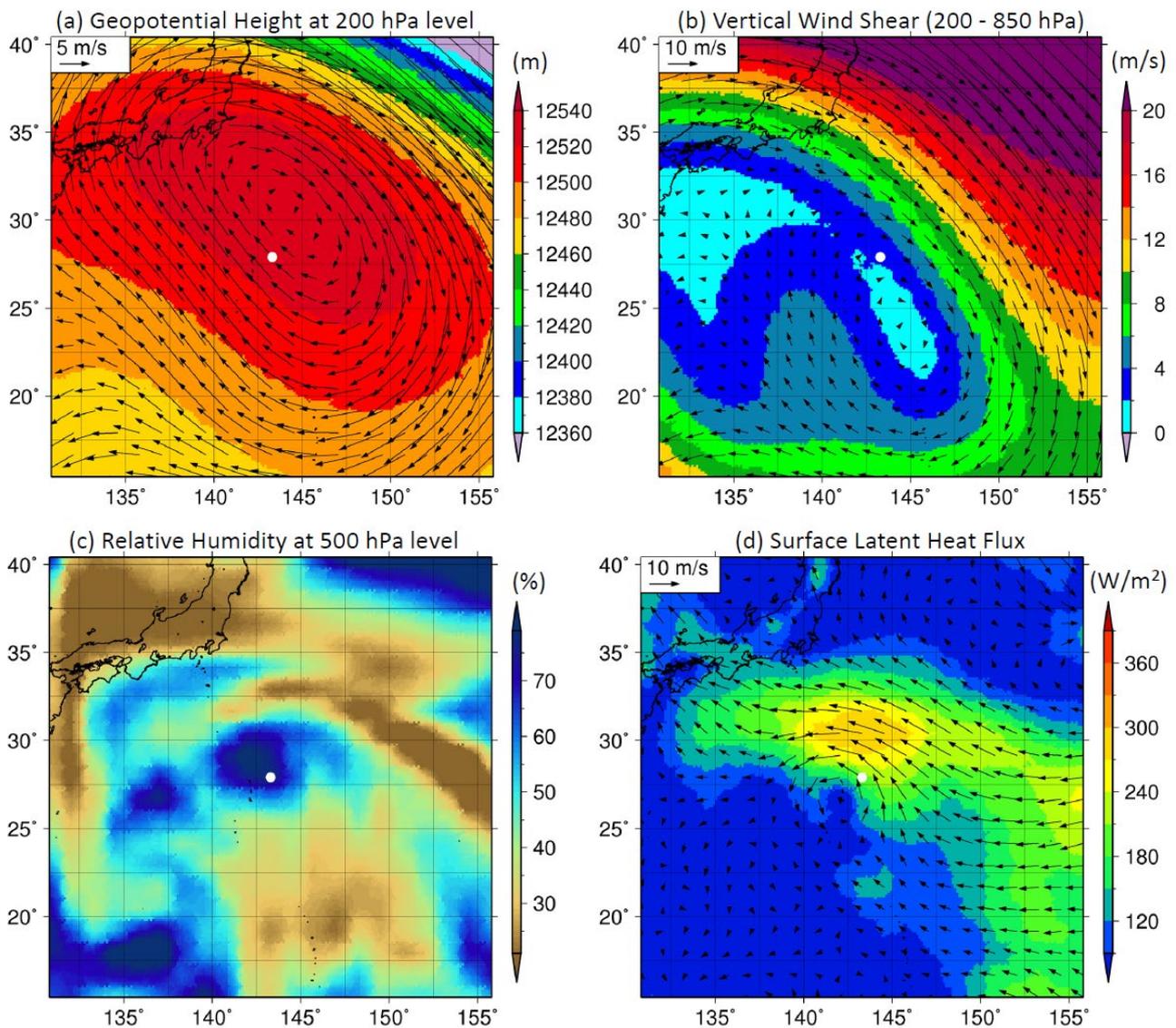


図 2.3.2 9月7日 0600UTC における (a) 200hPa の高度場、(b) 200hPa と 850hPa 間の鉛直シア、(c) 500hPa 高度の相対湿度、(d) 海面潜熱フラックス。データは JRA-55 を使用している。(a) 及び (b) は、Kurihara et al. (1993) や Wang et al. (2015) が用いた 1000 km スケール以下の擾乱をフィルタアウトする手法を通して台風成分を取り除いた場である。(d) は JRA-55 の風速を利用して算出したため、値が実際よりも大幅に小さいことに注意。

(b) 軸対称分布

東京レーダーで観測された反射強度の軸対称平均ホフメラー図によると (図 2.3.3)、台風の構造が上陸前後で激しく変化していたことがわかる。台風が陸地の影響を受け始めた 9月8日 1700UTC 以降、眼の壁雲の収縮が起きた。眼の領域にある非降水域が次第に縮小し、台風が千葉市に上陸した頃には眼の領域がつぶれた。その後、中心のすぐ東側で降水システムが発達した。台風が茨城沖に抜けた頃から、半径 70 km 付近に新しい眼の壁雲が形成された。

風速分布については、上陸直前の台風は、30m/s の風速 (高度 2 km 付近) 範囲が半径 100 km 付近にあった。半径 30-40 km 付近に最大風速半径 (RMW) が存在し、軸対称平均最大風速は高度 2 km で 45m/s 以上あった。その後、陸地の影響を受けて風速が急速に減少し、茨城沖に抜けた後には高度 2 km の軸対称平均最大風速は 35m/s 程度に減少した。

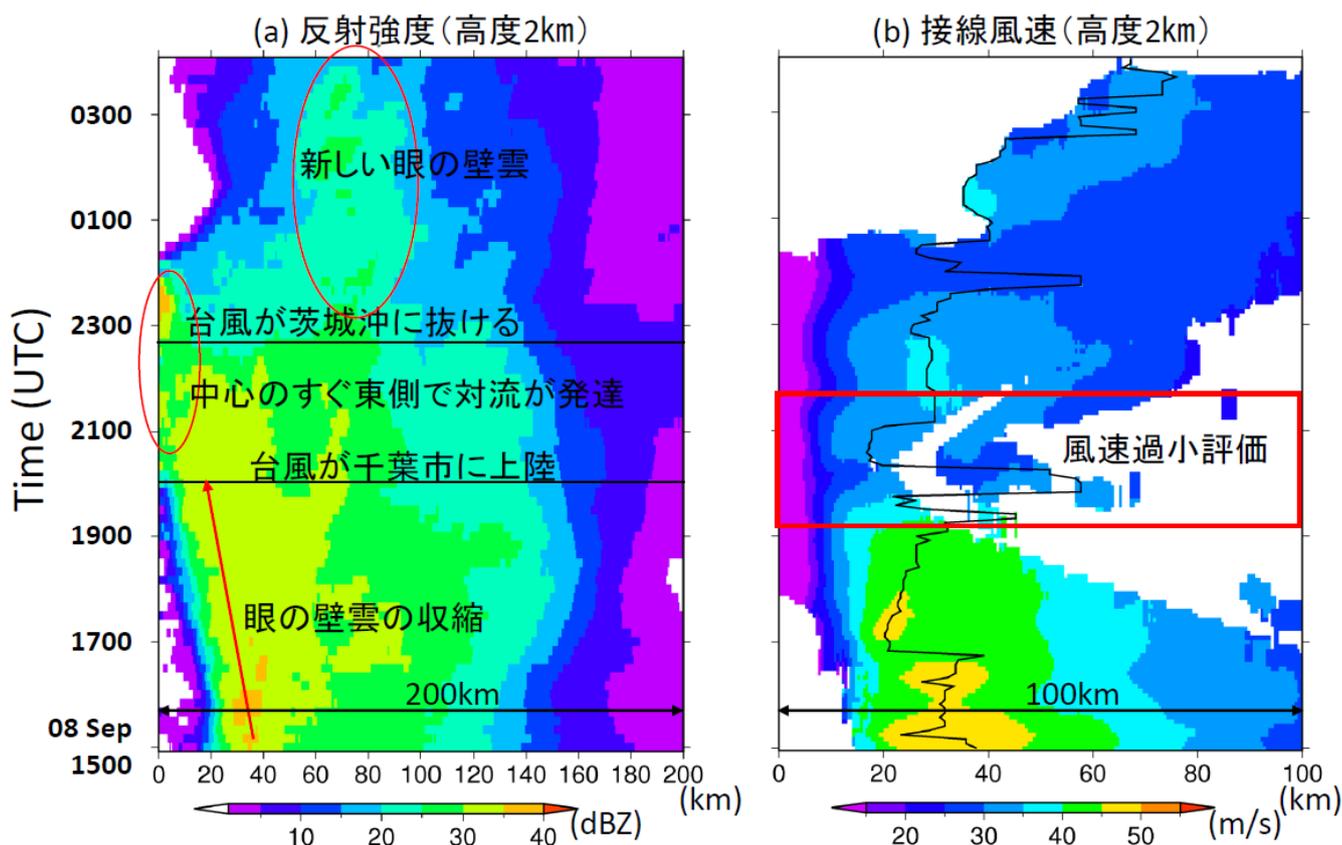


図 2.3.3 9月8日1500UTCから9月9日0400UTCまでの(a)軸対称平均した反射強度、(b)軸対称平均した高度2km接線風速のホフメラー図。(b)の黒線は最大風速半径(RMW)を示す。

次に台風第15号の構造を特徴づけるため、2018年に近畿地方に上陸した台風第21号の構造と比較を行った。図2.3.4は台風第15号の上陸前と後の半径・高度分布、図2.3.5は台風第21号の上陸前後の半径・高度分布である。上陸直前の構造に着目すると、高度2kmにおける両者の軸対称平均最大風速は45m/s程度で大きな違いはなかった。しかし、高度2kmのRMWは第15号が30-40km付近にあったのに対し、第21号は110-120km付近にあった。そのため、第15号は風速35m/s以上の範囲が半径80km以内だったのに対し、第21号は150km以遠までであった(レーダー解析範囲の外側)。水平スケールが第15号と第21号で大きく異なっていたことがわかる。このように台風第15号は狭い範囲で強い風が吹く構造的特徴を有していた。図は省略するが、相対渦度で比較すると、第21号の方は最大で軸対称成分の渦度は $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ に対し、第15号の方はその約2倍の $3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ に達していた。したがって、2019年台風第15号と2018年台風第21号は軸対称分布で見ると、台風第15号の方が上層の方まで最大風速が大きく、台風の渦としてしっかりとした構造を保っていたと言える。ただし、台風の移動速度が第15号で7m/sに対し、第21号では16m/sもあったため、台風の強度としての最大風速は台風第21号の方が強かったことに注意が必要である。

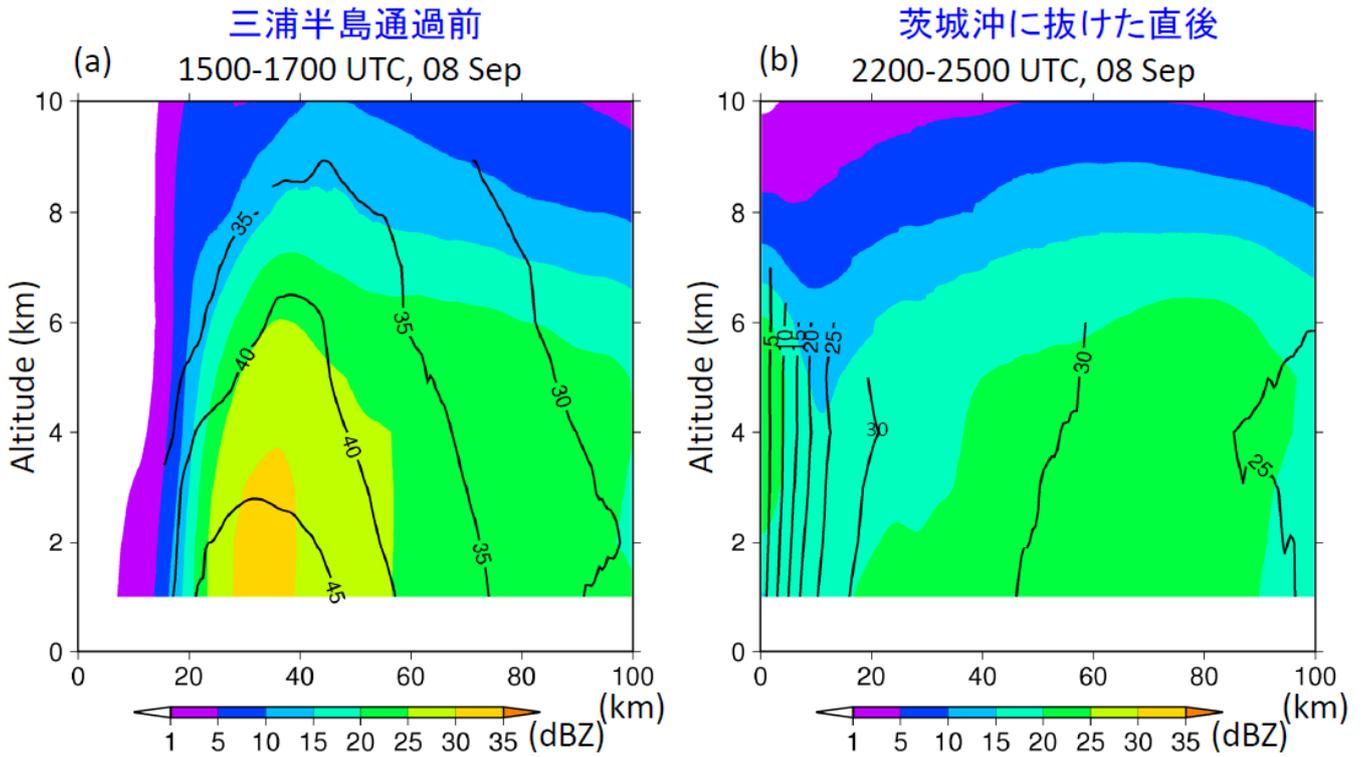


図 2.3.4 2019 年台風第 15 号の上陸前後における半径・高度分布（時間平均値）. カラーは軸対称平均した反射強度、実線は軸対称平均した接線風速を示す.

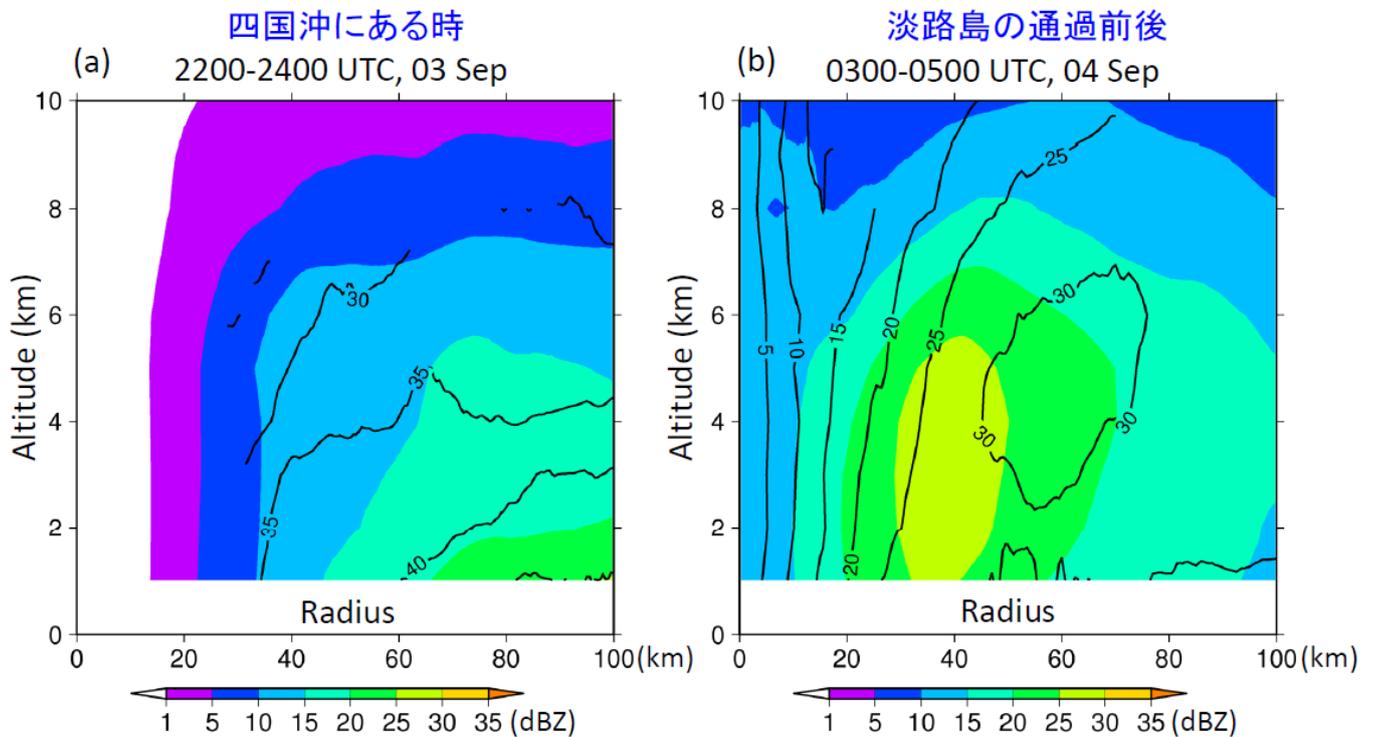


図 2.3.5 2018 年台風第 21 号の上陸前後における半径・高度分布（時間平均値）. カラーは軸対称平均した反射強度、実線は軸対称平均した接線風速を示す.

(c) 非対称分布

台風第 15 号はコンパクトで閉じた眼の壁雲を伴っていたものの、眼の壁雲はきれいな軸対称な構造ではなく、外側にスパイラル状に伸びた数本の降水バンドで構成されていた。これらの非対称構造の特徴について、ここでは、眼の壁雲交換、レインバンド、風速極大の観点から報告する。

(i) 眼の壁雲交換

台風は伊豆諸島近海を北上中と茨城県沖に進んだ直後にそれぞれ眼の壁雲交換を経験した。眼の壁雲交換とは一般に、内側壁雲が衰弱して消滅する一方外側壁雲が新たに形成・発達することで、眼の壁雲が置き換わる現象である。台風第 15 号の壁雲交換では、二回とも一般的な壁雲交換とはやや異なる特徴が見られた。

図 2.3.6 に一回目の壁雲交換時の降水強度分布を示す。1040UTC には二つの壁雲（二重壁雲）が見られ、内側壁雲は半径約 20 km、外側壁雲は半径約 50 km の大きさを持っていた。次第に内側壁雲の南半分が消滅するとともに、北半分は強い降水強度を保ったまま外側壁雲と一体化していった。そして 1310UTC には二つの壁雲としての識別が不可能となった。壁雲交換が完了したとみられる。図は省略するが、二重壁雲時にはドップラー速度の分布でも風速のダブルピークが見られた。眼の壁雲交換が完了しても、きれいな軸対称な眼の壁雲が形成されたわけではなく、外側に数本のスパイラル状の降水域が伸びた、非対称な眼の壁雲構造になっていた。

一回目の壁雲交換時に、台風はちょうど神津島付近を通過した。神津島空港で観測された海面更正気圧、風向及び風速によると（図 2.3.7）、最低海面更正気圧（952.6hPa）を観測したのは内側壁雲の中心付近が通過した 9 月 8 日 1231UTC 頃で、その後はゆっくりと気圧が上昇した。気圧の水平分布は軸対称ではなく、進行方向前面で勾配が大きく、後面で勾配が緩やかだったことがわかる。

二回目の壁雲交換では、9 月 8 日 2200UTC 以降、台風中心の西側に非降水域が急に現れ、台風の上陸によって収縮していた中心付近の降水域の南西側が消滅した（図 2.3.8）。一方、台風中心のすぐ南東象限で発達したバンド状の降水域は次第に新しい眼の壁雲の一部を構成した。9 日 0200UTC 以降、非降水域の西側には再び降水域が現れ、大きな閉じた眼の壁雲となった。しかしながら、この時間帯においては非降水域が多くを占めており、精度の高い密な風速分布は得られなかったため、風速のダブルピークは確認できず、東側で発達したレインバンドに伴う詳細な風速分布は得られなかった。

これらの壁雲交換では、古い眼の壁雲の中心点は外側壁雲の中心点よりも進行方向前面にずれて位置しており、古い内側壁雲の一部が発達したまま外側壁雲と一体化していた。Zhang et al. (2017) はこのような眼の壁雲交換を「部分的な眼の壁雲交換」と呼んだ。

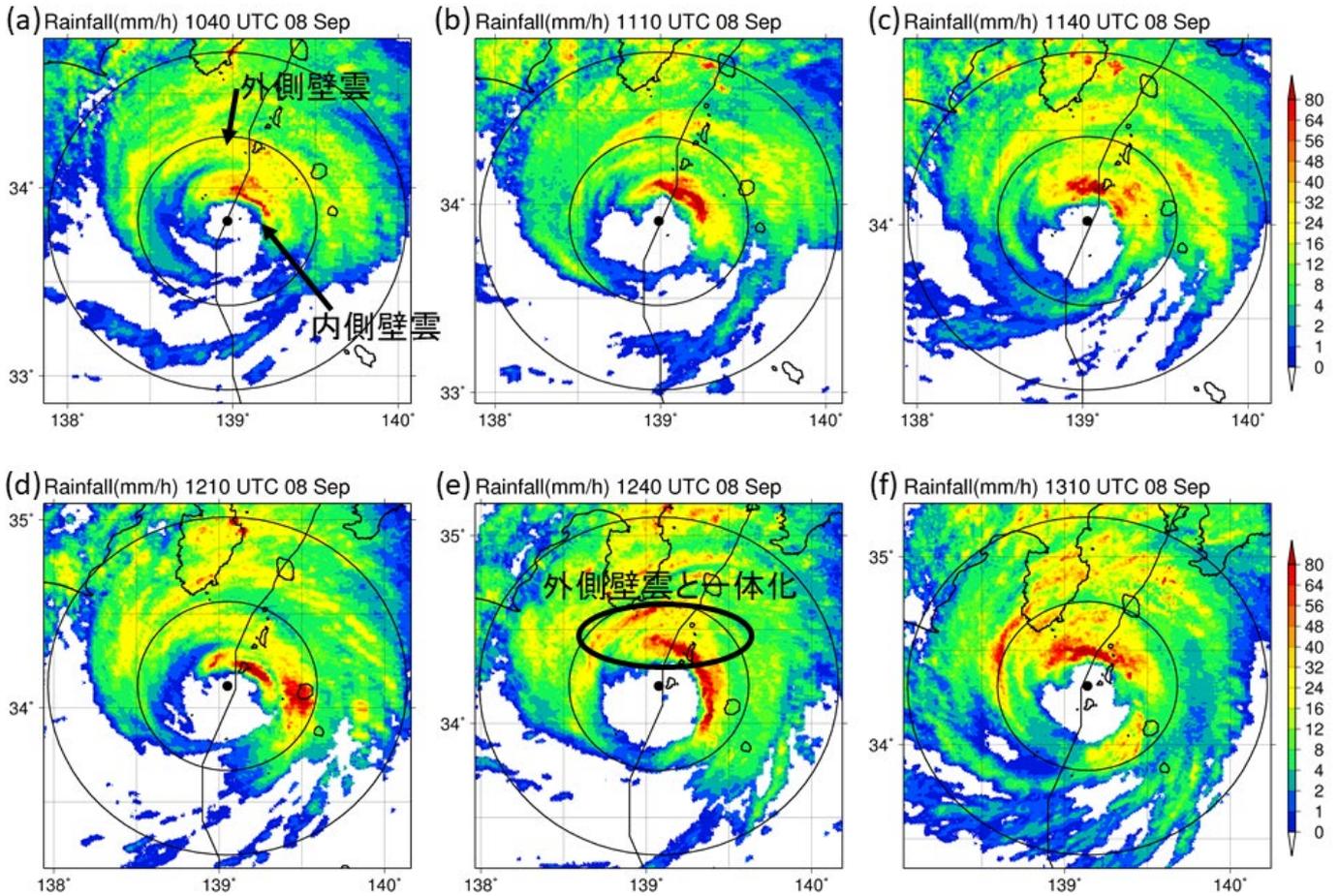


図 2.3.6 一回目の目の壁雲交換時の降水強度分布. 黒線は気象庁速報解析の経路及び風速場解析で抽出された中心点を示す. 円は台風中心から半径 50km 及び 100 kmを示す. 台風を中心点 (黒点) は台風スケールの循環中心点であり、気象庁速報解析の線形内挿点とは異なる.

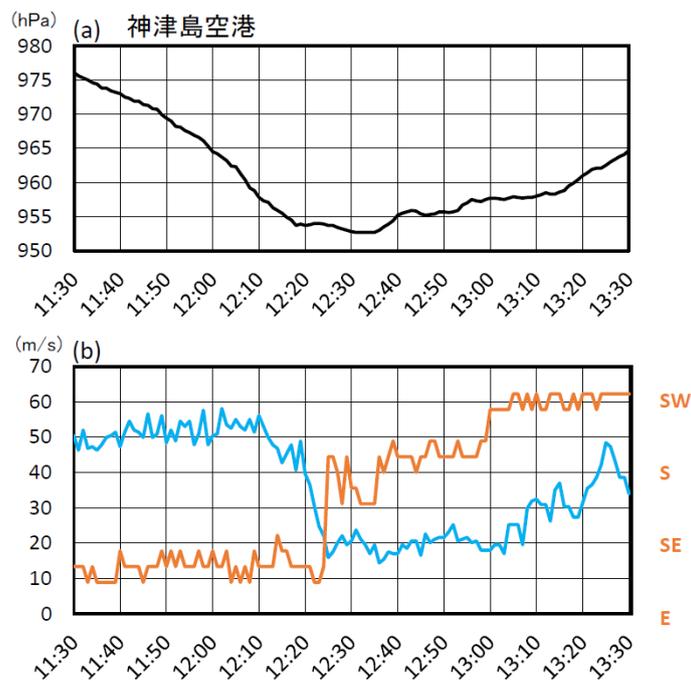


図 2.3.7 神津島空港で観測された (a) 海面更正気圧, (b) 1 分毎の最大瞬間風速の最大値とその風向.

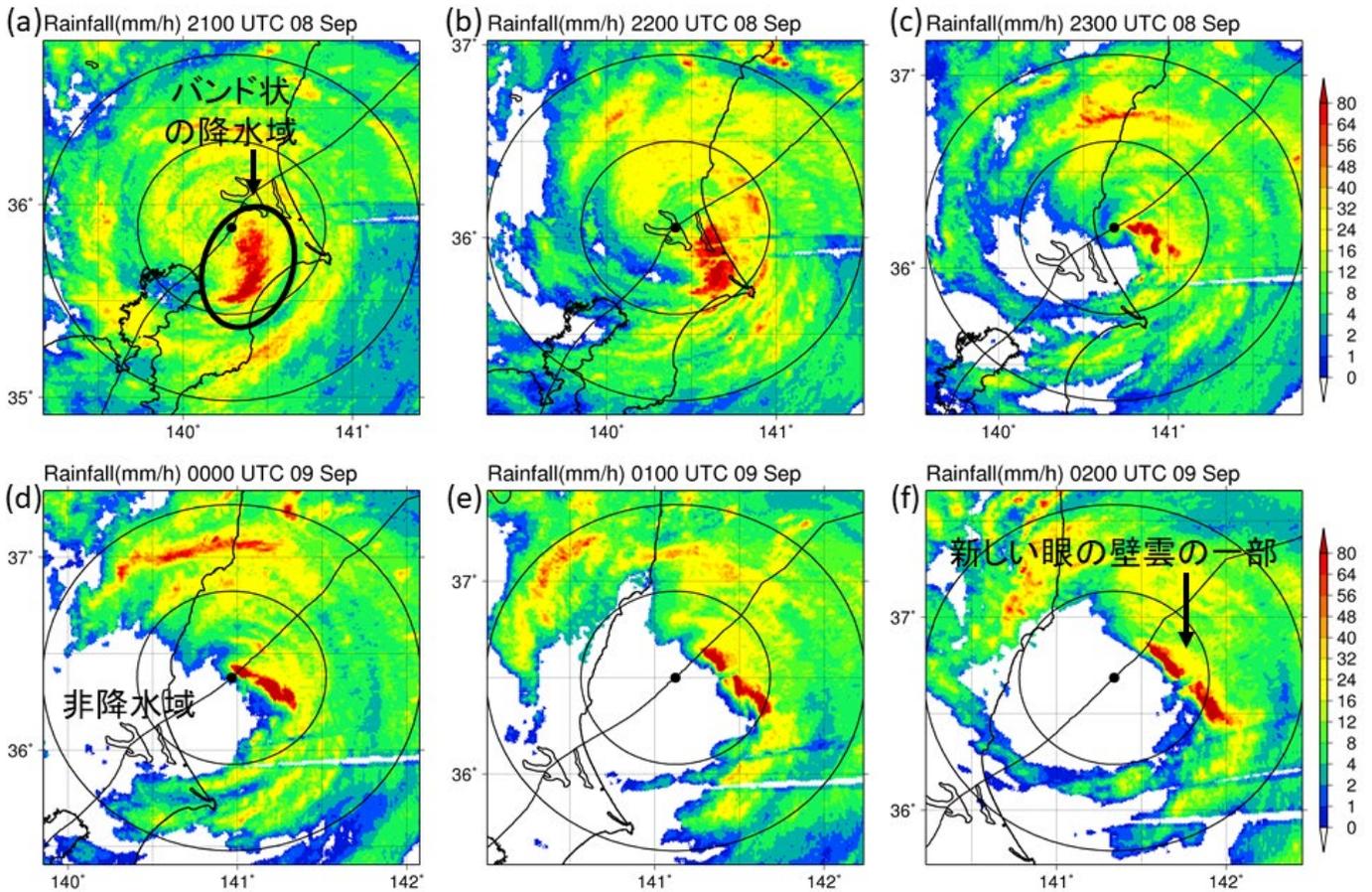


図 2.3.8 二回目の眼の壁雲交換時の降水強度分布. 黒線は気象庁速報解析の経路及び風速場解析で抽出された中心点を示す. 円は台風中心から半径 50km 及び 100 km を示す. 台風の中心点 (黒点) は台風スケールの循環中心点であり、気象庁速報解析の線形内挿点とは異なる.

(ii) レインバンドと風速の極大

千葉県南部の高度 2 km の上空では、台風が三浦半島を通過する前の 9 月 8 日 1630UTC 頃から、東京湾を通過中の 1900UTC にかけて、風速 50m/s 以上の風が吹いていた (図 2.3.9 左)。特に 1730UTC から 1900UTC にかけては、眼の壁雲から台風の南東側にスパイラル状に延びる強いレインバンドが見られ、その風下側で風速が局所的に増加していた (図 2.3.9 中及び右)。活発なレインバンドは他に台風の眼の壁雲の北東側と西側にもそれぞれ見られた。

台風の南東側のレインバンドは台風が千葉県に上陸以降さらに発達した。この頃の GBVTD 法による風速は過小評価となっている可能性が高いが、南東側のレインバンド付近では風速も局所的に強くなっていた (図略)。

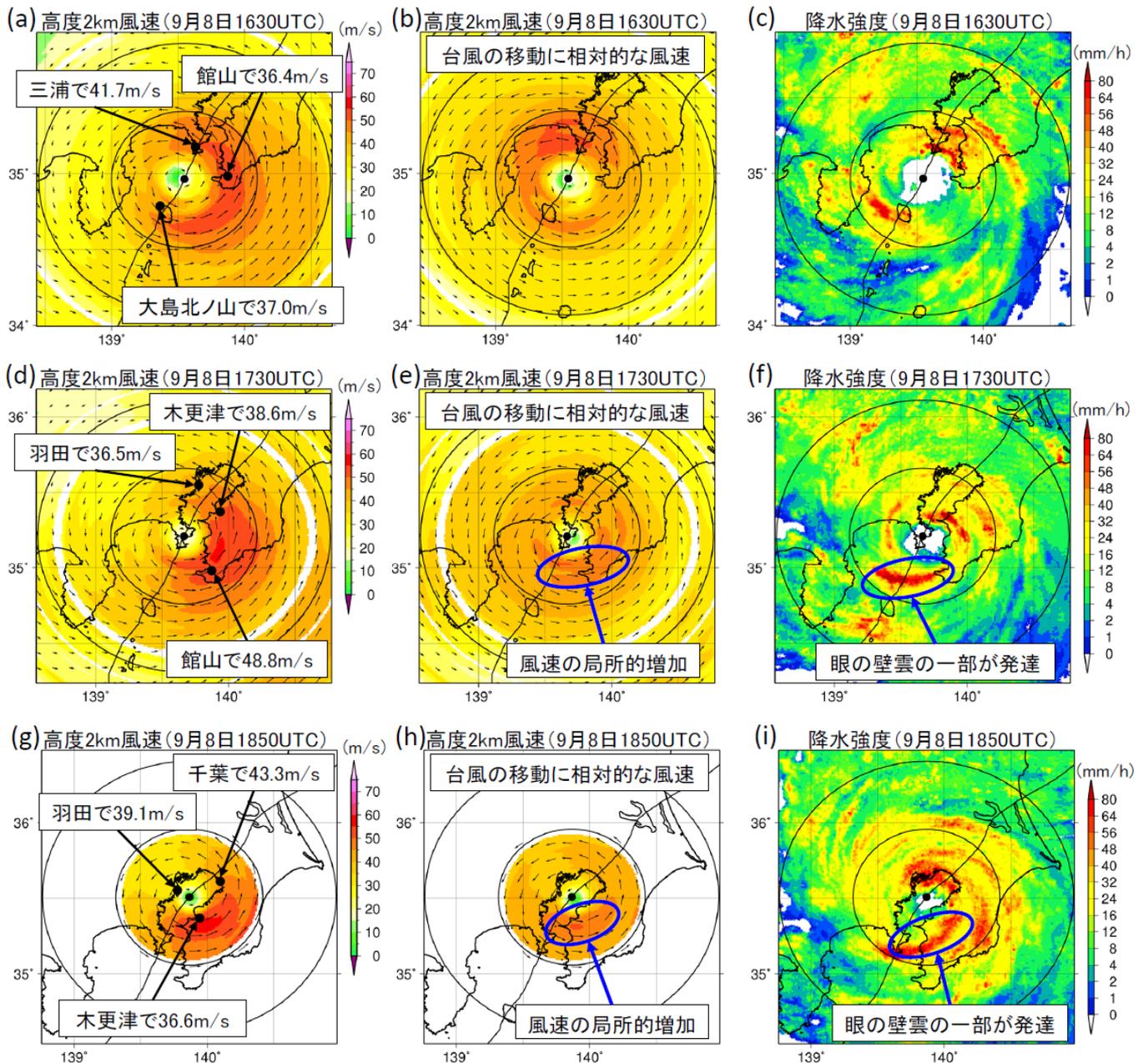


図 2.3.9 ドップラー速度データから推定された高度 2 km の風速(左側)、高度 2 km の風速から移動速度を差し引いて求めた台風の移動に相対的な風速(真ん中)及び降水(右側)の分布。上段は9月8日1630UTC、中段は9月8日1745UTC、下段は9月8日1850UTC。黒線はレーダー解析に用いた台風経路を示す。円は内側から順に、台風中心点から50km、100kmの距離を示す。対象時刻の前後5分以内に地上で観測された最大瞬間風速の極値を黒枠内に示す。風速の空白域は、ドップラー速度の観測値がないため、風速が推定できなかったことを示す。風速場推定手法の精度的限界のため、風向には不確実性があることに注意が必要である。

(iii) 風速の継続時間と地上の突風

千葉県南部の上空では、レインバンドに伴う局所的な風速増加と、地理的に台風の進行方向の右側に位置していたことが影響し、台風の大部分が陸地にあるにもかかわらず、少なくとも1900UTC頃までは風速が減少しなかった。その結果、千葉県南部の高度2kmの上空では、風速50m/s以上の風が最大で2時間にわたり吹き続いていた(図2.3.10右)。また、伊豆半島から関東地方南部、茨城県にかけての広い範囲で、風速40m/s以上の風が高度2kmの

上空で吹き続いていた（図 2.3.10 左）。

一般に高度 2 km の風速と地上で起こる最大瞬間風速（突風）の極値は、各観測点で見ると、良い対応関係にある。実際、台風の眼の壁雲（強い降水域）付近では、高度 2 km の風速に匹敵する最大瞬間風速の極値が地上（沿岸地域）でしばしば観測されている。ゆえに、高度 2 km の風速は、地上（沿岸地域）で起こる最大瞬間風速の極値をある程度推測できる高度の風と言える。熱帯低気圧の観測研究や理論研究によると、台風の眼の壁雲付近では、地上の 10 分平均風速が高度 2 km 風速の約 0.8 倍になる関係が知られている。また、地上 10 分平均風速と最大瞬間風速（3 秒平均風速）の極値は、約 1.2 倍になることが知られている。結果的に、レーダーで観測される高度 2 km 風速と地上（沿岸地域）で観測される最大瞬間風速の極値はほぼ同じになりうる。

台風第 15 号の事例においても概ね良い対応が見られた。沿岸域のアメダスで観測された 1 分毎の最大瞬間風速とその上空の高度 2 km のレーダーで推定された風速の関係を見ると、台風第 15 号では、高度 2 km 風速に相当する最大瞬間風速の極値を地上で観測していたことがわかる（図 2.3.11）。また、千葉県館山で観測された 1 分毎の最大瞬間風速と高度 2 km の推定風速の時系列によると、高度 2 km で推定風速 50m/s 以上の風が吹いている間、地上では 40m/s 以上の最大瞬間風速が頻繁に観測されていた（図 2.3.12）。

高度 2 km の風速と最大瞬間風速の極値の間の一般的な関係とレーダー解析の結果を合わせて考えると、千葉県館山で観測されたような 40m/s 以上の最大瞬間風速の極値が、観測データのない千葉県南部の沿岸地域全域でも生じていた可能性が示唆される。

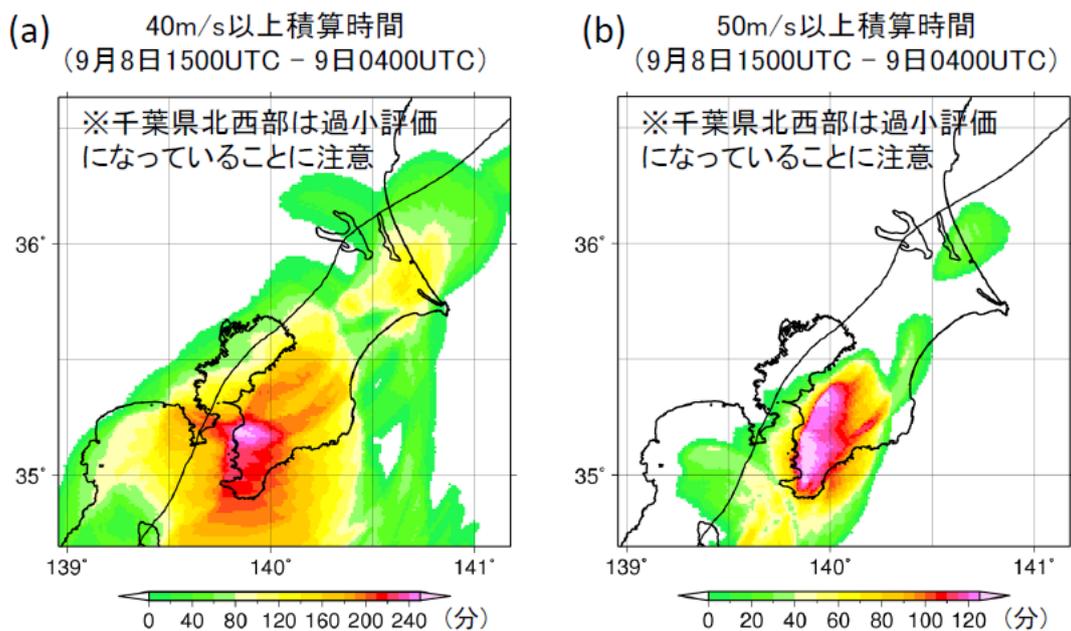


図 2.3.10 高度 2 km 付近で風速 40m/s 以上 (a)、及び風速 50m/s 以上 (b) の風が吹いていたと推定される積算時間 (分) . 積算は 9 月 8 日 1500UTC から 9 日 0400UTC まで.

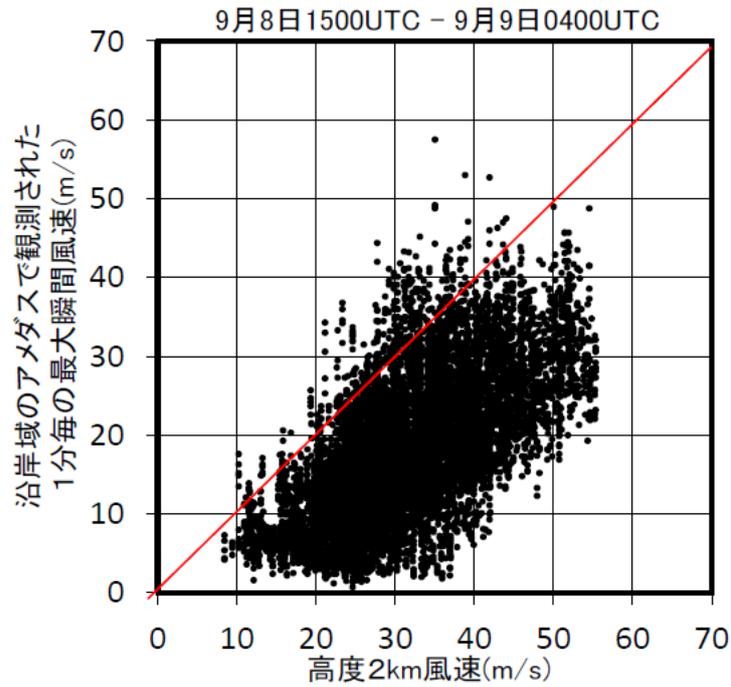


図 2.3.11 沿岸域のアメダスで観測された1分毎の最大瞬間風速の最大値と高度2kmの推定風速の散布図（9月8日1500UTCから9日0400UTCまで）。

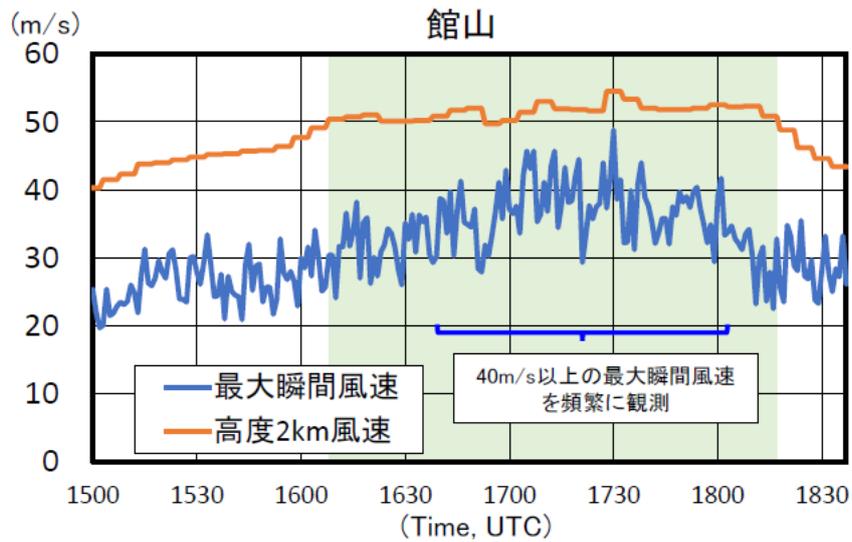


図 2.3.12 千葉県館山で観測された1分毎の最大瞬間風速の最大値と高度2kmの推定風速の時系列（9月8日1500UTCから1836UTCまで）。緑色は推定風速が50m/s以上の期間を表わす。

(iv) 海陸分布の影響

Keperit 氏の境界層モデル(Keperit and Wang 2001)を使用して、関東地方の海陸分布や移動速度が台風の非対称構造にどう影響を与えたか調べた。この境界層モデルは、湿潤過程が入っていないドライモデルであり、摩擦分布に対応した境界層内の非対称構造を診断する(Keperit 2006b)。ここでは9月8日1730UTCにおける風速場(レーダーからGBVTD法で算出)から傾度風バランスを仮定して推定した軸対称な気圧場(高度5km)を境界層モデルに与えることで、摩擦応答に伴う風速場を診断した。また関東南部の海陸分布(標高0mとする)を与えるのみとし、地形の影響は診断しない。

図2.3.13aによると、海陸分布の影響により、台風の南側にあたる相模湾で摩擦収束が強まることが診断された。これに移動速度の効果が加わると(図2.3.13b)、進行方向前面(北東側)と北西側にも摩擦収束域ができた。その結果、摩擦収束の極大域が房総半島先端から相模湾にかけてと、房総半島、及び湘南海岸付近の三か所に診断された。これらの診断された摩擦収束の極大域付近には、実際に眼の壁雲を構成する三つのレインバンドが形成されていた(図13c)。よって、台風が三浦半島から東京湾を通過している時の非対称な降水分布は、移動速度と海陸分布が影響していたことがわかった。

一方、今回使用した境界層モデルでは、高度2km付近に見られた風速極大を診断しなかった。レインバンドの発達に伴う湿潤プロセスの影響を考慮しないとイケないかもしれない。今後の課題である。

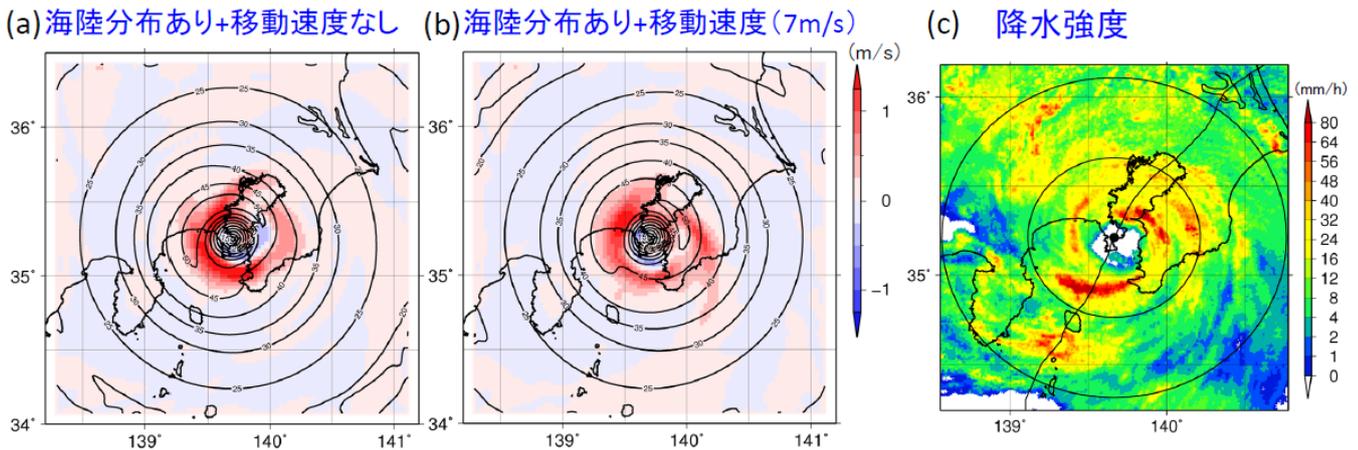


図 2.3.13 9月8日1730UTCにおける、(a, b)境界層モデルを用いて診断された高度1 kmでの鉛直速度(カラー)及び高度2 kmでの風速(実線)、(c)降水強度。

2.3.4 まとめ

台風第15号の発達期における環境場の特徴と、関東地方上陸前後における、台風の降水分布及び風速場の時間変化を調査した。台風第15号は、海面水温が30度で、非常に小さな鉛直シア(5m/s以下)の環境場で発達した。このような条件は一般に発達に好都合な環境場である。一方でこの台風は、周辺を乾燥空気に囲まれ、総観規模の上層高気圧のほぼ真下に位置し、上層発散が抑制された環境場であったにもかかわらず発達したことは特筆すべき特徴である。台風は非常にコンパクトな構造を有して最盛期に達し、その後大きく衰弱せずに関東地方に上陸した。台風は伊豆諸島近海を北上中と茨城沖に進んだ直後に眼の壁雲交換を経験した。上陸後には眼の壁雲が収縮して非降水の眼領域がつぶれた一方、眼の壁雲から外側にスパイラル状のレインバンドが発達し、房総半島南部でしばらく停滞した。台風の移動速度(7m/s)の影響で、風速場は非対称な構造になっており、進行方向右側の千葉県で風速が増加した。さらにストームリラティブな風速場は、上陸前は進行方向前面に極大域があった一方、陸地の影響

を受けた後は台風の南東側に極大域が現れた。その結果、千葉県南部では高度 2 km 付近で風速 50m/s 以上の風が最大で 2 時間にわたって吹き続いていた。沿岸域では高度 2 km の風速と同程度の最大瞬間風速の極値が地上で観測されることが知られている。今回の解析結果から、千葉県館山で頻りに観測された 40m/s 以上の最大瞬間風速は、アメダスによる観測のない千葉県南部の沿岸地域でも生じていた可能性が示唆された。最後に、境界層モデルを用いた調査により、台風が東京湾を進んでいる時の非対称な降水分布は、台風の移動の影響に加え、関東地方の海陸分布が影響したことが示唆された。

謝辞

本調査を進めるにあたり、貴重な観測データを迅速に提供くださった気象庁観測部、成田航空地方気象台、及び東京航空地方気象台の関係者に深く感謝いたします。また、境界層モデルの使用を許可いただいたオーストラリア気象局及び Jeff Kepert 氏に感謝いたします。本調査は、科学研究費助成事業（特別研究促進費）「停電の長期化に伴う影響と風水害に関する総合調査」（代表丸山喜久千葉大学教授）の助成を得て行われた。

参考文献

- 1) Bell, M. M., and W. Lee, 2012: Objective tropical cyclone center tracking using single-Doppler radar. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 878-896.
- 2) Jou, B. J.-D., W. C. Lee, S. P. Liu, and Y. C. Kao, 2008: Generalized VTD retrieval of atmospheric vortex kinematic structure. Part I: Formulation and error analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 995-1012, doi:10.1175/2007MWR2116.1.
- 3) Kepert, J. D., 2006b: Observed boundary layer wind structure and balance in the hurricane core. Part II: Hurricane Mitch. *J. Atmos. Sci.*, 63, 2194-2211, doi:10.1175/JAS3746.1.
- 4) Kepert, J., and Y. Wang, 2001: The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part II: Nonlinear enhancement. *J. Atmos. Sci.*, 58, 2485-2501, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<2485:TDOBLJ>2.0.CO;2.
- 5) Kurihara, Y., M. A. Bender, and R. J. Ross, 1993: An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2030-2045, doi:10.1175/1520-0493(1993)121,2030:AISOHM.2.0.CO;2.
- 6) Lee, W.-C., B. J.-D. Jou, P.-L. Chang, and S.-M. Deng, 1999: Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon. Wea. Rev.*, 127, 2419-2439.
- 7) Ono, M., S. Notsuhara, J. Fukada, Y. Igarashi, and K. Bessho. 2019: Operational Use of the Typhoon Intensity Forecasting Scheme Based on SHIPS (TIFS) and Commencement of Fiveday Tropical Cyclone Intensity Forecasts. Technical Review No. 21. RSMC Tokyo Typhoon Center.
- 8) Rappin, E. D., and D. S. Nolan, 2012: The effect of vertical shear orientation on tropical cyclogenesis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 138, 1035-1054.
- 9) 嶋田宇大, 大和田浩美, 2019: SHIPS. 気象研究所技術報告, 82, 4-19.
- 10) Shimada, U., M. Sawada, and H. Yamada, 2018a: Doppler radar analysis of the rapid intensification of Typhoon Goni (2015) after eyewall replacement. *J. Atmos. Sci.*, 45, 143-162.
- 11) Wang, Y., 2009: How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? *J. Atmos. Sci.*, 66, 1250-1273, doi:10.1175/2008JAS2737.1.
- 12) Wang, Y., Y. Rao, Z.-M. Tan, and D. Schonemann, 2015: A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the western North Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 143, 3434-3453, doi:10.1175/MWR-D-15-0049.1.

- 13) Yamaguchi, M., H. Owada, U. Shimada, M. Sawada, T. Iriguchi, K. D. Musgrave, and M. DeMaria., 2018: Tropical Cyclone Intensity Prediction in the Western North Pacific Basin using SHIPS and JMA/GSM. SOLA, 14, 138-143.
- 14) Zhang, F., D. Tao, Y. Q. Sun, and J. D. Kepert, 2017: Dynamics and predictability of secondary eyewall formation in sheared tropical cyclones. J. Adv. Model. Earth Syst., 9, 89-112, doi:10.1002/2016MS000729.

超高分解能モデルによる市街地での突風の解析

Numerical Analysis of Turbulence and Gust in an Urban District with an Ultra-High-Resolution CFD Model

竹見 哲也*¹*Tetsuya TAKEMI*

This study examined the characteristics of severe winds and gusts over an urban district during the passage of Typhoon Faxai (2019) by using an ultra-high-resolution computational fluid dynamics (CFD) model. A building-resolving large-eddy-simulation modeling for turbulent motions was employed in the CFD model. As a case, business districts in Tokyo were chosen for the numerical analysis. The large eddy simulations realistically reproduced turbulent winds within the urban districts. It was found that the peak gusts become stronger in areas consisting of buildings with variable heights and open spaces/major streets. Urban districts are highly susceptible to wind-induced damages.

Keywords : *severe winds, gust, turbulence, large-eddy simulation, computational fluid dynamics*

2.4.1 はじめに

台風 15 号により、関東各地で暴風が吹き、特に房総半島では広域で倒木や電力網への被害が生じ、長期間におよぶ停電が発生し、生活基盤に甚大な影響が生じた。最大瞬間風速としては、房総半島の地点では、館山 48.4 m/s、勝浦 40.8 m/s、木更津 49.0 m/s、千葉 57.5 m/s、成田 45.8 m/s、銚子 40.4 m/s といった暴風が観測された。一方、東京都心でも暴風が吹き、東京 31.4 m/s、羽田 43.7 m/s、江戸川臨海 36.5 m/s といった最大瞬間風速が記録された。

こういった瞬間的に強まる突風は、台風自身が気象現象として持つ固有の擾乱特性から生じる場合もあれば、地表面の複雑さや凹凸具合によって生じる気流の乱れから生じる場合もある。どちらの影響が顕著に表れるかは、気象場や地理的な特徴に応じて変化する。例えば、竜巻やダウンバーストといった局所的な現象の場合には、突風は現象が持つ固有の特性に応じて定量的に決まると言える。一方、台風や低気圧の場合には、気象場の影響が顕著に表れる場合もあれば、地形や都市構造といった地表面形状の影響が支配的になる場合もあるであろう。

例として 2018 年台風 21 号の場合を考えると、市街地における突風率は 2 前後となり、一般的に知られた突風率（概ね 1.2~1.5）よりもはるかに大きな値を取ることが分かった¹⁾。これは、市街地で生じる突風は、地表面の形状あるいは粗度に一定程度は影響を受けるということを示唆している。

そこで本研究では、市街地で生じる暴風や突風を定量的に見積もることを目的とする。東京都心の高層ビルが林立する街区を解析対象とすることで、ビルの高さや密集度によって風速変動が街区内でどのように変化するかにつ

*1 京都大学防災研究所 准教授・理博

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Dr.Sci.

いて調べる。建物を陽に表現し、large eddy simulation (LES)により、超高分解能で数値シミュレーションし、台風 15 号通過時に想定される東京都心での暴風を量的に再現する。

2.4.2 数値モデルおよびシミュレーションの設定

本研究で用いた数値モデルは、Yoshida et al. (2018)²⁾、Yoshida and Takemi (2018)³⁾で開発された LES モデルである。本 LES モデルは、Nakayama et al. (2011)⁴⁾に基づき、MPI による大規模並列化などの高速化が施されている⁵⁾。この LES モデルでは、乱流粘性は標準スマゴリンスキーモデルによりモデル化されており、京都市街地での観測結果との比較からスマゴリンスキー定数を 0.14 と設定している²⁾。本 LES モデルにより、京都市街地²⁾や大阪市街地⁶⁾を対象に、乱流シミュレーションが実施されている。大阪市街地を対象とした研究⁶⁾では、2018 年台風 21 号の通過に伴って生じた市街地内での暴風を定量的に表現することに成功し、高層ビルの周囲に大通りや中低層建物が混在する街区では、境界層上端高度の風と同程度の暴風が地上でも吹くことが示された。このように本 LES モデルは、既に実市街地での適用例を重ね、実績を残しているものである。

解析対象領域は、図 2.4.1 の白枠で示した東西 2 km・南北 3 km の範囲とした。図中には、国際航業 (株) による 3 次元地理空間データ PAREA-LiDAR より作成した 2 m 分解能での東京都心部の建物高さの分布を示す。その中で、解析対象として、高層ビルが林立し、また中低層の建物が密集したり、大通りや公園といった空間が存在したりといった多様な空間特性を持つ範囲を選んだ。計算領域の鉛直方向には 1.026 km の高さを設けた。

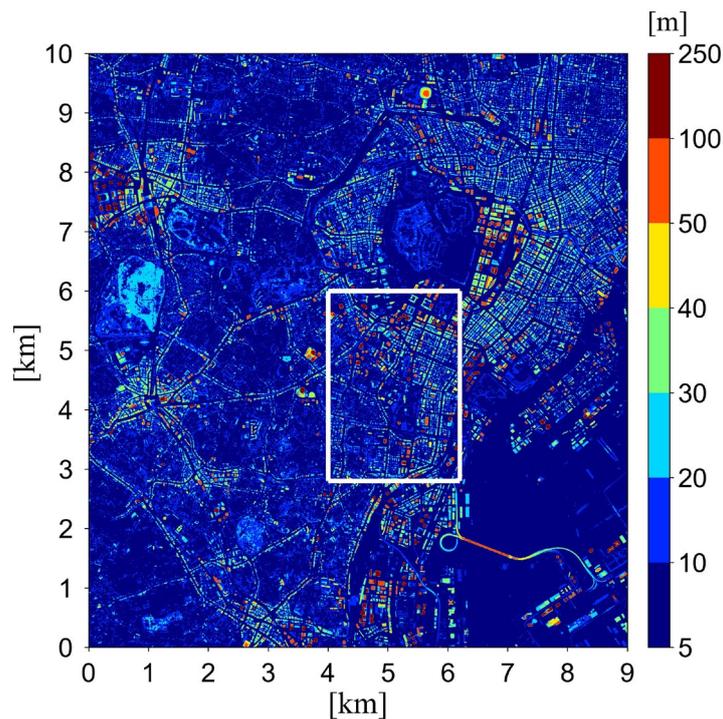


図 2.4.1 東京都心部での建物高さ (単位 : m) の分布と LES モデルによる計算領域 (白枠)

図 2.4.1 に示される実際の都市建物データを用い、建物や構造物を陽に LES モデルの下端境界条件として与える。LES モデルの格子系は直交直線座標系であり、建物が流れ場に及ぼす影響を Goldstein et al. (1993)⁷⁾によるフィードバック強制により表現し、建物が存在する格子点において、この強制を運動方程式の外力項として与える。建物が存在しない流体の格子点では、この外力項は除外する。このように、格子点毎に流体か建物かを都市建物データ

PAREA-LiDAR から判別することで、統一した支配方程式を直交直線座標系で差分化し、数値的に時間積分する。本研究での計算領域の空間分解能は、水平格子幅を 2 m とし、鉛直格子幅は地面から高度 350 m までは 2 m、350 m より上空では 2 m から徐々に間隔を 16 m にまで広げて設定した。これによって、建物部分については、水平・鉛直方向ともに 2 m の解像度で表現されることになる。

台風 15 号の通過時の東京都心部での強風は、概ね北よりであったことから、解析対象領域の北側境界を流入境界とし、北風を想定した場合の対象領域内の乱流シミュレーションを実施した。乱流シミュレーションをするためには、流入境界において適切な強度を持った変動風を境界条件として注入することが必要不可欠である。本研究では、Nakayama et al. (2011)⁴⁾を参考にして、解析対象とする計算領域とは別に、乱流を駆動するドライバー部を設け、十分に吹走させることで乱流を生成する手法を用いた。ドライバー部では、下端境界に高さに粗度ブロックを配置し、吹走させることで十分な変動性状を持つ乱流を生成させ、ライバー部での流出境界での変動風速を解析対象領域の流入境界面に与えた。この手法は、Yoshida et al. (2018)²⁾および Yoshida and Takemi (2018)³⁾と同じものである。解析対象の本計算領域の下流側の境界には放射条件、側面境界面には周期条件を課した。

図 2.4.2 に、本計算領域を拡大した範囲を示す。この図では、左が北側、右が南側、上が東側、下が西側を示し、流入境界は左境界となる。北風が主流方向とみなすことから、図中の左から右向きを主流方向として x 座標とし、それと直交する軸を y 座標と設定した。なお、解析対象領域である x 方向 3 km・ y 方向 2 km の範囲の外側に、一様高さの粗度ブロックを規則的に配置し、バッファー領域とすることでドライバー部から本計算領域への不自然な接続を回避するように工夫した。バッファー領域も含めた本計算領域の大きさは、 x 方向 4 km・ y 方向 2.4 km とした。バッファー領域は、ドライバー部でも設定しており、ドライバー部の計算領域は、 x 方向 6 km・ y 方向 2.4 km・ z 方向（鉛直方向）1.026 km である。

時間積分は 5400 秒とし、最後の 1800 秒間の出力データにより解析した。

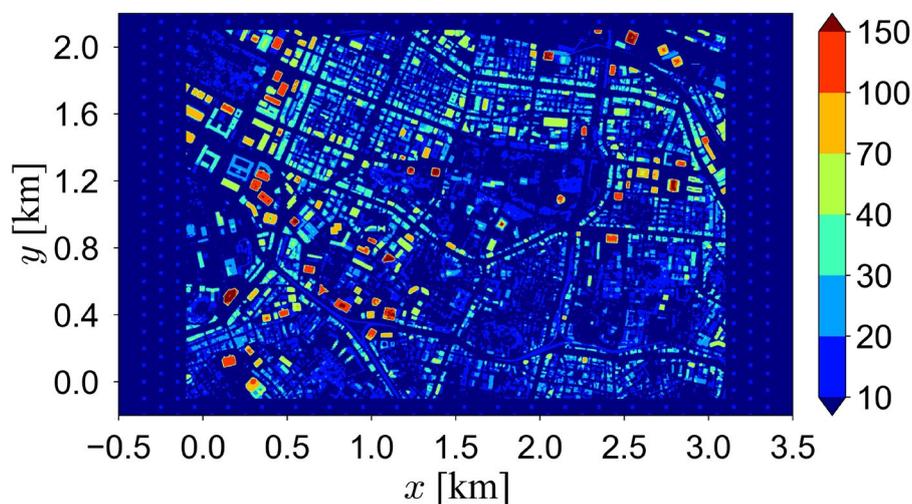


図 2.4.2 図 2.4.1 の白枠を拡大した本計算領域および建物高さ (m) 分布。解析対象領域の外側には一様粗度ブロックを配置したバッファー領域を設けている。

2.4.3 解析結果

最初に、解析領域での平均風速の鉛直プロファイルを見てみる。時間積分した 5400 秒間で時間平均し、かつ高度別に面平均した風速の鉛直分布を図 2.4.3 に示す。図中の風速は、平均風速の最大値が見られた高度 326 m での風

速 U_∞ により規格化した数値により示している。この平均風速プロファイルは、大阪市街地でシミュレーションしたときに得られたもの⁶⁾と似たものとなっている。解析対象とした東京都心部と大阪市街地での粗度特性が似ているため、平均風速としては同様の形状となる。言い換えれば、大都市の粗度特性に応じた乱流境界層が良好に表現することができたと言える。

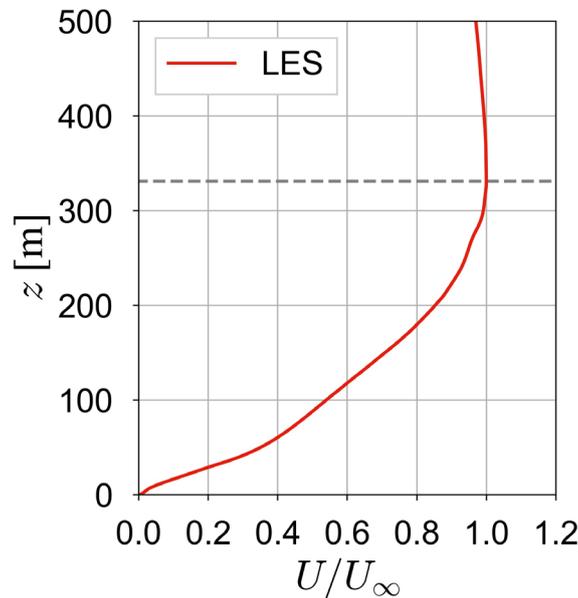


図 2.4.3 本計算領域での平均風速の鉛直プロファイル。境界層上端高度（326 m）での風速（ U_∞ ）で規格化した風速値により示す。

以上のように作成した乱流境界層において見られる風速場について以下に調べる。

まず、地上風速場を見てみる。ここで地上風とは、地上高 10 m での風とする。図 2.4.4 に時間積分の後半 1800 秒で平均した風速場を示す。本解析では、北風を主流風向としているため、南北の大通りにおいて全般的に平均風速が強いことが分かる。また、ある程度の広がりを持ったオープンスペースでも風速が強くなっている。一方、建物の密集度が高い街区においては、平均風速が弱いことも見てとれる。このように平均風速で見ても、市街地内では局所的に大きく変化し、建物の配置や密集度に応じて変わるのである。言い換えれば、市街地で観測された風速値の空間代表性をどう捉えるべきかについて十分に注意して考える必要があると言える。

次に、最大瞬間風速の分布を見てみる。図 2.4.4 から、流入境界の左境界から x 軸の向きに 0.5 km までの距離で、風速が一律に局所的に強まっているように見え、物理的に不整合な分布と言える。これは、ドライバー部、バッファ領域と吹走した後、実在都市の解析領域に流入したところで粗度の変化の影響を受けて、気流が現実的とは言えない応答を示すためである。そこで、x 座標が 1.0 km の位置から下流側の範囲において、最大瞬間風速の分布を調べることとする。最大瞬間風速は、時間積分の最後 1800 秒の間での格子点毎の時系列から最大値を求めることで決定した。図 2.4.5 に、1 km 四方の範囲毎に最大瞬間風速の分布を示す。最大瞬間風速値が大きくなっている場所は、x 方向（南北方向）に伸びる大通り沿い、大規模な建物（高層の場合が多い）の周辺部、空間的な広がりがあるオープンスペースなどである。特に大規模建物の周辺では、オープンスペースが確保されている場合が多く、そういった場所では全般的に風速値が極めて大きくなっていることが分かる。

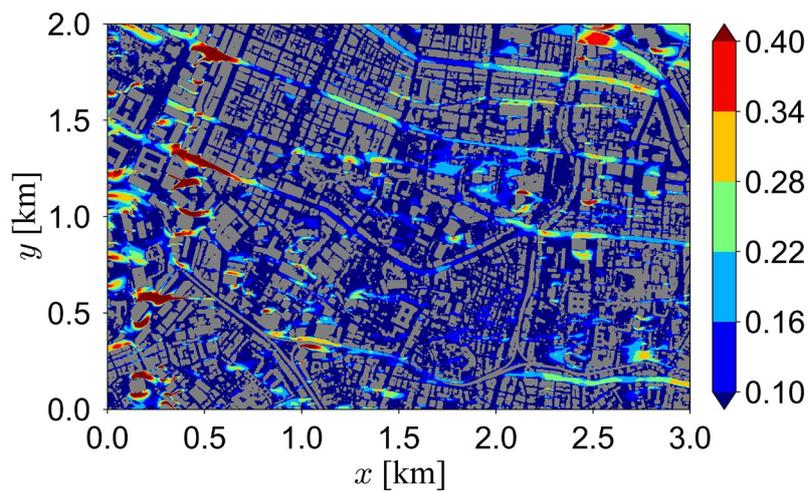


図 2.4.4 地上高 10 m での時間平均した風速場。高度 326 m での風速 U_∞ により規格化している。灰色部分は建物を表す。

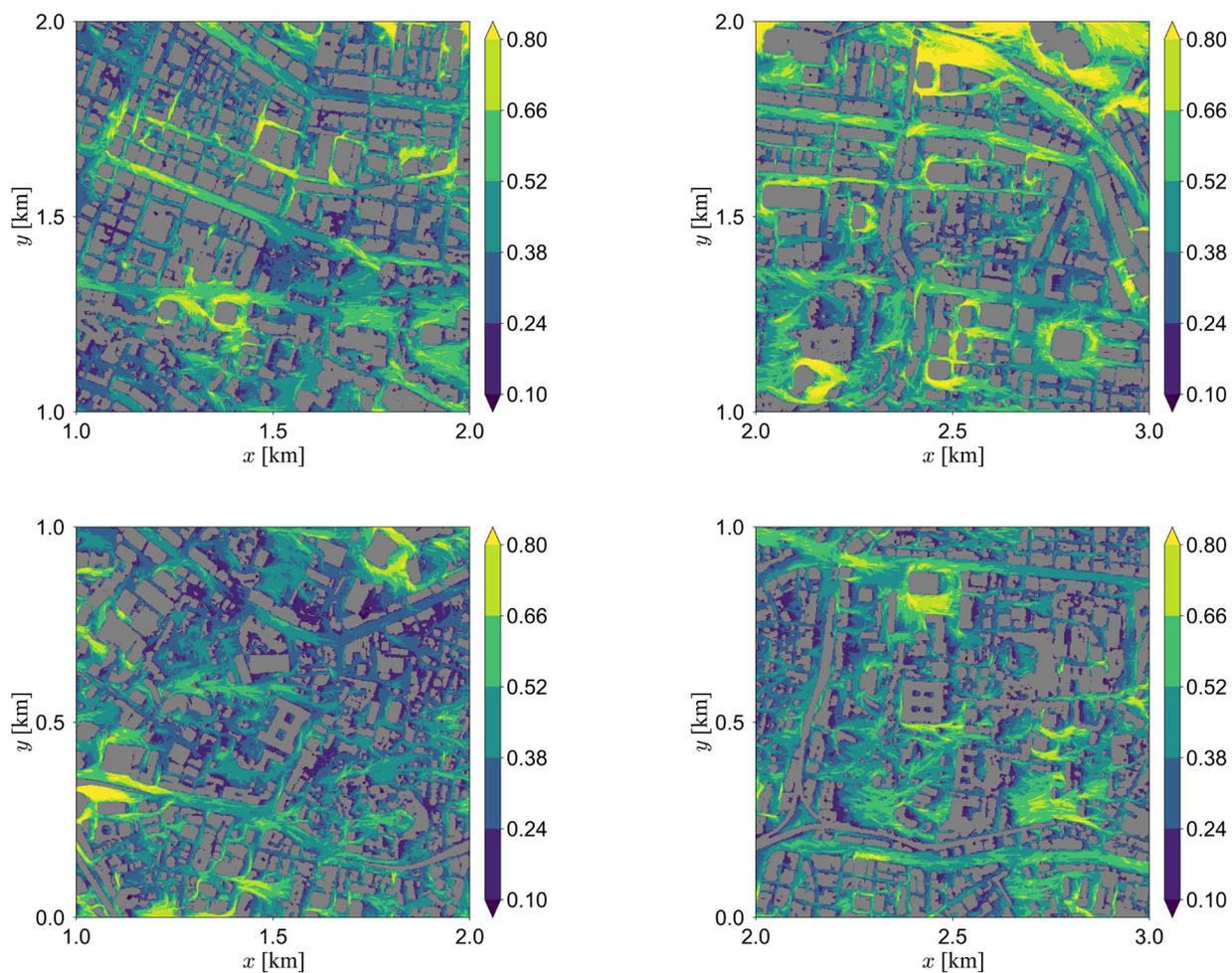


図 2.4.5 図 2.4.2 の解析対象領域のうち 1 km 四方の範囲で分けて示した格子点別の最大瞬間風速値。x 軸および y 軸の座標は、図 2.4.2 または 2.4.4 での座標と一致している。灰色部分は建物を表す。

このような最大瞬間風速値の分布の特徴は、2018 年台風 21 号の通過に伴い生じた大阪市街地内での暴風の出現特性とも一致している。大規模な建物は高層でもあり、そういった構造物の周囲では、迂回する流れ、上空からの下方への運動量輸送の促進、気流の収束といった効果が複合的に作用することにより、最大瞬間風速値が極めて大きくなるのである。

Nakayama et al. (2012)⁸⁾は、気象モデル Weather Research and Forecasting (WRF)モデルによる 60 m メッシュまでのダウンスケールシミュレーションと都市建物解像の LES モデルとを接続することにより、2009 年台風 18 号により東京で観測された最大瞬間風速 30.2 m/s の再現実験をした。建物解像 LES モデルにより、突風率 2 を超える風速変動を再現することが可能となり、ほぼ観測と一致した瞬間値を再現することができた。気象モデルで表現される風速値は、100 m メッシュ以下よりも高分解能でシミュレーションした場合であっても、おおむね数分から 10 分程度の時間平均した観測風速に対応する。特に都市のような複雑地表面上での風速変動は、建物を陽に表現することで初めて現実的に激しく変動する風速が再現できるのである。Nakayama et al. (2012)⁸⁾で示した通り、都市街区内の風速変動は、LES モデルにより初めて定量的に表現できるものである。

しかし、Nakayama et al. (2012)⁸⁾の LES では、水平分解能が 20 m であったため、街区内の詳細な瞬間的な変動を表現することは困難であった。本研究では、水平分解能 2 m という超高解像度と設定することにより、図 2.4.5 に示した通り、街区内の個別の建物周りの瞬間的な風速変動をも再現することができた。このような超高解像度モデルにより、都市で生じる突風を定量的に見積もることが可能となった。

2.4.4 まとめ

本研究では、建物解像 LES モデルを用いて、東京都心部での突風の数値解析をした。3 次元地理空間データを用いることにより、東京都心部での実際の建物や構造物を LES モデルの下端境界に設定し、現実の都市で生じるであろう風の非定常な挙動を再現することができた。

解析の結果、主流方向に伸びる大通り沿い、大規模な建物の周辺部、空間的な広がりがあるオープンスペースといった場所において最大瞬間風速が特に強くなることが分かった。特に大規模建物の周辺では、オープンスペースが確保されている場合が多く、そういった場所では全般的に最大瞬間風速値が極めて大きくなっていることが分かった。このように、超高解像度の建物解像 LES モデルにより、実際の都市街区内で生じる暴風、突風を定量的に表現することが可能となった。

本研究で示した LES モデルによる数値解析手法は、都市といった複雑地表面上で生じる暴風のリスクを定量的に評価する手法として活用できる。近年、全国で進む都市再開発、都市再生による建物の高層化、密集化を考えると、都市での暴風リスクは、以前にもまして高まっていると言える。本研究で用いた解析手法は、今後様々な都市での暴風リスクを定量的に評価するアプローチとして有用になるであろう。

参考文献

- 1) 竹見哲也, 石川裕彦, 2019: 2018 年台風 21 号による暴風の解析. 京都大学防災研究所年報, 第 62 号 B, pp. 386-392.
- 2) Yoshida, T., T. Takemi, and M. Horiguchi, 2018: Large-eddy-simulation study of the effects of building height variability on turbulent flows over an actual urban area. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 168, pp. 127-153, doi: 10.1007/s10546-018-0344-8.

- 3) Yoshida, T., T. Takemi, 2018: Properties of mixing length and dispersive stress in airflows over urban-like roughness obstacles with variable height. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 14, pp. 174-178, doi:10.2151/sola.2018-031.
- 4) Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2011: LES analysis of the aerodynamic surface properties for turbulent flows over building arrays with various geometries. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 50, pp. 1692-1712, doi: 10.1175/2011JAMC2567.1.
- 5) Vanderbauwhede, W., and T. Takemi, 2015: Twinned buffering: A simple and highly effective scheme for parallelization of Successive Over-Relaxation on GPUs and other accelerators. *High Performance Computing and Simulation (HPCS)*, 2015 International Conference on, pp. 436-443, 20-24 July 2015, doi: 10.1109/HPCSim.2015.7237073.
- 6) Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki, and K. Hase, 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol. 15, pp. 22-27, doi:10.2151/sola.2019-005.
- 7) Goldstein, D., Handler, R., and Sirovich, L., 1993: Modeling a noslip flow boundary with an external force field. *J. Comput. Phys.*, 105, 354–366.
- 8) Nakayama, H., T. Takemi, and H. Nagai, 2012: Large-eddy simulation of urban boundary-layer flows by generating turbulent inflows from mesoscale meteorological simulations. *Atmospheric Science Letters*, Vol. 13, pp. 180-186, doi: 10.1002/asl.377.

台風 15 号による園芸施設への被害状況を踏まえた再解析風速データの比較

Comparison of Re-analysis Winds based on Storm Damage to Greenhouses due to Typhoon Faxai (2019)

飯塚 聡*1, 横山 仁*2, 清水 慎吾*3, 鈴木 真一*4

Satoshi IIZUKA, Hitoshi YOKOYAMA, Shingo SHIMIZU, Shin-ichi SUZUKI

This study compared the characteristics of re-analysis winds associated with Typhoon Faxai (2019) during its approach to and landfall over the Chiba Prefecture. Winds estimated from X-Band doppler radar deployed over the metropolitan Tokyo are assimilated into the cloud resolving model. This assimilated 10-m surface winds are compared with those obtained from both the Meso Scale Model (MSM) and the Local Forecast Model (LFM) of the Japan Meteorological Agency. The comparison shows that the assimilated winds well reproduce the 10-m surface wind speed and direction observed at the many AMeDAS stations over the Chiba and Ibaraki prefectures. The regional characteristics of the greenhouse damage observed over the Chiba and Ibaraki prefectures are also explained by the wind speed of the assimilated re-analysis winds.

Keywords : *Typhoon Faxai, 10-m surface winds, data-assimilation, greenhouse damage*

2.5.1 はじめに

2019年の台風15号は中心気圧955hPa、最大風速45m/sの勢力を維持したまま9日3時頃に三浦半島に接近後東京湾を進み、中心気圧960hPa、最大風速40m/sの勢力で9日5時頃に千葉市に上陸した。その後、北東に進み茨城県沖に抜けたが、千葉市では最大瞬間風速57.5m/sを観測するなど、台風の進行方向の右側にあたる房総半島を中心に広域で暴風となった。この暴風により房総半島の各地で停電が生じ、長期間にわたり住民生活などに甚大な影響を及ぼした。また、台風第15号による農林水産関係の被害総額は約509億円（10月10日現在、農林水産省）に上り、その約8割を千葉県（約428億円）、1割を茨城県（約60億円）が占め、両県とも被害額の約7割を園芸施設が占めている。

気象現象の実況把握は、災害対応の初動において有効な情報と考えられる。現在、降雨については、気象庁アメダスによる観測の他に国土交通省によるX-Rainによるレーダ雨量観測により広範囲の面的な情報が得られる。一

*1 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門
総括主任研究員・理博

*2 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門
主幹研究員・農博

*3 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門
主任研究員・理博

*4 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門
主任研究員・理博

Researcher, Storm, Flood, and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr.Sci.

Researcher, Storm, Flood, and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr.Agr.

Researcher, Storm, Flood, and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr.Sci.

Researcher, Storm, Flood, and Landslide Research Division,
National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Dr.Sci.

方、風況の情報については、気象庁アメダスなどによる地点での観測による情報のみで、広範囲の面的な情報を把握することはできていない。数値モデルに観測データを組み入れることにより補正した再解析データは、この問題を補完する手法の一つとして考えられる。再解析データの精度は年々向上しているものの、今回の台風 15 号による強風災害の状況把握にどの程度、利活用できるのかは明らかではない。そこで、現在利用可能な再解析データで表現される台風 15 号の風について比較評価した結果を報告する。なお、比較評価に当たっては、気象庁のアメダスの 10 分平均値の地上 10-m 風との比較の他に、千葉県と茨城県の複数地点で現地調査した園芸施設の被害状況との対応も比較検討した。

2.5.2 再解析データの風の比較

ここで比較するのは、気象庁から提供されているメソ予報数値モデル MSM (Meso Scale Model) と局地数値予報モデル LFM (Local Forecast Model) および雲解像度モデル CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator) に LFM のデータを側面境界条件として与えると同時に首都圏に展開している X-NET と呼ばれる X バンド気象レーダによる観測網 (図 2.5.1) から推定した高度 1km での風の情報¹ (図 2.5.2a)などを同化することにより得られた再解析データ²である (図 2.5.2b)。また、参考のために、米国の NCEP から提供されている水平解像度 1 度、0.5 度、0.25 度の再解析データも示す。なお、各データの概要を表 2.5.1 に示す。

表 2.5.1 再解析データの名前と解像度

再解析データ名	空間分解能	範囲	標準値 (予報値) の出力時間間隔
NCEP-GFS	100km~1 度	全球	6 時間 (3 時間)
NCEP-GFS	50km~0.5 度	全球	6 時間 (3 時間)
NCEP-GFS	25km~0.25 度	全球	6 時間 (3 時間)
MSM	5km~0.05×0.0625 度	日本域	3 時間 (1 時間)
LFM	2km~0.02×0.025 度	関東域	1 時間 (30 分)
CReSS	1km	関東域	10 分

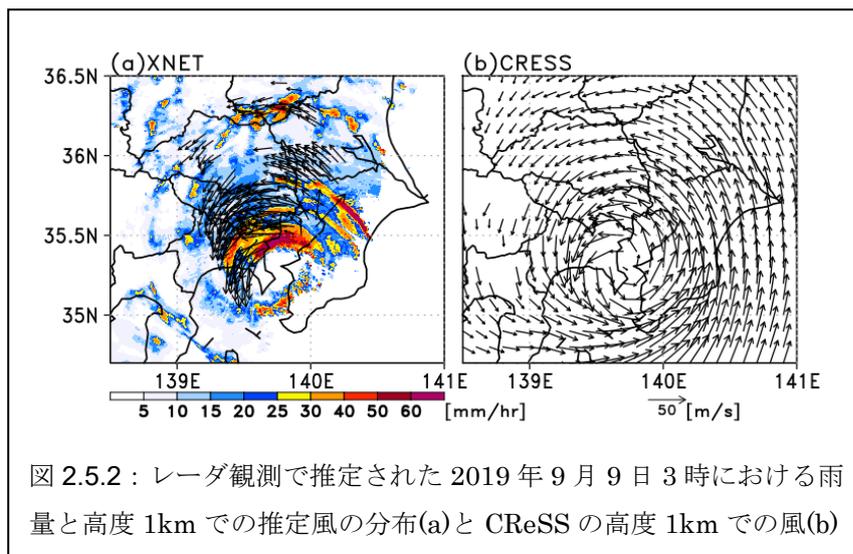
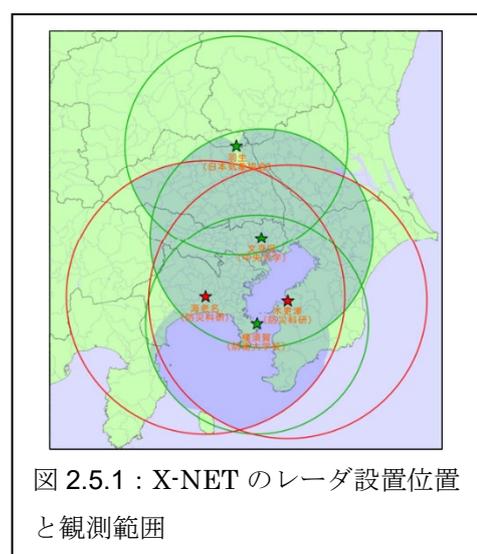


図 2.5.3 は、9 月 9 日 3 時における NCEP から提供されている水平解像度 1 度、0.5 度、0.25 度の NCEP-GFS の高度 1km における風の間と海面気圧分布ならびに MSM と LFM の高度 1km の風の間と海面気圧分布、さらに、CReSS の高度 1km の風の間と海面気圧分布を示したものである。房総半島の南端の 35°N, 140°E 付近では、いずれのデータでも約 50m/s の風速を示しているが、水平解像度 1 度の NCEP では中心気圧の位置が三浦半島から北東へ大きくずれており、中心気圧の低下も著しく過小評価されている。水平解像度 0.5 度の NCEP でも、ずれ幅は

小さくなるものの、同様な傾向が見られる。しかし、水平解像度 0.25 度になると、LFM と同程度の風速や気圧場を再現している。一方、水平解像度 0.25 度の NCEP よりも水平解像度が細かい MSM の風の間を見ると、LFM に比べると台風の進行方向の右側の房総半島周辺での強風域の範囲が小さく、反対側の強風域の位置もやや西へずれている。最も水平解像度が高い CReSS の風の間を見ると、LFM に類似しているが、レーダの情報(図 2.5.2a) が入る進行方向の西側の神奈川県で差異が見られる。

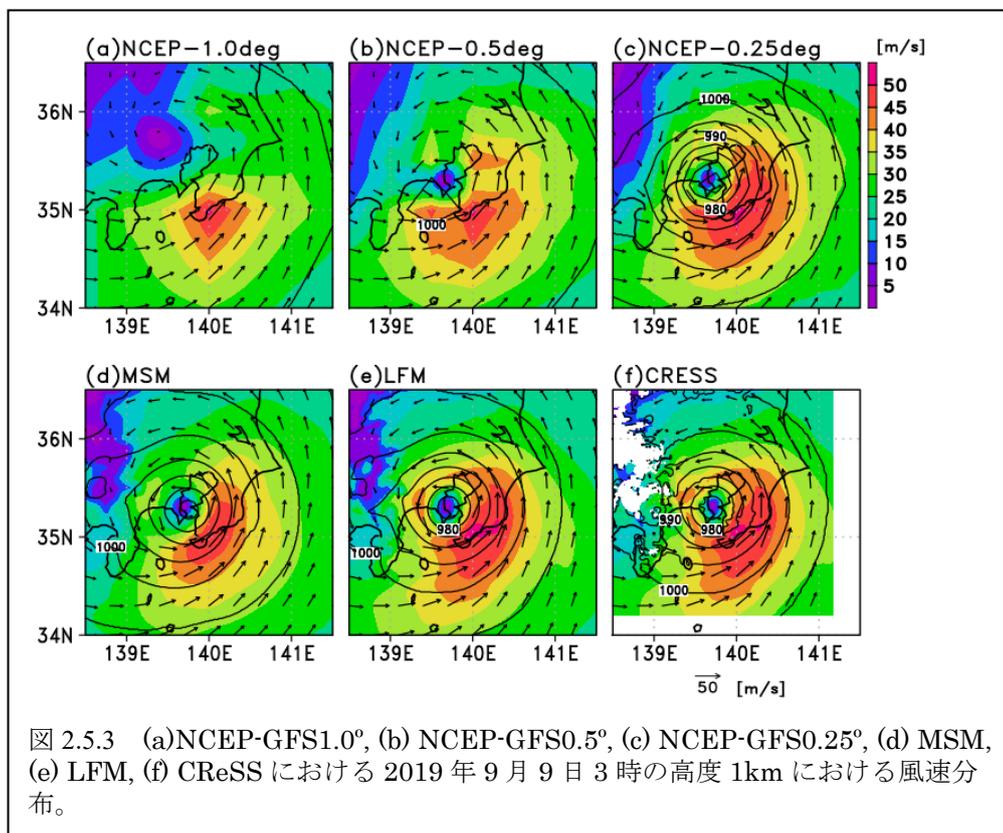


図 2.5.3 (a)NCEP-GFS1.0°, (b) NCEP-GFS0.5°, (c) NCEP-GFS0.25°, (d) MSM, (e) LFM, (f) CReSS における 2019 年 9 月 9 日 3 時の高度 1km における風速分布。

次に、気象庁のアメダスの 10 分平均の風と MSM, LFM および CReSS の地上 10m での風速・風向を比較したものを図 2.5.4 に示す。レーダの情報 that 得られない新島では CReSS, LFM, MSM のいずれも台風通過後の風速が過大評価傾向となるなど観測とのずれが大きい。しかし、大島では、台風が通過した 1 時頃からレーダのデータ同化による補正効果で、MSM, LFM と比べて CReSS では観測に近い風速が再現されている。また、新木場、香取、成田、茂原、木更津、勝浦、佐倉、横浜、三浦、辻堂、柏、竜ヶ崎でも、最大風速が観測された時刻を中心に MSM, LFM と比べてアメダスで観測に非常に近い風速が CReSS では再現されている点は特筆すべき点と言える。ただし、最大瞬間風速 52m を周辺の海上自衛隊館山航空基地で記録した館山や最大瞬間風速 57.5m が観測された千葉では、観測に比べ過小評価されている。また、羽田では最大風速観測時刻直後に風速が不自然に低下している。この原因として、細かく複雑な雨雲の状況においてレーダで必ずしも時空間方向に一樣に風速データが推定できないことその他に、観測データを同化する際の時間・空間的な範囲を決めるパラメータなどの設定による問題が挙げられる。但し、前者については、国土交通省の X-Rain など他の観測データを活用することで、後者の問題については今後事例を増やすことによりパラメータ値を適切にチューニングすれば改善される可能性が高い。一方、風向については、今回の台風 15 号通過時においては、MSM, LFM, CReSS のいずれもアメダスで観測された値をほぼ再現している。これらから、一部で風速を過小評価している地点はあるものの、MSM, LFM に比べて CReSS はアメダス地点で観測された 10 分平均値の値を全体的にはより精度良く再現していると判断できる。

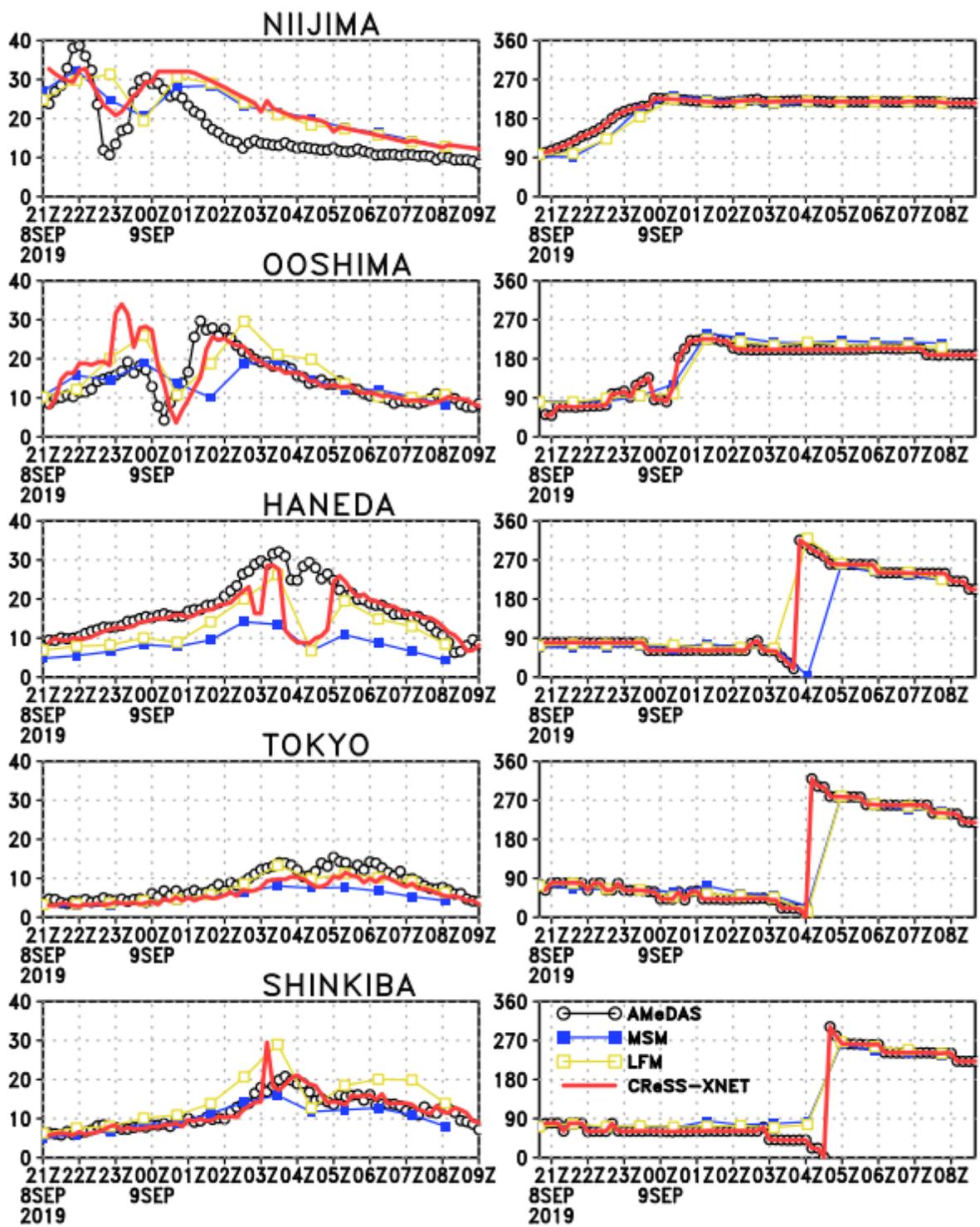


図 2.5.4 左図：気象庁アメダスで観測された 10 分平均風速（黒線）と MSM(青線), LFM(黄線), CReSS(赤線)の風速。右図：風向。上から、新島、大島、羽田、東京、新木場での値。

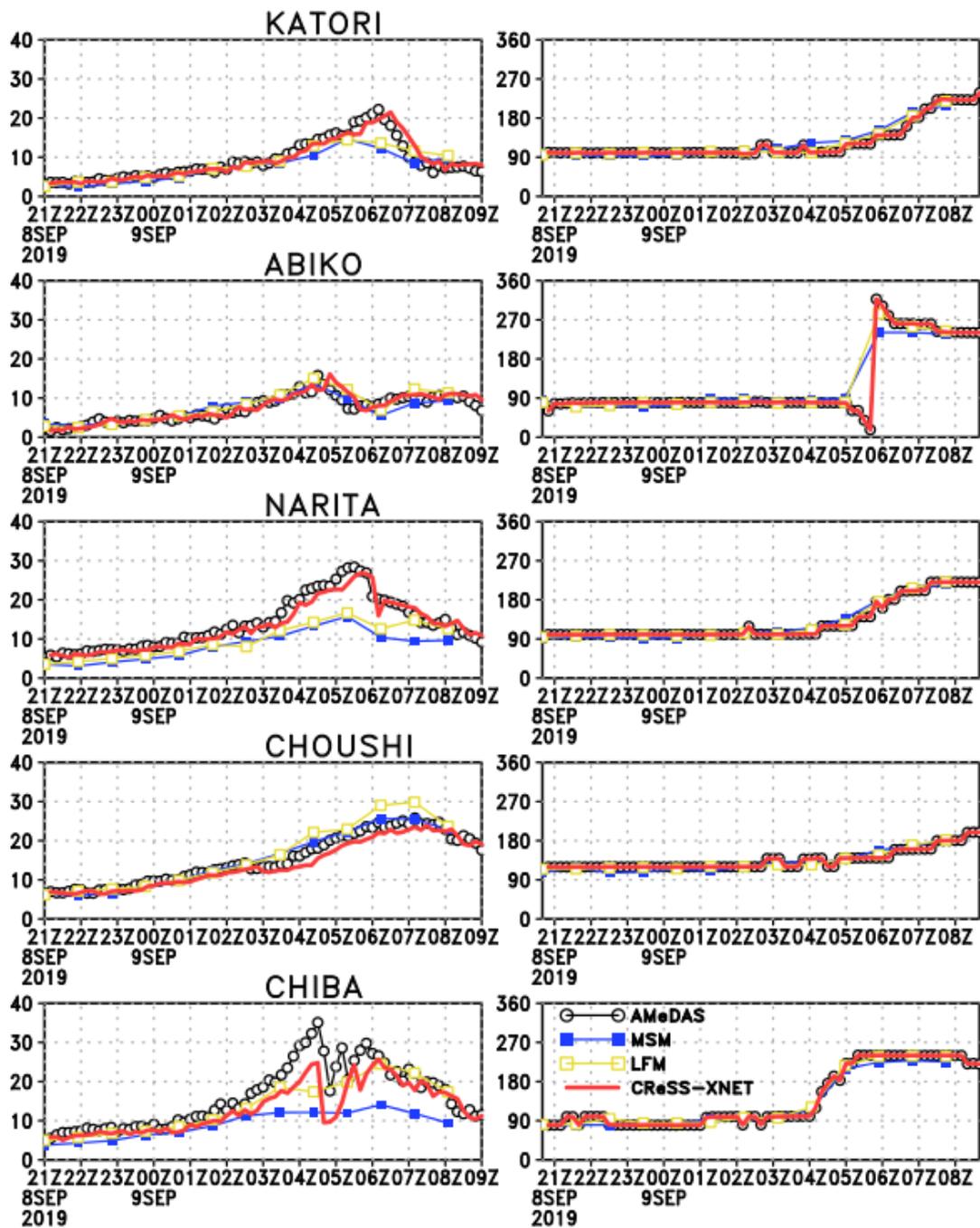


図 2.5.4 (続き) : 上から、香取、安孫子、成田、銚子、千葉での値。

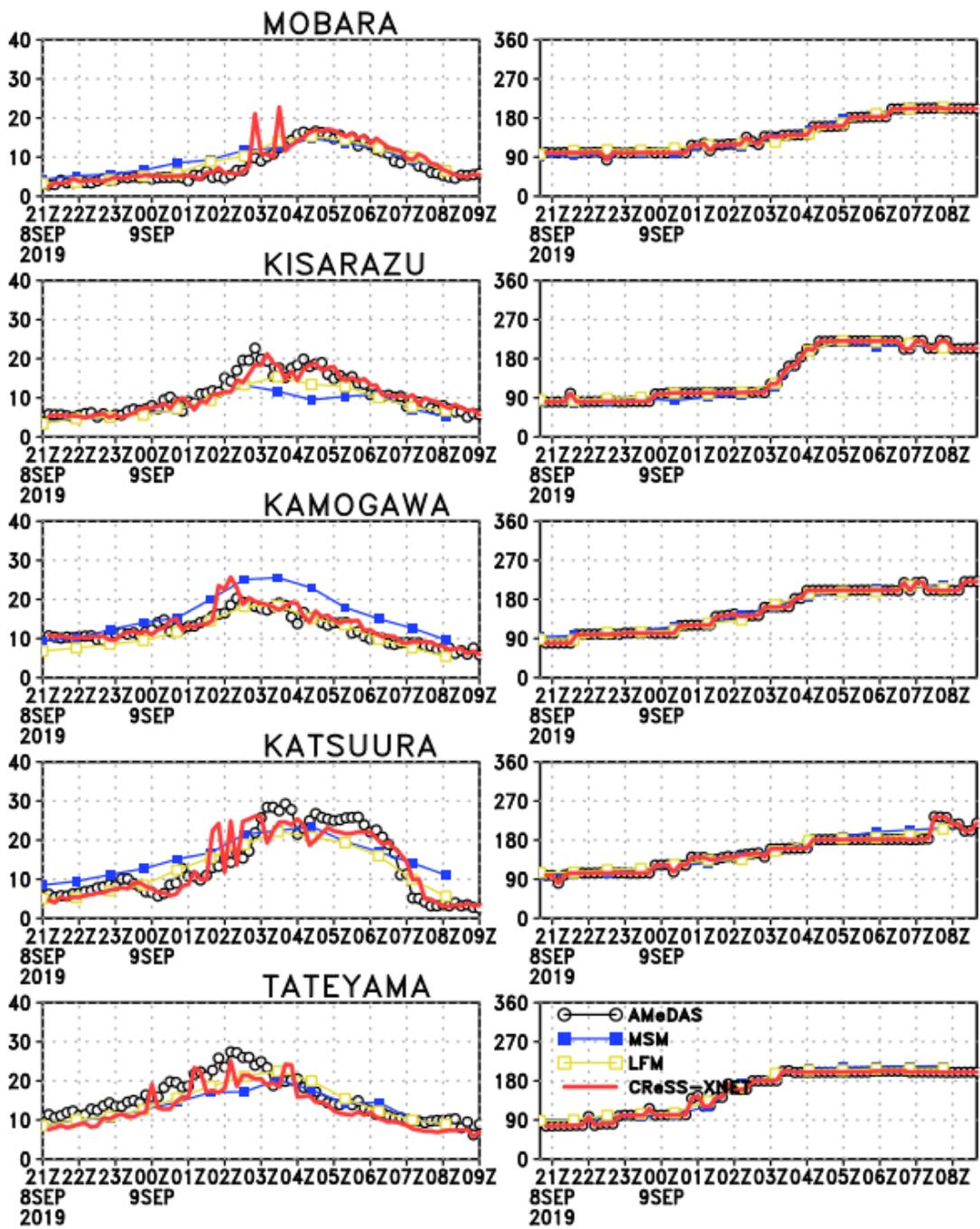


図 2.5.4 (続き) : 上から、茂原、木更津、鴨川、勝浦、館山での値。

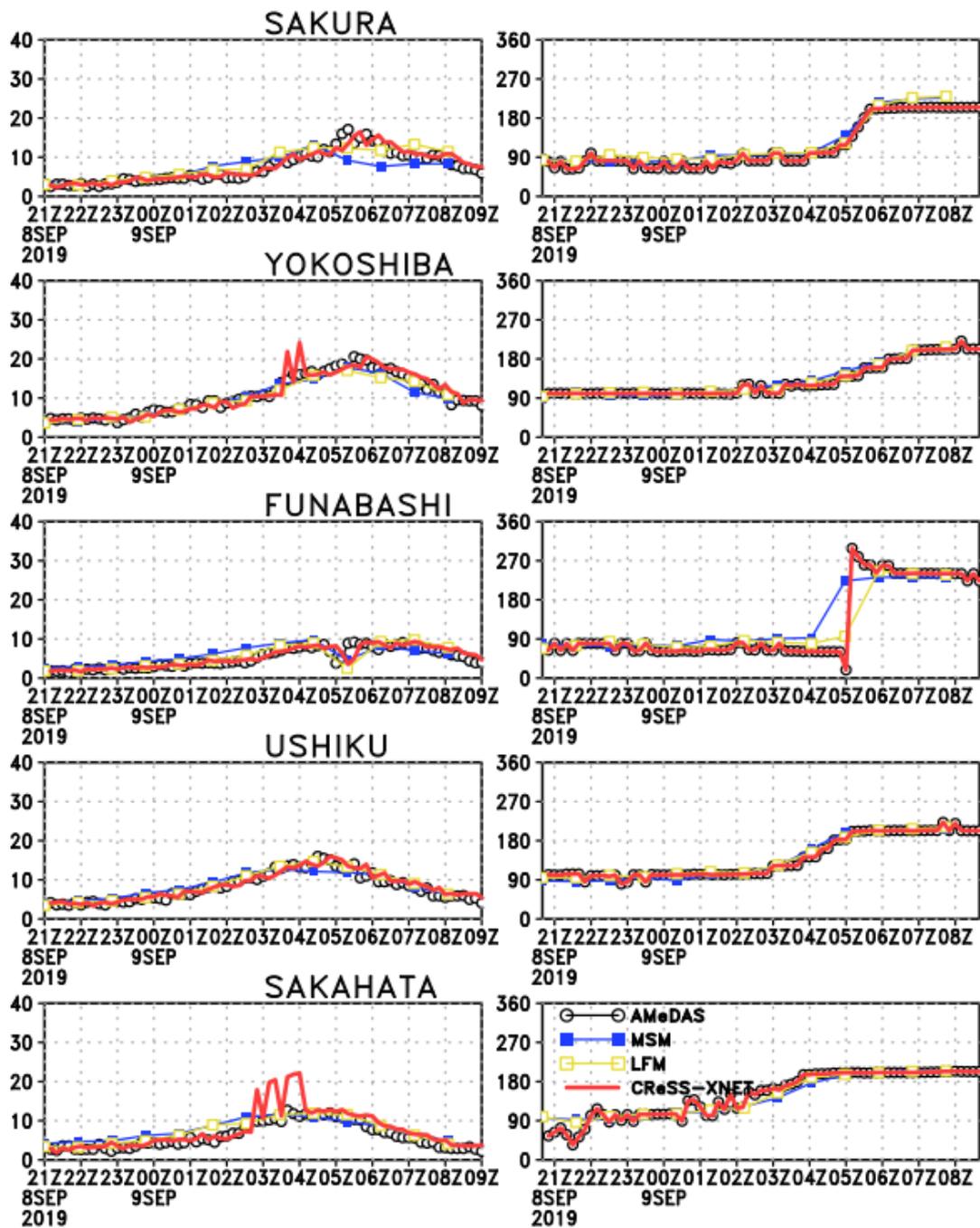


図 2.5.4 (続き) : 上から、佐倉、横芝、船橋、牛木、坂畑の値。

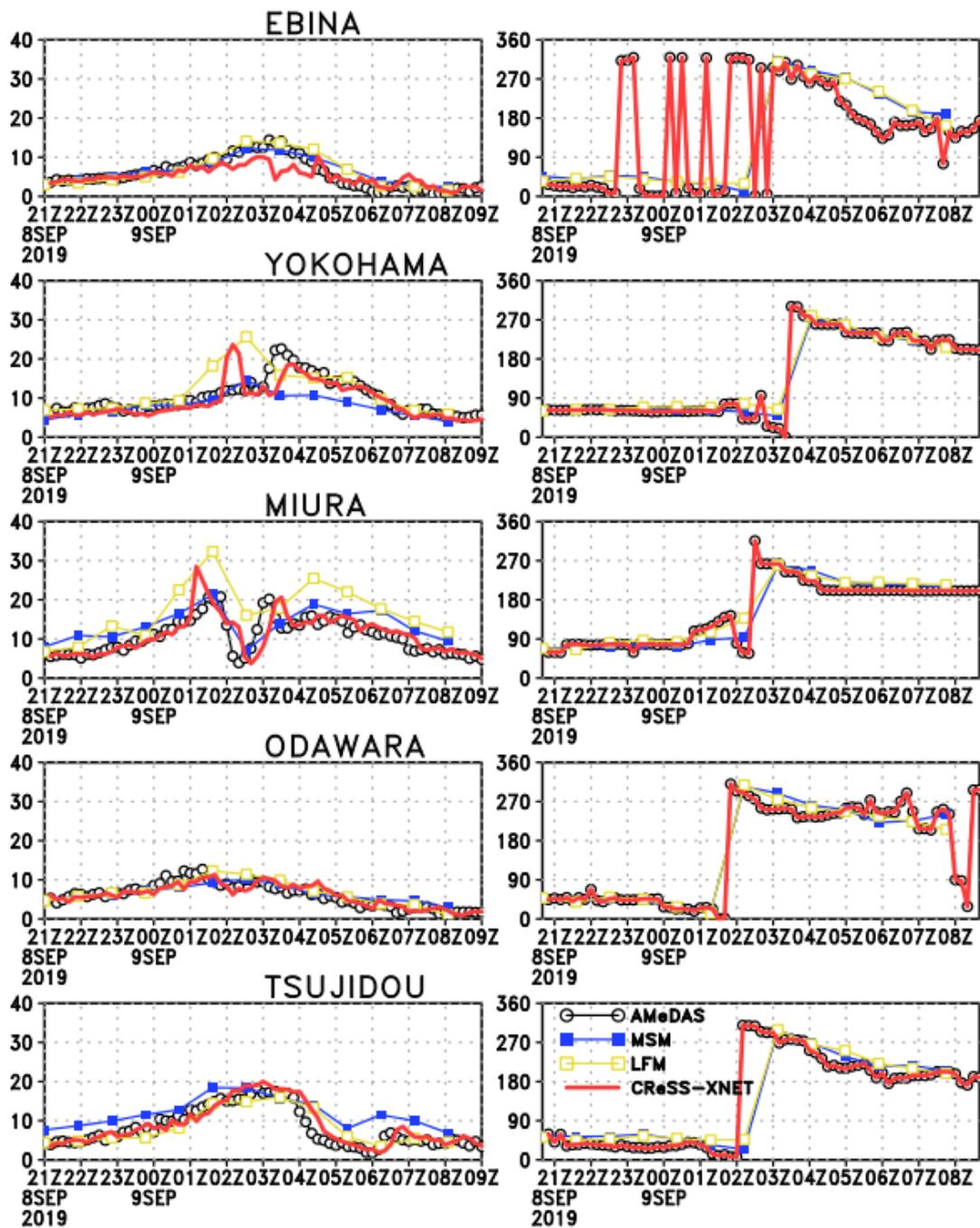


図 2.5.4 (続き) : 上から、海老名、横浜、三浦、小田原、辻堂の値。

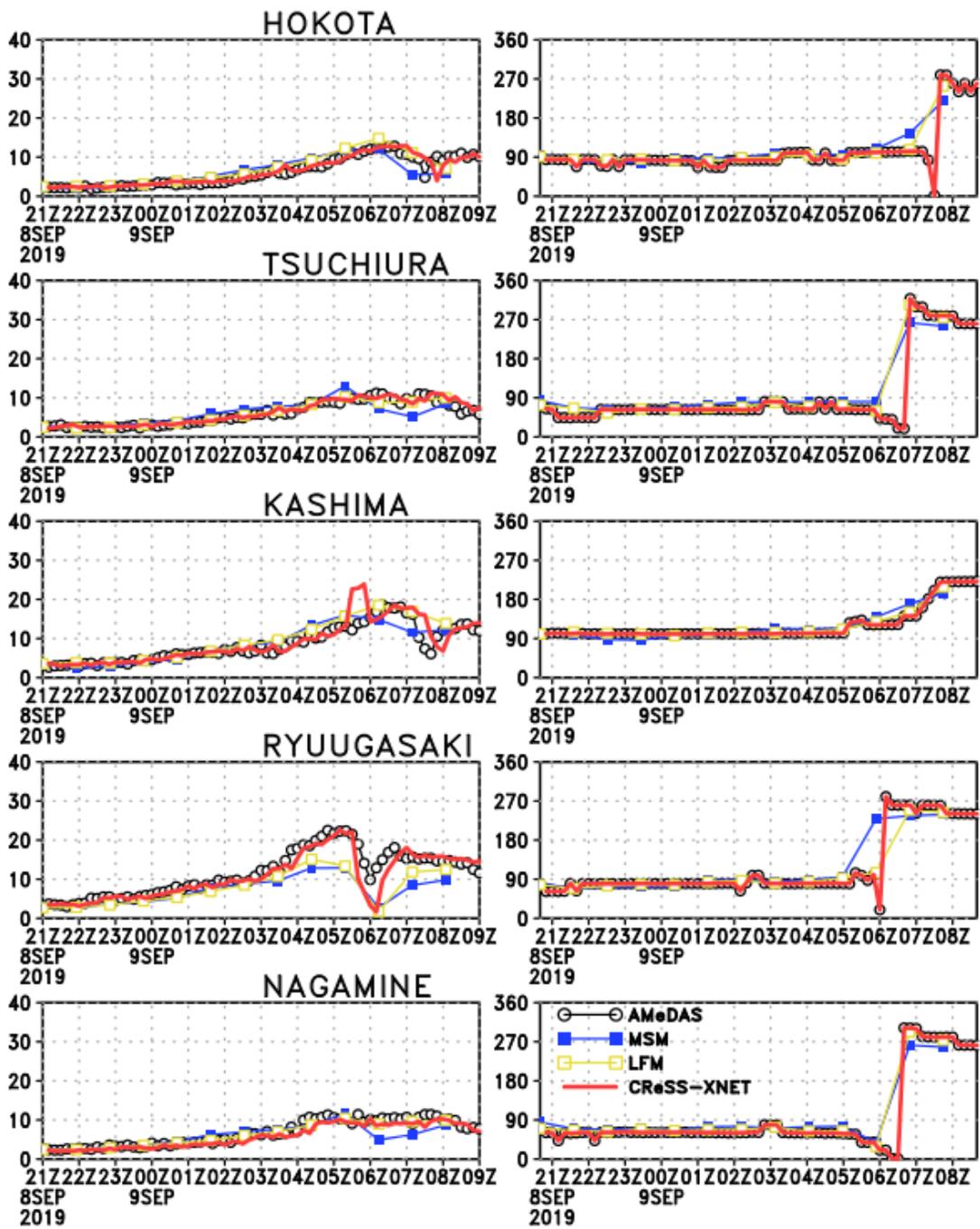


図 2.5.4 (続き) : 上から銚田、土浦、柏、竜ヶ崎、長峰 (つくば) の値。

2.5.3 園芸施設の被害状況と再解析の風との対応

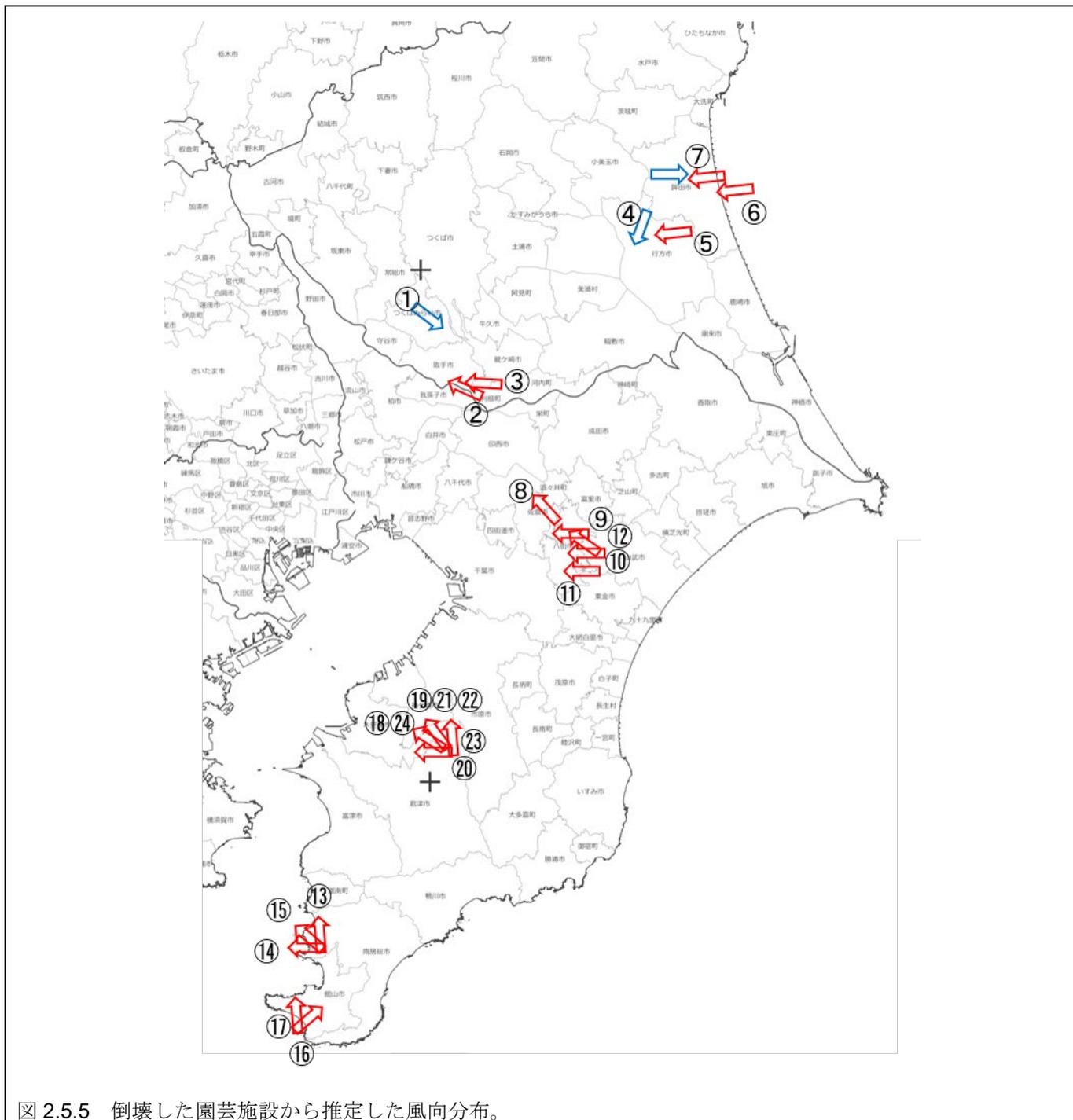
次に、強風により倒壊した園芸施設の状況およびそれから推定された風向と CReSS の風速データとの対応関係について調べる。台風 15 号が通過した後の 9 月 10 日から 10 月初旬にかけて、千葉県および茨城県内を数回に分けて周り、園芸施設の被害状況について調査した。今回の台風 15 号により倒壊が確認された園芸施設の地点を表 2.5.2 に、現地調査から推定した各地点での風向を図 5 に表示する。また、写真 2.5.1 から 2.5.24 は、各地点での園芸施設の被害状況を示したものである。

表 2.5.2 現地調査した地点名・緯度・経度との倒壊した園芸施設から推定した風向

番号	地名	緯度	経度	風向
1	茨城県つくばみらい市中島	35.96	140.06	北西
2	茨城県取手市小泉	35.90	140.09	南東
3	茨城県取手市清水	35.90	140.10	東
4	茨城県行方市玉造	36.10	140.42	北北東
5	茨城県行方市小貫	36.11	140.47	東
6	茨城県鉾田市白塚	36.17	140.56	東
7	茨城県鉾田市湯坪	36.18	140.56	東と西
8	千葉県佐倉市上勝田	35.70	140.28	南南東
9	千葉県八街市大関	35.66	140.30	東
10	千葉県八街市八街	35.61	140.32	東
11	千葉県八街市武勝	35.63	140.32	東
12	千葉県八街市笹引	35.63	140.31	南東
13	千葉県南房総市富浦町 1	35.04	139.84	南
14	千葉県南房総市富浦町 2	35.04	139.84	東
15	千葉県南房総市富浦町 3	35.04	139.84	南東
16	千葉県館山市布沼 1	34.95	139.82	南西
17	千葉県館山市布沼 2	34.96	139.80	南
18	千葉県木更津東インター脇	35.36	140.05	南東
19	千葉県君津市湯名	35.36	140.05	南南東
20	久留里線下郡駅すぐ傍の踏切周辺	35.35	140.05	東
21	千葉県君津市山本	35.35	140.05	南南東
22	千葉県君津市西原 1	35.34	140.05	南南東
23	千葉県君津市西原 2	35.34	140.05	南
24	千葉県君津市西原 3	35.34	140.06	南東

図 2.5.6 から図 2.5.12 に、現地調査した地点で倒壊した園芸施設から推定された風向と CReSS の風向が一致した時刻で CReSS の風速が最大の時の風速分布を示す。南房総市では 30m/s 以上の風速が、そのほかの木更津市、八街市、取手市、つくばみらい市、鉾田町では 15m/s 以上の風速となっていることがわかる。また、木更津市ではすぐ近くで 20m/s 以上の風速も見られる。今回現地調査を実施した地点では、通常のパイプハウスの倒壊が確認さ

れたが、例外的に南房総市では鉄骨ハウスの倒壊やガラス温室の被覆材の破損が見られた。木更津市でも、鉄骨ハウスの倒壊は確認されなかったが、ガラス温室の被覆材の破損は見られた。一般に、最大瞬間風速は 10 分平均風速の 1.5 倍から 2 倍とされているが、粘性項に対してレイノルズ平均を施す気象モデルでは、最大瞬間風速のような乱れを表現することができないことから、CReSS の風速の 2 倍の値が各地点での最大瞬間風速として考える。補強の程度によって変わるが、園芸施設はその構造部材により風に対する強度が異なり、通常のパイプハウスでは約 30m/s、鉄骨ハウスやガラス温室では約 50m/s 程度が許容される設計用の最大瞬間風速とされている³。これらから、CReSS から想定される各地点での最大瞬間風速は、現地調査で確認された園芸施設の被害特徴と比較的良好に対応していると言える。



2002年台風21号の際、千葉県・茨城県下での多くの園芸施設は台風の進行方向の前面の東寄りの風で倒壊していたことが森山等(2003)⁴により報告されている。今回の台風15号においても、千葉県・茨城県下での多くの園芸施設は台風の進行方向の前面の東寄りの風で倒壊していた。一般には、台風の進行方向の右側で最大風速が観測されることから園芸施設が北東方向に倒壊することが想像される。現地調査で話を伺った関係者の中には、電柱は西側に倒壊していることもあり、竜巻等の影響を指摘する話も聞かれた。しかし、今回の台風15号による風が極めて強かったため、台風の進行方向の前面の東寄りの風で園芸施設の多くが西側へ倒壊したためと推定される。



写真 2.5.1 : つくばみらい市中島



写真 2.5.2 : 取手市小泉



写真 2.5.3 : 取手市清水



写真 2.5.4 : 行方市玉造



写真 2.5.5 : 行方市小貫



写真 2.5.6 : 銚田市白塚



写真 2.5.7 : 銚田市湯坪



写真 2.5.7 : 銚田市湯坪



写真 2.5.8 : 佐倉市上勝田



写真 2.5.9 : 八街市大関



写真 2.5.10 : 八街市八街



写真 2.5.11 : 八街市武勝



写真 2.5.12 八街市笹引



写真 2.5.13 : 南房総市富浦町 1



写真 2.5.14 : 南房総市富浦町 2



写真 2.5.15 : 南房総市富浦町 3



写真 2.5.16 : 館山市布沼 1



写真 2.5.17 : 館山市布沼 2



写真 2.5.18 : 木更津東インター脇



写真 2.5.19 : 君津市湯名



写真 2.5.20 : 久留里線下郡駅すぐ傍の踏切周辺



写真 2.5.21 : 君津市山本



写真 2.5.22 : 君津市西原 1



写真 2.5.23 : 君津市西原 2



写真 2.5.24 : 君津市西原 3

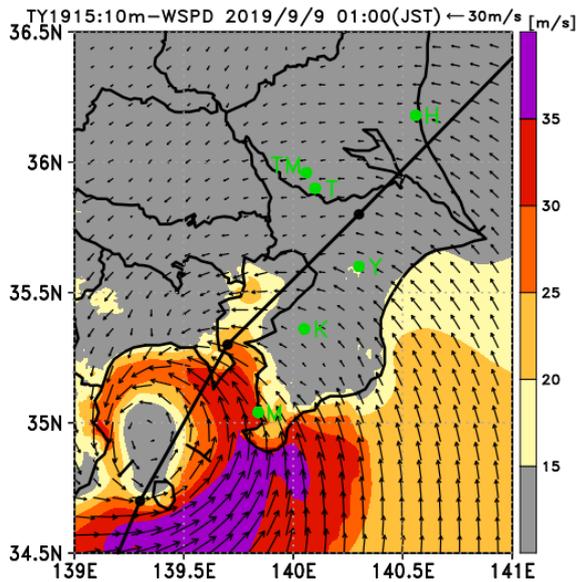


図 2.5.6 : CReSS による南房総市(記号 M)で倒壊した園芸施設から推定した風向と一致する時刻 (2019 年 9 月 9 日 1 時) の 10m 風速分布。

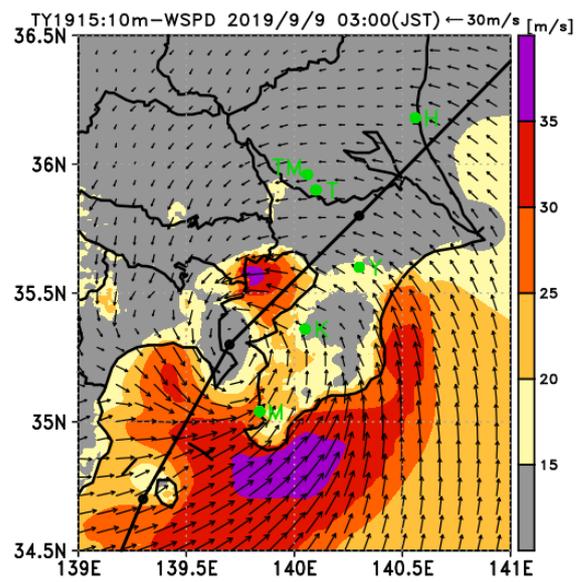


図 2.5.7 : CReSS による木更津市(記号 K)で倒壊した園芸施設から推定した風向と一致する時刻 (2019 年 9 月 9 日 6 時 30 分) の 10m 風速分布。

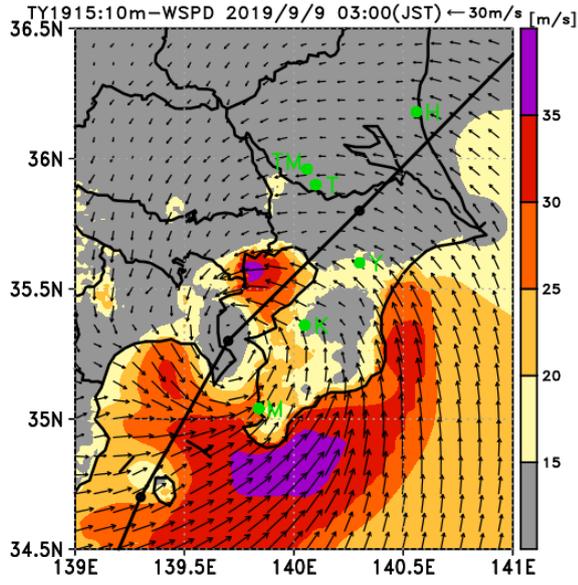


図 2.5.8 : CReSS による八街市(記号 Y)で倒壊した園芸施設から推定した風向と一致する時刻 (2019 年 9 月 9 日 3 時) の 10m 風速分布。

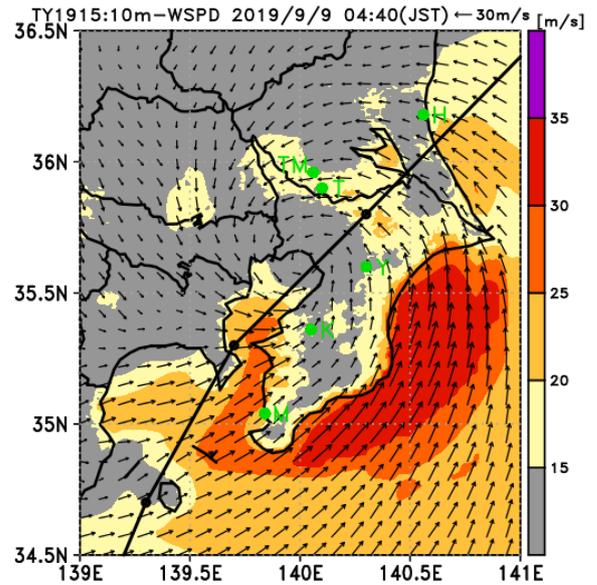


図 2.5.9 : CReSS による取手市(記号 T)で倒壊した園芸施設から推定した風向と一致する時刻 (2019 年 9 月 9 日 4 時 40 分) の 10m 風速分布。

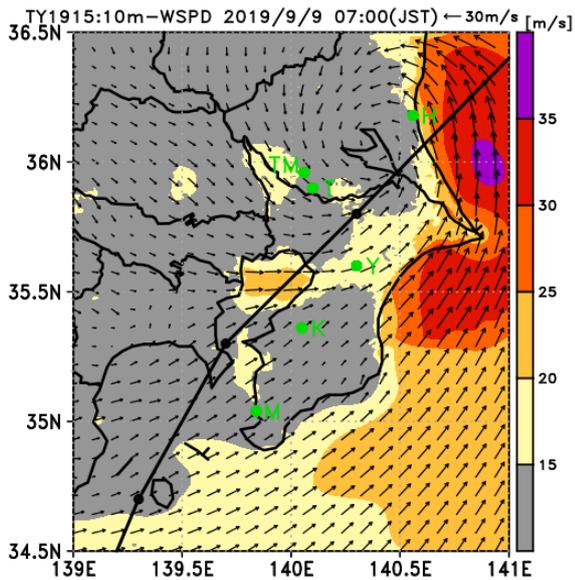


図 2.5.10 : CReSS によるつくばみらい市(記号 TM)で倒壊した園芸施設から推定した風向と一致する時刻 (2019 年 9 月 9 日 7 時) の 10m 風速分布。

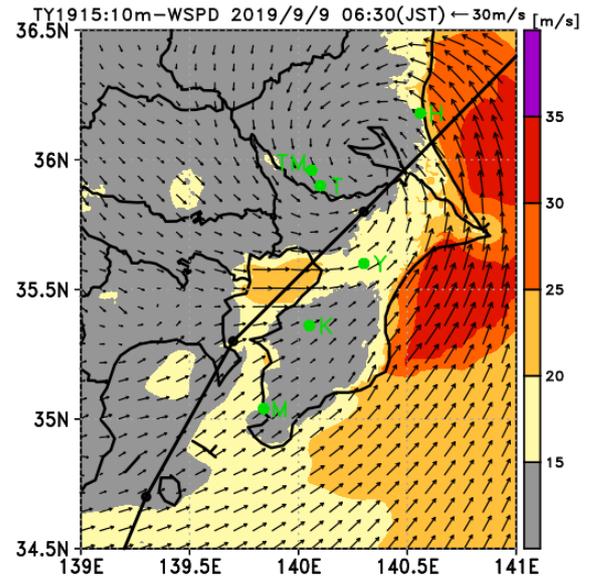
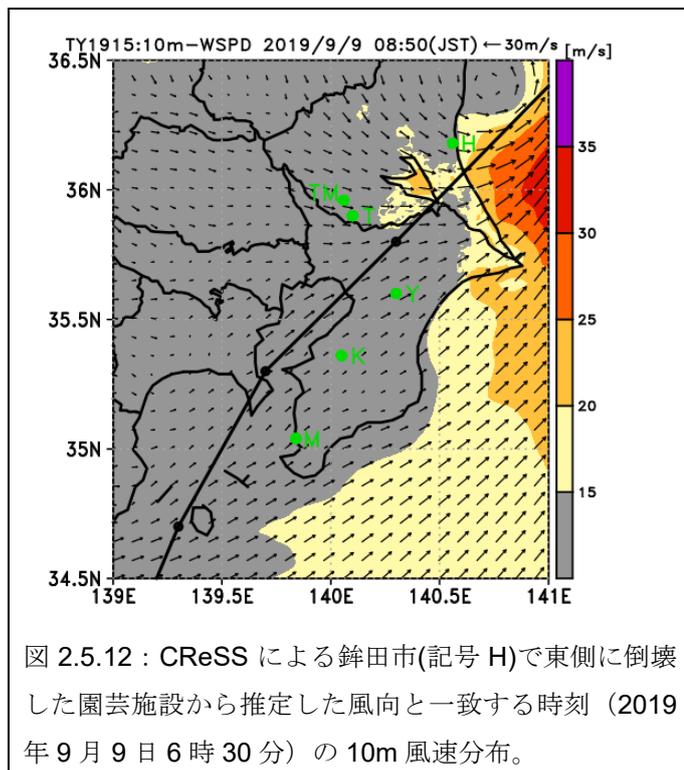


図 2.5.11 : CReSS による銚田市(記号 H)で西側に倒壊した園芸施設から推定した風向と一致する時刻 (2019 年 9 月 9 日 6 時 30 分) の 10m 風速分布。



2.5.4 おわりに

本研究では、強風の広範囲の面的な情報としての再解析データの有効性について、今回の台風 15 号に関わる気象庁アメダスの 10 分平均値の地上 10-m 風と現地調査した園芸施設の被害状況を踏まえ評価した。その結果、いくつかの地点では風速が過小評価されていたが、Xバンド気象レーダで推定された高度 1km での風を同化した再解析データによる地上 10-m 風は、広い範囲において気象庁アメダスで観測された風速・風向と良い対応が見られた。観測体制の強化や同化技術の向上がより進めば、今回の台風 15 号のような強風時の面的な情報を提供するシステムとなる可能性が高いと考えられる。また、そのデータの地上 10-m 風は、園芸施設の倒壊や破損状況とも比較的良好な対応が見られた。各地域での構造物およびその耐風速などの情報を組み合わせれば、今回のような台風の強風災害時における初動対応において有効な情報となることが期待される。

参考文献

- 1) 前坂 剛, 真木 雅之, 岩波 越, 三隅 良平, 清水 慎吾, Xバンドドップラーレーダネットワークを用いた地上風の推定手法について, 第 20 回風工学シンポジウム論文集.
<https://doi.org/10.14887/kazekosymp.20.0.34.0>
- 2) K. Shimose, S. Shimizu, R. Kato, and K. Iwanami, "Analysis of the 6 September 2015 Tornadoic Storm Around the Tokyo Metropolitan Area Using Coupled 3DVAR and Incremental Analysis Updates," J. Disaster Res., Vol.12, No.5, pp. 956-966, 2017.
<https://www.fujipress.jp/jdr/dr/dsstr001200050956/>
- 3) 一般社団法人日本施設園芸協会, 温室設計指針検討専門委員会, 農業用温室設置コスト低減推進事業報告書 (平成 28 年度補正予算国庫補助事業) (第二分冊), 平成 30 年 3 月.
https://jgha.com/wp-content/uploads/2019/11/TM06-13-lowcost1808_2.pdf
- 4) 森山英樹, 佐瀬勘紀, 小綿寿志, 石井雅久, 台風 0221 による千葉県・茨城県下の園芸施設構造の被災状況と考察, 農業施設 34 巻 3 号, 199-212, 2003.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sasj1971/34/3/34_3_199/pdf-char/ja

台風 15 号に伴う突風と落雷の空間分布

Spatial Distribution of Gusts and CG Lightning Associated with Typhoon 1915

小林 文明*

Fumiaki KOBAYASHI

Based on the detected gusts accompanied with the Typhoon T1915, the meteorological features of gusts were revealed. Almost of the gusts were accompanied with convective radar echoes. Most of the gusts occurred within 50 km from the center of the typhoon and concentrated within between East to West direction. These results implied that the gusts were influenced by both the force of gradient wind and the downdraft from cumulonimbus. The number of lightning strikes (CG) around T1915 exceeded 400 times and CG concentrated in the center of the typhoon inner core. CG lightning discharge was observed over the sea, and no CG was observed over the land after the landing of T1915.

Keywords : *gust, typhoon induced tornado, downburst, Cloud-to-Ground discharge*

2.6.1 はじめに

令和元年台風 15 号 (T1915, アジア名ファクサイ) は、9 月 8 日 21 時頃神津島付近で再発達し、955 hPa の“非常に強い (最大風速 44 m/s 以上 54 m/s 未満)”勢力のまま 9 日 03 時頃三浦半島を通過し、960 hPa で千葉市に上陸した。台風が非常に強い勢力のまま関東に接近したのは珍しく、昨年関西を襲った台風 21 号 (T1821) に次いで、首都圏が強風に曝された。関東近海で再発達したことから、東京島嶼部から関東南部で特に暴風による被害が発生した。神津島村で 58.1 m/s、千葉市中央区で 57.5 m/s を記録するなど、これまでの最大瞬間風速を更新するような強風が観測された。本節では、1) 地上で観測された突風が相対的に台風のどこで発生したかという突風の空間分布と、2) 台風 15 号に伴う落雷 (雷放電) 特性を調べた。

* 防衛大学校地球海洋学科 教授・理博

Prof., Dept. of Geoscience, National Defense Academy, Dr.Sci.

2.6.2 突風の空間分布

台風 15 号に伴う住宅被害は、全壊 219 棟、半壊 2,126 棟、一部破損 39,828 棟となっており（消防庁、2019 年 10 月 10 日現在）、全壊と半壊数は T1821 の数を一桁上回る結果となった。また、住家だけでなく、送配電設備、農業施設、樹木等が広域で甚大な被害に見舞われた。地上における突風が台風のどこで発生したのかを調べるために、台風 21 号（T1821）同様の解析を試みた¹⁾。

図 2.6.1 は気象官署の最大瞬間風速値（最大瞬間風速 30 m/s 以上の風速値）を記録した地点を、台風進行方向に相対的な位置で表したものである。図中赤丸は上空に強エコー（48 mm/h 以上）が存在していた箇所である（黄色丸は中程度のエコー、白丸は弱エコーを示す）。この図から、台風 15 号に伴う突風は半径 50 km 以内に集中し、特に東西方向に分布する傾向が明らかである²⁾。一般に、T1821 で示されたように、比較的広範囲（半径 150 km）の東側（危険半円）に分布すると考えられるが³⁾、本事例では一般的な傾向とは大きく異なる結果となった。これは、台風がコンパクトで、暴風域の最大半径が約 110 km と狭かった点、台風の渦構造を維持したまま上陸した点が強く寄与していたと考えられる。上空のエコー強度との関係は、東側（危険半円）に強エコー（台風循環内の発達した積乱雲）に伴う突風が集中していた。

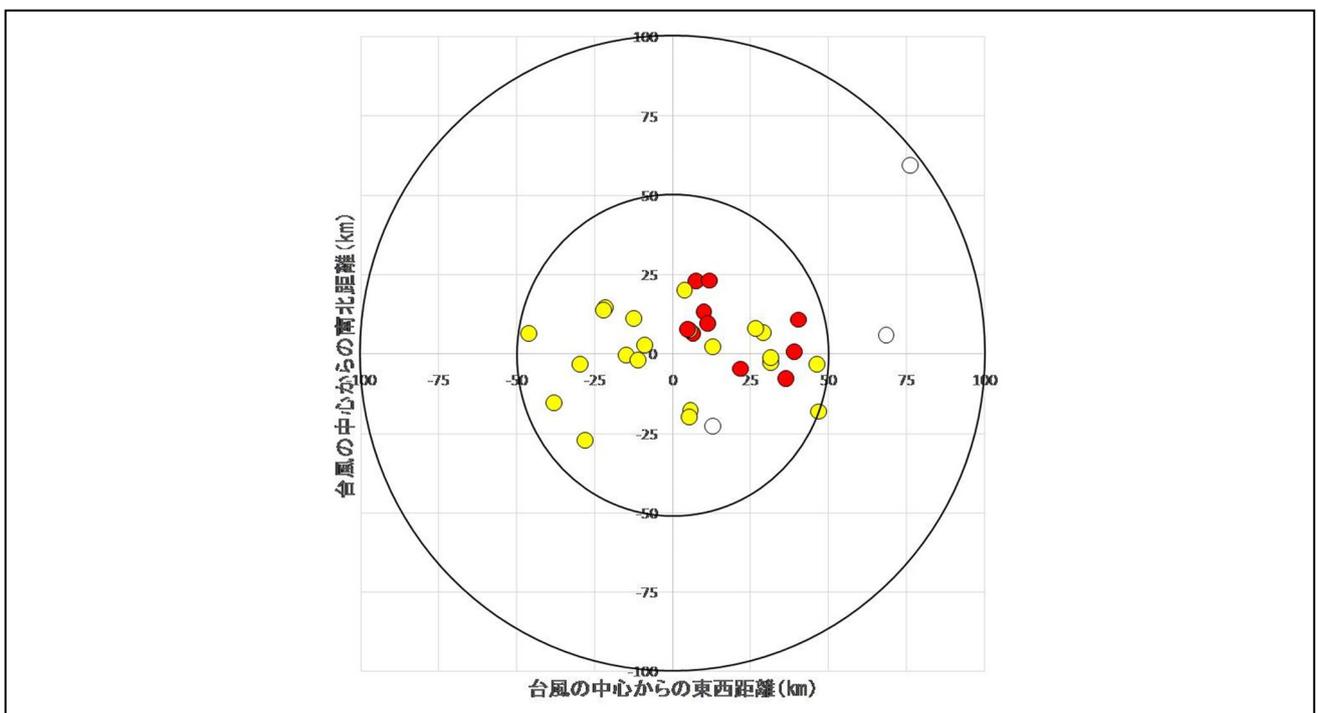


図 2.6.1 台風中心に相対的な突風生場所（台風の進行方向に相対的な位置）²⁾

Fig. 2.6.1 Positions of maximum instantaneous wind speed (more than 30 m/s) relative to the center of T1915

2.6.3 地上稠密気象観測データによる台風 15 号の特徴

関東地方に設置してある地上稠密気象観測ネットワーク（POTEKA）は、約 300 カ所の観測点で構成されており、数 km 間隔における空間分解能の観測を可能にしている⁴⁾。簡易気象計の観測値の中で、気圧値は地形や構造物の影響をほとんど受けず、観測地点の標高による更正（海面更正気圧）のみを行えば議論することができる。台風 15 号通過に伴う気圧変化には、メソ～マイクロスケールの大気擾乱に伴うと考えられる変動がみられた。図 2.6.2 は、台風上陸時の気圧分布を示しており、台風の中心付近からアウターレインバンドに至る領域で密な観測が行われた

ことがわかる。東京湾に沿った観測地点で 960 hPa 台が記録され、さらに近傍の地点あるいは台風中心から同距離の地点でも気圧値が 1~2 hPa 程度異なっていた。台風 15 号の POTEKA による最小気圧値は、東京都利島で 9 月 8 日 23:09 に観測された 956.4 hPa であった。また、千葉市に上陸した時点での気圧は、9 月 9 日 04:33 に千葉市内で 962.5 hPa が観測され、気象庁による発表（上陸時 960 hPa）と整合的であった⁵⁾。

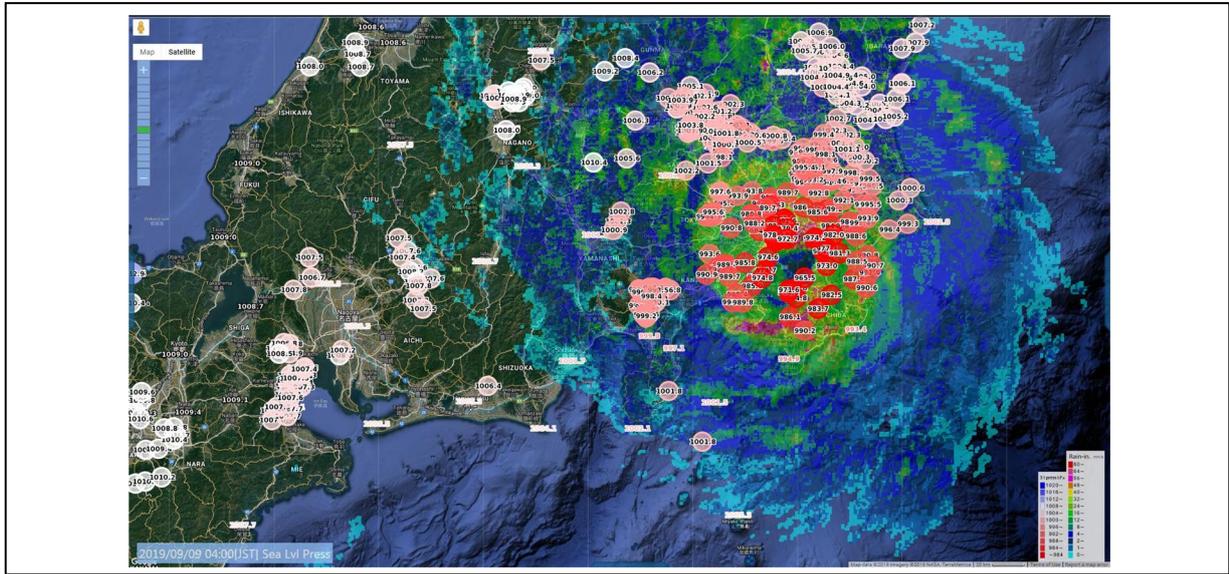


図 2.6.2 9 月 9 日 4 時のレーダーエコー（カラー、気象庁）とPOTEKA で観測された海面更正気圧（円内数値）⁵⁾

Fig. 2.6.2 Radar echo (color) and the value of sea surface pressure (circle) on 04JST, 9 September

具体的な 3 観測地点における気圧の時系列をみると（図 2.6.3），台風通過前後の気圧変化パターンは類似しており，台風の構造が維持されたまま通過したことを示唆している。いずれの観測地点でも気圧の微小変化 (pressure dip) が存在していたことがわかる。これは，T1821 でも解析されたようなメソスケールの渦，あるいは竜巻のようなマイクロスケールの擾乱が内在していたことを意味している⁶⁾。

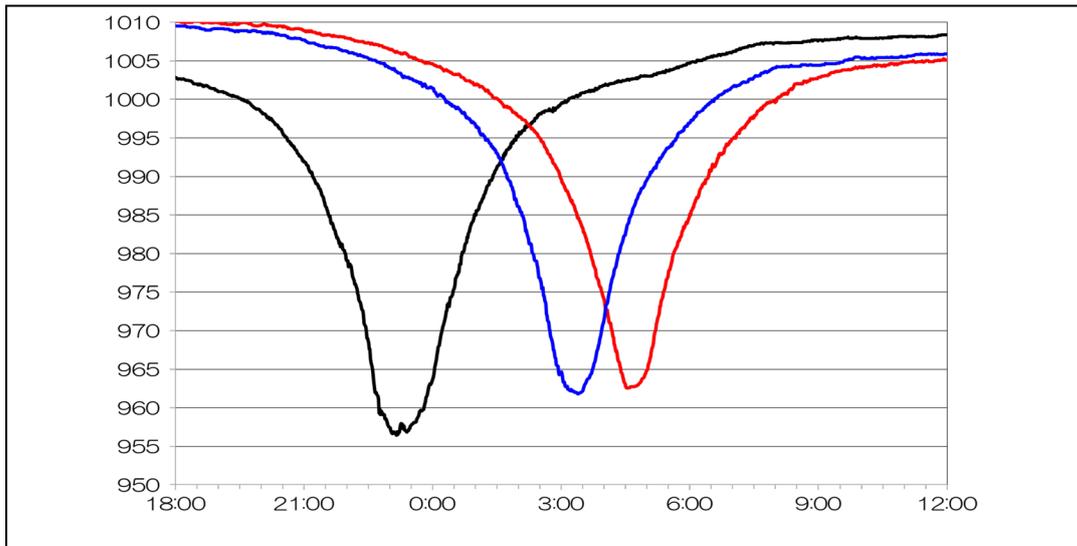


図 2.6.3 気圧の時系列データ（異なる 3 地点）⁵⁾

Fig. 2.6.3 Time sequence of pressure at 3 different points

2.6.4 落雷の特性

現在、陸上に設置された落雷位置標定システム（LLS: Lightning Location System）により、日本周辺の落雷は1個1個の位置、極性、電流値などが観測可能となっている。ここでは、台風15号に伴う落雷活動を、フランクリン・ジャパンが運用している全国規模の雷観測ネットワークであるJLDN（Japanese Lightning Detection Network）のデータを用いて議論する。有効なデータが得られる日本近海（海岸線から約500 km）、つまり台風接近時の落雷（CG: Cloud-to-ground discharge）頻度、落雷分布、落雷極性についてまとめる。9月8日から9日までの2日間で観測されたCGは426回であり、2018年台風21号に伴うCG数8000回と比べても全体としては不活発であった³⁾。図2.6.4の落雷分布をみると、台風の中心付近（図中破線は台風経路を示す）でCGが集中していたことがわかる。また、台風が再発達した神津島付近から上陸して海上に抜けるまでの間、台風中心付近（インナーコア）におけるCGはほとんど観測されなかった⁹⁾。これは、T1821で暴風域内のCGが海上では観測されず、上陸時のみ陸上で観測された結果と逆である。台風の上陸前後で、台風の構造だけでなく内在する積乱雲の構造も変化するためCGの分布にこのような違いが生じるものと推測される。落雷極性は、全体でみると約半分が正極性であった。台風中心付近の極性は、接近時（8日12時～24時）に正極性58%、上陸後再び海上に抜けた後（9日6時～12時）は68%と正極性の割合が非常に高かった。一方、レインバンド（アウターレインバンド）に伴うCGに関しては、正極性が約3割であった。

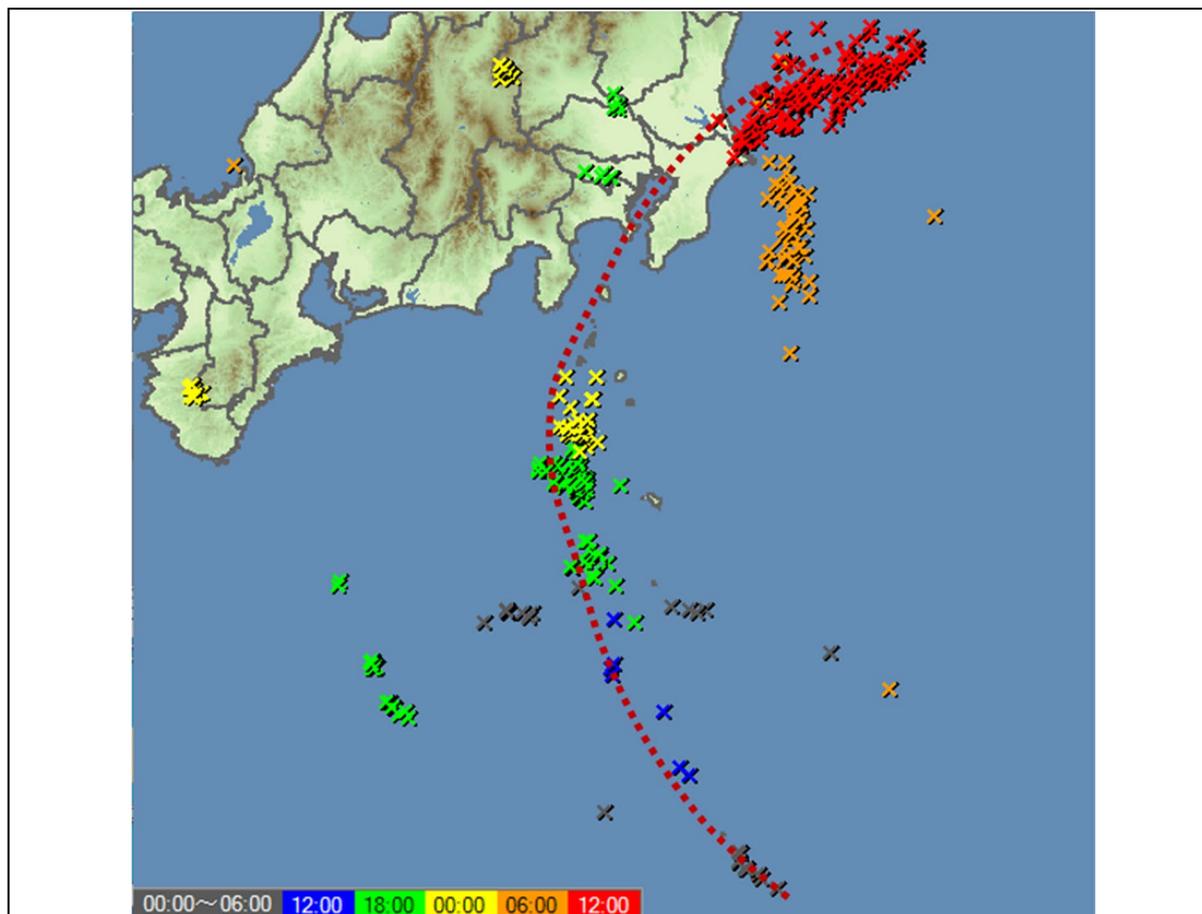


図 2.6.4 落雷分布（8日0時～9時12時）⁶⁾

Fig. 2.6.4 Positions of CG lightning from 00JST, 8 to 12JST, 9 September

2.6.5 フェーズドアレイレーダでみた台風の構造

千葉市内に設置された X バンドフェーズドアレイ気象レーダで台風 15 号通過の観測に成功している（ただし、台風通過後の停電により一部データの欠測がある）²⁾。フェーズドアレイ気象レーダは、複数のスロットアンテナから同時に電波を射出するので、高時間分解能の観測が可能となる。本観測でも、平板アンテナを 30 秒に 1 回転させ全空のデータを観測したため、30 秒間隔でレーダエコーの 3 次元分布が得られた。上陸時の台風 15 号は、同心円の渦構造がはっきりしていたが（図 2.6.5）、エコー分布は場所により強弱は異なっていた。

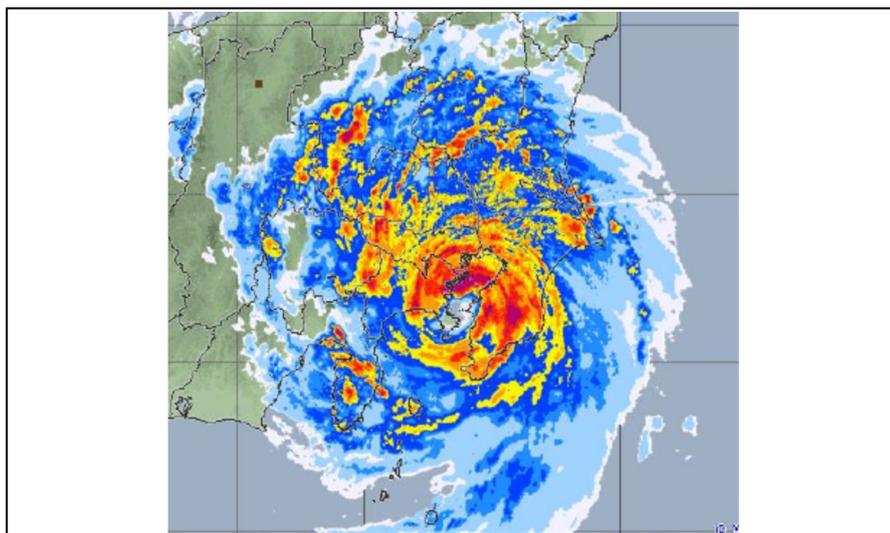


図 2.6.5 9 月 9 日 4 時のレーダエコー（気象庁）²⁾

Fig. 2.6.5 Distribution of radar echo at 04JST, 9 September

フェーズドアレイ気象レーダで観測、3 次元表示されたエコー分布を図 2.6.6 に示す。台風のインナーコア、アウターレインバンドとも積乱雲の集合体であるが、積乱雲の発達（雲頂高度）は個々の台風、中心からの位置、時間によって変化する。台風が三浦半島を通過した、9 日 1 時 30 分のエコー構造は、相対的に背の高いエコーがインナーコア部分に存在し、その外側では背の低い積乱雲が面状に広く分布していたことがわかる。この時のエコー頂高度は、6~7 km 程度であり、中緯度で発生する積乱雲に比べて低く、熱帯起源の台風に伴う積乱雲は上陸時にも水雲的構造であったことを示唆している。

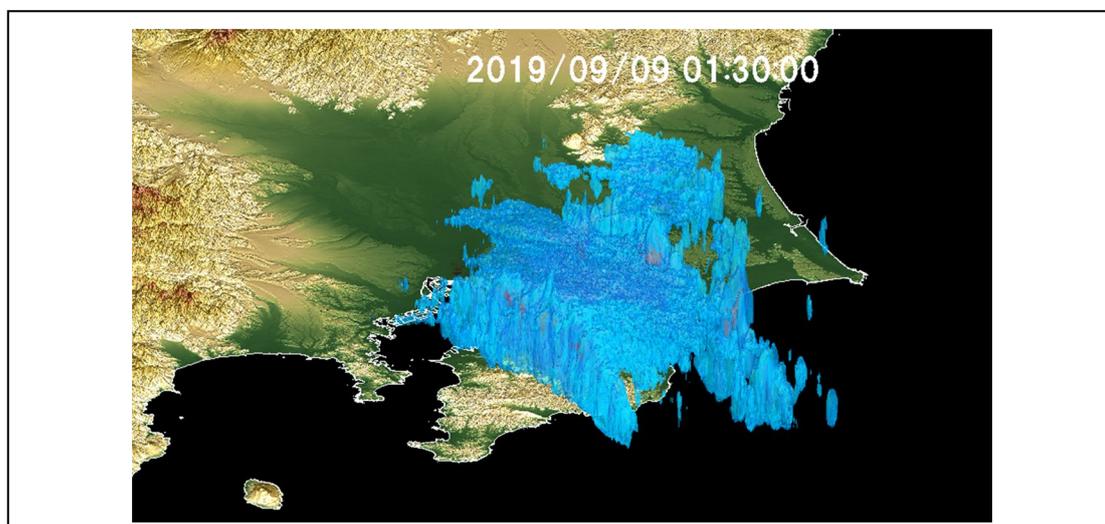


図 2.6.6 フェーズドアレイ気象レーダによるエコー 3 次元表示²⁾

Fig. 2.6.6 Three dimensional echo structure observed by X-band phased-array weather radar

2.6.6 過去の台風との比較

令和元年台風 15 号の後、台風 19 号による広域豪雨、台風 21 号に伴う千葉県内から東北にかけての集中豪雨など、台風に伴う甚大な災害が相次いだ。2004 年に 10 個上陸した台風のうち、台風 22 号 (T0422, Ma-on) は T1915 と同様のスケールをもちコンパクトな台風による強風災害が顕著であった。両者の違いは、T0422 は急速に衰弱しながら伊豆半島に上陸したのに対して、T1915 は勢力を維持したまま東京湾を北上して上陸した点であった。2004 年の台風 23 号 (T0423, Tokage) は日本列島の広域に大雨をもたらしており、2004 年と 2019 年は 2 つの類似した台風が激甚災害をもたらした点で同様のパターンとなった。ちなみに、T0423 時の日本全体で積算した総雨量は観測第 1 位の記録であり、T1919 はそれに次ぐ第 2 位の記録となった。

参考文献

- 1) 小林文明, 高木みゆき, 金井紀江, 台風 21 号に伴う突風と落雷の空間分布, 「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」, 平成 30 年度科学研究費・特別促進費研究成果報告書, 1-37-42, 2019
- 2) 小林文明, 木村海斗, 高田明里, 池田大将, 岩下久人, 諸富和臣, 嶋村重治, 原岡秀樹, 鷹野敏明, 高村民雄, 樋口篤志, 令和元年台風 15 号 (Faxai) の気象学的特徴, 大気電気学会誌, 96 (印刷中), 2020
- 3) 小林文明, 高木みゆき, 金井紀江, 平成 30 年台風 21 号 (Jebi) の落雷特性と突風の空間分布, 大気電気学会誌, 96 (印刷中), 2020
- 4) Iwashita, H., and F. Kobayashi, 2019: Transition of meteorological variables while downburst occurrence by a high density ground surface observation network, *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 184, 153-161, 2019
- 5) 岩下久人, 小林文明, 諸富和臣, 嶋村重治, 原岡秀樹, 鷹野敏明, 高村民雄, 樋口篤志, 地上稠密気象観測データからみた台風 21 号 (Jebi) と台風 15 号 (Faxai) の特徴, 大気電気学会誌, 96 (印刷中), 2020
- 6) 原岡秀樹, 小林文明, 岩下久人, 諸富和臣, 嶋村重治, 鷹野敏明, 高村民雄, 樋口篤志, 令和元年台風 15 号 (Faxai) の落雷特性, 大気電気学会誌, 96 (印刷中), 2020

雷放電活動から見た台風 15 号の盛衰過程

3D characteristics of lightning activity associated with Typhoon Faxai (2019)

櫻井 南海子*¹, 筆保 弘徳*², Paul R. Krehbiel*³*Namiko SAKURAI, Hironori FUDEYASU, and Paul R. KREHBIEL*

3D characteristics of lightning activity associated with Typhoon T1915 were examined using Tokyo Lightning Mapping Array (Tokyo LMA) and JMA C-band Doppler radar. Lightning were observed in the eyewall and outer-rainband in the typhoon, and the number of lightning in the eyewall were more observed than that in the outer-rainband. Most of lightning in the eyewall were observed when the typhoon center was located over the sea. On the other hand, lightning in the outer-rainband were observed when the typhoon center was approaching to Kanto region and passing over Tokyo bay or Kanto region. There were developed convective cells in the eyewall which had 10 km echo top height and lightning location sources were observed over the developed convective cells and surrounding upper stratiform layer. Leader was propagated from the core of eyewall to outside into the stratiform region.

Keywords : lightning, Lightning Mapping Array, typhoon

2.7.1 はじめに

2019 年 9 月に関東を通過し広い範囲に強風および大雨をもたらした令和元年台風 15 号 (T1915, アジア名ファクサイ) は¹⁾, 多くの雷が発生したことも特徴の一つとして挙げられる^{2),3)}. 台風に伴って発生する雷放電は, 壁雲や外側降雨帯で多く, 内側降雨帯で少ないことがこれまでの研究で報告されている⁴⁾. 中野ら (2011) は, 熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載された雷観測装置 (LIS) で観測された 10 年分の雷放電データを用いて, 台風に伴って発生する雷放電は, 季節によって発生場所や雷放電数などが異なることを明らかにした³⁾. しかしながら, 台風に伴う雷放電に関する研究の多くは衛星データを用いているため, 台風内で発生した雷放電の時間変化を詳細に調べることは難しかった. 本節では, 首都圏に展開している 3 次元雷観測システム (Tokyo LMA) を用いて, 台風 15 号の雷放電活動の時間変化と 3 次元的特徴を調べた.

*1 防災科学技術研究所 主任研究員・理博

Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr.Sci.

*2 横浜国立大学教育学部 准教授・理博

Associate Prof., Faculty of Education, Yokohama National University, Dr. Sci.

*3 ニューメキシコ鉱物工科大 教授・物博

Prof., New Mexico Institute of Mining and Technology, Dr. Phy.

2.7.2 雷放電の空間分布

Tokyo LMA は、12 台のセンサーから成り、雷放電から放射された電磁波のうち VHF 帯の電磁波を受信し、到達時間差法を用いて雷放射源の位置を 3 次元的に特定することにより放電経路を可視化する観測システムである⁵⁾。ただし、Tokyo LMA の観測範囲は 12 台のセンサーの中心から 200 km 程度であるため、台風 15 号の一生の雷放電を観測することは出来ない。Tokyo LMA が捉えた雷放電が台風 15 号の一生においてどの時期に発生したのかを把握するため、気象庁で発表された台風中心付近の最大風速と中心気圧⁶⁾の時間変化および Tokyo LMA で観測された雷放射源数の時間変化を調べた(図 2.7.1)。台風 15 号は、9 月 5 日 3 時(日本時)に南鳥島近海で発生し、9 月 8 日 3 時にかけて中心気圧を下げ続け、955 hPa に達した。同様に、中心付近の最大風速も 45 m/s まで強まった。9 月 9 日 0 時から中心気圧の上昇および最大風速の弱화가始まり、9 月 10 日 3 時には台風は温帯低気圧となって消滅した。Tokyo LMA で観測された雷放射源数の時系列を見ると、Tokyo LMA は 9 月 8 日 12 時から 9 月 9 日 12 時まで雷放射源を断続的に検知していた。これらのことから、Tokyo LMA は台風 15 号の最盛期後半から衰退期にかけて発生した雷放電を観測していたといえる。

次に、台風 15 号に伴って発生した雷放射源の空間分布を図 2.7.2 に示す。解析期間は、9 月 8 日 12 時から 9 月 9 日 12 時である。この期間、Tokyo LMA により観測された雷放射源数は 44,160 点で、高度分布は高度約 10 km (約 -30°C) にピークが見られた。雷放電の発生場所を、時間を追って見ていくと、まず、台風 15 号の中心が南海上に位置する 9 月 8 日 12 時から 9 月 8 日 20 時の期間、陸上では関東を中心に複数の孤立した雷雲が発生した(図 2.7.2①)。台風 15 号の中心が八丈島付近を通過した 9 月 8 日 15 時から神津島に接近した 9 月 8 日 22 時の期間には、壁雲で雷放電が観測された(図 2.7.2②)。台風が関東にさらに近づき神津島を通過した頃から、雷放電は殆ど発生しなくなった。台風が東京湾を北上し千葉県と茨城県を通過した 9 月 9 日 00 時から 9 月 9 日 06 時の期間は、外側降雨帯で雷放電が発生した(図 2.7.2③)。台風が茨城県から海上へ出る直前である 9 月 9 日 06 時から、外側降雨帯での雷放電はなくなり、壁雲での雷放電が観測された(図 2.7.2④)。

次に、台風 15 号で観測された雷放射源と台風中心からの距離との関係を図 2.7.3 に示す。台風中心から 30 km、140 km、300 km、380 km において雷放射源数の極大が見られ、内側から順に壁雲、外側降雨帯に対応し、300 km と 380 km は台風が中心が陸上から遠く離れた南の海上に位置する時に関東で発生した孤立雷雲による雷放電に対応する。台風本体に関係する壁雲と外側降雨帯で発生した雷放電に注目すると、台風 15 号は外側降雨帯より壁雲で多く雷放電が発生したことが分かった。

2.7.3 壁雲で発生した雷放電

台風 15 号で多く発生した壁雲における雷放電の特徴を明らかにするため、台風 15 号が茨城県から茨城県沖へ東北東方向に移動する過程で壁雲で発生した雷放電を詳しく解析した。図 2.7.4 に、雷放射源の空間密度分布を示す。解析期間は、9 月 9 日 06:59:00 から 08:42:50 である。雷放射源の高度分布プロファイルを見ると高度約 8 km にピークがみられるが(図 2.7.4c)、図 2.7.4b、c を見ると雷放射源の集中する高度は水平方向に一様ではなかった。雷放射源の集中する高度は西(陸上)から東(海上)に高度が高くなっていった(図 2.7.4b)。同様に、南北方向も雷放射源数の集中する高度が一定ではなく、南から北にかけて低くなっていった(図 2.7.4e)。

高密度雷放射源の高度が水平方向に一様ではない原因を明らかにするため、台風の降水システムの内部構造を調べた。図 2.7.5 は、9 月 9 日 06:50 から 07:00 の期間に観測された雷放射源と気象庁 C バンドドップラーレーダ(東京レーダ)の反射強度の分布である。台風中心から見て右側の壁雲のエコー頂高度は、台風の中でも特にエコー頂高度が高く、反射強度 20 dBZ のエコー頂は高度 10 km まであり、比較的反射強度の強い 35 dBZ は高度約 7 km ま

で達していた (図 2.7.5a, c). 雷放射源は, この台風中心の右側の壁雲に集中していた. また, 雷放射源の多くは, 35 dBZ の領域よりも高い高度に分布しており, 20 dBZ のエコー頂高度が南から北へ向かって低くなっているのに対応して, 雷放射源の高度分布も低くなっていた (図 2.7.5c). これらのことから, 壁雲内の発達した対流域において霰や氷晶といった氷粒子による電荷分離が起こり, 雷放電が発生していたと考えられる.

図 2.7.6 は, 9 月 9 日 06:55:38 に壁雲付近で発生した雲放電 1 フラッシュの雷放射源の空間分布である. 雷放射源は, 高度 7 から 10 km 付近に集中して観測された. これは, 負リーダによる正電荷領域への進展過程を捉えたものと考えられる. 図 2.7.5 に見られた雷放射源の高度分布が東 (北) 方向へ高く (低く) なっている様子が 1 フラッシュからも確認できる. また, 図 2.7.6 から, フラッシュの水平スケールは東西方向に約 30 km, 南北方向に約 40 km に亘っていた. Yoshida et al. (2018)⁷⁾によると, 夏季雷の水平スケールは平均 6.5 km, 最大 45.2 km であることから, 台風 15 号内で発生した図 2.7.6 の雷放電の水平スケールは平均的な夏季雷に比べて大きかった. 今回得られた雷放電の水平スケールの結果は, 台風内部で発生する雷放電の一般的な特徴なのか, 台風 15 号に限った特徴なのかは, 今後, 他の台風事例を含めて統計的に調べる必要がある. また, リーダの進展過程を見ると, リーダは壁雲の円弧に沿って南北方向に広がり, また, 壁雲の内側から外側へ向かって進展していた.

2.7.4 まとめ

令和元年台風 15 号の雷放電の特徴について, Tokyo LMA と気象庁レーダを用いて調べた. Tokyo LMA は, 台風 15 号の最盛期後半から衰退期にかけて発生した雷放電を観測し, 壁雲と外側降雨帯で雷放電が発生したこと, 壁雲でより多くの雷放電が発生したことがわかった. また, 壁雲と外側降雨帯で観測された雷放電は同時期に発生することは殆どなく, それぞれ数時間に亘って連続的に別々の期間に発生していた. 壁雲の雷放電は, 壁雲の中で特にエコー頂高度の高い対流域でリーダ進展を開始し, 対流域上空や周辺に広がる層状域 (正電荷領域) へリーダが進展していた. 壁雲で観測された雷放電の中には, 1 フラッシュの水平スケールが南北方向に約 40 km あり, 平均的な夏季雷の水平スケールよりも大きい雷放電が存在した. 以上のように, 本研究では, 台風に伴う雷放電の 3 次元的特徴を観測から捉えることが出来た.

参考文献

- 1) 内閣府, 令和元年台風第 15 号に係る被害状況等について, 2019.
(http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon15/pdf/r1typhoon15_30.pdf, 2020.3.17)
- 2) 原岡秀樹, 小林文明, 岩下久人, 諸富和臣, 嶋村重治, 鷹野敏明, 高村民雄, 樋口篤志, 令和元年台風 15 号 (Faxai) の落雷特性, 大気電気学会誌, 96 (印刷中), 2020
- 3) 櫻井南海子, 筆保弘徳, 岩波 越, Paul R. Krehbiel, William Rison, Daniel Rodeheffer, 2019 年に関東を通過した台風 15 号, 19 号の雷の特徴について, 大気電気学会誌, 96 (印刷中), 2020
- 4) 中野藤之, 森本健志, 牛尾智雄, 河崎善一郎, TRMM 搭載 LIS により観測された台風における雷放電の特徴, 天気, 58, 117-130, 2011.
- 5) Ronald J. Thomas, Paul R. Krehbiel, William Rison, Steven J. Hunyady, William P. Winn, Timothy Hamlin, and Jeremiah Harlin, Accuracy of the lightning mapping array, 109, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JD004549>.
- 6) 気象庁, 台風経路, 2019. (<https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/typhoon/T1915.pdf>, 2020.3.17)
- 7) Yoshida S., E. Yoshikawa, T. Adachi, K. Kusunoki, S. Hayashi, and H. Inoue, Three-dimensional radio images of winter lightning in Japan and characteristics of associated charge structure, IEEJ Trans., 2018. <https://doi.org/10.1002/tee.22795>.

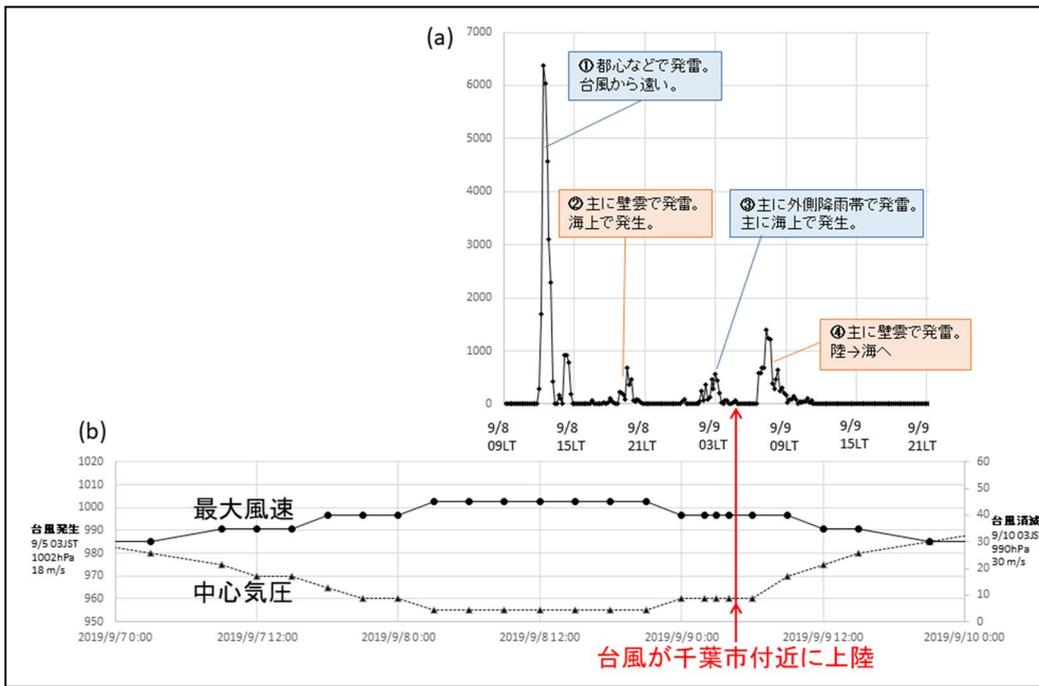


図 2.7.1 台風 15 号の中心気圧，最大風速の時系列(b)と雷放射源数の時系列(a).

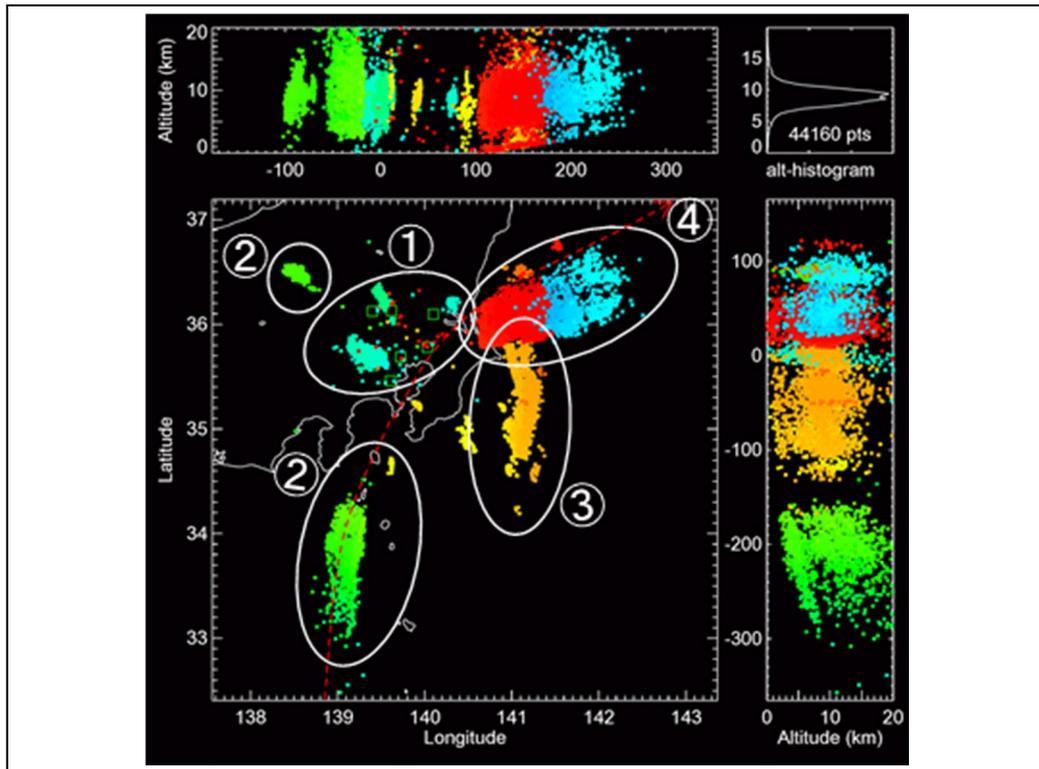


図 2.7.2 Tokyo LMA で観測された台風 15 号に伴う雷放射源の分布. 点の色は発生時刻の違いを示している. ④の点は，赤色の方が青色よりも観測時刻が古いことを示している. 図中の数字は，雷放電発生の大まかな順を示している. 赤色の点線は，台風 15 号の経路を示している.

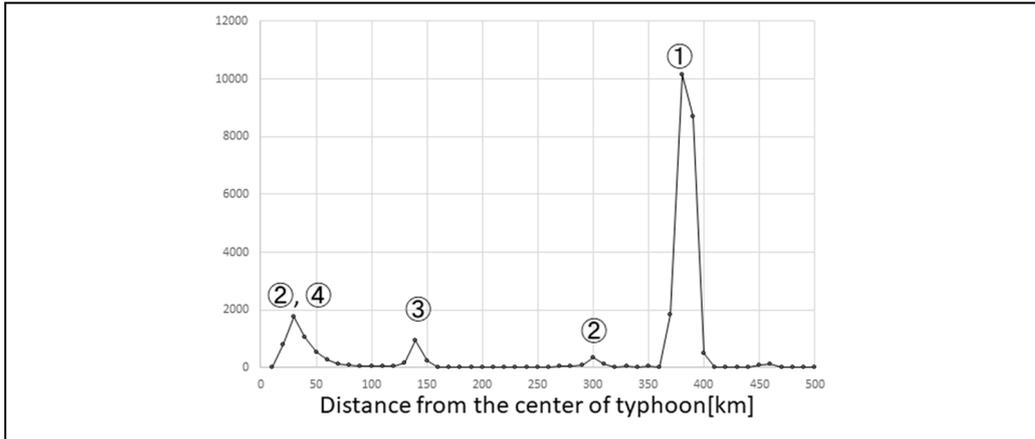


図 2.7.3 台風 15 号で観測された雷放射源の動径分布. 図中の数字は, 図 2.7.2 の数字に対応する.

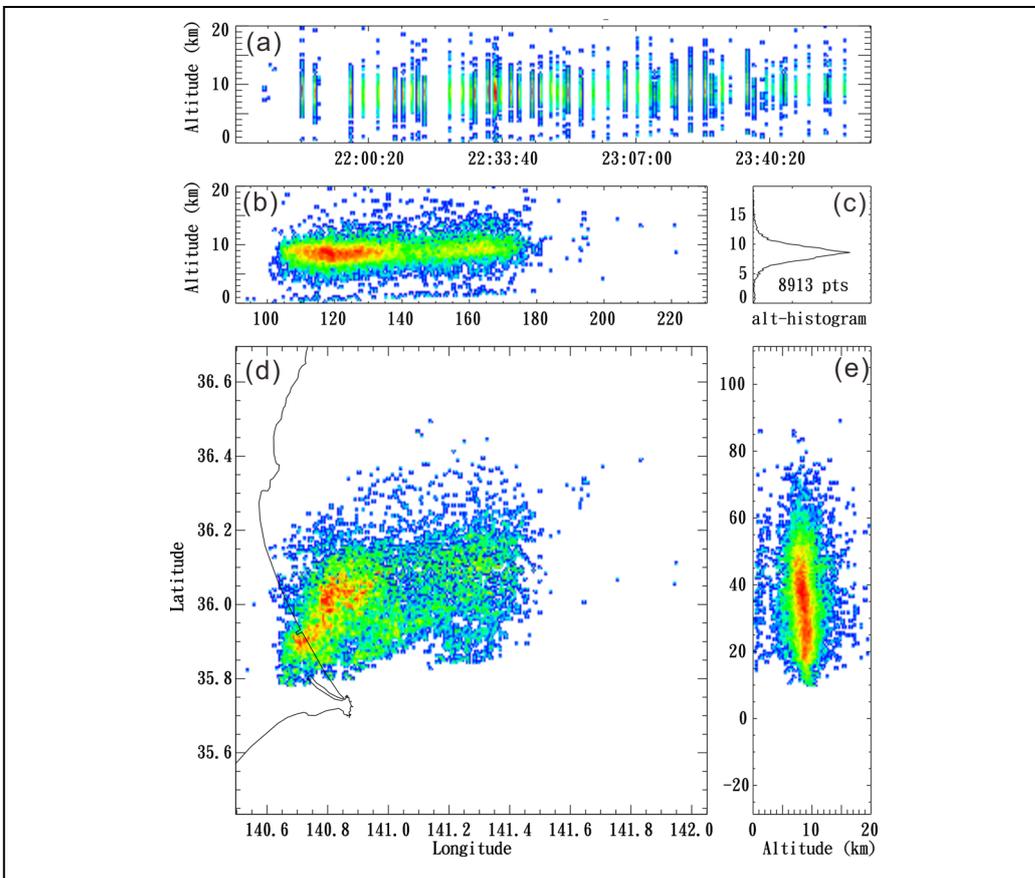


図 2.7.4 9月8日 21:59:00 UTC から 23:42:50 UTC に壁雲で観測された雷放射源の空間密度分布図. 暖色系の色ほど密度が高いことを示している.

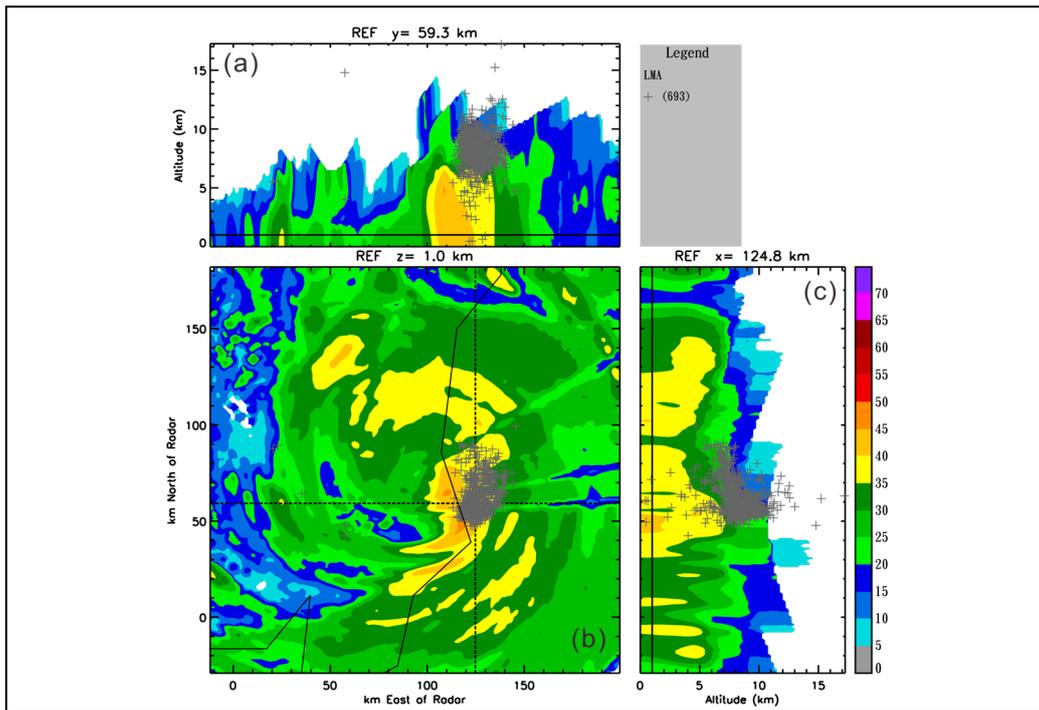


図 2.7.5 9月8日 21:50 UTC から 22:00 UTC にかけて観測された雷放射源とレーダエコーの空間分布. 図中の+は, Tokyo LMA で観測した雷放射源の位置を示す. (b)の点線は, それぞれ(a)と(c)の断面の位置を示す.

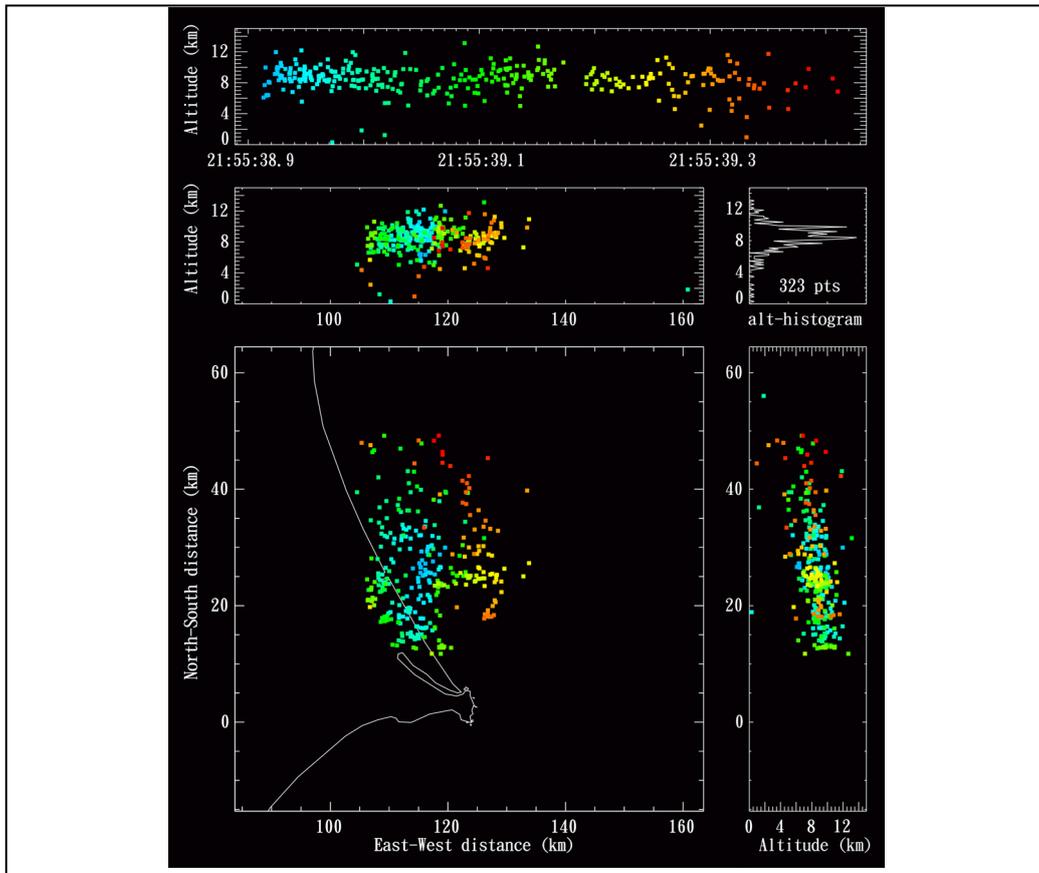


図 2.7.6 9月8日 21:55:38 UTC に壁雲付近で発生した1フラッシュの雷放射源の空間分布.

数値シミュレーションによる

2019年台風15号の上陸前の強度・構造変化のメカニズム

Intensity and Structural Changes in Typhoon 1915 before the landfall in a numerical simulation

宮本 佳明*¹, 筆保 弘徳*², 和田 章義*³

Yoshiaki MIYAMOTO, Hironori FUDEYASU, and Akiyoshi WADA

This study investigates change in intensity and structure of Typhoon 1915 simulated in a numerical simulation. Typhoon 1915 made landfall with the strongest intensity out of tropical cyclones (TCs) that made landfall at Kanto area. We focus on the physical reason why the cyclone can sustain such a strong intensity until it approaches the land. Analyses of a numerical simulation revealed that the structure of the simulated TC is axisymmetric, which is favorable to intensify. This feature has not been popular in mid-latitudes where the baroclinicity is high. By conducting a vorticity budget analysis, it is shown that the symmetric vortex structure is due to high stretching and tilting terms.

Keywords : *Typhoon, Intensity and structure change*

2.8.1 はじめに

発達中や成熟期の熱帯低気圧 (Tropical Cyclone: TC) の多くが、回転軸周りに対称 (軸対称) 的な風や雲を伴う。TC の強化・維持には、最大風速半径 (Radius of Maximum Winds: RMW) より内側での非断熱加熱が重要であることが分かっている (Shapiro and Willoughby 1982¹); Schubert and Hack 1982²); Rogers et al. 2013³)。さらに、RMW より内側の非断熱加熱の分布が軸対称的であるほど、より効率的に TC を強化できることも理論的・観測的に示されている (Nolan et al. 2007⁴); Shimada et al. 2017⁵)。つまりは、RMW より内側で、軸対称的な (角度方

*1 慶應義塾大学環境情報学部 専任講師・理博

Assistant Prof., Faculty of Environment and Information Studies,
Keio University, Dr.Sci.

*2 横浜国立大学教育学部 准教授・理博

Associate Prof., Faculty of Education, Yokohama National University,
Dr. Sci.

*3 気象庁気象研究所 室長・理博

Group Head, Meteorological Research Institute,
Dr. Sci.

向に変動が少ない) 大きな非断熱加熱が存在すると、TCは強化しやすい。基本的に非断熱加熱は、海から供給された水蒸気が凝結することによる空気の加熱である。そのため、海面水温の高い海域を通過した際に、非断熱加熱が多くなってTCが強化しやすい。

傾圧性の低い熱帯ではTCの構造も軸対称的で、非断熱加熱の分布も軸対称的になりやすいが、傾圧性の高い中緯度にやってくると、背景水平風の鉛直シアも大きくなり軸対称構造が崩れて非対称性が強まることが多い。これに伴って、中緯度に来た多くのTCが温帯低気圧に変化する。温帯低気圧は、南北の温度差(位置エネルギーの差)を利用して駆動する低気圧であり、水蒸気の凝結熱を主たるエネルギーとするTCとは、動力源が異なる。温帯低気圧になった後に再発達するものもあるが、基本的にTCは、中緯度に来ることで、水温が低くなり、鉛直シアも強くなって構造も非対称化し、弱まって行く。

2019年台風15号は、歴史上稀に見る強度で関東へ接近・上陸して、千葉県を中心に広範囲で被害を発生させた。台風15号は東京湾を北上し(図1)、その際に進行方向の東側(危険半円側)にあたる千葉県で、特に強風によって建造物の倒壊や広範囲での停電など大きな被害を引き起こした。この台風は、東京湾を北上する直前に、その最大の強度である955 hPaとなった。それでは、中緯度に入ってきた後にも関わらず、このような強い強度を獲得したのは何故なのだろうか。上述したような現在分かっているTCの性質を踏まえると、この理由として、水温が上昇したことに加えて、台風の構造が強化しやすい状態へ変化したことなどが考えられる。

そこで本研究では、台風15号の数値シミュレーションを行い、上陸前に台風の構造がどのように変化したのか、そして構造変化と強度変化の関係を明らかにすることを目的とする。本論文では、まず第2章でシミュレーションの設定を紹介した後、3章で強度や構造変化に関する結果を示し、4章で渦度の収支解析を行って軸対称化した理由を示す。5章で結果を考察し、6章でまとめる。

2.8.2 シミュレーションと解析方法

気象庁で開発された非静力学大気波浪海洋結合モデル(Non-Hydrostatic Model: NHM, Saito et al. 2006⁶⁾)を用いて、台風15号が上陸する直前の2019年9月8日00UTCから36時間の数値シミュレーションを行った。水平解像度を1 kmとした。

台風の強度に重要な海面水温のデータに関しては、リモートセンシング社が提供する、衛星マイクロ波観測によって得られた水平格子間隔0.25°の日毎の水温データを利用した。海洋データとして、水平格子間隔0.5°の北太平洋版海洋長期再解析データセットを利用した。実験結果の詳細はWada et al. (2019)⁷⁾を参照されたい。

台風の中心は、海面更正気圧のデータから重心を求め、その格子点を中心点と定義した(Braun et al. 2002⁸⁾)。また台風の強度は、多くの先行研究と同様に(e.g., Miyamoto and Nolan 2018⁹⁾)、風や他の物理量を円筒座標形に座標変換した後、角度方向に平均した接線方向風速が、高度2 kmにおいて最大となる値を最大風速(強度)と定義した。

2.8.3 結果：台風の強度・構造変化

図1に、計算された台風の強度(高度2 kmでの最大風速、および、中心点における海面気圧)の時間変化を示す。最大風速も中心気圧も、シミュレーションの後半まで、ほぼ一定の値で推移しており、目立った発達・減衰は見られない。しかし、 $t = 40$ hになると急激に強度が弱まっていることがわかる。これはちょうど台風が上陸した時に相当し、それまでの強度が強かった分、上陸した時の衰退も顕著である。

図2に、接線風速が高度2 kmで最大となった半径(最大風速半径)と、接線風速が15 m/sになった半径の時間変化を示す。最大風速半径は、計算開始後から $t = 10$ hまで減少し約20 kmになって10時間程度維持していた。

その後、 $t = 20$ h から $t = 40$ h にかけて緩やかに 40 km 程度まで増加した。一方で、風速 15 m/s 半径は、計算開始直後に約 200 km まで増加し、計算期間の最後に急激に小さくなるまでの間、徐々に小さくなって行った。

図 3 に、 $t = 6, 12, 18, 24, 30, 36$ h における鉛直平均した凝結物混合比と高度 2 km における水平風を示す。 $t = 6$ h の時点で、目を取り囲むように凝結物の多いリング状の領域（目の壁雲）が存在することが分かる。その周りには、スパイラル状に伸びる凝結物混合比の大きい領域も存在でき、中心の北東側で半径数十 km、南西側では半径 150 km 以上まで広がっている。 $t = 12$ h になると、目の壁雲域の凝結物量が増加し、その極大が中心西側に位置している。さらにレインバンドも成長して、北東象限にコマ状に広がっている。

さらに $t = 18$ h では、中心付近の凝結物混合比はさらに増加しており、対流活動が活発化したことを示唆している。ただ、分布は軸対称的であった $t = 12$ h のものより、非対称性が増したと見られる。レインバンドもほぼ全ての象限で凝結物の値が大きく、目の壁雲を取り囲むように成長している。 $t = 6$ h までの波数 1 の構造から、レインバンドが 2 本のびた波数 2 の構造が顕著になった。 $t = 24$ h になると、南にあったレインバンドが消えて、北にのみ存在している。また、目の壁雲での非対称的な分布も継続している。

$t = 30$ h では、明らかに目の壁雲の半径が大きくなった。目の壁雲より外側の凝結物混合比が大きい領域も北西象限に集中し、その値も前と比較すると小さい。この傾向は $t = 36$ h で継続されているが、この時刻では目の壁雲の非対称性が顕著で、壁雲域でも大きな凝結物混合比は北西象限にのみ集中している。

ここで注目したいのが、 $t = 18$ から 24 h にかけて、非対称ながら目の壁雲の外側にもう一つ円弧状の雲が存在していた点である。その後の時間で、内側の壁雲が衰退し、外側の雲が入れ替わったように見える。そして、目の壁雲の半径がそれまでに比べて大きくなった。この一連の過程は、目の壁雲の交換サイクル (Eyewall Replacement Cycle: ERC) と見なすことができる。ERC は台風の強度・構造を劇的に変えるため、台風の予報において重要な現象であるが、その変化が急激であるため予測することが難しい。さらに、ERC のきっかけとなる現象が、外側の壁雲の形成である。外側の壁雲の形成には風速の分布が重要であることが指摘されているが (例: Miyamoto et al. 2018¹⁰)、まだ解明されていない。ただ外側壁雲が形成したからと言って、全てのケースで ERC が生じるとは限らず、内側と外側の両方の壁雲が維持されるケースもある (Tsuji et al. 2017¹¹)。この点は、今後詳細に調べる。

図 4 に、水平断面図と同じ 6 つの時間における、角度方向に平均した凝結物混合比と、接線方向風速・動径方向風速の半径・高度分布を示す。 $t = 6$ h では、接線方向風速の極大が高度数百 m から 1 km にあり、その半径より少し内側で凝結物混合比が最大となっている。混合比は高度 6 km 程度まで大きな値を持っている。

地表面付近に速い内向き流が存在しており、高度約 13 km・半径 50 km 付近に外向き流の極大が存在している。また、最大風速半径付近で、高度 1 km あたりでは外向きの流れとなっている。これは、傾度風平衡を満たす接線方向風速よりも速い風速 (超傾度風) が吹くことで、気圧傾度力に対して遠心力が強くなり過ぎて生じると考えられている。遠心力が大きくなることが重要なので、小さい台風で見られやすい特徴である。

図 5 に、二つの高度差で算出した水平風の鉛直シアの時間変化を示す。一つは、高度 1.5 km と 12 km (黒色線)、もう一つは高度 1.5 km と 8 km (灰色線) の風速差である。ここで水平風は、台風中心周り 600 km で平均した値である。両シアとも同じような時間変化をたどっていた。計算開始後大きな値であったが、数時間後には $1.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 程度まで下がり、 $t = 32$ h 程度まで一部の期間を除いて最小値を維持し、その後再び増加した。

図 6 に、台風中心から半径 100 km 以内で平均した地表面からの顕熱フラックス (黒色線) と潜熱フラックス (灰色線) の時間変化図を示す。顕熱・潜熱両フラックスともに似た時間変化をたどっている。計算開始から $t = 18$ h まで両フラックスが大きい値を保ち、その後急に減衰している。そして再び $t = 38$ h あたりから増加した。

図 7 に、相対渦度の鉛直成分、及び、凝結物混合比で求めた軸対称度の時間変化を示す。両者ともに、最大風速半径以内で高度 1.5 km から 10 km で平均した値である。相対渦度の軸対称度は、計算開始直後から増加し、 $t = 10$

h で極大になり 20 h まで維持した。その後、減衰して $t = 25$ h 以降は小さい値となった。凝結物混合比も $t = 10$ h から 20 h の間で大きい値となったが、相対渦度の軸対称度に比べて値のばらつきが大きい。

2.8.4 結果：渦度の収支解析

次に、計算開始後に台風 15 号が少し強まった理由を明らかにするため、台風を中心付近において、相対渦度の鉛直成分の収支解析を行った。相対渦度の鉛直成分の方程式は、各地点での渦度の時間変化が、東西・南北・鉛直方向の移流項、鉛直流の発散による伸縮項、傾斜項、拡散項で決まるという式である。

図 8 に軸対称平均した渦度の時間変化を示す。渦度は、計算開始数時間後から増加して、 $t = 8$ から 22 h まで最大の値（約 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）に達して、その後再び低い値（約 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）を維持していた。この変化傾向は、強度変化の時間変化（図 1）よりも、最大風速半径のそれ（図 2）と類似しており、最大風速半径が変化することで領域平均した渦度が増加したと考えられる。

次に、計算結果から各項を計算し、台風の半径 100 km 以内、及び、高度 1.5 km から 10 km で平均をした各項の時間変化を示す（図 8）。計算開始数時間後で伸縮項が大きくなり、その後ティルティング項、移流項の順に大きくなった一方、伸縮項は負の値になった。この結果から、最大風速半径以内で平均した軸対称成分の渦度は、主に軸対称成分のストレッチング項・ティルティング項によって増加したと考えられる。そして大きな渦度が維持されたのは、ティルティング項と移流項が寄与している。

2.8.5 考察

2019 年台風 19 号のシミュレーションの結果、関東へ上陸する十数時間前に、中緯度にも関わらず、計算された台風が発達していた。結果に示した台風の環境場・内部構造に関するパラメータの解析から、台風が発達した原因を考察する。

まず環境場のパラメータとして、一般的に台風発達に最も大きく影響を与える、地表面からの熱フラックス（海面水温の結果）と背景水平風の鉛直シアの二つのパラメータの時間変化を求めた。その結果、上陸前に鉛直シアが弱くなっていたことと、地表面からの顕熱・潜熱両方のフラックスが大きくなっていたことが示された。つまり、台風が発達しやすい環境場に存在していたと考えられる。

また、台風発達速度を決めると考えられている内部構造に関するパラメータも調べた。計算された台風が発達したタイミングで、最大風速半径が小さく、相対渦度で求めた軸対称度パラメータ（Miyamoto and Takemi 2013¹²⁾）が大きい値となっていた。先行研究から、これら二つの内部パラメータが大きい時には、台風の運動エネルギーを生成する非断熱加熱が同じ量与えられた時にも、台風発達率が高くなることが分かっている。これらの結果から、計算された台風は、環境場のパラメータで見ても、内部構造に関するパラメータで見ても発達しやすい状況であったことが考えられる。

2.8.6 まとめ

過去最高強度で関東に上陸し、被害を発生させた 2019 年台風 15 号について、上陸前からの数値シミュレーションを実行し、上陸前の台風の強度・構造変化について解析を行った。その結果、計算された台風は、上陸前に強化しやすい環境下に存在していたために、強度変化が生じたとともに強い強度を保ちながら上陸したと考えられる。

具体的には、海面からの顕熱・潜熱フラックスが大きく、背景水平風の鉛直シアが小さい環境場であった。また、台風の渦自体も、高度 2 km において接線方向風速が最大となる半径が約 20 km と小さく、相対渦度の鉛直成分で算出した軸対称度も高くなっており、発達に好ましい構造となっていた。

参考文献

- 1) Shapiro, L.J. and H.E. Willoughby, 1982: The Response of Balanced Hurricanes to Local Sources of Heat and Momentum. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 378–394.
- 2) Schubert, W.H. and J.J. Hack, 1982: Inertial Stability and Tropical Cyclone Development. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 1687–1697.
- 3) Rogers, R., P. Reasor, and S. Lorsolo, 2013: Airborne Doppler Observations of the Inner-Core Structural Differences between Intensifying and Steady-State Tropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2970–2991.
- 4) Nolan, D.S., Y. Moon, and D.P. Stern, 2007: Tropical Cyclone Intensification from Asymmetric Convection: Energetics and Efficiency. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 3377–3405.
- 5) Shimada, U., K. Aonashi, and Y. Miyamoto, 2017: Tropical Cyclone Intensity Change and Axisymmetry Deduced from GSMaP. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 1003–1017.
- 6) Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J.-I. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.
- 7) Wada, A., Kanada, S., and Yamada, H., 2018: Effect of air-sea environmental conditions and interfacial processes on extremely intense Typhoon Haiyan (2013). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123.
- 8) Braun, S.A., 2002: A Cloud-Resolving Simulation of Hurricane Bob (1991): Storm Structure and Eyewall Buoyancy. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1573–1592.
- 9) Miyamoto, Y. and D.S. Nolan, 2018: Structural Changes Preceding Rapid Intensification in Tropical Cyclones as Shown in a Large Ensemble of Idealized Simulations. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 555–569.
- 10) Miyamoto, Y., D.S. Nolan, and N. Sugimoto, 2018: A Dynamical Mechanism for Secondary Eyewall Formation in Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3965–3986.
- 11) Tsujino, S., K. Tsuboki, and H. Kuo, 2017: Structure and Maintenance Mechanism of Long-Lived Concentric Eyewalls Associated with Simulated Typhoon Bolaven (2012). *J. Atmos. Sci.*, **74**, 3609–3634.
- 12) Miyamoto, Y. and T. Takemi, 2013: A Transition Mechanism for the Spontaneous Axisymmetric Intensification of Tropical Cyclones. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 112–129.

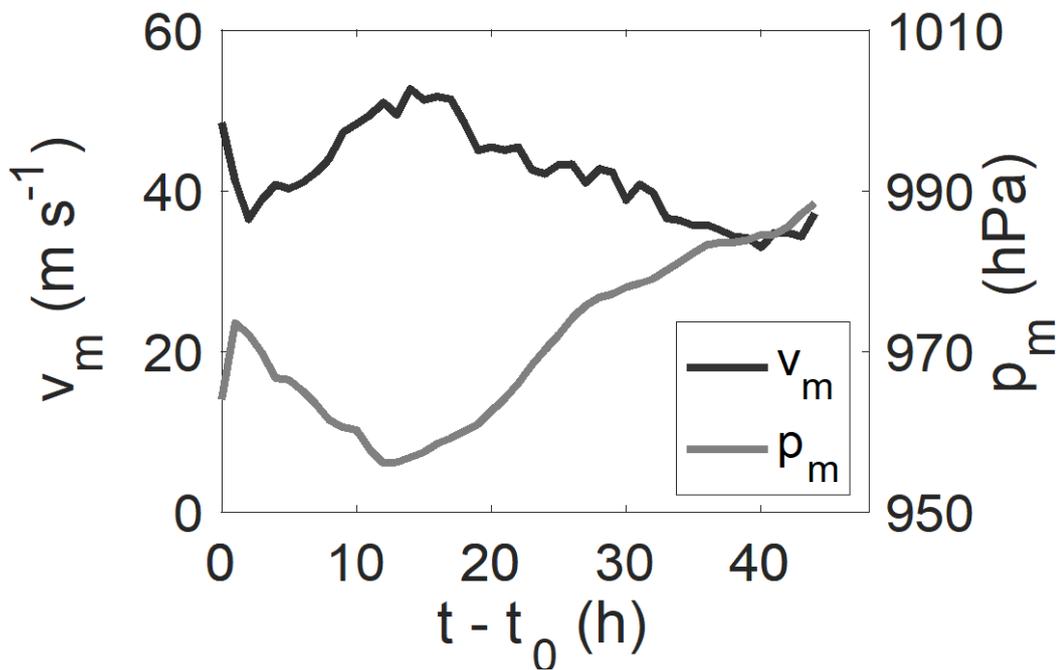


図1：高度 2 km における、角度方向に平均した接線方向風速の最大値（黒色線）と、重心位置における海面気圧（灰色線）の時間変化図。

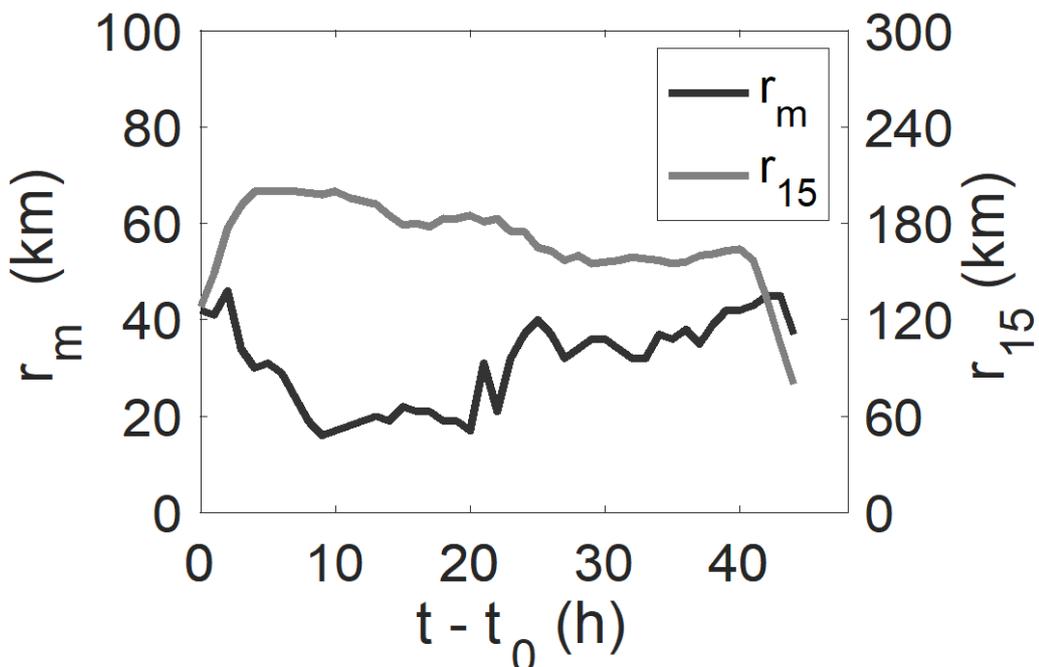


図2：高度 2 km における最大接線風速の半径（黒色線）と、風速が 15 m/s になる半径（灰色線）の時間変化図。

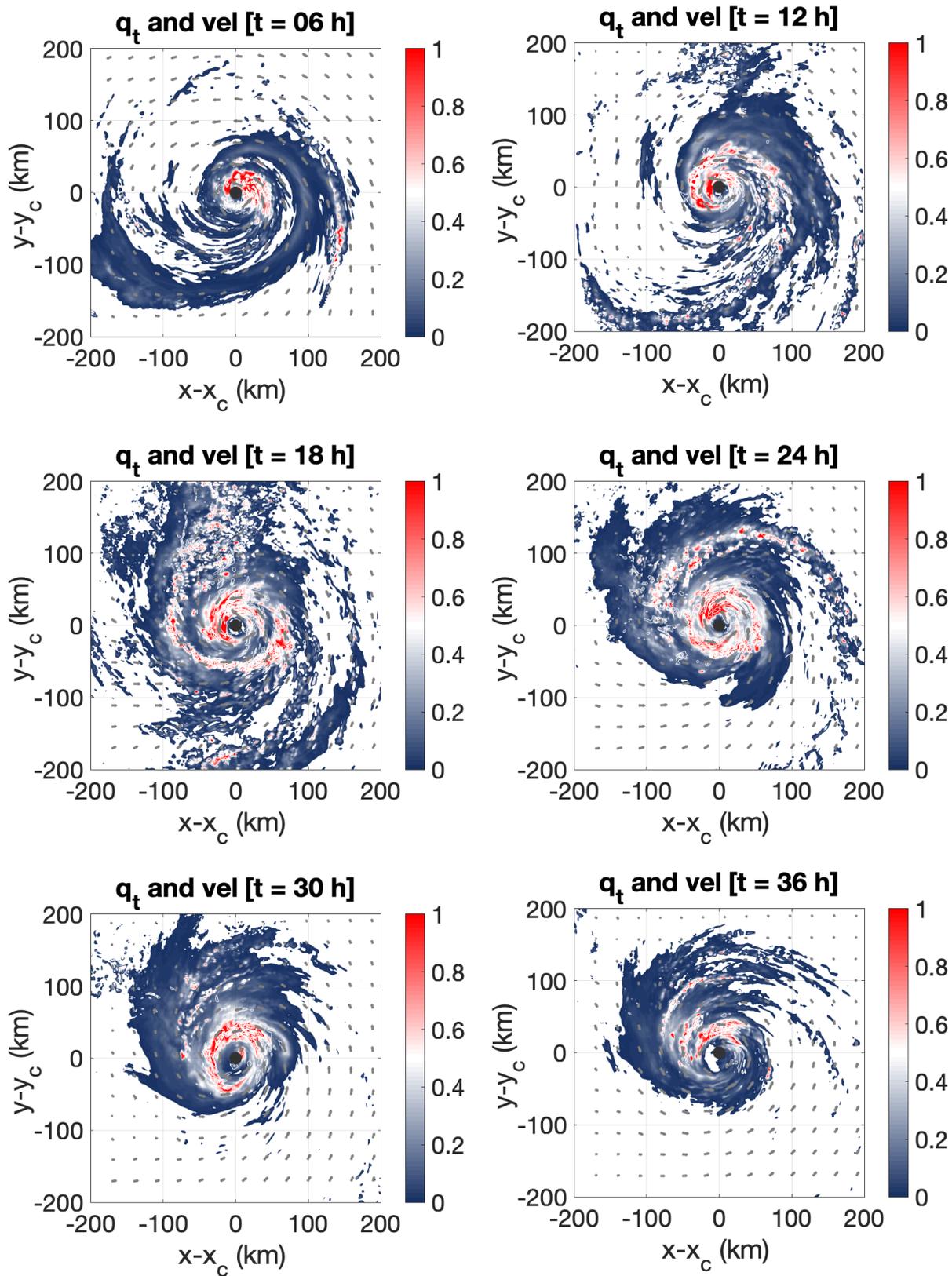


図3：高度 1.5 km と 10 km の間で鉛直平均した凝結物混合比 (g/kg、陰影) と高度 2 km の水平風 (ベクトル) の水平断面図。

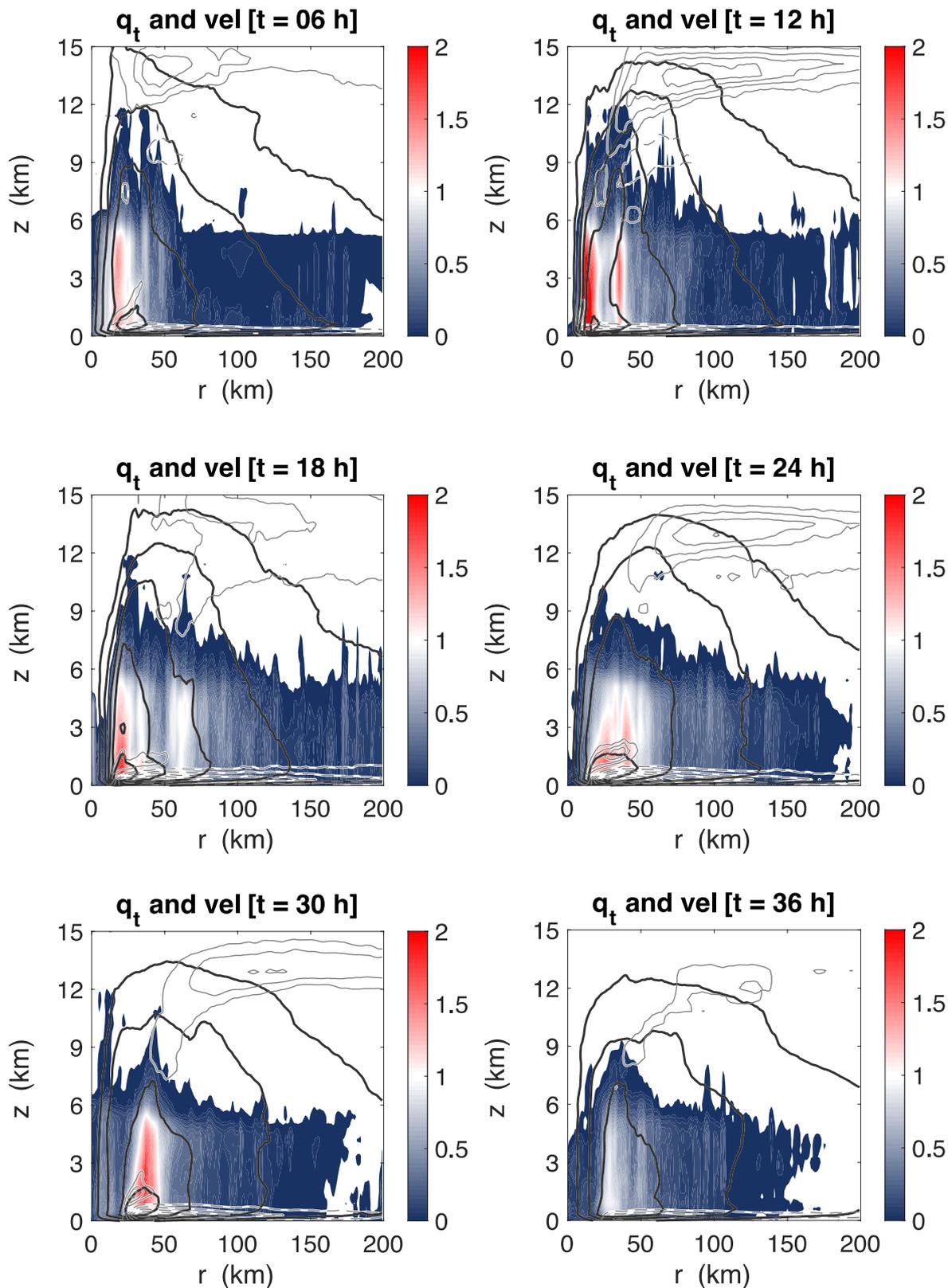


図4：角度方向に平均した鉛直平均した凝結物混合比 (g/kg、陰影) と、接線方向風速 (黒色等値線)、動径方向風速 (灰色等値線) の半径—鉛直断面図。

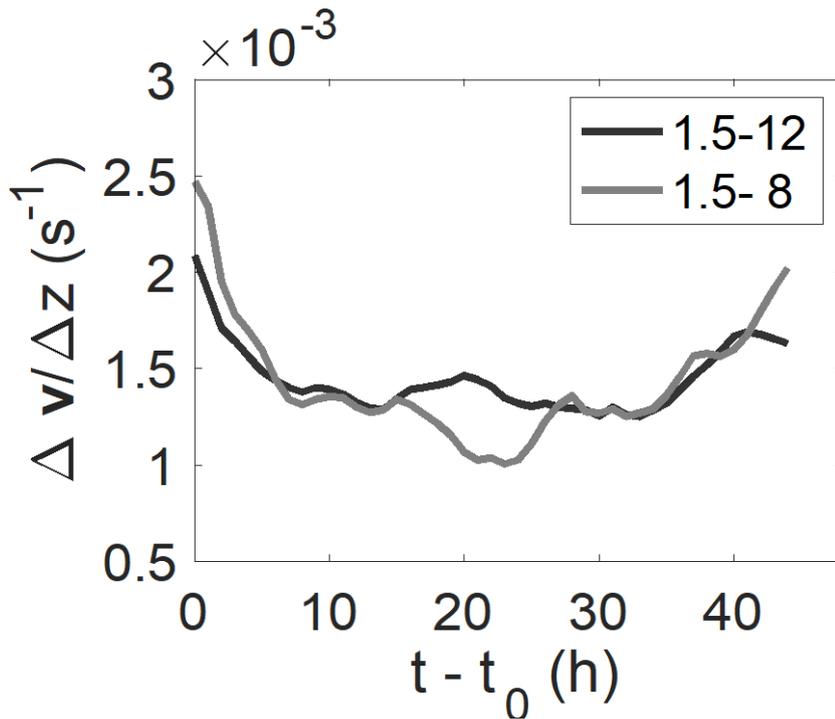


図 5：高度 1.5 km と 12 km の風速差で算出した背景風の鉛直シア（黒色線）と、高度 1.5 km と 8 km の風速差で算出した鉛直シア（灰色線）の時間変化図。背景風は台風中心周り 600 km で平均した水平風速。

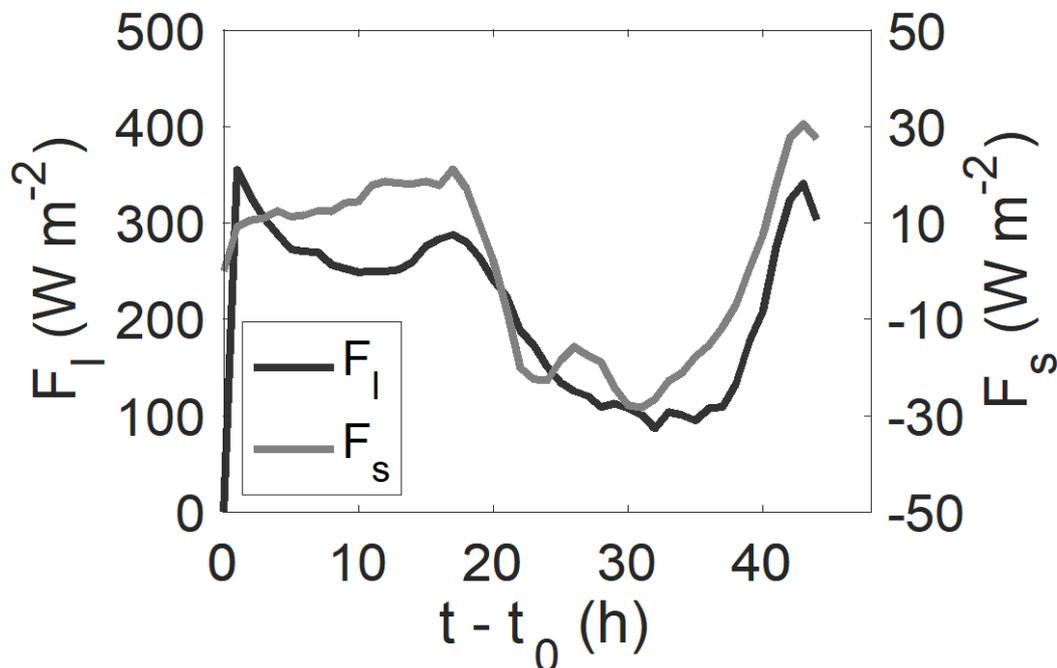


図 6：最大風速半径以内で平均した海面における潜熱フラックス（黒色線）と顕熱フラックス（灰色線）の時間変化図。

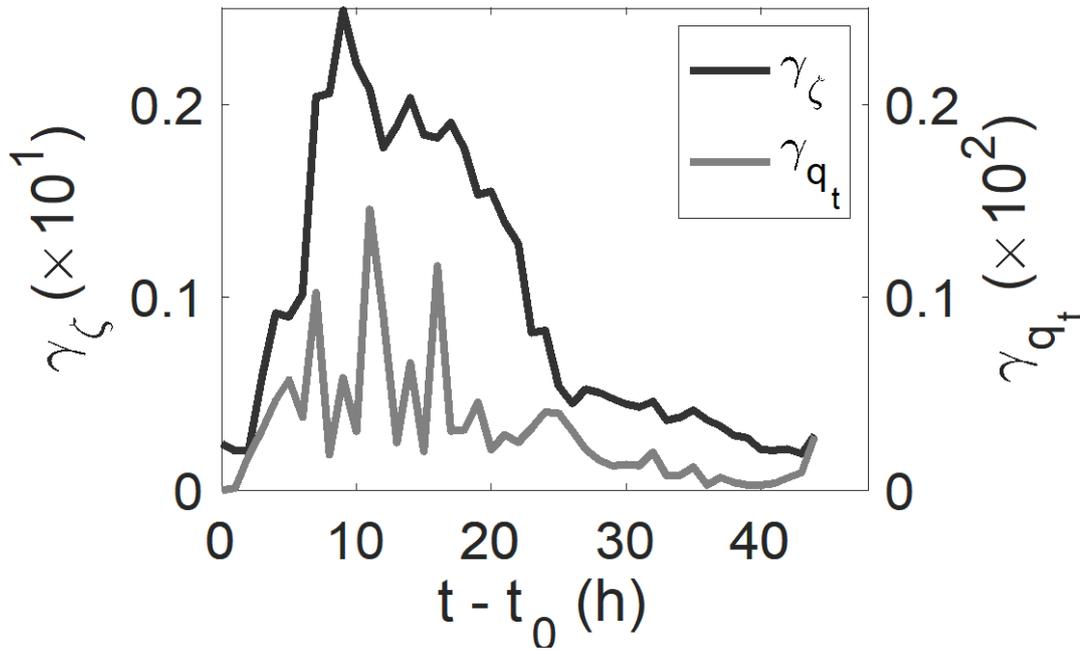


図7：相対渦度の鉛直成分で求めた軸対称度（黒色線）と凝結物混合比で求めた軸対称度（灰色線）の時間変化図。両者ともに、最大風速半径以内、及び、高度 1.0 km から 10 km で平均した値。

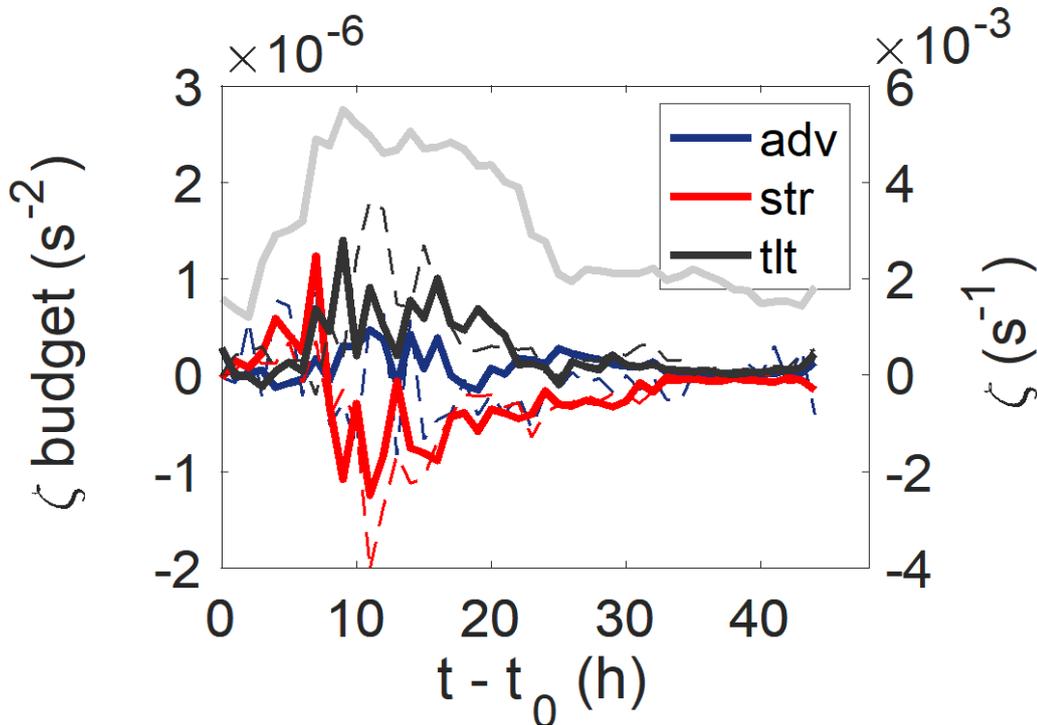


図8：渦度の鉛直成分（灰色線）と収支解析によって求められた各項の時間変化図。青色線は移流項（水平二次元・鉛直成分の合計）、赤色線は伸縮（ストレッチング）項、黒色線は傾斜（ティルティング）項を示す。実線は軸対称成分による項、鎖線は非軸対称成分による項を示す。全ての項は、最大風速半径以内、及び、高度 1.0 km から 10 km で平均した値。

東京湾における高波の要因

High waves generated in Tokyo Bay by Typhoon Faxai (1915)

高野 洋雄*

Nadao KOHNO

This study examined the characteristics of high waves generated by Typhoon Faxai (1915) which led to severe damages in the coast of Yokohama City, especially Kanazawa district and Honmoku piers. The maximum significant wave heights were about 3m, which is large for inland-bay waves, and the wave periods were also large as 7 seconds. Numerical wave simulation was conducted and the results turned out that long swells propagated from the south of Tokyo Bay, which might enhance the damage at the coast of Yokohama. Calculated wave spectrum indicates that wave energy is distributed in wide range, which means multiple waves simultaneously exist. Such wave condition makes sea surface complicated and sudden high wave may occur. Those situations would have led to the damages in the coast of Yokohama, although the conditions are circumstantial.

Keywords : ocean waves, wave spectrum, numerical simulation

2.9.1 はじめに

台風第15号については、房総半島の強風災害に関心が集まり当初あまり着目されなかったが、東京湾で高波が発生し、特に西部の横浜市海岸部で災害が発生した。横浜市金沢区の福浦地区の工業団地や本牧のふ頭の手釣り施設などは、護岸の倒壊や家屋の損壊など大きなダメージを受けた。高波による被害等については、別章で報告されるので、ここではこのような災害をもたらすことになった波浪の要因について報告する。

2.9.2 東京湾の高波概況

台風第15号は、小型であったが記録的な強風を伴い、台風が接近・通過した9月9日未明に、東京湾で高波を生じさせ護岸等の設備に損害がでた。被害のあった横浜市海岸部には波浪の観測地点はなく現地の値はよくわからないが、近くの観測として港湾局の港湾局第二海堡波浪計¹⁾の観測値を表2.9.1に示す。なお、この値は速報値であり、確定後に値が変わる可能性がある。台風の接近に伴い、有義波高最大2.7m(周期7.4秒)が観測されている。波高3m弱という値は、外洋ならともかく東京湾のような内湾では、かなり大きい波高であるといえる。ただし、高波期間の前後数時間に欠測があるため、あくまで参考としての最大値である。

図2.9.1(a)は、2015年～2019年(5年間)における第二海堡波浪計の毎時観測値について、有義波高と周期の

* 気象研究所全球大気海洋研究部 室長

Head, The Fifth Lab., Dept. of Atmosphere, Ocean and Earth System Modeling, Meteorological Research Institute, JMA

散布図をとったものである。ほとんどの波は波高 1m 弱で、今回の波高は、5 年間で最大の値である。周期は、6 秒以下の短い波ものが大多数を占める。周期が 8 秒を超える波も観測されているが、そのほとんどは波高 0.5m 程度と低いもので、逆に波高が 2m 程度になる場合の周期は 6 秒程度のものが多い。このことから、第二海堡で波高が 2m を超え、更に周期が 7 秒と大きい値になることは滅多にないことといえる。因みに、この散布図で次点にあたる波高 2.5m の波は、2017 年の台風第 21 号による高波であり、この時も横浜市港北区の新横浜公園で浸水被害が発生した。

高波の由来を評価するために、波向別の波高分布をとったものが図 2.9.1 (b) である。第二海堡では基本的に全方位からくる波が観測されているが、大きい波高の波は専ら南の波向となっている。これは、東京湾内では吹送距離の制限等によって波が発達しにくいことによる。大きな波は基本的に、南の東京湾開口部（浦賀水道）から入ってくるものであることになる。東京湾では台風前面で東よりの風が卓越するが、この方向の波高を見ると顕著に低いものばかりになっており、高波は南よりの波向を持つことが多いといえる。

表 2.9.1 第二海堡波浪計の観測値（速報値）

日時	有義波		最大波	
	波高	周期	波高	周期
9/9 0 時	0.8	3.9	1.3	4.0
9/9 3 時	2.7	7.4	4.3	8.4
9/9 7 時	1.3	5.2	2.3	6.4

※1,2,4-6 時は欠測

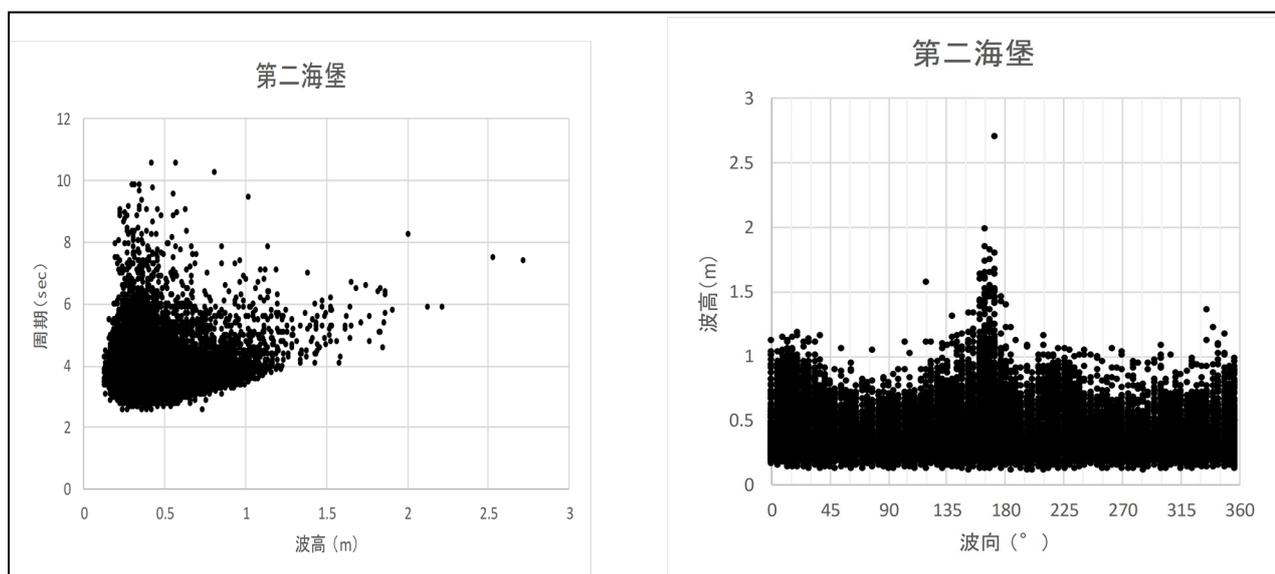


図 2.9.1 近年の第二海堡の観測値特性

2015 年～2019 年における毎時観測値の、(a) 波高/周期の散布図、(b) 波向別の波高観測値の分布
2015-2017 年は確定値、2018, 2019 年は速報値を用いた。

2.9.3 高波の数値計算

東京湾における高波の状況を調べるために、波浪モデルによる推算を行った。気象庁波浪モデル (MRI-III) ²⁾を用い、計算条件は表 1.1.2 に示した通りで、外洋 (055km 格子)、近海 (5km 格子)、東京湾 (400m 格子) の3重の領域で計算した。外力は、気象庁全球モデル (GSM) の風に、台風域内を解析値で補正した風を用いた。初期値は2019年9月7日 00UTC で、外洋計算では波浪解析値を初期値としているが、近海・東京湾の計算は静穏状態から計算を始め、9日 00UTC までの48時間を計算した。今回の台風の接近前は、関東海域では波が低かったため、内湾については静穏状態からスタートしても、高波の時刻までに十分 spin up すると考えている。

表 2.9.2 計算の概要

モデル	気象庁第3世代波浪モデル MRI-III		
領域 解像度	日本近海	15-55N 115-155E	0.5 度
	沿岸	30-38N 126-143E	0.05 度
	東京湾	34.25-35.75N 138.5-140.25E	400m
外力	GSM 海上風+台風解析による傾度風		
初期値	日本近海	全球波浪モデル初期値	
	沿岸・東京湾	静穏スタート	
初期値	9月7日 00UTC		
計算時間	48 時間		

9月9日 16UTC から 21UTC における、毎時の波浪計算結果を図 2.9.2 に示す。台風が南にある 16UTC は、北東風で吹送距離は長くなるがまだ風速はさほど強くないため、波高は 2m 弱とあまり高くない。台風が北上して接近するにつれ、台風の前面の東風が強まり、これに伴う西向きの風浪が発達する。ただし、東西方向の吹送距離は長くないため、風は強くても波高は 2~2.5m 程度である。18UTC 頃から、東京湾は台風前面の南東風が強まり波高 2.5~3m となる。また、少し南の東京湾開口部にあたる浦賀水道付近では、外洋で発達した 5m を超える高波が作られており、この波の一部もうねりとして横浜市の海岸に向かっていているように見える。その後南風となり、東京湾を北に進む波向の波が発達する。台風が通過してからは、南西風に変わり、東京湾中央部から北東の湾奥部に向かう波ができるが、風速は弱くなっており、高波域は限定される。横浜市付近の波は、18UTC 頃が一番高く、東京湾を南東から進んでくる波が卓越している。

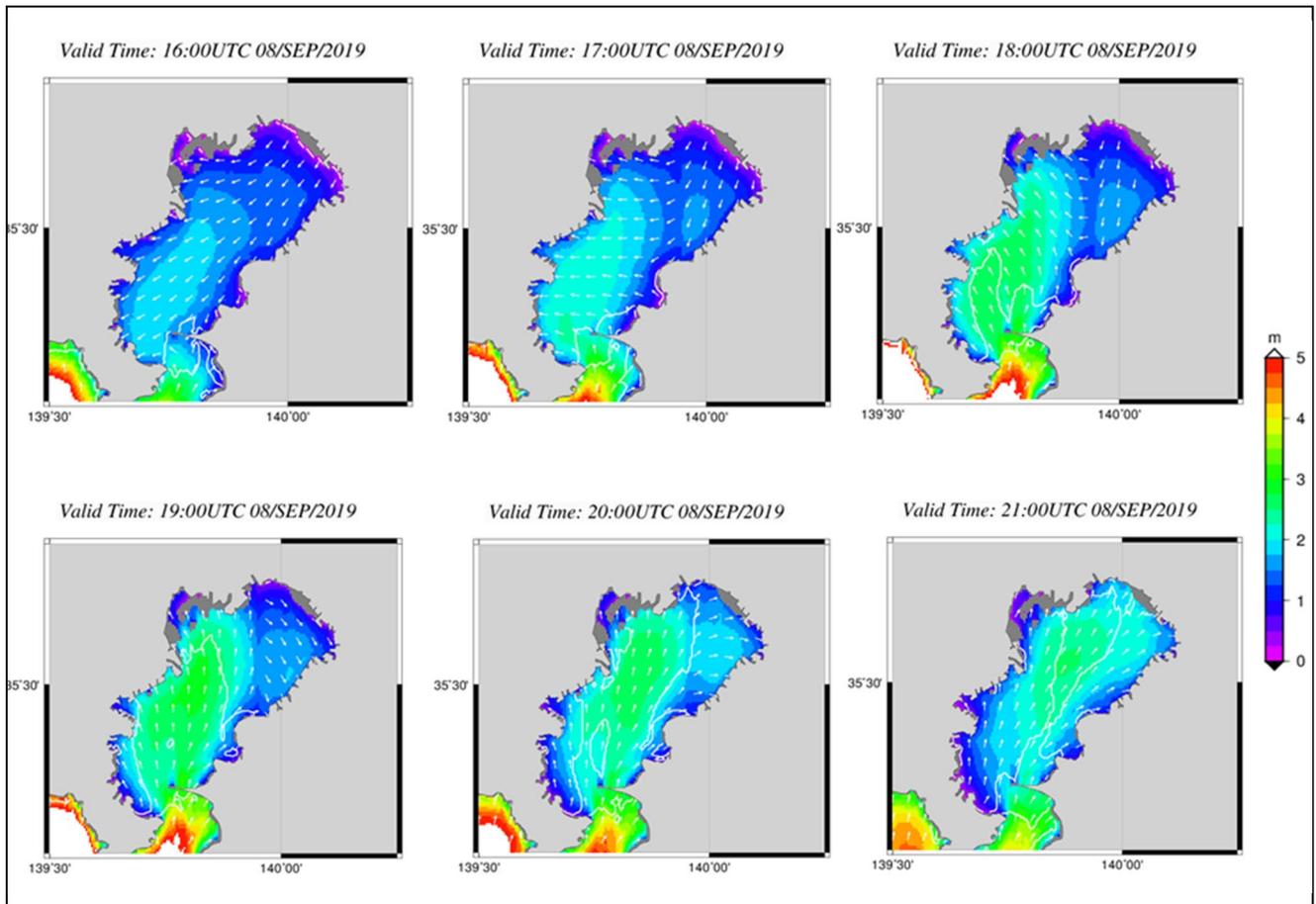


図 2.9.2 計算された波浪状況

図のカラーは有義波高、矢印は卓越波向を示す。

次に、金沢区と本牧における波高と周期の変化についてみる。図 2.9.3 に、金沢区、本牧、及び第二海堡における波高と周期の時系列を示す。比較のため第二海堡の観測値もプロットしてある。第二海堡では、台風接近前の計算波高は若干過大であるが、ピークの値や時系列の傾向は大体一致している。計算された周期は、観測に比べてピーク前の短い周期も表現されないなど変動が小さく全般的に大きめであるが、高波高時の 18UTC には、7.7 秒と観測よりもやや大きいが大体同じ値になっており、概ね妥当な計算結果といえよう。

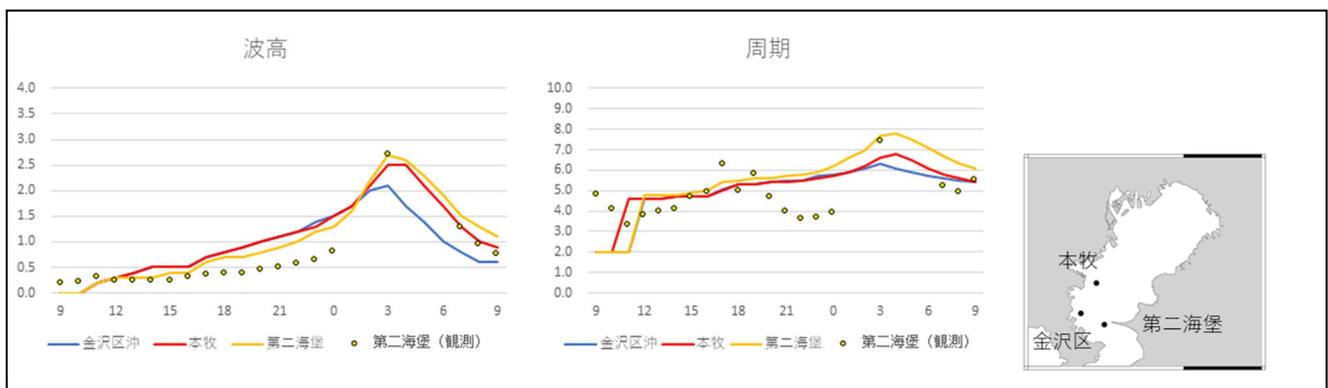


図 2.9.3 地点における波と周期の時系列

計算された最大の波高は、金沢区で2m、本牧で2.5mという値で、この値は、外洋では大きくないが、東京湾では大きめの値である。また周期も、金沢区で6.3秒、本牧で6.8秒と、東京湾としては大きい値が計算されている。通常よりは高波高かつ長周期の波が海岸部に打ち寄せていたことになる。

2.9.4 波浪スペクトルの特徴

波の特性について、波浪スペクトルで詳細に考察する。図 2.9.4 は、金沢区と本牧付近における計算された波浪スペクトルを示したものである。

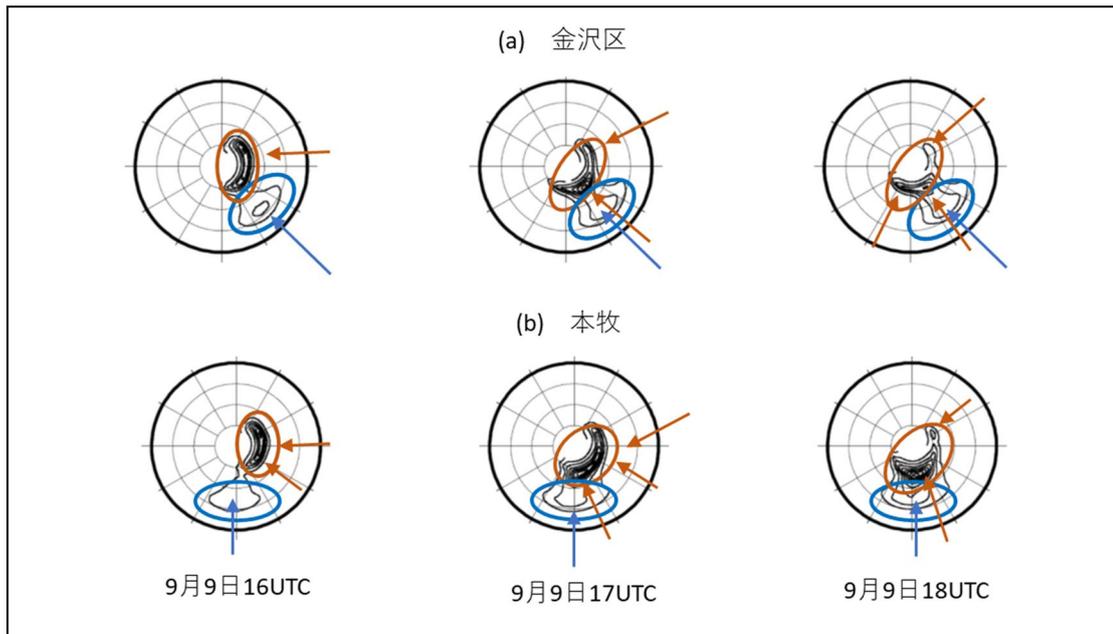


図 2.9.4 金沢区と本牧における波浪スペクトル

等高線は波エネルギー (m^2/s) を表し、来る方向、円は中心から周期 5, 10, 15, 20 秒を示す。

波のスペクトル分布をみると、金沢区、本牧共に中心付近の周期 6 秒程度の部分に大きなエネルギーが分布しており、これが主な波となる。更に、金沢区では南東から、本牧では南から、周期 10 秒を超える長周期のところにもエネルギーが広がっている。この長周期の波は浦賀水道から入ってきたうねりと考えられる。この成分は、エネルギーとしては短い周期の成分に比べて大きくはないが、長周期で波長のかなり長い波である。一般に長周期の波は、海岸構造物に大きな衝撃を与えるほか、越波などが起こりやすくなるため、浸水や堤防の被害につながりやすい³⁾。このような長周期の波が重なっていることで、防波堤等へのダメージが大きくなったものと考えられる。

短い周期の部分について細かく見ると、北東から南西まで幅広くエネルギーが分布しており、連続的ではあるが単一の極大となっていない。風向の変化に応じて波向の違う成分が徐々に作られたことになり、複数の波成分が存在していたことを示している。このように、複数の波が存在すると、重ね合わせなどによって海面が複雑になり、また突然の大波が発生しやすくなる⁴⁾。今回の波浪スペクトルの分布をみると、複数の波が重なっていることが示されるので、潜在的な可能性ではあるが、突発的な大波が発生しやすい状況でもあったといえる。

2.9.4 おわりに

台風第15号による、東京湾の高波の特徴について、主に数値モデルを用いて調査した。台風第15号は、小型でありながら非常に強い風を伴っており、これによって波高2~3m、周期7秒という東京湾としてはかなり大きな波が作られたと考えられる。更に、東京湾の南から周期10秒を越える長周期の波（うねり）も入っていたことが分かった。このような高波高・長周期の波が、横浜市の海岸部に当たったことが災害災害につながった要因と考えられる。

また、横鼻海岸部付近の波浪スペクトルをみると、南からの長周期の波に加え、広い方位にエネルギーが分布しており、複数の波成分が重なり合った状態にあることが分かった。このような複数の波は、その重ね合わせにより海面が複雑になるほか、突発的な高波が発生しやすくなる。有義波高2-3mは東京湾では高い値であるが、このような条件により、突発的に大きな波が発生して災害につながった可能性もある。

参考文献

- 1) 永井紀彦, 1998. ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）の現状と今後の課題, 土木学会論文集, 1998(609), 1-14
(データ : <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)
- 2) Ueno, K. and N. Kohno, 2004. The development of the third generation wave model MRI-III for operational use. *Proc. 8th Int. Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting*, G2, 1-7
- 3) 合田良實, 1982. 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会
- 4) 高野洋雄, 2014. 波浪スペクトルを活用した波浪情報の高度化について, 測候時報, 81, S39-S51.

2019 年台風第 15 号の強風被害分布

Wind-related disasters occurred by Typhoon 1915

友清 衣利子^{*1}, 野田 稔^{*2}, 岩下 久人^{*3}*Eriko TOMOKIYO, Minoru NODA, Hisato IWASHITA*

This study reports that distribution of strong winds and damage due to Typhoon FAXAI. Strong winds were recorded throughout the Kanto region as the typhoon approached. The typhoon had a small strong wind radius. There were about 150 human casualties and more than 75,000 damaged houses in Japan. The damage was particularly severe in the southern Boso Peninsula, Chiba Prefecture.

According to aerial surveys of Uchibo, rooftop damage was severe in densely populated areas. In particular, the roof damage ratio along the coast south of Kyonan Town was very high. However, there were cases where the damage rate was lower in some areas where there were mountains on the windward side. This may be due to the wind reduction effect of the windward mountainous terrain.

The extreme weather changes by Typhoon FAXAI could be observed by approximately 60 POTEKA weather stations around Izu islands, Sagami bay and Tokyo bay. The multiple results of wind direction indicated that the typhoon had certainly passed over Tokyo Bay. In spite of the observation height of 1.5 m above ground surface, the maximum value of peak wind speed of 40.1 m/s was observed at some point in Kimitsu city. The extreme drop of wind speed at some observation point in Chiba city indicated that the typhoon might have landed near this point.

Keywords : *Human casualty, Residential damage, Aerial survey, Wind direction, Wind speed, POTEKA, Extreme weather change*

1 強風観測記録

熊本大学 友清 衣利子

台風 15 号の接近通過に伴い関東地方の各地で強風が吹き、伊豆諸島や千葉県を中心に被害が発生した。図 1.1 に 2019 年 9 月 9 日の日最大瞬間風速の分布図を、表 1.1 に最大瞬間風速が 40m/s を超えた気象官署での風速記録の一覧を示す。最大瞬間風速は、神津島（神津島村）で 58.1m/s、千葉（千葉市中央区）で 57.5m/s、新島（新島村）で 52.0m/s となるなど、複数の地点で観測史上 1 位の値を更新した。図に示す通り、風速 30m/s 以上の最大瞬間風速を記録した観測点は関東地方の狭い地域に分布していた。台風 15 号の特徴として、強風域の半径が小さい“コンパクトな”台風だったことが挙げられる。図 1.2 に示すように強風域は最大でも 350km で、その一生の中で一度も大型（強風域（風速 15m/s 以上）の半径が 500km 以上）になることが無かった¹⁾。

*1 熊本大学大学院先端科学研究部
准教授・博士（工学）

Associate Prof., Faculty of Advanced Science and Technology
Kumamoto University, Dr.Eng.

*2 高知大学理工学部 教授・博士（工学）

Prof, Faculty of Science and Technology,
Kochi University, Dr.Eng.

*3 明星電気株式会社 気象防災事業部
技術部 主査

Assistant Manager, Engineering Department,
Meteorological & Disaster Prevention Systems Division,
Meisei Electric Co.,Ltd.

なお、本報告の一部は、気象研究所の佐藤英一氏から提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

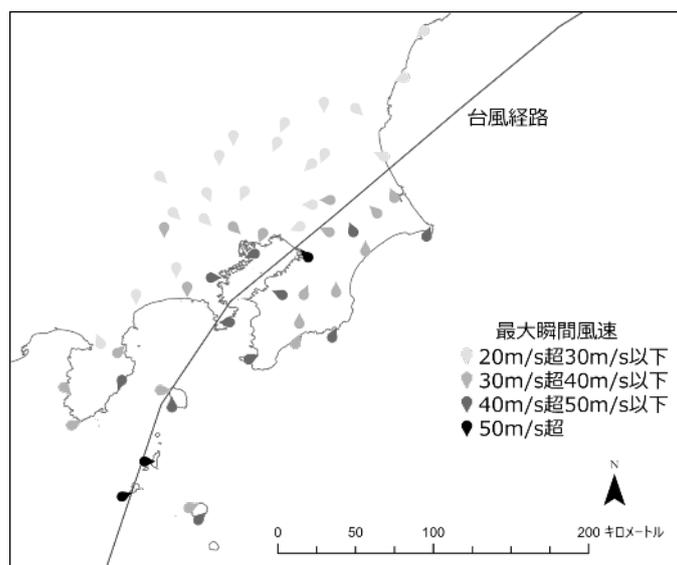


図 1.1 気象官署での最大瞬間風速分布図 (2019/9/8-9)

表 1.1 2019年9月8日および9日の風観測記録 (最大瞬間風速 40m/s 以上の地点)

観測点名	観測日	最大風速 (m/s)	時刻	最大風速 時風向	最大瞬間 風速(m/s)	時刻	最大瞬間風速 時風向
成田	9月9日	28.4	5:30	南南東	45.8	5:40	南南東
銚子	9月9日	25.8	7:10	南東	40.4	7:10	南南西
千葉	9月9日	35.1	4:30	東	57.5	4:30	南東
木更津	9月9日	22.7	2:50	東南東	49	2:50	東南東
勝浦	9月9日	29.3	3:40	南東	40.8	4:30	南南西
館山	9月9日	27.4	2:10	東南東	48.8	2:40	西南西
三浦	9月9日	20.8	1:50	東	41.7	1:40	東
横浜	9月9日	22.6	3:30	東北東	41.8	3:20	西
羽田	9月9日	32.1	3:30	東北東	43.7	3:30	東北東
大島	9月9日	29.7	1:20	東北東	47.1	1:20	南
新島	9月8日	38.7	22:00	西	52	23:40	西
神津島	9月8日	43	21:10	西南西	58.1	21:10	西南西
三宅坪田	9月8日	37.2	21:20	南西	48.4	22:20	南西
稲取	9月8日	27.7	23:20	北北東	48.3	23:20	北北東

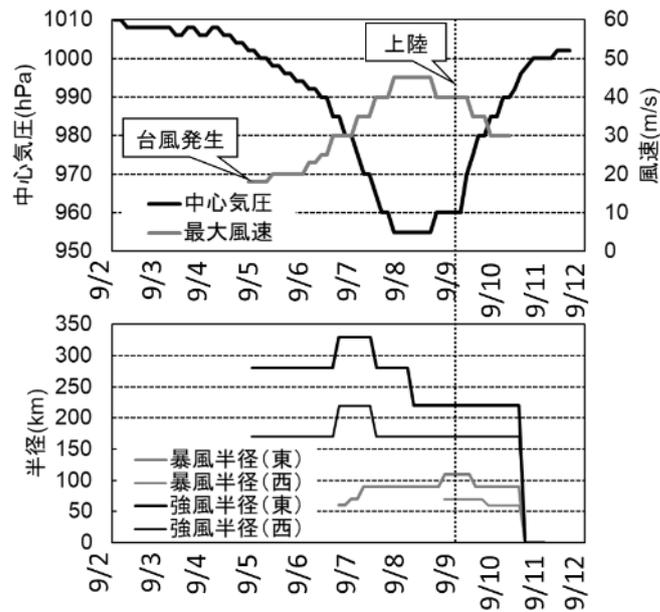


図 1.2 台風 15 号の中心気圧，風速および暴風，強風半径

2 建物および人的被害の概要

熊本大学 友清 衣利子

表 2.1 に台風 15 号に関連した各都道府県における被害件数を示す²⁾。人的被害は合わせて 151 名で，強風にあおられて建物に頭を打った死亡事例が 1 件報告されている。また，表には示していないが，千葉県では災害関連死 2 名が報告されている⁶⁾。住宅被害件数は一部損壊を含めて全国で 76,874 棟が報告されており，千葉県での被害が最も多く 67,278 棟である（2019 年 12 月 23 日時点）。しかし，2020 年 3 月 5 日時点の千葉県の報告⁶⁾によれば，千葉県内では，全壊 404 棟を含み全被害住家数は 74,407 棟を超えていた。

表 2.1 台風 15 号による各都県での人および住宅被害件数²⁾

都県名	人的被害			住宅被害				
	死者	重傷	軽傷	全壊	半壊	一部損壊	床上浸水	床下浸水
福島県				1			5	6
茨城県		1	24	4	84	4,705		1
栃木県			1			3		
埼玉県		1	9			15	1	
千葉県		8	74	363	3,929	62,986	34	57
東京都	1		6	12	68	1,425	13	11
神奈川県		3	10	11	76	2,665	68	32
静岡県			13		47	480		2
合計	1	13	137	391	4,204	72,279	121	109

前述の表に示した 8 つの都県別住宅被害数を図 2.1 に示すが、千葉県での被害数が群を抜いていることが確認できる。以降では、福島県を除く 7 都県の市町村別の被害に着目する。図 2.2 に市町村別の死傷者数を示す³⁻⁹⁾。死亡事例は、東京都世田谷区で発生したが、負傷者数は強風を記録した千葉市や市原市に多い。図 2.3 に被害住宅数を、図 2.4 に住家被害率を示す。ここでの住家被害率とは、一部損壊以上の被害を受けた住家を世帯数で除した値である。被害住宅数に着目すると人口密度の高い千葉市や市原市での被害が多いが、被害率に着目すると房総半島の南西部と東京都の島しょ部での被害が顕著であった。最も住家被害率が高かったのは千葉県鋸南町の 63.9%で、房総半島での被害は南房総市 31.6%、館山市 27.4%と続く。島しょ部では新島村の被害率が 38.7%だった。

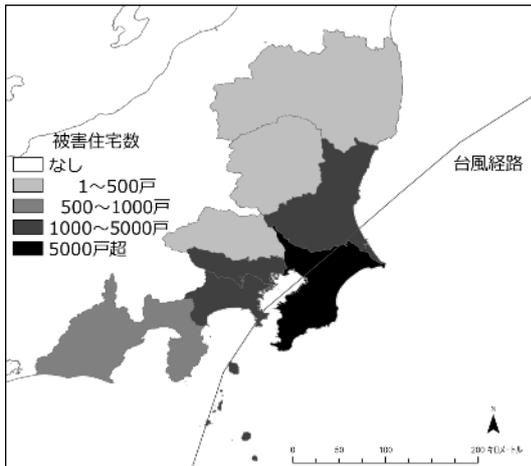


図 2.1 台風 15 号による都県別被害住宅数

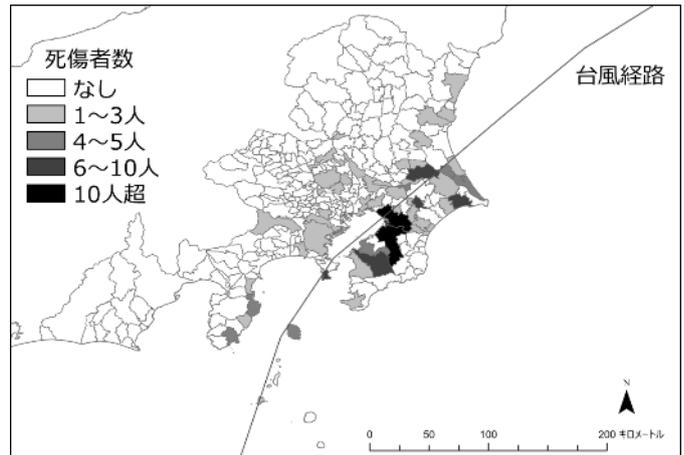


図 2.2 台風 15 号による市町村別死傷者数

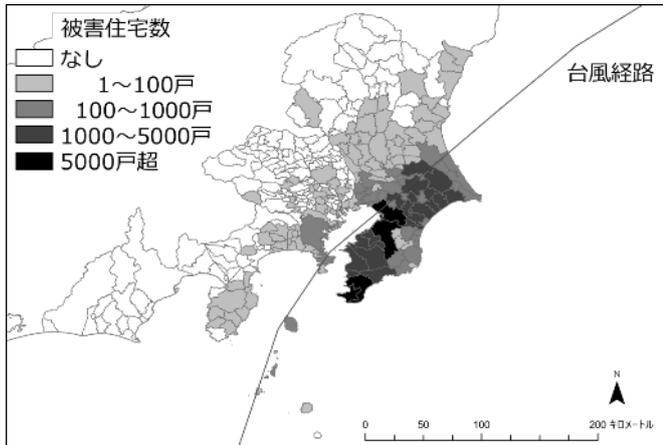


図 2.3 台風 15 号による市町村別被害住宅数

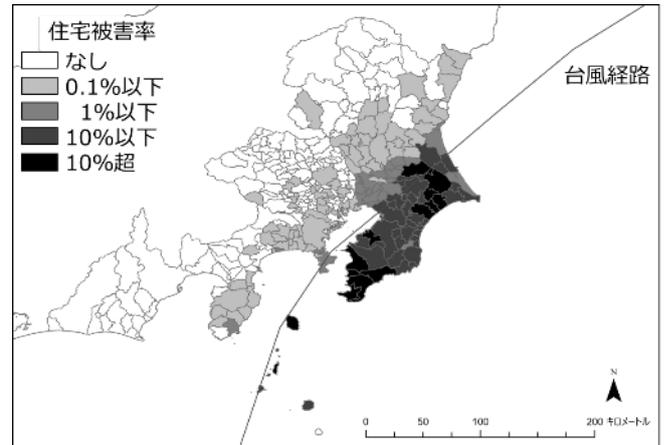


図 2.4 台風 15 号による市町村別住宅被害率

3 房総半島内房沿い被害分布

高知大学 野田 稔

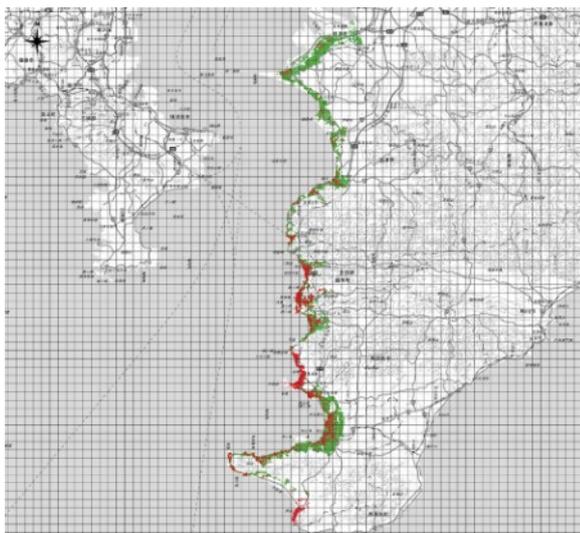
台風 15 号による被害は千葉県において顕著であったことを受け、9 月 19 日にドローンによる被害調査、9 月 21 日にヘリコプターによる航空調査を実施(図 3.1, 写真 3.1)し、君津市以南の内房沿いにおける建物の屋根被害状況を、ブルーシートをマーカーとして目視で抽出した。調査範囲全体における被災建物の分布と 250m メッシュ内の屋根被災建物数を視認建物数で除して求めた被害率の分布を図 3.2(b)に示す。また、各自治体ごとに視認された屋根被害建物数、視認建物数、被害率を表 3.1 に示す。画像から視認できた建物数 55,009 棟のうち、被害を受けていると視認できた建物数は 5,059 棟であり、視認した範囲での平均被災率は 9.2%であった。

内房については、建物が海岸沿いに分布しており、台風との位置関係からも海からの風を直接受けて被害が発生したと考えられる。基本的に住宅が密集している場所ほど被害が多い傾向が認められた。図 3.3 に木更津市南部、君津市、富津市の海岸付近の被害分布状況を示す。このエリアで視認された建物の被害率は、平均 3.3%であり、調査範囲の中では最も被害の軽微な地域である。次に、鋸南町の被害分布状況を図 3.4 に示す。視認建物における被害率は 26.9%と、調査範囲の自治体の中では最も被害率が高かった。被害分布の傾向としては、海岸近くが最も被害率が高く、山際に近づくと被害率が下がっている。その南の、南房総市の被害分布状況を図 3.5 に示すが、この範囲では、南側のエリアと北側のエリアで被害率が大きく異なっており、南側ではほとんどが 50%以上の被害率となっているのに対して、北側のエリアでは、10%前後の被害率にとどまっている。この原因としては、南側と北側のエリアの間に存在する尾根の影響によって北側のエリアの風速が低下したためと考えられる。最後に、館山市の被害分布状況を図 3.6 に示す。ここでも南側のエリアと北側のエリアで被害率に大きな隔たりがあり、南側エリアではほぼ 100%近い被害率になっているのに対して、北側では、ほとんどが 10%未満の被害率である。ここでも、両エリアの間に山が存在し、山による風速低下が北側エリアの被害率を低下させた原因と考えられる。一方の南側エリアでは、被害エリアが山裾に位置しており、地形的に風速が増加した可能性も存在する。これらの特徴は、地形の影響がほとんど認められなかった平成 30 年台風 21 号の大阪府南部における被害分布^{10,11)}とは異なる傾向である。

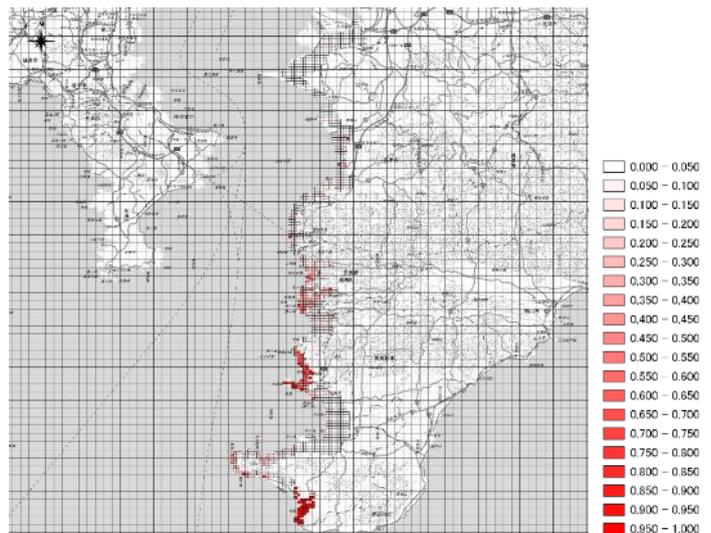
なお、本調査の一部は読売新聞東京本社の協力により実施された。また、航空調査の画像からの被害建物の抽出作業は、高知大学工学部地球環境防災学科 3 年の尾田春雄君、伊藤修一君、山田雛野君、同 2 年の井田直宏君、中村里菜君、松元日向子君の協力を受けて実施した。ここに記し、謝意を表す。



図 3.1 9 月 19 日～21 日に実施した被害調査の GPS ログ 写真 3.1 航空調査に使用したヘリコプターとドローン



(a) 屋根被害建物(赤)と視認建物(緑)

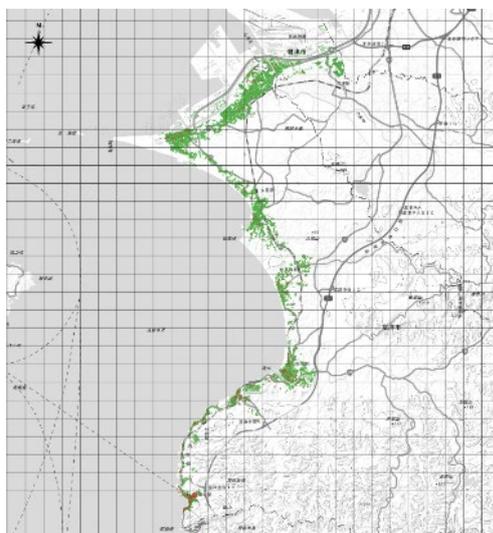


(b) 被害率

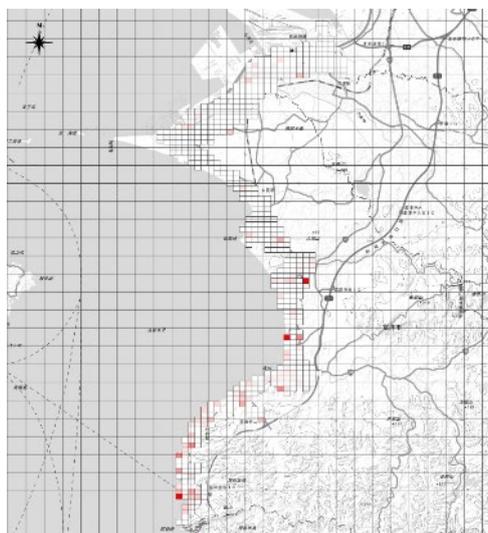
図 3.2 調査範囲全域における屋根被害（ブルーシート）分布と被害率

表 3.1 各自治体ごとの視認屋根被害(ブルーシート)建物数と視認建物数, 被害率

	君津市	富津市	鋸南町	南房総市	館山市	調査範囲全体
視認屋根被害建物 (ブルーシート数) [棟]	45	526	1,450	1,247	1,791	5,059
視認無被害建物数[棟]	1,917	15,551	3,945	4,398	24,139	49,950
視認建物総数[棟]	1,962	16,077	5,395	5,645	25,930	55,009
被害率	2.3%	3.3%	26.9%	22.1%	6.9%	9.2%

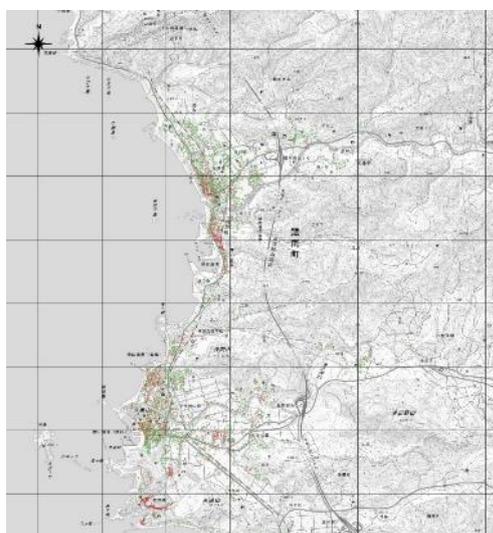


(a) 屋根被害建物(赤)と視認建物(緑)

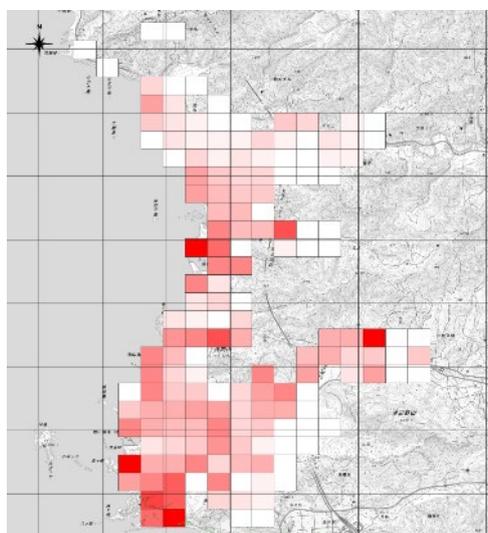


(b) 被害率

図 3.3 木更津市, 君津市, 富津市における屋根被害 (ブルーシート) 分布と被害率

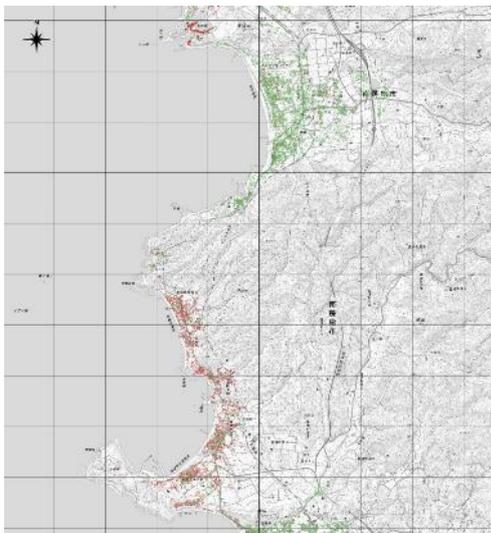


(a) 屋根被害建物(赤)と視認建物(緑)

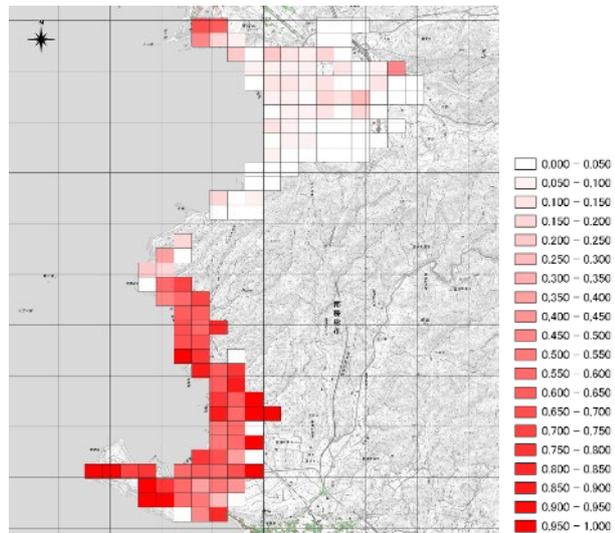


(b) 被害率

図 3.4 鋸南町における屋根被害 (ブルーシート) 分布と被害率

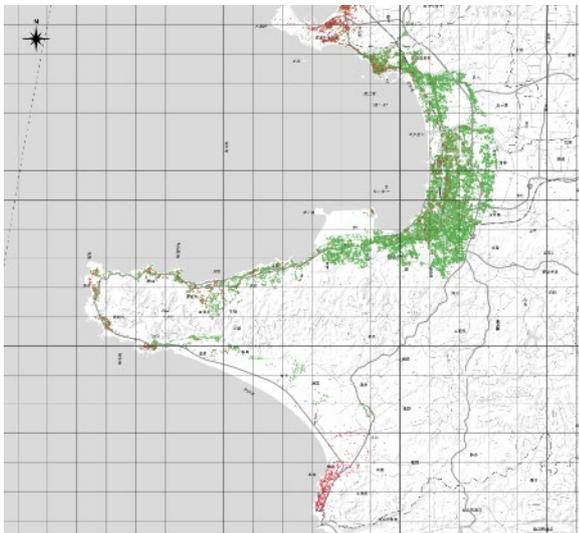


(a) 屋根被害建物(赤)と視認建物(緑)

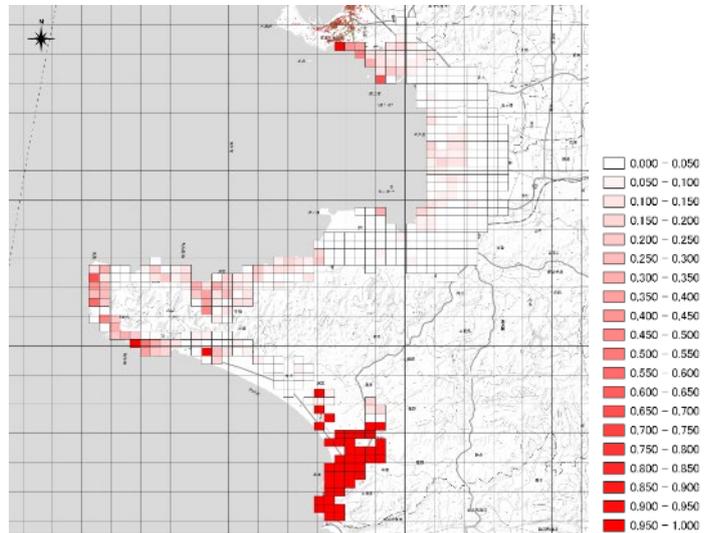


(b) 被害率

図 3.5 南房総市における屋根被害（ブルーシート）分布と被害率



(a) 屋根被害建物(赤)と視認建物(緑)



(b) 被害率

図 3.6 館山市における屋根被害（ブルーシート）分布と被害率

4 伊豆諸島，相模湾，東京湾周辺 POTEKA の風向・風速観測結果

明星電気 岩下 久人

4.1 はじめに

2019年9月8～9日，台風15号(FAXAI)が伊豆諸島，相模湾，東京湾を通過した当時，その周辺地域においては，計60台（伊豆諸島：2台，伊豆半島：1台，神奈川県東部：13台，千葉県南部：8台，東京都23区：15台，千葉県北西部：21台）のPOTEKAによる地上稠密気象観測が行われていた。伊豆諸島，相模湾，東京湾周辺地域のPOTEKA設置状況を図4.1に示す。丸印がPOTEKAで，矢印は気象庁が事後解析後に発表した台風15号の進路である。

POTEKA気象観測装置は，気温，気圧，湿度，風(風向・風速)，降水量，感雨，日射の7つの要素を観測可能であるが，台風通過時においては，特に気圧や風が重要であると考えられる。気圧については，気象分野の2.6項においてご報告を頂いているため，本稿では風に関する報告に絞る。また，POTEKA各観測点の詳細データについては，それぞれの被害調査に応じ個別にご利用を頂いているため，本稿では気象的観点からの一般的な風向観測結

果と地上稠密気象観測が故に捉えることができたと考えられる特徴的な風速観測結果を報告する。

なお、図 4.2 に POTEKA 観測装置の外観図を示すが、POTEKA の風向・風速計に関しては、その性能上、設置面から 1.5m の高さで観測を行っており、10m の高さでの観測を標準とする気象庁アメダスの風速値に対して、POTEKA はおおよそ 1/2 程度の値に抑えられる特性を持つ。

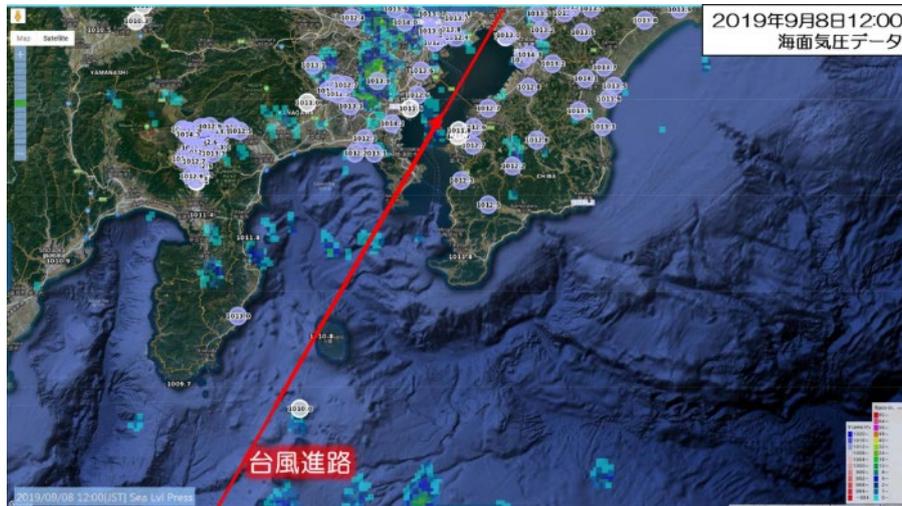


図 4.1 伊豆諸島，相模湾，東京湾周辺 POTEKA 設置状況

Fig. 4.1 POTEKA installation situation around Izu islands, Sagami bay and Tokyo Bay

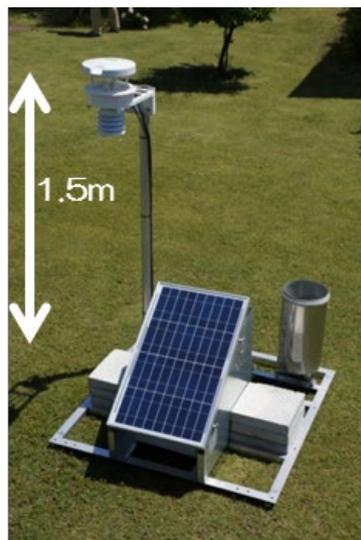


図 4.2 POTEKA 気象観測装置外観図

Fig. 4.2 POTEKA observation equipment external view

4.2 POTEKA 地上稠密気象観測による風の観測結果概要

伊豆諸島，相模湾，東京湾周辺では、2019年9月8日12時時点では、全般的に平均で2~5m/s程度で静穏であった。しかし、台風中心が近づくにつれて徐々に風速が上昇し、台風中心が通過した伊豆諸島や千葉県北西部、台風進行右側の危険半円に入った千葉県南部の観測点では、平均風速で15m/s以上、最大瞬間風速で30m/s以上のピーク値が軒並み観測された。特に、利島村の観測点では39.6m/s(8日22:58)、君津市のある観測点では40.1m/s(9日4:31)の最大瞬間風速が、地表からの観測高さ1.5mであるにも拘わらず観測された。台風通過後は徐々に風速は低下し、9日12時時点では全般的に2~5m/s程度に落ち着き、静穏を取り戻した。

4.3 風向の観測結果

図 4.3 は 9 日 3:00 時点における POTEKA の平均風速・風向観測値及び気象庁のレーダエコーである。①の観測点は台風進路の東側に、②の観測点は台風進路の西側に入ったと推測される。平均風向・風速変化の推移について図 4.4 に示す。

台風中心の接近前は、2 観測点共に東風成分が主体であったが、台風中心の接近に伴い①では南風に転向し、一方で②では北風に転向した。その後、台風中心が北北東に去ると 2 観測点共に西風成分が主体に変化した。

この 2 地点以外にも、進路の東側と西側ではそれぞれ同様の風向観測結果が得られており、これらの地上稠密気象観測データは台風中心周囲の反時計回りの地上風の流れを捉えていたものと考えられる。気象庁発表の進路の通りで、台風中心は東京湾を通過し、特に被害が大きかった房総半島を危険半円側に巻き込んだことは間違いない。

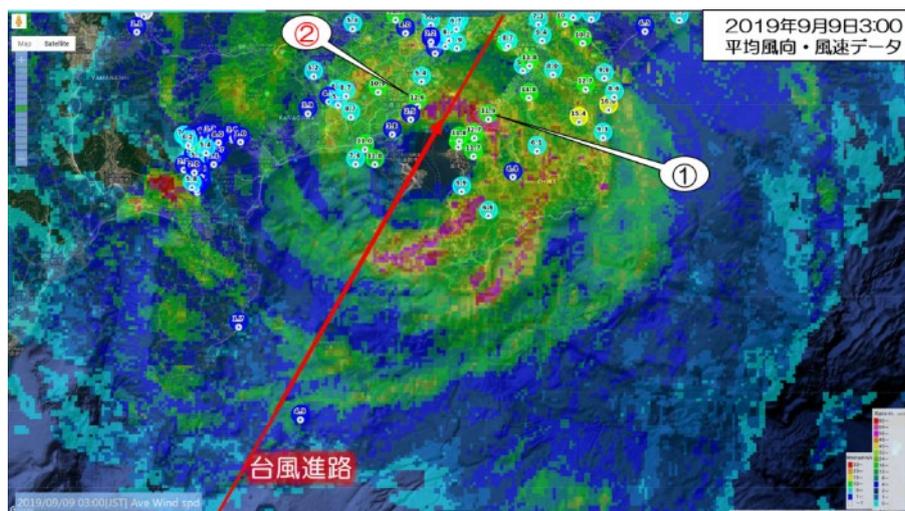


図 4.3 9日3:00の平均風向・風速観測値と①、②の観測点位置

Fig. 4.3 Average wind direction/speed observation values at 9:00 on 9th and the position of ①, ②

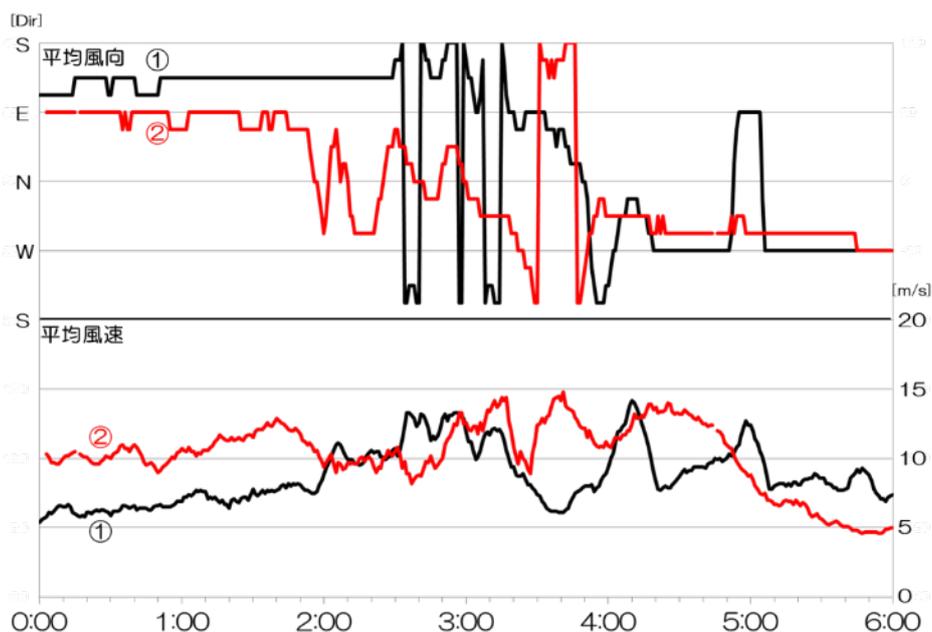


図 4.4 観測点①、②での平均風向・風速の推移

Fig. 4.4 Transition of average wind direction/speed at ①, ②

4.4 風速の観測結果

図 4.5 は、図 4.3 と同じく 9 日 3:00 時点における POTEKA の平均風速・風向観測値及び気象庁のレーダエコーである。表 4.1 には、台風進路右側の危険半円側に入った 3 観測点③沿岸部(君津市), ④市街地(木更津市), ⑤郊外部(市原市)の平均風速と最大瞬間風速の最大値を示す。また、③, ④, ⑤の平均風速及び最大瞬間風速の変化推移を図 4.6 に示す。

台風中心から最も近く、沿岸部のために建造物等による摩擦の影響が少なかったと思われる③の観測点の風速が最も高く、観測高さ 1.5m であるにも拘わらず平均風速及び最大瞬間風速の最大値はそれぞれ 24.7m/s, 40.1m/s であった。仮に気象庁アメダスの標準観測高さである 10m で観測されていれば、平均で 40m/s や最大風速で 60m/s 以上の風速が吹いていた可能性もある。市街地と郊外部を比較すると、建造物等の摩擦の影響が少ないと思われる郊外部の方が、台風中心により近かった市街地よりも風速のやや高い傾向が見られた。

また、表 4.2 は、台風が上陸したとされる千葉市のある観測点⑥の平均風速及び最大瞬間風速の最大値を示している。図 4.7 にはこの⑥の平均風速及び最大瞬間風速の変化推移を示すが、当該地点では台風通過最中において全観測点の中で最も低い風速値(平均風速で 1.4m/s, 最大瞬間風速で 1.7m/s)が一時的に観測された。この⑥地点は、気象庁発表の台風進路よりも 5 km ほど東に離れている。当該観測データのみでは断定はできないが、台風中心はこの⑥地点の近傍を通過していた可能性も考えられる。

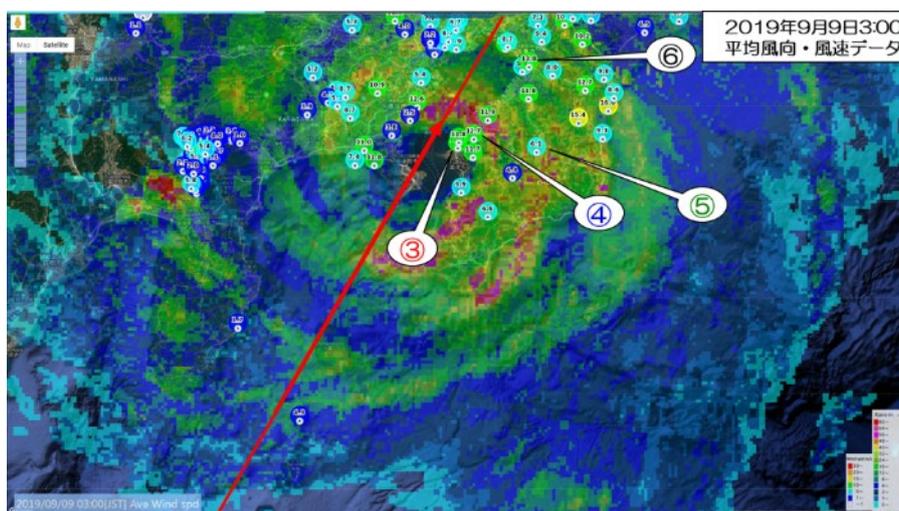


図 4.5 9 日 3:00 の平均風向・風速観測値と③～⑥の観測点位置

Fig. 4.5 Average wind direction/speed observation values at 9:00 on 9th and the position of ③～⑥

表 4.1 ③～⑤の平均・最大瞬間風速の最大値

Table 4.1 The maximum values of average/peak wind of ③～⑤

観測点	平均風速最大値	最大瞬間風速最大値
③	24.7 m/s	40.1 m/s
④	16.7 m/s	25.9 m/s
⑤	15.6 m/s	30.7 m/s

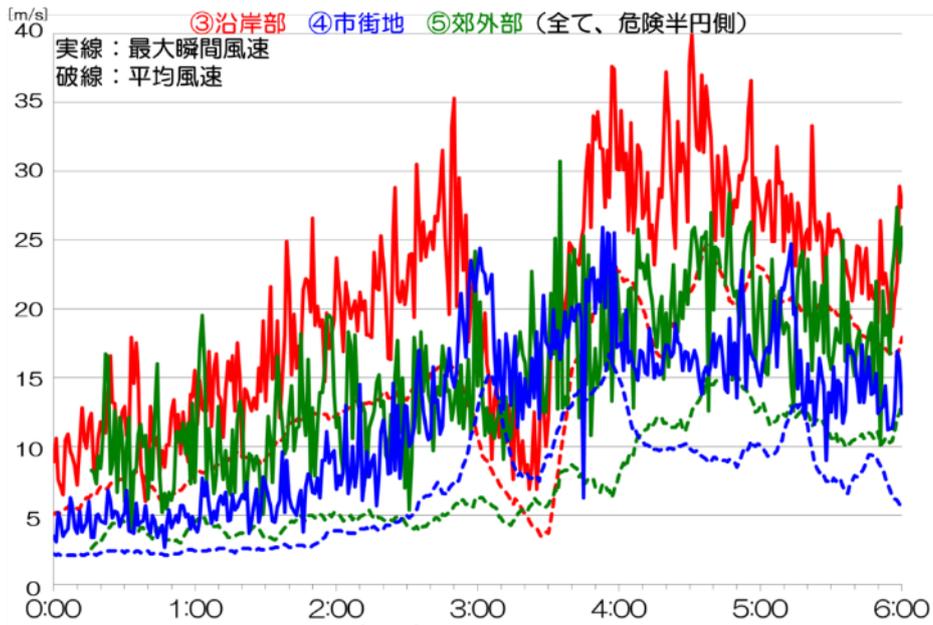


図 4.6 観測点③～⑤での平均・最大瞬間風速の推移

Fig. 4.6 Transition of average/peak wind speed at ③～⑤

表 4.2 ⑥の平均・最大瞬間風速の最大値

Table 4.2 The maximum values of average/peak wind of ⑥

観測点	平均風速最大値	最大瞬間風速最大値
⑥	10.9 m/s	26.4 m/s

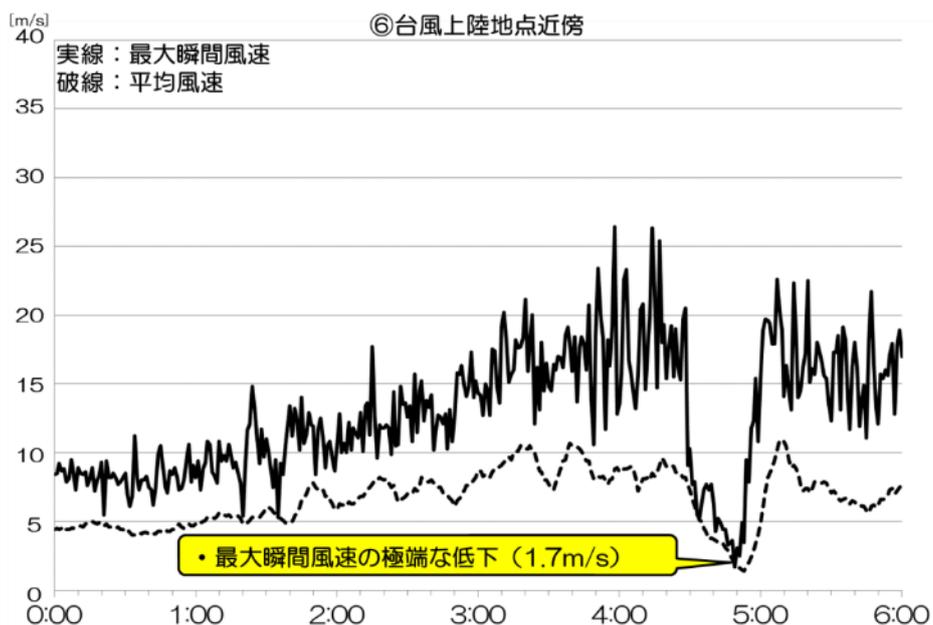


図 4.7 観測点⑥での平均・最大瞬間風速の推移

Fig. 4.7 Transition of average/peak wind speed at ⑥

4.5 まとめ

伊豆諸島、相模湾、東京湾周辺での POTEKA による地上稠密気象観測は、2019 年 9 月 8～9 日にその周辺を通過し、房総半島に特に大きな被害を与え、千葉市に上陸した台風 15 号(FAXAI)による激しい気象変化の詳細を捉えていた。風向については、台風中心の周囲を取り巻く反時計回りの風が的確に観測されていた。風速は、台風進路右側の危険半円側に入り、建造物等による摩擦の影響が少なかったと思われる君津市の沿岸部で、地表からの観測高さ 1.5m であるにも拘わらず、平均風速で最大 24.7m/s、最大瞬間風速では最大 40.1m/s を記録した観測点が存在した。また、台風が上陸したとされる千葉市のある観測点では、台風通過最中において全観測点の中で最も低い平均風速 1.4m/s、最大瞬間風速 1.7m/s が一時的に観測された。

参考文献

- 1) 日本風工学会風災害研究会, 【速報】台風 1915 号 (FAXAI) がもたらした強風災害について, 日本風工学会誌, 第 45 巻第 1 号, pp.369-378, 2020.1.
- 2) 消防庁災害対策室, 令和元年台風第 15 号による被害及び消防機関等の対応状況 (第 40 報), 2019.12.23.
- 3) 茨城県防災・危機管理課, 令和元年台風第 15 号 県内市町村の被害状況, 2019.11.28.
- 4) 栃木県県民生活部危機管理課, 令和元 (2019) 年 9 月 9 日台風 15 号による被害について (第 2 報・最終報), 2019.9.9.
- 5) 埼玉県危機管理防災部消防防災課災害対策担当, 台風 15 号による被害状況について (第 4 報), 2019.9.9.
- 6) 千葉県防災危機管理部, 令和元年台風 15 号 (第 117 報) 及び台風 19 号 (第 60 報) について, 2020.3.5.
- 7) 東京都総務局, 令和元年台風第 15 号にかかる対応について, 2019.10.11.
- 8) 神奈川県くらし安全防災局防災部災害対策課, 令和元年台風第 15 号による県内被害状況 (第 9 報), 2019.9.26.
- 9) 静岡県危機報道官, 台風第 15 号による被害状況について 【第 4 報・最終報】, 2019.9.10.
- 10) 野田 稔, 友清衣利子, 竹内 崇, 大阪府南部・和歌山県北部における T1821 号による強風被害の航空調査, 日本風工学会 2019 年度年次研究発表会梗概集, 日本風工学会誌, Vol.44 No.2, pp.105-106, 2019.
- 11) 野田 稔, 友清衣利子, 竹内 崇, 航空調査で明らかになった T1821 号による大阪府南部の住宅被害分布, 2019 年度日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.155-156, 2019.
- 12) 金容徹, 岩下久人, 野田博, 野田稔, 松井正宏, 観測及び工作物の被害による風速推定, 「平成 30 年台風 21 号による強風・高潮災害の総合研究」, 平成 30 年度科学研究費・特別促進費研究成果報告書, 2-87-112, 2019

2019 年台風第 15 号による太陽光発電施設の強風被害

Wind-induced damage to structure of photovoltaic system due to Typhoon 1915

高森 浩治*¹*Koji TAKAMORI*

During Typhoon 1915, some structures of photovoltaic (PV) system were damaged due to high winds. Most of the causes of damage were inadequate structural design and poor construction. However, it was considered that hidden causes were lack of technical and construction management data of PV structures until recently. It was also considered that there were no review systems to confirm structural safety.

Keywords: *photovoltaic system, wind damage, design code*

1 はじめに

再生可能エネルギー固定価格買取制度（FIT）の導入によって急増した太陽光発電設備（PV 設備）は、2018 年には累積導入量が 50GW に達したが、導入量の増加に伴って強風、積雪、豪雨などの自然事象による PV 設備の被害も増加傾向にある。特に強風による被害は台風上陸のたびに発生しており、それらの情報は SNS 等によって Web 上に公開されるため、PV 発電設備の構造安全性が疑問視する声も上がっている。被害原因の多くは構造設計の不備や施工不良であるが、その背景としては、PV 設備の構造設計や施工管理に関する技術資料が近年まで整備されていなかったこと、中・小規模の PV 設備において第三者による構造安全性の確認が行われる制度が整備されていないことが考えられる。その一方で、PV 発電所の建設は、新たな設置場所として傾斜地や農地、さらには溜池やダム湖などの水上にも展開している。このような設置環境にある PV 設備においては、構造設計に関する知見が少ないだけでなく、これまでの地上設置型 PV 設備に比べて設計や施工の難易度が高くなっていると考えられる。そのためか、傾斜地、農地、水上に設置された PV 設備の被害も徐々に見受けられるようになっている。

2 2019 年台風第 15 号による太陽光発電施設の強風被害の特徴

図 1 は、台風 15 号の強風によって被害を受けた千葉県市原市の水上設置型 PV 設備である。被害場所から近いアメダス牛久測定局（観測高さ 9.4m）および千葉特別地域気象観測所（観測高さ 47.9m）の記録によれば、被害当日の最大風速は 16.0m/s（S）および 35.1m/s（SE）であった。これらの風速を被害場所と気象観測所の地表面粗度区分の違い（ⅢとⅡ）を考慮して JIS C 8955¹での基準風速 V_0 と同じ地表面粗度区分Ⅱの高さ 10m に換算すると、それぞれ 20.7m/s および 27.7m/s となる。被害場所である市原市の基準風速 V_0 は 38m/s であるから、被害当時の風速は設計風速を下回っていた蓋然性が高い。

被害を受けた水上設置型の PV 設備は、樹脂製のフロートに PV モジュールが取り付けられており、フロート間を連結することでアイランドと呼ばれるフロート群が形成されている。アイランドの係留には、水面下の地盤に打ち込まれたアースアンカーが用いられており、アイランドの外周フロートにおいて係留ワイヤーを介してアースアンカーに接続されている。なお、係留ワイヤーは水位の上昇に対応できるように長さに余裕を持たせている。そのため、強風が吹くとアイランド全体が風下側へと移動する。この被害ではアイランドが風下側に移動し、風上側の係留ワイヤーが張りきった状態となった後、風上側（南側）のアースアンカーの抜けやフロート間の接合部が破断したものと推測される。風上側のアースアンカーが抜けなかった箇所では、荷重負担が大きい（風下側フロートの荷重も負担する）アイランドの風上側端部付近のフロート間の接合部で破断しており、風上側のフロートはほぼ元の位置に残されていた（図 1 (a)）。一方、切断された風下側アイランドは、風下側へと押し流され、風上のフロートが捲れ上がるとともにアイランドの中央から風下側の部分ではロール状に積み重なって盛り上がっていた（図 1 (b), (c)）。その際、電路の一部が損傷し、夜明けとともに日射を受けて発電し始めると、電路の損傷部が発熱してフロートが発火したものと推測される（図 1 (d)）。発火場所は幸いにも岸から比較的近い位置であったため、消防車による消火が可能であった。



(a) 分断されたアイランド



(b) 捲れ上がった風上側のフロート



(c) 分断後の風下側のアイランドの様子



(d) 火災後の様子（フロートが燃え種となった）

図 1 水上 PV 設備の被害（千葉県市原市）

*1 構造耐力評価機構 理事・博士（工学）

Director, Structural Performance Evaluation Institute, Dr. Eng.

図2は、千葉県某所の農地上に設置されたPV設備（営農型PV設備）の被害である。当該発電設備の支持物は、アルミ製架台と杭基礎で構成されている。被害状況としては、風上側に位置する架台の崩壊およびPVモジュールの部分的な飛散であった。架台が崩壊した原因は、部材間接合部の脱落および柱部材の折損である。アルミ製の架台の接合部にはTスロット（T型溝）とスロットナットによる接合が広く用いられているが、溝方向に力が作用する接合となっている場合には、接合部が抜ける（あるいはズレる）ことがある²⁾（図2（a））。また、アルミ部材は熱処理によって強度を上げることができるが、その反面靱性が低下するので、部材が折損するなどの脆性的な破壊が生じる事例もある³⁾（図2（b））。

他方、PVモジュールの飛散原因は、架台の変形に伴うモジュール押え金具からのPVモジュール抜け出しであると推測される（図2（c））。下部に農作業を行うための空間を必要とする営農型PV設備の架台は、梁（横架材）までの高さがあり、柱スパンが大きいいため、架台全体の剛性の確保が難しく、強風時の変形が大きくなりやすい。そのため、PVモジュールを押え金具で固定する工法では、架台の変形に伴ってPVモジュールが外れやすい状態にあったと考えられる（図2（d））。



(a) 崩壊した架台



(b) Tスロット接合部の抜け



(c) 折損した柱部材



(d) PVモジュールが脱落・飛散した状態



(e) PVモジュール飛散後のモジュール押え金具の状態

図2 営農型PV設備の被害（千葉県某所）

謝辞：本調査資料は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託研究「太陽光発電システム長期安定電源化基盤技術開発プロジェクト」の一環として実施された調査から提供を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本規格協会, JIS C 8955:2017 太陽電池アレイ用支持物の設計用荷重算出方法, 2017
- 2) NEDO, 奥地建産, 太陽光発電協会, 地上設置型太陽光発電システムの設計ガイドライン (2019 年版) 技術資料 D, 2019
- 3) 高森浩治, 伊藤隼人, 強風被害にみる太陽電池発電設備の構造的弱点, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 構造- I, pp.213-214, 2019

2019 年台風第 15 号による電力送配電施設などの強風被害

Wind Disasters of Transmission and Distribution Facilities
Caused by Typhoon Faxai (2019)野田 稔*¹, 木村 吉郎*², 中藤 誠二*³*Minoru NODA, Kichihiro KIMURA, Saburo KEIKAKU*

The typhoon FAXAI caused enormous damage to power transmission and distribution facilities, including the collapse of two transmission towers and the collapse of nearly 2,000 distribution poles, and a long-term power outage over a wide area, mainly in Chiba Prefecture. In this section, in order to clarify the actual situation of the damage, field surveys, numerical analysis, and data surveys were conducted for the transmission tower damage, the process of transmission tower damage occurrence, and the damage to distribution equipment. In conclusion, it is considered that the transmission tower was able to withstand the static wind load corresponding to the average wind speed of 40 m / s according to the design standard, and the distribution equipment was hardly damaged by fallen trees or flying objects, and could not withstand the wind load. It can be said that there were almost no cases of breakage and collapse. Therefore, the direct causes of a series of transmission and distribution damages are: 1) the expected strong wind blowing over a wide area for a long time; 2) the speed increase effect due to the surrounding terrain near the transmission tower; It is concluded that the impact of fallen trees and flying debris on the equipment occurred at the same time.

Keywords: *transmission tower collapse, terrain effect, computational fluid analysis, structural analysis, flying debris*

1 送電鉄塔の被害概要

T1915 号の通過時の 2019 年 9 月 9 日の 2 時 55 分に、千葉県君津市長石の鉄塔 2 基が倒壊する事故が発生した。倒壊した鉄塔は、いずれも 1972 年に建設されたもので、66kV の木内線の No.78 と No.79 である。なお、隣接する No.80 鉄塔の部材の一部には部材変形が生じた。これらと、No.77 鉄塔、ならびに送電線等の概要を表 1.1 に示す。電力線の総数は単導体が 18 本で、加えて 2 本の地線が架けられている。周辺の地形と合わせて倒壊した送電鉄塔の位置を図 1.1 に示す。いずれの鉄塔も、北北西に向かって倒壊した。なお、この事故により、内房線系統および小糸川線、木内線系統の通電が停止し、約 11 万軒の停電が発生した。また、内房線系統は 2019 年 9 月 9 日 22 時 38 分に、小糸川線、木内線系統は 2019 年 9 月 10 日 16 時 17 分に、仮復旧している。

2019 年 9 月 20 日に、東京電力パワーグリッド株式会社のご厚意により、現地を調査した。図 1.2 は No.78 鉄塔の

*1 高知大学理工学部 教授・博士(工学)

Prof., Faculty of Science and Technology, Kochi University, Dr.Eng.

*2 東京理科大学理工学部土木工学科 教授・Ph.D

Prof., Dept. of Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science, Ph.D.

*3 関東学院大学理工学部 教授・博士(工学)

Prof., College of Science and Engineering, Kanto-gakuin University, Dr.Eng.

調査当日の状況である。撤去に備えての仮支持構造物の準備を行っていた。図 1.3 は、No.78 鉄塔の 4 基の基礎の状況である。結果的に大きく損傷しているものの、部材の抜け出しや基礎の浮き上がりは見られなかった。図 1.4 に、

表 1.1 鉄塔の概要（中間報告書¹⁾の情報をもとに作成）

鉄塔番号	吊型	建設年	鉄塔重量 (t)	鉄塔高さ (m)	標高 (m)	水平角度 方向 度 分	径間長 (m)	電力線	架空地線
77	耐張	1995	146.5	77.7	163.2	R 46 6	159 357 260	(木内線) TACSR610mm ² 1 条×3 相 2 回線	AC 70mm ² 2 条
78	耐張	1972	21.0	45.0	163.5	L 10 25		(小糸川線 併架) ACSR610mm ² 1 条×3 相 2 回線	
79	耐張	1972	38.0	57.0	154.4	L 36 42		(内房線 併架) ACSR610mm ² 1 条×3 相 2 回線	
80	耐張	1972	27.5	57.0	165.6	L 17 52			

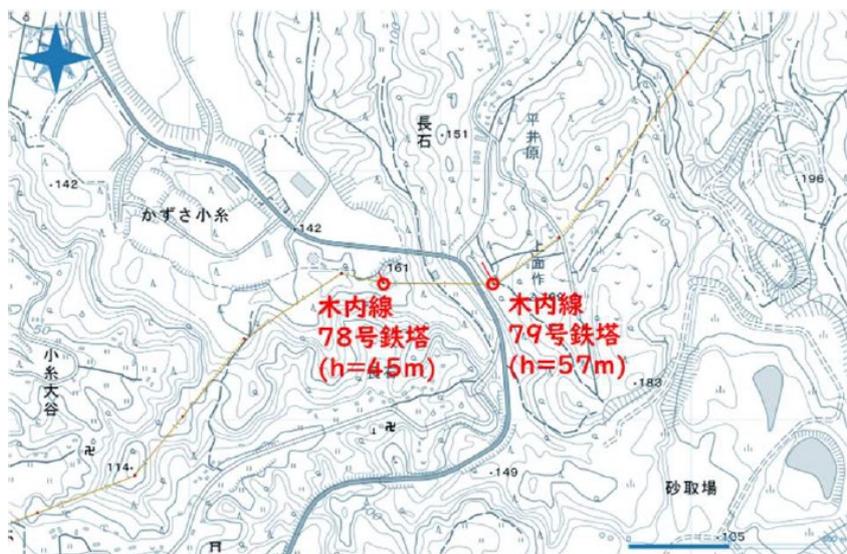


図 1.1 倒壊した送電鉄塔と周辺の地形²⁾

No.78 鉄塔の被害状況を示す。図 1.5 は、No.78 鉄塔そばにある、かずさ 4 号公園内展望台から No.79 鉄塔を含む方向を望んだものである。中央のケーブルは、展望台にひっかかった 2 本の架空地線である。

図 1.6 に、No.79 鉄塔の 4 基の基礎の状況を示す。No.78 鉄塔の基礎と同様に、部材の抜け出しや基礎の浮き上がりは見られなかった。図 1.7 に、No.79 鉄塔の被害状況を示す。No.79 鉄塔の圧縮側の 2 本の支柱は、いずれも明確に破断しており、その状況を図 1.8 および図 1.9 に示す。

倒壊した鉄塔の周辺の林地には、局所的に多数の針葉樹の幹折れ被害がみられ、風速が高かったことが推察された (図 1.10, 1.11)。なお、根から倒れる倒木ではなく、地上から数 m 程度の幹が折れている被害が大多数であったことが特徴的で、こうした被害が起きたのは、溝腐病による幹の腐朽が原因となっている可能性がある²⁾。



図 1.2 No.78 鉄塔の状況



図 1.3 No.78 鉄塔の 4 基の基礎の状況



図 1.4 No.78 鉄塔の状況



図 1.5 かずさ 4 号公園内展望台から No.79 鉄塔を含む方向を望む



図 1.6 No.79 鉄塔の 4 基の基礎の状況



図 1.7 No.78 鉄塔の状況



図 1.8 No.79 鉄塔の破断した主柱の両側（1）



図 1.9 No.79 鉄塔の破断した主柱の両側（2）



図 1.10 No.78 鉄塔近くの幹折れの状況



図 1.11 No.79 鉄塔近くの幹折れの状況

2 台風 15 号による送電鉄塔倒壊被害に関する検討

2.1 はじめに

台風 15 号通過時に千葉県君津市長石(図 2.1)で発生した東京電力木内線送電鉄塔倒壊被害では、三相電力 6 回線分の合計 18 本の送電線と地線 2 本を支持する高さ 45m の 78 号鉄塔と高さ 57m の 79 号鉄塔の 2 基が図 2.2 に示すように北北西側に倒壊した。9 月 20 に実施した現地調査では、ドローンを使って鉄塔の基本構造および破損状況の記録を行った。また、9 月 21 日に実施した航空調査によって、送電鉄塔倒壊現場周辺の森林では樹木の幹折れ被害が頻発しており、強風が吹いたことは推察される。実際にどの程度の風速であったのかを知るためには、実際に破壊された送電鉄塔について構造解析を実施し、破壊に至る風速を求めることが必要である。

しかし、破壊されたのは、送電鉄塔 2 基の規模であり、高さにして 60m ほど、送電鉄塔が支持していた送電線は長さにして 500m 近い規模であり、これらに当たった風は当然周辺地形の影響を受けて風速分布を有するものと考えられるため、検討に際しては、想定される風向に対する周辺地形の影響を検討した上で、風荷重などに反映させることが必要となる。そこで、始めに、倒壊鉄塔周辺の気流に対する地形の影響を数値流体解析によって検討し、そこで得られた風速分布を使って、送電鉄塔の構造解析を実施し、倒壊時の状況について調べることにした。

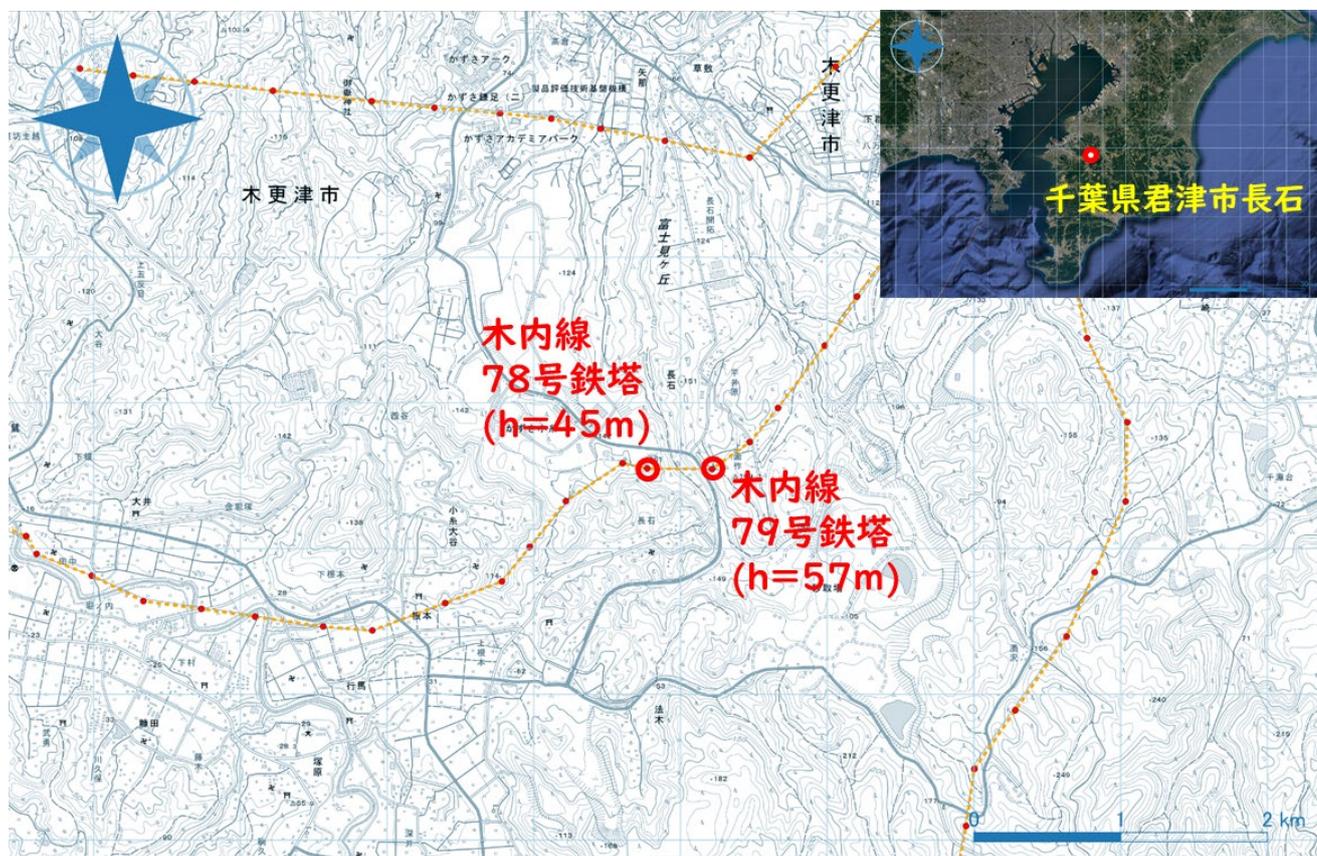


図 2.1 倒壊した送電鉄塔の位置

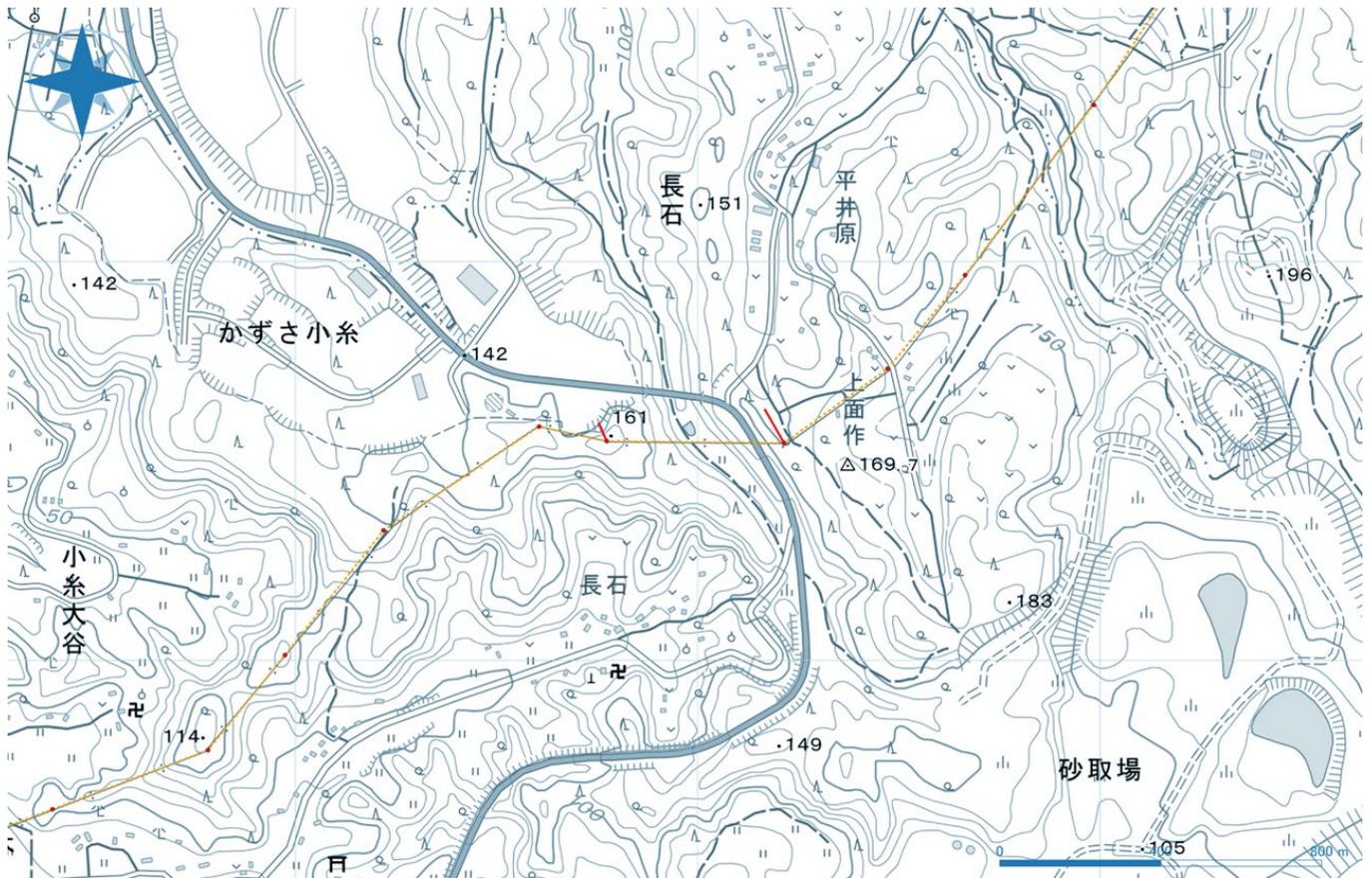


図 2.2 送電鉄塔の倒壊方向

2.2 流れ場に対する周辺地形の影響の検討

2.2.1 解析概要

鉄塔が北北西に倒れたことから、南南東の風を中心に南東から南を 11.25° ずつの 32 風向で分割し、北から時計回りに取った風向角を 135° (以下 SE), 146.25° (以下 SSE), 157.5° (以下 SSE), 168.75° (以下 SSES), 180° (以下 S) の 5 風向を基本風向として設定した。また、地形の再現範囲を変化させることで、倒壊した送電鉄塔付近の風況に影響を与える地形がどの程度の範囲に及んでいるかを検討できるように、地形の再現範囲を 1km 刻みに半径 $R_0=1\text{km}\sim 5\text{km}$ とし、その外側 1km の部分には、動径 $r(\text{km})$ に対して $a = 0.5 + 0.5\cos\pi(r - R_0)$ [$R_0 \leq r \leq R_0 + 1$] の重み関数を乗じて、地形を標高 0m に滑らかに擦り付けるようにした。地形は国土地理院が公開している 10m 標高メッシュ³⁾を用いた。

計算領域は、東西軸を x 軸 (東向きを正)、南北軸を y 軸 (北向きを正) とした直交座標系に合わせた水平方向の 1 辺が $2(R_0 + 1)$ (km)、高さが 2km の直方体で生成し、水平方向には 15m の等間隔分割、鉛直方向には第 1 メッシュが 10m の等比級数で生成した非等間隔分割とした。図 2.3 に各再現範囲に対する地表面部分のメッシュを示す。

本解析では風向を上流側に位置する流入面での風速ベクトルで変化させており、流入面では粗度長 $z_0 = 0.1$ m の対数則に基づいた鉛直速度プロファイルを与えた。また、下流側の流出面においては自由境界を設定した。さらに、南風の解析においては、風向の平行面となる東西面をスリップ境界とした。地表面は樹木なども多い土地であるため、粗度長を一律に $z_0 = 0.1$ m とし、ゼロ面補正やキャノピーモデルなどは用いなかった。

数値流体解析は、OpenFOAM7.0⁴⁾の定常ソルバーである simpleFOAM を用いて実施し、RANS モデル(標準 $k - \epsilon$)

を用いた。また、地形による風速の変化を評価するために、同じメッシュ条件で地形のない平坦な状態での解析領域中心における風速分布も求め、地上高 40m の平均風速で除すことで地形の再現範囲による風速基準点の風速変化を評価した。

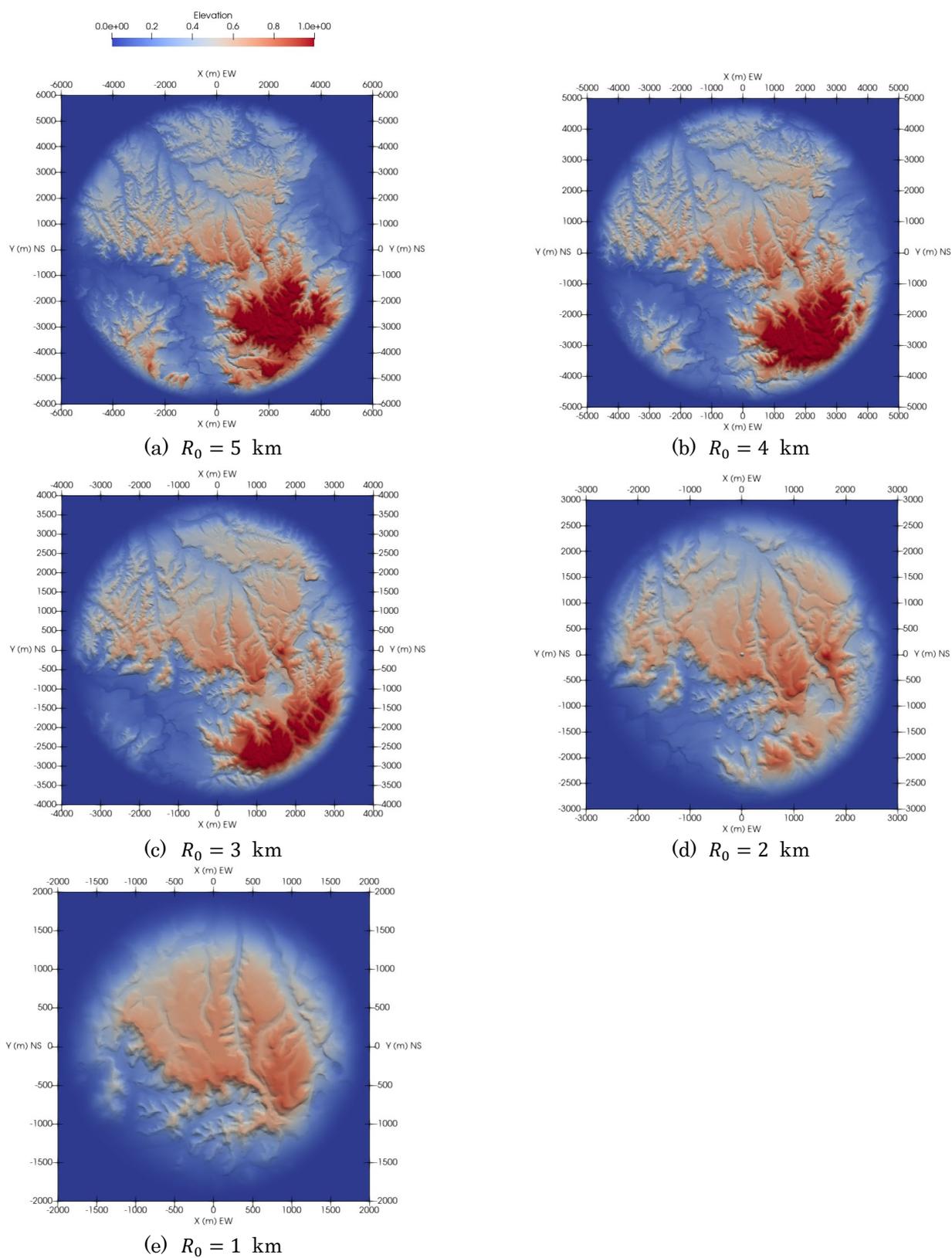
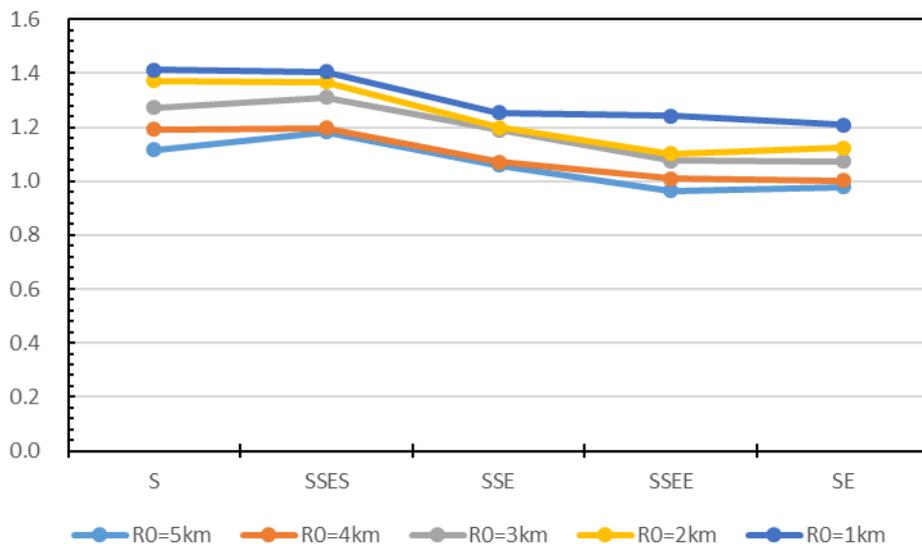


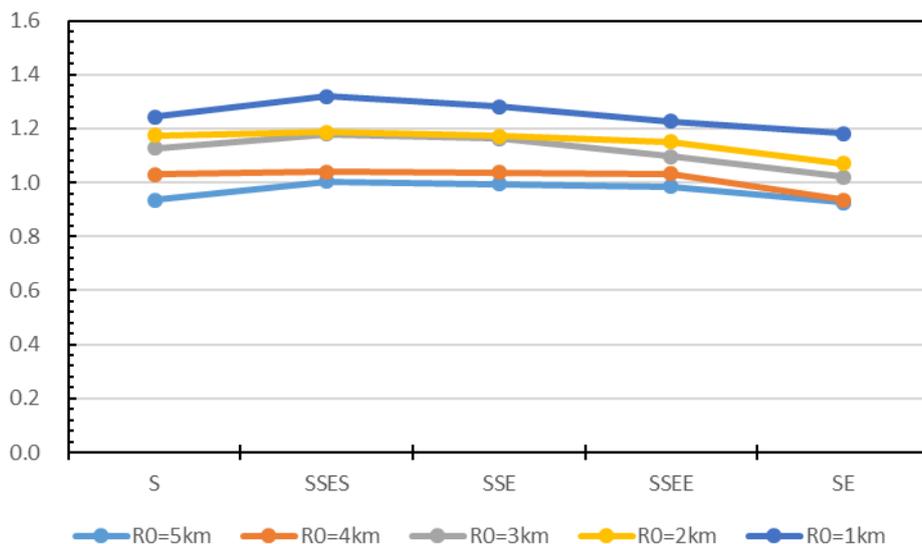
図 2.3 気流解析における地形の再現状況

2.2.2 基準点の風速に対する地形の影響

始めに、78号鉄塔が位置する場所、79号鉄塔が位置する場所における地表高さ40mの地形なしの平均風速に対する地形ありの平均風速比を図2.4に示す。いずれの地点においても地形の再現範囲が狭くなるほど基準風速が高まる傾向にあり、近隣の地形が鉄塔地点の風速を増加させる効果を持っており、遠方の地形が再現されるほど基準風速が低下していくことから、遠方の地形は風速を下げる効果を持っていると言える。また、鉄塔間の風速を比較すると、同じ地上高40mでの風速では、78号鉄塔側の方が高い風速となっており、風向がSまたはSSESの場合に特に78号鉄塔側の基準風速が増加する傾向を持っていることが分かった。



(a) 78号鉄塔地点における基準風速比



(b) 79号鉄塔地点における基準風速比

図2.4 倒壊鉄塔地点における地上高40mの基準風速比

2.2.3 送電線路沿いの鉛直面内の風況

ここでは、送電線路に沿った鉛直面における風速分布について検討する。図 2.5 に 78 号鉄塔の位置を原点として 79 号鉄塔に向かう方向を正とする送電線路沿いに設定した座標軸 S 軸と鉛直軸 Z 軸が作る S-Z 平面における風速分布を示す。ここでは、半径 5km の範囲の地形を再現した解析結果について示しており、78 号鉄塔の位置における地上高 40m における南北、東西、鉛直各成分の平均値の合成風速を基準風速として、各位置における合成風速を基準化している。また、図中の黒い線分は 78 および 79 号鉄塔の中心線を表している。

風向 S の風速分布では、78 号鉄塔から南側に高い風速が地表面近くに降りてきており、78～79 号鉄塔間での風速は大きく低下し、79 号鉄塔の北側で回復する特徴を示している。風向 SSES になると、78 号鉄塔を中心とした狭い範囲に高い風速域が存在する一方で、風向 S に比べると鉄塔間における風速比は高まっており、79 号鉄塔から北の部分についても風向 S に比べると風速は高まる傾向を持っている。次に風向 SSE および SSEE を見ると、風向 SSES で現れていた 78 号鉄塔付近の風速増加域は確認できず、78～79 号鉄塔間の風速比は、風向 SSES よりも高い値となっている。そして、79 号鉄塔付近から北側の風速比も 78 号鉄塔付近よりも高い風速比となっている。風向 SE では、78 号鉄塔から 79 号鉄塔北側にかけて、風向 SSE および SSEE と比べて風速比が増加する傾向を示している。検討した 5 風向について比べると、風向の変化とともに風速比の高い範囲が 78 号鉄塔付近、78～79 号鉄塔間、79 号鉄塔北側と移動するような傾向を示す結果となった。

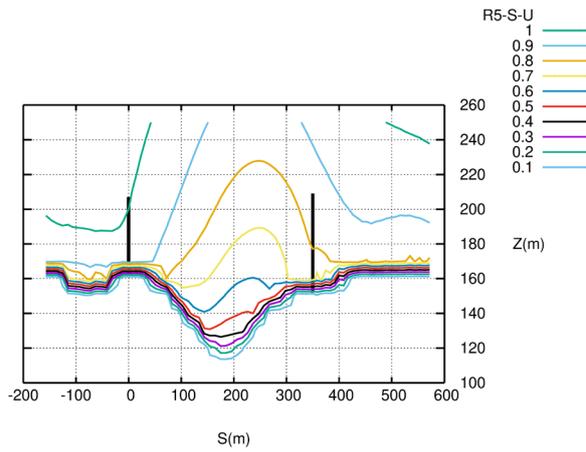
次に、地形の影響を顕著に受けると考えられる鉛直成分の風速比分布を図 2.6 に示す。ここでも基準風速は 78 号鉄塔位置の地上高 40m における合成風速の平均値としており、 $w > 0$ で吹き上げ、 $w < 0$ で吹きおろしを意味する。この結果を見ると、風向 S および SSES においては、78 号鉄塔の南側、北側において吹き下ろしが強まっている一方で、78 号鉄塔の位置では弱い吹き上げとなっている。一方で、78～79 号鉄塔間の谷の部分の北側では吹き上げが強い傾向にある。そして、79 号鉄塔より北側では弱い吹き下ろしとなる。78 号鉄塔の南側においては、ほかのすべての風向でも吹き下ろし傾向を維持しているが、北側の部分については風向 SSEE、SE になると吹き上げとなっている。また、79 号鉄塔より北側の部分の吹き下ろし傾向は、風向が東寄りになるにつれて強まる傾向が認められる。

このように、78 および 79 号鉄塔が支持する送電線が存在する空間では、地形の影響によって風向ごとに合成風速比、鉛直成分風速比がいずれも複雑に変化することが明らかとなった。構造解析を実施するにあたっては、こういった流れ場の変化を考慮する必要があると考えられる。

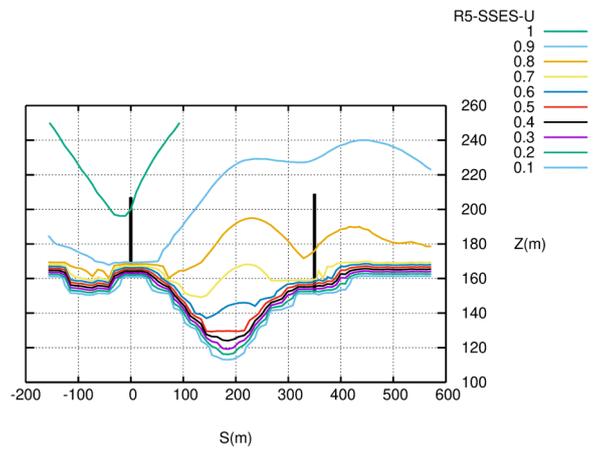
2.3 構造解析による送電鉄塔倒壊メカニズムの検討

2.3.1 概要

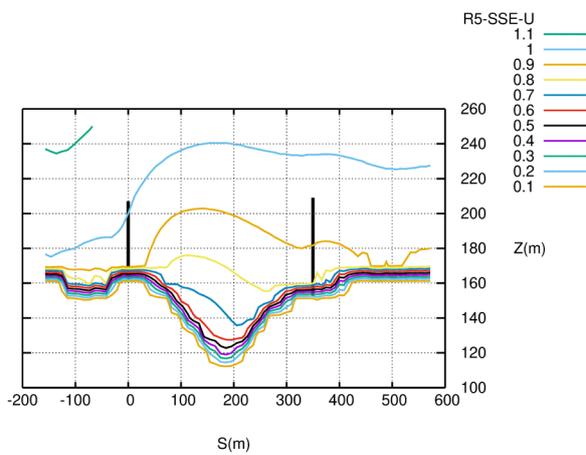
今回倒壊した 78 および 79 号鉄塔は、被害調査から圧縮側の部材の破壊によるものと推察される。しかし、どちらの鉄塔から倒壊したのかについて、現場の痕跡からは読み取ることができなかつたため、倒壊事故のプロセスを理解するためには、地形の影響を考慮した流れ場を前提に構造解析を実施し、倒壊に至る可能性について検討する必要がある。そこで、現地調査などで得られた鉄塔の構造諸元を元に構造モデルを構築し、地形の影響を受けた風速分布から風荷重を算定して構造解析を実施し、風速変化による断面力を求め、許容応力度あるいは座屈応力度から求まる各部材の耐力と比較することで、鉄塔の倒壊について検討を行った。



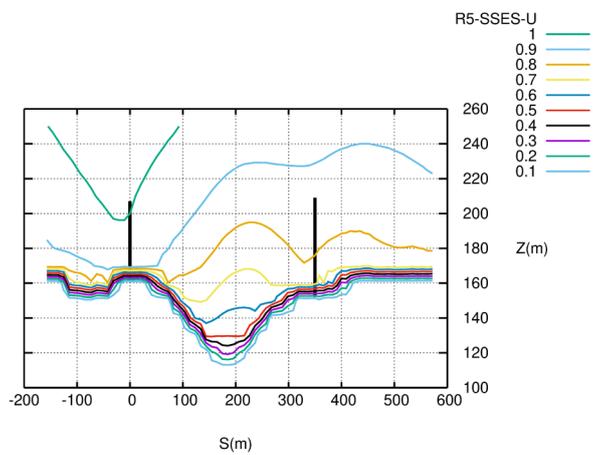
(a) 風向 S



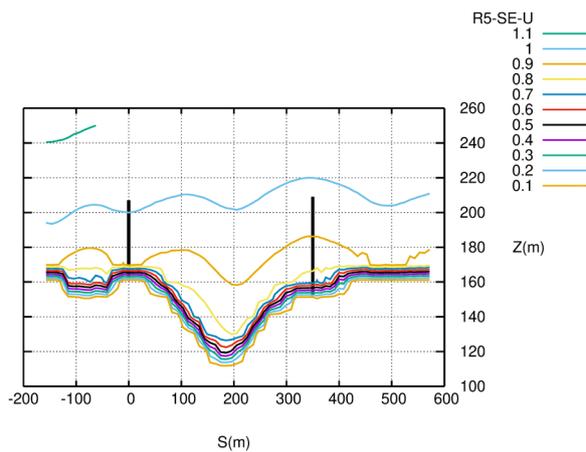
(b) 風向 SSES



(c) 風向 SSE

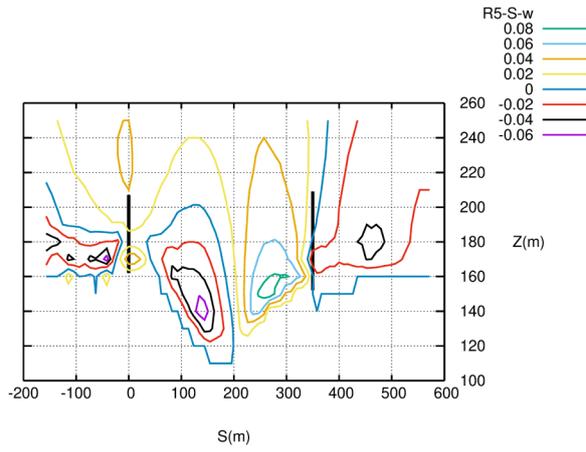


(d) 風向 SSEE

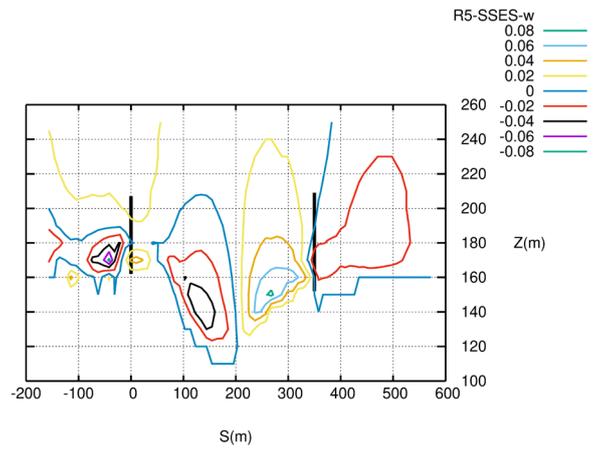


(e) 風向 SE

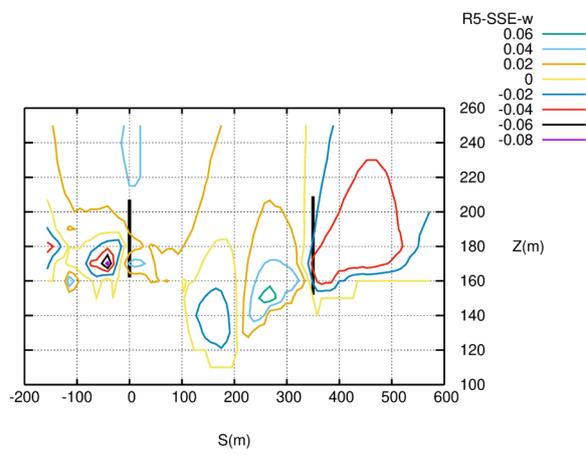
図 2.5 送電線路沿いの鉛直面における合成風速の風速比分布 (基準風速点: 78号鉄塔地上高40m)



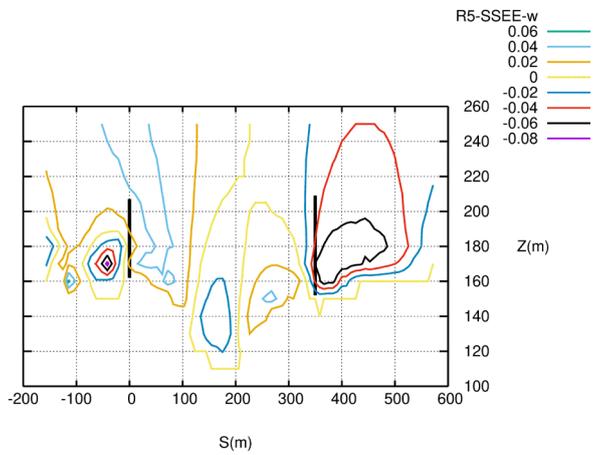
(a) 風向 S



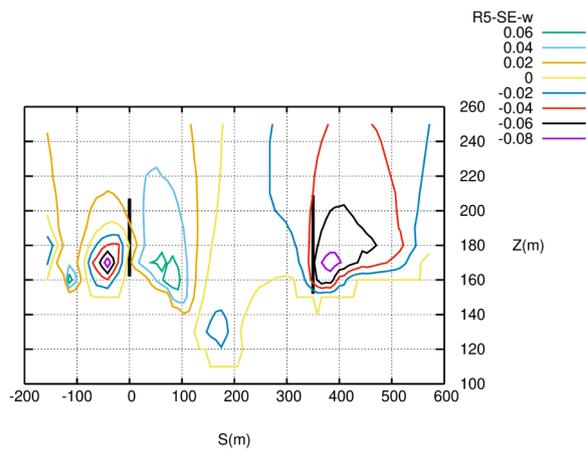
(b) 風向 SSES



(c) 風向 SSE



(d) 風向 SSEE



(e) 風向 SE

図 2.6 送電線路沿いの鉛直面内における鉛直成分の風速比分布（基準風速点：78号鉄塔地上高40m）

2.3.2 鉄塔腕金に作用させる送電線張力の算定

前節において、送電線が張られている空間における平均風速が地形の影響によって増減しており、一様な分布とではないことを示した。そのため、送電鉄塔が支持する送電線は風速分布の影響を受けることとなり、流れ場の中でどのように変形するかを考慮して、送電線の支持力を決定する必要があると考えられる。そこで、張力、自重、風荷重のみを考える簡易な個別要素法によって、任意の風速分布に対する送電線の静的な変形状態を求めた。自然長が L の送電線を n 分割し、自然長 $dx = \frac{L}{n}$ の n 本のバネ乗数 $k (= EA/dx)$ のバネ要素と考え、要素同士の結合部分の座標 \mathbf{x}_i ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) における力のつり合い状態を考えれば、次式のように表される。

$$\sum \mathbf{F} = k(|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i| - dx) \frac{\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i|} - k(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}| - dx) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}|} + \mathbf{F}_i - c_i |\dot{\mathbf{x}}_i| \dot{\mathbf{x}}_i - m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = 0$$

ここで、 \mathbf{F}_i は節点 i に作用する外力、 c_i は節点における減衰係数(解析を安定させるためのパラメータ)、 m_i は節点に配分する要素の質量である。外力については、ここでは、重力と風荷重の合力となり、風荷重については、節点の位置 \mathbf{x}_i における要素軸直角成分の風速 \mathbf{U}_i を求め、 $\frac{1}{2} \rho C_D d |\mathbf{U}_i| \mathbf{U}_i dx$ として加算した。ここでは、強風時を想定していることや気流が乱れていることを勘案して、抗力係数を $C_D = 0.81$ とした。また、節点に配分する質量は、 $m_i = \rho_c dx$ である。これを線形加速度法によって数値積分を実施し、送電線の定常状態の変形を求め、端部の要素の復元力から送電線の支持力を求めた。なお、自然長は所定のサグ比⁵⁾となるように無風状態の解析結果によってあらかじめ調整した。

図 2.7 に 78 号鉄塔～79 号鉄塔の風向 \mathbf{S} に対する風速分布を使った送電線形状に対する基準風速の影響を示す。ここで、基準風速とは、78 号鉄塔位置の地上高 40m の合成風速値である。図中の X は南北軸、 Y は東西軸を表しており、(b) については X 方向と Z 方向のスケールが 1:1 となっていない。また、図中に 3 つのグループが存在するが、これは、上から地線、最上段の送電線、最下段の送電線の結果を表している。この結果より、基準風速の増加に従って、送電線ケーブルおよび地線ケーブルはそれぞれ風によって吹き流されていることが分かる。また、図 2.8 に基準風速の変化に対する送電線支持力の変化の一例として、78 号鉄塔最下段に 79 号鉄塔方向の送電線の 78 号鉄塔側端部の張力を示す。ここで、 F_x, F_y, F_z は、鉄塔の番号が増える方向に正とした座標軸を \mathbf{x} 、 \mathbf{x} 軸の正方向に向いた時の左側直交方向を \mathbf{y} 軸、鉛直方向を \mathbf{z} 軸としたもので、鉄塔の構造軸基準の座標系である。この結果からもわかるように、風速の増加によって z 軸方向の水平面内の力が増加していることが分かる。

次に、基準風速一定の条件下で風向が変わった時の送電線ケーブルの変形状態の変化を図 2.9 に示す。図中の 3 つのグループについては前述と同じである。この結果より、風向変化によっても送電線ケーブルの変形状態は変化することが分かる。この変化は、風向によるものと、風向によって起きる風速変化によるものが合わさったものであると考えられる。また、図 2.10 に図 2.8 と同様の送電線ケーブルの張力を示す。この結果より、 F_x, F_y は風向によって変化していることが分かる。したがって、基準風速の影響に比べれば、風向の影響は小さいが影響を受けていることには違いがないため、構造解析に与える送電線ケーブルの張力は、流れ場の影響を加味したものを与える必要があると考えられる。

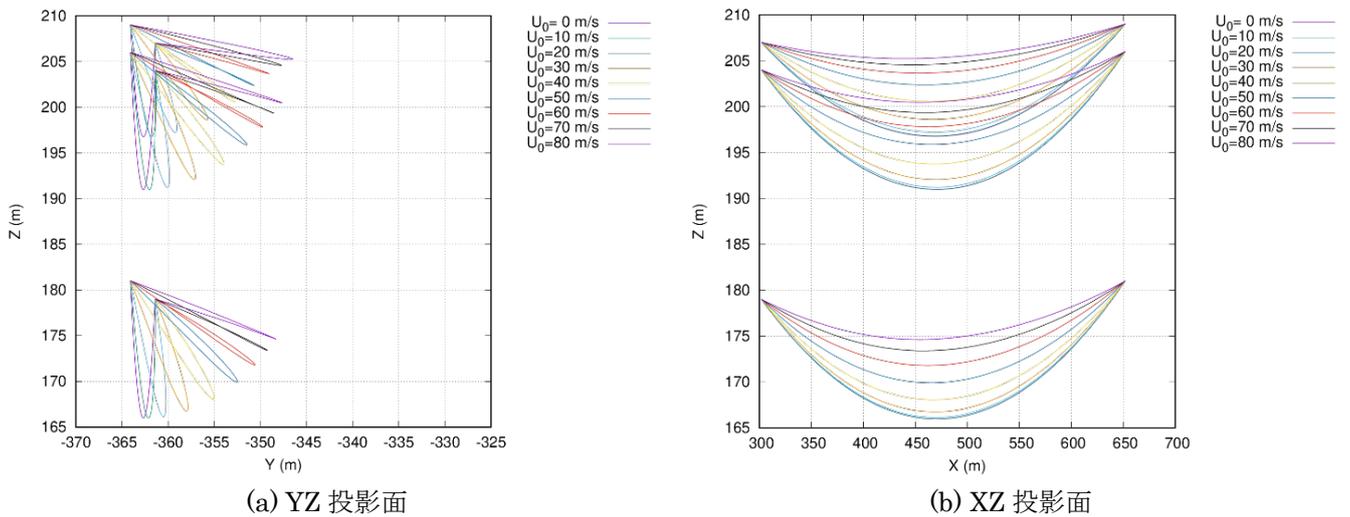


図 2.7 風向 S における 78 号鉄塔～79 号鉄塔間の送電線の変形に対する基準風速の影響

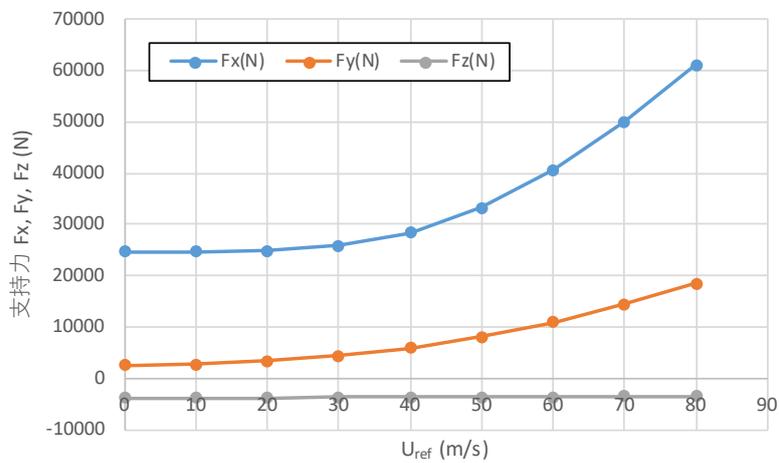


図 2.8 風向 S における 78 号鉄塔最下段の 79 号鉄塔側の送電線の張力に対する基準風速の影響

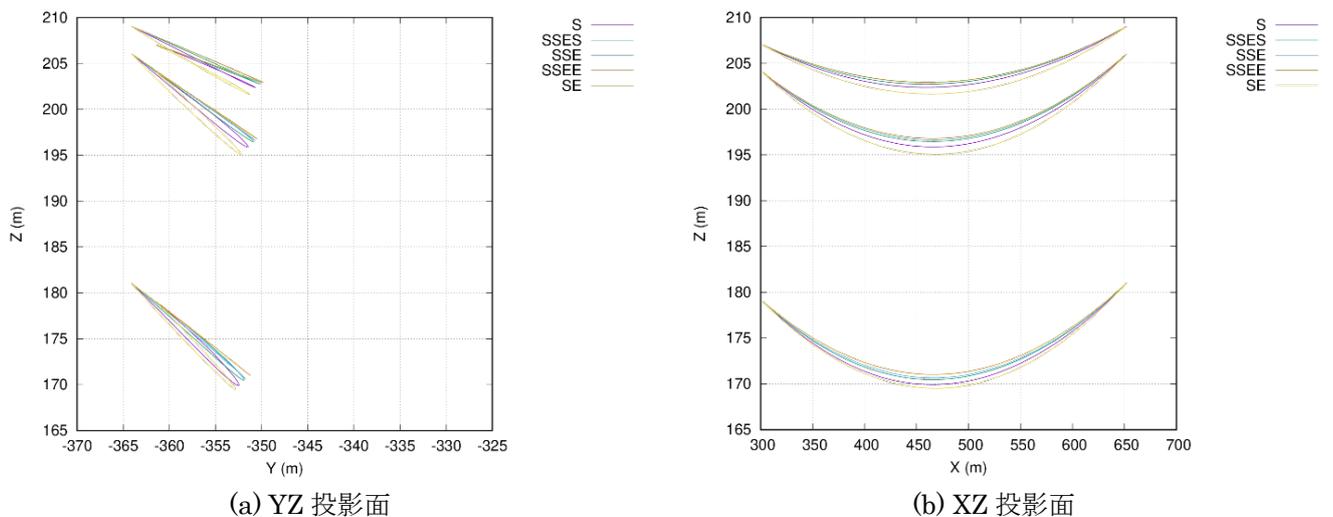


図 2.9 基準風速 50m/s における送電線の形状に対する風向の影響

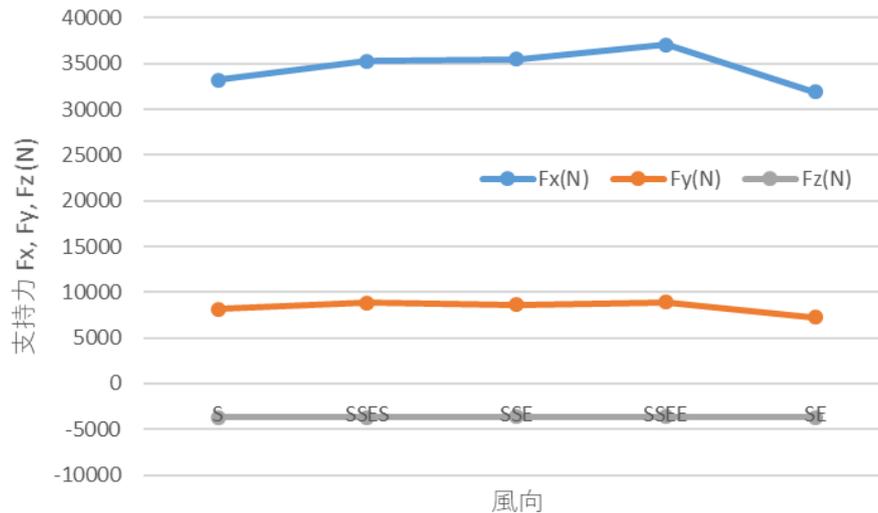


図 2.10 基準風速 50m/s における 78 号鉄塔腕金に作用する北側送電線の張力に対する風向の影響の例

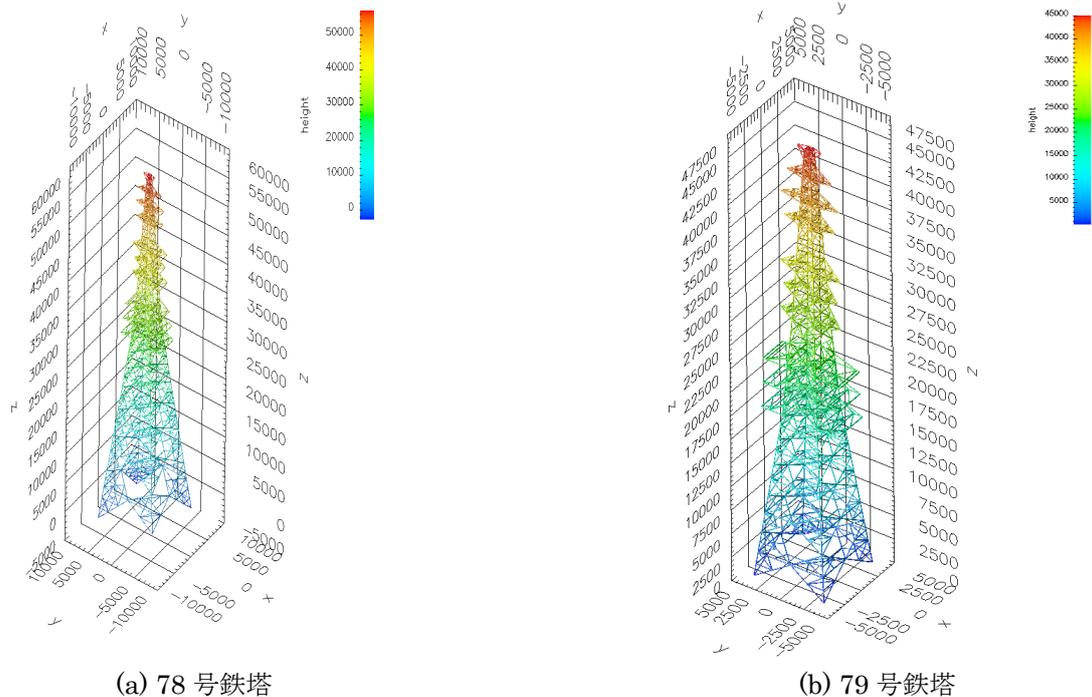
2.3.3 送電鉄塔の構造解析

ここでは、送電鉄塔に作用する風荷重、送電線に作用する風荷重、自重を外力とする構造解析を実施する。解析は、現地調査などで得られた情報をもとに構築した図 2.11 に示すような構造モデルによって行った。構造モデルは 2 次部材、3 次部材まで極力再現するようにした。解析は、3 次元骨組み構造解析コードの **Frame3DD**[®] を用いて実施した。ここで、倒壊した 2 基の送電鉄塔は、いずれも等辺山形鋼で構成されるアングル鉄塔であり、部材に対する風向角も様々であるため、アングル型の平均的な値として抗力係数を 1.9 として風荷重を算定し、断面形の非対称性によって発生する揚力については、構造の対称性から打ち消されることを期待して無視した。この際の風荷重の算定においては、鉄塔中心位置の部材高さにおける風速ベクトルを用い、部材軸直角方向の風速成分を求めて、その風速による抗力を風荷重として求めた。なお、送電鉄塔のようなトラス構造の場合には、遮蔽効果により下流側の部材に作用する空気力は低減することになるが、鉄塔本体に作用する風荷重は送電線に作用する風荷重に比べて部材力にあまり貢献しないため、遮蔽効果などについては考慮しなかった。ここでは、鉄塔本体の部材に働く風荷重と自重に加え、前節で求めた送電ケーブルの張力を腕金に載荷することで、構造解析を行い、鉄塔の各部材力を求めた。

主材である柱部分については **SM540**、そのほかの部材については **SS400** 相当と考えられるが、部材の耐力は、それぞれの部材の降伏応力または座屈応力に基づいて求めた。また、倒壊の要因には主材である柱部が重要であると考えられたため、主材の耐力に対する実際の軸力の比の数値ごとの頻度によって解析結果について検討していく。

78 号鉄塔、79 号鉄塔において、各主材を対象として、耐力に対する各風向・各風速で発生した軸力の比（以下、対耐荷力軸力比）の階級別発現頻度を求めた結果を図 2.12 に示す。ここでの風速は、78 号鉄塔位置における地上高 40m における風速である。また、対耐荷力軸力比の発現頻度を階級幅 0.1 で求め、表中の数値および棒グラフによって図示している。

78 号鉄塔の結果に注目すると、無風時では対耐荷力軸力比の値はほとんどが 0.3 未満を占めており、風速の増加とともに対耐荷力軸力比の値は増加していく。この原因は鉄塔本体および送電線に働く風荷重の増大である。そして、対耐荷力軸力比が 1 に達する、つまり発生軸力が耐力を超えるのは、ほとんどが基準風速 60m/s であり、この鉄塔が設計された当時の設計風速 40m/s に比べてかなり余裕のある数値となっている。



(a) 78号鉄塔

(b) 79号鉄塔

図 2.11 本解析に用いた送電鉄塔の構造モデル

一方、79号鉄塔の結果に注目すると、無風時の耐荷力軸力比が0.5程度に達しており、無風時に発生する軸力が78号鉄塔に比べて高い結果となっている。当然、風荷重の増大に対する耐力的な余裕も小さくなるため、破壊条件に達する風速は、風向 SSE および SSEE においては、78号鉄塔位置の高さ40mにおける風速が40m/s、そのほかの3風向で同じく50m/sとなった。

図 2.13 に、両鉄塔が破壊条件に達する78号鉄塔位置における高さ40mでの風速値をまとめる。このことから、両鉄塔を比べると破壊条件に達する78号鉄塔位置における基準風速が低い79号鉄塔の方が先に静的に破壊に至ったと考えることができる。また、図 2.4 に示した78号鉄塔と79号鉄塔の風速値の関係から、79号鉄塔における地上高40mの風速値に直した結果を併せて求めたところ、79号鉄塔が破壊条件に達する79号鉄塔における地上高40mの風速値は40m/sをわずかに上回る結果となり、当時の設計風速40m/sに準ずる風速値で破壊条件に到達したものと考えられる。

ただし、ここで判断に用いているのは降伏応力度または座屈応力度から求めた耐荷力と静的風荷重による発生軸力であることから、実際に破壊状態に到達する風速はより高い風速であると考えることが妥当であるが、ここで示された結果からは、倒壊被害のプロセスとしては、79号鉄塔から倒壊した可能性が高いのではないかと考えられる。

78-S										79-S										
N/C	0 m/s	10 m/s	20 m/s	30 m/s	40 m/s	50 m/s	60 m/s	70 m/s	80 m/s	N/C	0 m/s	10 m/s	20 m/s	30 m/s	40 m/s	50 m/s	60 m/s	70 m/s	80 m/s	
0	0.0-0.1	0.2917	0.3833	0.5000	0.2500	0.0333	0.0000	0.0000	0.0667	0	0.0-0.1	0.0188	0.0188	0.0250	0.0375	0.0500	0.0500	0.0750	0.0750	0.0750
1	0.1-0.2	0.4417	0.2333	0.1667	0.0833	0.2000	0.0667	0.0167	0.2250	1	0.1-0.2	0.2125	0.0663	0.3813	0.3750	0.4500	0.4500	0.4125	0.4000	0.4000
2	0.2-0.3	0.2500	0.2750	0.2417	0.1750	0.0667	0.1167	0.0833	0.0417	2	0.2-0.3	0.3125	0.2125	0.1750	0.1000	0.0000	0.0000	0.0125	0.0250	0.0250
3	0.3-0.4	0.0167	0.1083	0.2250	0.2750	0.1250	0.1000	0.0833	0.0500	3	0.3-0.4	0.1250	0.1188	0.0750	0.0313	0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.4-0.5	0.0000	0.0000	0.0167	0.2000	0.3583	0.0833	0.0833	0.0167	4	0.4-0.5	0.2875	0.2750	0.1625	0.0938	0.0188	0.0188	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.5-0.6	0.0167	0.0000	0.0000	0.0167	0.1000	0.2167	0.0417	0.0083	5	0.5-0.6	0.0438	0.0688	0.2313	0.1688	0.0750	0.0125	0.0125	0.0000	0.0000
6	0.6-0.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1167	0.2167	0.0917	0.0250	6	0.6-0.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.1938	0.1063	0.0688	0.0125	0.0125	0.0125
7	0.7-0.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.2083	0.1750	7	0.7-0.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2313	0.0375	0.0125	0.0125	0.0125
8	0.8-0.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.1750	0.0583	8	0.8-0.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0438	0.1000	0.0625	0.0000	0.0000
9	0.9-1.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0833	0.0167	9	0.9-1.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2188	0.0375	0.0188
10	1.0~	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1333	0.6167	0.4833	10	1.0~	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0438	0.3625	0.4563	0.4563

図 2.12 各風向・各風速における 78 号鉄塔，79 号鉄塔の主材の耐力 C に対する軸力 N の比の階級別頻度分布

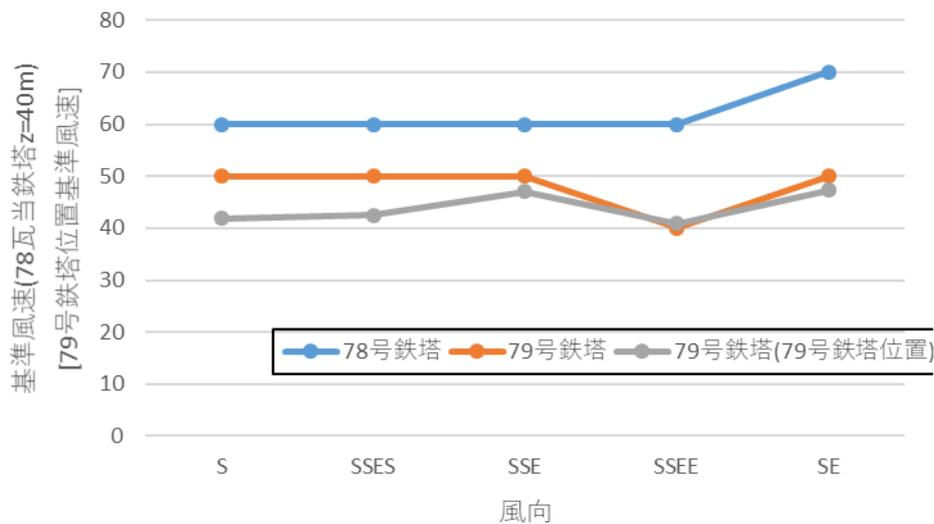


図 2.13 各鉄塔の主材が破壊条件に至る 78 号鉄塔位置における地上高 40m の風速および 79 号鉄塔破壊時の 79 号鉄塔位置における地上高 40 の風速

3 配電柱の被害

配電柱の被害について、主に令和元年台風15号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループの中間報告書に基づき以下にまとめる。

2019年9月8日から9日にかけて関東地方を直撃した台風15号では、暴風により千葉県を中心に甚大な被害が生じた。東京電力管内では、1996本の電柱が損傷、倒壊、傾斜等の被害を受けた。そのうち、台風の進路の東側に位置した千葉県内の被害が1750本と最も多い(図3.1, 3.2)。千葉県以外の配電柱の被害は順に茨城県94本、神奈川県59本、静岡県55本などとなっている。千葉県の被害の地点は房総半島の東京湾側に多く、半島の先端部は海岸側に被害が見られるが、全体としては山林部に集中している。茨城県の被害は、台風進路の東側に位置する県南部に集中しており、千葉県の被害地域と連続している。神奈川県は三浦半島、静岡県は伊豆半島に被害が多い。被害の形態としては傾斜より、折損、倒壊の割合が多い。

千葉エリアでは、9日8時時点で約64万軒という大規模な停電が生じ、倒木による道路の閉鎖が多発したこともあり、停電解消も9月24日となった(土砂崩れや倒木等により立ち入り困難な一部の箇所を除く)⁷⁾。復旧にあたっては、倒壊した電柱や樹木を二次災害に注意しながら撤去可能なサイズに解体する作業などに時間を要した⁸⁾。

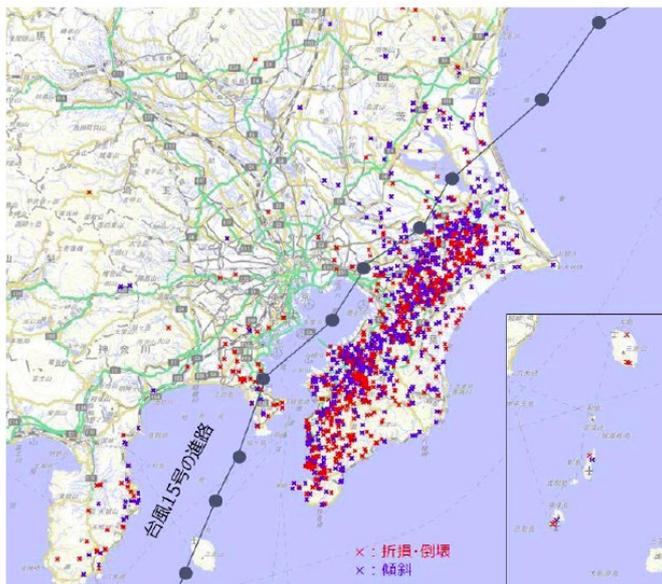


図 3.1 電柱の被害発生状況分布図¹⁾



図 3.2 倒木・飛来物による電柱損壊現場の様子¹⁾

事故原因は 1579 本については事故原因が確定され、397 本については現場調査や住民へのインタビュー等によって推定され、残り 20 本については追加調査された。追加調査の対象となったものは、飛来物や倒木が折損した電柱から離れており原因と確定できなかったものなどである。事故原因が確定された 1579 本の内訳は、事故時の図面・写真によるものが 1182 本、改修管理表によるものが 89 本、現場作業員からの報告によるものが 308 本であった。

追加調査により 20 本のうち 18 本の電柱については原因が特定された。残り 2 本のうち 1 本は、隣接する家屋の屋根が飛来物となったが、電柱の衝突痕が屋根と反対側であることや傾斜状況から、損壊の原因が飛来物であると判断できなかったものである。もう 1 本は、飛来物であるビニールハウスと電柱の距離が 200m 離れていて原因と判断するのは困難とされたものである。

表 3.1 に電柱の損壊状況内訳を示す。1996 本のうち、倒木・建物の倒壊によるものが 1477 本（74%）、飛来物によるものが 283 本（14%）、地盤の影響によるものが 236 本（12%）となっている。千葉エリアについては、1750 本のうち倒木・建物の倒壊によるものが 1311 本（75%）、飛来物によるものが 265 本（15%）、地盤の影響によるものが 174 本（10%）となっている。

表 3.1 台風 15 号の影響による電柱の損壊状況内訳¹⁾

エリア		電柱本数（本）										
		栃木	群馬	茨城	埼玉	千葉	東京 (23 区)	多摩	神奈川	山梨	静岡	合計
損壊数		9	0	94	9	1,750	15	3	59	2	55	1,996
電柱損壊 の原因	倒木・建物の倒壊	9	0	57	8	1,311	6	3	37	2	44	1,477
	飛来物	0	0	9	0	265	3	0	6	0	0	283
	地盤の影響	0	0	28	1	174	6	0	16	0	11	236

風速が高いと想定される沿岸部について、千葉エリアの海岸付近（海岸線から概ね 200m 以内）で折損・倒壊した電柱 14 本の周囲環境の調査の結果、近隣の同じ環境に施設された電柱に被害がなく、倒木や飛来物による 2 次被害であったとしている。また、風の影響を直接受けやすいと考えられる農地や森林などの電柱の折損数に関して、千葉県沿岸部では 5 本で折損率は 0.17% であり、一方、千葉県全域では 375 本で折損率は 0.11% であり、沿岸部の折損率は有意に高くなかった。

以上の調査より、1996 本の電柱は、倒木・建物の損壊や飛来物、地盤の影響による 2 次被害であると判断する、としている。

以下に、原因を特定するにあたって検討された他の事項についてまとめる。

保全履歴の確認により、保安規定に基づく保全が適切に実施されていたことが確認されている。具体的には目視による定期巡視を 5 年周期で実施し、必要に応じて補強工事や電柱建替を行っている。

施設年別の電柱損壊率の傾向は、特定の年代に集中するような特異性はなく、損壊率が高い年は、同一地域に集中して設置されて、その地域で損壊が多く発生したことによるとしている。

損壊した電柱のうち 61 本を調査し、そのうち鉄筋破断を確認した 31 本は、いずれも破断部の形状的特徴から鉄筋強度を上回る引張力が加わったことによる延性破断と判断し、折損前に腐食などによる強度低下は生じていなかったとした。

架空配電線路の支持物には、鉄筋コンクリート柱、鉄柱、木柱があり、全国でのシェアはそれぞれ約 96%、3%、

1%である。鉄柱については、送電線路に多く見られ、配電線路においては、コンクリート柱の搬入・施設が困難な箇所へ活用されている。今回の被害における鉄筋コンクリート柱、鉄柱、木柱の本数は表 3.2 のようになっている。鉄筋コンクリート柱の倒壊本数が多いが、東電管内の全体のそれぞれの本数に対する割合では、コンクリート柱が 0.033%、鉄柱が 0.029%、木柱が 0.305%となっており、木柱の倒壊の割合がコンクリート柱の割合のおよそ 10 倍となっている。

調査が実施された 33 本の 12m-350kgf のコンクリート柱の折損のうち、地際部（地際部から 5m まで範囲）で 15 本、段落ち部（配筋の数が減る位置、地際部から 5～7m の範囲で 16 本）で生じている。

表 3.2 各電柱の損壊状況 *1)を元に一部省略して作成

	倒壊電柱（本） （東電管内割合）		東電管内の電柱（本）	
	本数	割合	本数	割合
コンクリート柱	1929 (0.033%)	96.6%	5,824,380	98.0%
鉄柱	32 (0.029%)	1.6%	109,701	1.8%
木柱	35 (0.305%)	1.8%	11,475	0.2%
計	1,996 (0.034%)	100.0%	5,945,556	100.0%

原因に関する分析において、樹木をモデル化した解析では、風速 30m/s の風が加わっている状態で、電線から 6m 離れた位置にある、通し 50cm、高さ 15m の樹木が 3 本倒れた場合に、地際モーメントが破壊モーメントを超えて折損するおそれがあることが示されている。また、2.25m×15m の飛来物が電線にかかり、かつ風速 30m/s の風が加わると電柱が折損する恐れがあるとしている。

電柱の設計にあたっては、技術基準において、電柱は日本産業規格 (JIS) 準拠のものを使用することとしている。また強度設計では、風荷重の設定、根入れ、地盤の補強等に施工により、技術基準で規定されている安全率等を満たすようにしている。設計においては、飛来物や倒木による荷重は考慮されていない。

コンクリート柱の設計荷重は、柱の頂点から 0.25m の点に水平応力を加えた場合の破壊荷重の 1/2 とされ、柱のどの部分においてもこの応力に耐えるように規定されている。コンクリート柱はプレストレストコンクリート構造となっており、底部に向けて非緊張材が配筋することで耐力を段階的に増加させている。電気設備の技術基準の解釈では、鉄筋コンクリート柱に対して、設計荷重の 2.0 倍の荷重を加えたとき、これに耐えることを求めている。電柱の高さは 11m、12m、13m、14m、15m、16m のいずれかで（12m が多い）、通常、電柱は全体の 6 分の 1 が地中に埋まっている状態である。頂部直径は 190mm のものが一般的である⁹⁾。

電気設備の技術基準では、架空電線路の支持物の材料及び構造は、その支持物が支持する電線等による引張荷重、風速四十メートル毎秒の風圧荷重に対して倒壊のおそれがないよう、安全なものでなければならない、としている。電柱に係る風圧荷重の技術基準としては、昭和 7 年（1932 年）に改正された電気工作物規定の解説において、風速について「基準風速 40m/秒」と定めている記載が確認されており、平成 9 年（1997 年）の電気設備の技術基準（省令）の改正において、「風速 40m/秒」の風圧荷重が技術基準の本体に明記された。

また、東京電力の防災業務計画¹⁰⁾では、架空電線路について「電気設備の技術基準に規定されている風圧荷重が地震動による荷重を上回るため、同基準に基づき設計を行う。」となっており、風荷重が構造強度を決める構造となっている。

4. まとめ

台風 FAXAI は、2 基の送電鉄塔の倒壊、2,000 本近い配電柱の折損倒壊をはじめとする送配電設備への甚大な被害を与え、さらに千葉県を中心に広範囲にわたって長期間に及ぶ停電をもたらした。本節では、被害の実態を明らかにすることを目的に、送電鉄塔被害の実態、送電鉄塔被害発生のプロセス、配電設備の被害に分けて、現地調査、数値解析、資料調査を行った。

結論として、送電鉄塔は設計基準通りに平均風速 40m/s 相当の静的風荷重には耐えていたと考えられ、配電設備についても倒木や飛散物による被害がほとんどであり、風荷重に耐えられずに折損、倒壊したケースはほとんどなかったと言える。従って、一連の送配電被害発生の直接的な原因は、1) 想定に近い強風が広範囲に長時間吹いたこと、2) 送電鉄塔付近で周辺地形による増速効果が発生したこと、3) 配電設備に対して倒木や飛散物の影響が同時に多発したことである、と結論付けられる。

送電設備の耐風設計基準については、現行基準では大きく改善されており、現行基準に基づく送電設備が今回と同じ被害を受ける可能性は低いと考えられるが、今回被害を受けた送電鉄塔と同じ基準によって設計された送電設備は全国にわたって大量に存在するため、既設設備については、設計風速に対する地形の影響などについて改めて検討を行い、問題の再発の防止に努める必要があるものと考えられる。また、配電設備に関しては、風荷重そのものによる被害というよりは樹木の倒壊や飛散物の影響によるものがほとんどであって設備周辺の条件に左右される問題が多く、簡単に設計基準で対処することが難しいと考えられる。日常的な保守点検などでの対応も含め、総合的な対応策を検討していく必要があるものと思われる。

参考文献

- 1) 令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ、令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ<中間報告書>、2020 年 1 月 21 日
- 2) 小林文明, 佐藤英一, 友清衣利子, 野田稔, ガヴァンスキ 江梨, 高館祐貴, 高森浩治, 木村吉郎, 中藤誠二, 森山英樹, 鈴木覚, 重永永年, 服部力, 松井正宏, 岩下久人, 【速報】台風 1915 号 (FAXAI) がもたらした強風災害について, 日本風工学会誌, 第 45 号第 1 号 (通号第 162 号), pp.30-39, 2020 年 1 月
- 3) 国土地理院, 基盤地図情報 10m メッシュ, <https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>, 2020
- 4) The OpenFOAM Foundation, OpenFOAM, <https://openfoam.org/>, 2020
- 5) 国際協力機構, ニュージェック, 中国電力, 「カンボジア国プノンペン首都圏送配電網拡張整備事業フェーズ 2 準備調査ファイナルレポート」, JICA 報告書 PDF 版, https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12182671_03.pdf, 2014
- 6) Henri P. Gavin, Frame3DD. Static and Dynamic Structural Analysis of 2D and 3D Frames, <http://frame3dd.sourceforge.net/>, 2015.
- 7) 東京電力ホールディングス株式会社: 台風 15 号対応検証委員会報告書 (最終報告), 2020 年 1 月 16 日
- 8) 「電気と工事」編集部: 特集ドキュメント 19days 観測史最強クラスの台風からの復旧工事, 電気と工事 2 月号, オーム社: 2020 年 2 月
- 9) 小山茂夫, 木方靖二, 鈴木勝行: 送配電工学, コロナ社, 1999
- 10) 東京電力ホールディングス株式会社, 東京電力パワーグリッド株式会社, 東京電力エネルギーパートナー株式会社: 防災業務計画, 2019 年 4 月

2019 年台風第 15 号による農業用ハウスの強風被害

Wind induced damage to agricultural plastic greenhouses by Typhoon Faxai (2019)

森山 英樹*¹*Hideki MORIYAMA*

Typhoon 1915 (Faxai) caused 47 billion-yen in damage to agricultural green houses and other facilities (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2019). A typhoon danger semicircle has passed through areas where there had been few reports of strong wind damage related to agricultural green houses. As a result, damage to agricultural houses increased, which had not always been fully prepared to strong winds. The main affected areas were the Kanto-region, Shizuoka prefecture and Fukushima prefecture, except for Gunma prefecture (Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, 2019). In Chiba Prefecture, a large amount of damage was concentrated, such as a 490 ha pipe house with a cost of 20.3 billion yen and a 28 ha glass room with a cost of 2.3 billion yen (Chiba Agriculture, Forestry and Fisheries Department, 2019).

Keywords: *agricultural plastic greenhouse, wind damage, typhoon Faxai*

1 2019 年台風第 15 号による農業用ハウスの強風被害

森山 英樹（農研機構）

2019 年台風 15 号では農業用ハウス等に 470 億円の被害が発生した（農林水産省、2019）。従来、農業用ハウスに関する強風被害報告例が少なかった地域を、台風の危険半円が通過した。そのため、強風対策が必ずしも万全ではなかった農業用ハウスにおいて被害が拡大した。主な被災地は、群馬県を除く関東地方、静岡県および福島県であった（農林水産省、2019）。その中でも千葉県では、490ha のパイプハウスで 203 億円、28ha のガラス室で 23 億円相当が被災する等、多くの被害が集中した（千葉県農林水産部、2019）。

2 現地調査方法

農業用ハウスの被災実態を明らかにするために、現地調査を行った。現地調査は、2019 年 9 月 10 日に神奈川県藤沢市、同年 9 月 17 日および 18 日に千葉県八街市、山武市および多古町、同年 9 月 27 日に千葉県南房総市および館山市、同年 10 月 17 日および 18 日に南房総市および館山市において実施した。現地調査では、農業用ハウスの寸法、使用部材、被災状況、周辺の土地利用状況を調べた。また、可能な限り、生産者に対する聞き取り調査も行った。

*1 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

National Agriculture and Food Research Organization

3 調査結果

パイプハウスの被害が顕著であった。千葉県の実災地で使用されていたパイプハウスは、全国の平均的な寸法に比べると、ハウス断面、使用部材断面ともにやや小さい傾向にあった。間口は4.5m程度、棟高は2.5~2.6mの事例が多かった。アーチパイプの直径は19.1mmが多く、一部で22.2mmも使用されていた。被覆材は農業用塩化ビニルフィルム（農ビ）、もしくは特殊ポリオレフィン系フィルム（いわゆる農PO）であった。

被災パターンは、南北棟では妻面の傾斜（図1）もしくは転倒、東西棟では台風進路の東側では南側側面、西側では北側側面の転倒もしくは陥没（図2）が顕著であった。また、多くの同型のパイプハウスが並列配置されたハウス団地では、屋根の陥没が多くみられた（図3）。アーチパイプの補強として、数スパン毎にアーチパイプを二重に設置する、いわゆるダブルアーチパイプを採用した事例が多いのが、調査地域の特性であった。しかし、2組のアーチパイプを金具で固定する間隔がやや大きく、内側のアーチパイプが適切な距離を保つことができずに変形してしまっている事例が散見された。この他、アーチパイプ表面の発錆もしくは腐食した骨組みで、ハウス側面が地際に折損し、被害程度を大きくしている傾向にあった。



図1 妻面が破壊された南北棟のパイプハウス（千葉県八街市）



図2 正圧により側面から破壊されたパイプハウス（千葉県八街市）



図3 再付着した気流によって屋根が陥没したパイプハウス（千葉県館山市）

一方、鉄骨ハウスでは、栽培空間を広く確保するために、間口もしくは軒高を大きくしたもので顕著な被害が生じていた。調査事例では、風上側に位置する柱のコンクリート製基礎の埋設深が、ハウス規模に対して浅いものが、地中で転倒することで骨組み構造の被災を助長していた（図4）。また、H型鋼のフランジにあけたボルト穴の位置で破断、折損するなど今後の改良点も明らかとなった。



図4 風上側の妻面が破壊された鉄骨ハウス（千葉県南房総市）

鉄骨ハウスはパイプハウスに比べて使用部材の強度が大きい。そのため、骨組みが被災しない場合は、被覆材が破断するケースが多かった。大きな負圧が発声する風下側の屋根面および側面で、被覆材を骨組みに止めているスプリング状の資材がレールからはじけ飛ぶ等の被害が多発した（図5）。ガラス被覆の場合は、農地周辺からの飛散物によって割れた事例があった。この場合、圃場にガラス片が散乱してしまう。これらのガラス片を全て回収する

必要があり、被災からの復旧に多大な人的コストを費やす結果となった。



図5 被覆材を固定するスプリング状資材が離脱した鉄骨ハウス（千葉県南房総市）

農業用ハウスでは、生産者によって既存のハウスを増築するケースも少なくない。今回の被災調査でも、斜めの圃場に併せて三角形の形にハウスを増築した事例で、増築部の被害が発生した。変形構造のため、基礎が浅く埋設されていること、柱のフランジが片側のみに設置されているなどが被災原因としてあげられる。

台風の西側に位置した神奈川県における調査では、千葉県と逆方向の風による被災が顕著であることを確認した。被災パターンとしては、方角が異なるだけで、千葉県と同様の被災形状を示した。

参考文献

- 1) 農林水産省（2019）：令和元年台風第15号に係る被害情報（2019年10月21日閲覧）
- 2) 千葉県農林水産部（2019）：台風第15号の影響による農林水産業への被害について（第8報）1910111300 発表（2019年10月22日閲覧）

2019 年台風第 15 号による樹木の強風被害

Wind-induced damage to trees due to Typhoon Faxai (2019)

鈴木 覚^{*1}, 重永英年^{*1}, 服部 力^{*1}*Satoru SUZUKI, Toshiaki SHIGENAGA, Tsutomu HATTORI*

Many of the poles were damaged by fallen trees, resulting in power outages. Sambusugi distributed from eastern to midwestern Chiba Prefecture is susceptible to decay due to non-red blight rot. In order to clarify the relationship between the fallen trees and the non-red-wilt rot, we investigated the damages of fallen trees in Nakatsuda, Yamatake-shi, Toda, Itokawa, Kimitsu-shi and Kanaya, Futtsu-shi.

Keywords : *wind damage to trees, Sambusugi, typhoon Faxai*

1 はじめに

倒木による電柱の損壊が多発したことから、停電をもたらした原因の一つとして、倒木に注目したマスコミ報道が多数みられた。千葉県東部から中西部にかけて分布しているサンプスギは、非赤枯性溝腐病（以下、溝腐病）による腐朽が生じやすいことから、罹病したサンプスギが倒木原因であるとの論調であった。こうした被害状況や報道を受け、倒木と非赤枯性溝腐病との関係を明らかにすることを目的の一つに、山武市中津田，山武市戸田，君津市糸川，富津市金谷の倒木被害を調査した。調査対象地はいずれもサンプスギが主の林分であり、2019年9月27日と28日に現地調査を行った。本報告は鈴木ら¹⁾や小林ら²⁾を基礎に、追記しつつ概略をまとめたものである。

溝腐病とはチャアナタケモドキ (*Fomitiporia torreyae*) により辺材腐朽するものであり、サンプスギに関しては1960年代以降罹病による幹の腐朽が問題となってきた。本菌は辺材を軸方向と同心円方向に拡がって溝状の凹みを生じさせ、腐朽が進行すると辺材の露出した開口部が生じる。腐朽の程度として、幹の軸方向に溝状の陥没が生じただけのものと、さらに腐朽が進行して樹皮が離脱し辺材部が露出して開口したものとに分け、それぞれ「陥没」、「開口」とした。

*1 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所 Forestry and Forest Products Research Institute



図1 溝腐病に罹病した立木（左）と罹病木の幹断面（右）

2 調査結果

1) 中津田

被害形態は根返りと幹折れの両方が発生していた。倒木方向は北北西であった。被害地に面していたが被害を受けなかった個体のほとんども罹病していた。このことは、罹病した個体が被害を受けて健全木が選択的に残存したという被害状況ではないことを示している。また、根返り木の腐朽有無や腐朽程度を調べると、ほとんどの個体に腐朽程度「陥没」の溝腐病が見られた。このことは、溝腐病に罹病していたとしても、「陥没」程度であれば、幹の強度に大幅な低下はなく、結果的に根系の強度に幹の強度が上回ったことを示していると考えられた。

2) 戸田

倒木方向は北向きであった。全般的に溝腐病の腐朽程度が中津田よりも進行しており、腐朽程度「開口」のものが多かった。被害地内のほとんどの個体が幹折れしており、溝腐病罹病部での折れが多かったが、それ以外の場所の幹折れもみられた。任意の1植栽列に沿った個体ごとの被害状況は、13個体のうち10個体は高さ1.5m～6mの間で幹折れしていた。被害地の林縁木はほとんどが溝腐病に罹病していたが、ほぼすべてが残存しており、調査した植栽列における残存木3個体のうち2個体は林縁木であった。このような、林縁木が強風の被害を受けずに残存することは、風害被害地においてしばしば見られることである。

3) 金谷

北西に開いた谷地形であり、谷の底を高速道路が通ってトンネルにつながっていた。トンネル上で谷を挟む尾根が閉じる地形であった。高速道路に沿って南東から南南東方向に倒木し、トンネル上では南西方向に倒木した。谷地形が北西に開いているため北西風が入り込みやすく、トンネル上で尾根が閉じていることから、強風が収束するとともに、斜面に衝突して向きを変え、倒木方向が南西に変化したものと考えられた。溝腐病が進行したものは腐朽箇所でも幹折れしていたが、根返りも多数みられた。

4) 糸川

県道93号線に沿って車中から被害状況を観察し、適宜降車して調査した。溝腐病が進行して幹に開口部がみられたものが多かった。また、開口部の腐朽がさらに進行して幹が大きく変形している個体が多数みられた。1ha未満の小さな被害地が点在し、ほとんどが腐朽した箇所でも幹折れしていた。サンプスギ以外のスギ・広葉樹の根返りや幹折れも確認された。県道に沿って電柱や電線が設置されており、倒木で破損する被害が多数発生した。



図2 腐朽部で発生した幹折れ（戸田；左）および金谷の被害状況（右）

3 考察

4箇所 の被害地を車で移動する際には、数十メートル規模の小さな倒木被害が散見された。このような小さい規模の被害が数多く発生したのが今回の風害の特徴の一つであった。また、海岸沿いばかりでなく内陸部にもブルーシートで屋根を覆った家屋が点在していた。日本版改良藤田スケールによれば、粘土瓦が飛ばされる代表風速が35m/s～45m/s、欠点のない針葉樹に根返りや幹折れが発生する風速が40m/s～50m/sであり、倒木が発生してもおかしくない強風が広範囲に吹いたと考えられた。このような強風環境のなかで、ほとんどの個体が溝腐病に罹病していたと考えられる4か所の被害地において、腐朽が進行した糸川と戸田ではほとんどが幹折れし、腐朽の程度が比較的軽かった中津田と金谷は罹病にも拘わらず根返りが多数混ざって発生した。

以上の台風15号による倒木発生状況をまとめると、広域にわたる強風環境が出現したことにより、溝腐病への罹病の有無とは関係なく倒木は発生した可能性が高い。すなわち、溝腐病に罹病しているかどうかでなく、糸川や戸田のように腐朽が進行していたかどうか、そしてそのような林分が電柱などのインフラ設備に隣接していたかが被害を拡大させた重要な要因であったと考えられた。得られた知見を森林管理に活用するには、腐朽の程度と倒木リスクに関する評価法の開発とその基礎データとして腐朽の程度と幹の強度との関係の解明が不可欠であると考えられた。

引用文献

- 1) 鈴木 寛・重永英年・服部 力(2020)2019年台風15号にともなう千葉県東部から中西部で発生した風害，北方林業（印刷中）
- 2) 小林文明ほか(2020)台風1915号がもたらした強風災害について，風工学会誌 45：30-39

参考文献

- 1) 台風15号の森林被害等の学識経験者による緊急調査(2020.3.1確認)
<https://www.rinya.maff.go.jp/j/saigai/joho/attach/pdf/20190907-5.pdf>

2019年台風第15号による強風被害後の住家等の居住環境

Questionnaire survey for building environment after Typhoon Faxai (2019)

大風 翼*¹, 友清 衣利子*², 菊本 英紀*³, 富永 禎秀*⁴,
 玄 英麗*⁵, 水谷 国男*⁶, 中嶋 唯貴*⁷, 西嶋一欽*⁸

Tsubasa OKAZE, Eriko TOMOKIYO, Hideki KIKUMOTO, Yoshihide TOMINAGA
Yingli XUAN, Kunio MIZUTANI, Tadayoshi NAKASHIMA, Kazuyoshi NISHIJIMA

This paper reports the results of a post-disaster survey in Chiba Prefecture after Typhoon No. 15 (Faxai) on Sept. 9, 2019. In addition to damage surveys of houses caused by strong winds, questionnaire surveys on the living environment were also conducted, which inquired about the presence or absence of electricity or water, the behaviors of residents during the period of electricity outage or water outage, and the change of the living environment after the disaster. Electricity outage occurred in more than 90% of the houses included in the survey. It was found that more residents stayed at their houses during the period of electricity outage. For fire safety precaution after recovery from electricity outage, a local government informed their residents to shut off the circuit breaker, and therefore, in such areas, more houses took the above measurement in comparison with those did nothing. It can be considered that the information provided by the local government had a certain effect. As the damage of roof becomes severe, the number of houses responding to “water leakage” increases, which is the reason to cause the change of the living environment with “fusty smell”, “damp”, and “leakage of rainwater”. When the damage ratios of the roof were 10% and 25%, the response rate to “water leakage” were 30% and 50%, respectively. In many cases, the level of damage to the living environment, such as water leakage inside walls, cannot be estimated from the external appearance. These kinds of damage make the survey feel more difficult in comparison with the structural damage of the building by visual check.

Keywords : *Questionnaire survey, Building Environment, Electricity Outage, Water Outage, Leak*

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 准教授・博士(工学)	Assoc. Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Ph.D. (Eng.)
*2 熊本大学大学院先端科学研究部 准教授・博士(工学)	Assoc. Prof., Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University, Ph.D. (Eng.)
*3 東京大学生産技術研究所 講師・博士(工学)	Lecturer, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Ph.D.(Eng.)
*4 新潟工科大学工学部 教授・博士(工学)	Prof., Faculty of Engineering, Niigata Institute of Technology, Ph.D. (Eng.)
*5 東京工芸大学工学部 助教・博士(工学)	Assist., Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, Ph.D. (Eng.)
*6 東京工芸大学工学部 教授・学術博士	Prof., Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, Ph.D.
*7 北海道大学大学院工学研究科 准教授・博士(工学)	Assoc. Prof., Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Ph.D. (Eng.)
*8 京都大学防災研究所 准教授・博士	Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Doctor of Sciences

1. はじめに

2019年9月9日午前5時前に千葉市付近に上陸した台風15号によって、千葉県を中心とした関東地方に甚大な被害が生じ、千葉県では70,000棟以上の住宅が被災した。建物の全壊、半壊数を見ると、特に、千葉県南西部の内房、館山市、南房総市、鋸南町での被害が大きい^{1,2)}。台風や突風による災害が生じると、災害発生のメカニズムの解明や人的・物的被害の実態解析のための総合調査が実施されることが多く、最近では、2018年の台風21号による近畿地方の被害状況について、報告書が取りまとめられている³⁾。この報告書では、建築物の被害の大きかった泉佐野市の500m四方の領域において、悉皆調査を実施し、住宅の被害状況と被害拡大に及ぼす影響について調査・分析も行われている。2006年の北海道佐呂間町での竜巻災害後には、人的被害と生活状況の変化について心理的側面からの分析も行われている⁴⁾。一方、災害後の住宅の被害や停電・断水などのライフラインの遮断に伴う居住環境の影響については、東日本大震災後の津波による浸水域での床下空間や壁体内部の乾燥状況と室内の空気環境等の関係について大規模なアンケート調査を基にした研究が行われている⁵⁾が、強風災害後に住環境に着目して、悉皆調査等を行った研究はほとんどない。本報では、住宅の強風による被害調査に加え、停電・断水の有無、それらが遮断された際の居住者の行動、災害の居住環境の変化について住環境に関するアンケート調査を行ったので、その結果を報告する。

2. 現地調査の概要

2019年11月8日から11日までの4日間に、千葉県鋸南町、南房総市、館山市の一部地域を対象に、現地での聞き取り調査を行った。調査は、台風による住宅への被害調査と同時に実施し、表1に示すとおり調査住宅は計1976件の内、住環境によるヒアリングを行ったのは366件(19%)である。

表1 調査住宅及びヒアリング対象数

	合計	鋸南町	南房総市	館山市
調査対象住宅(件)	1976	560	632	784
うちヒアリングあり(件)	366	108	60	198

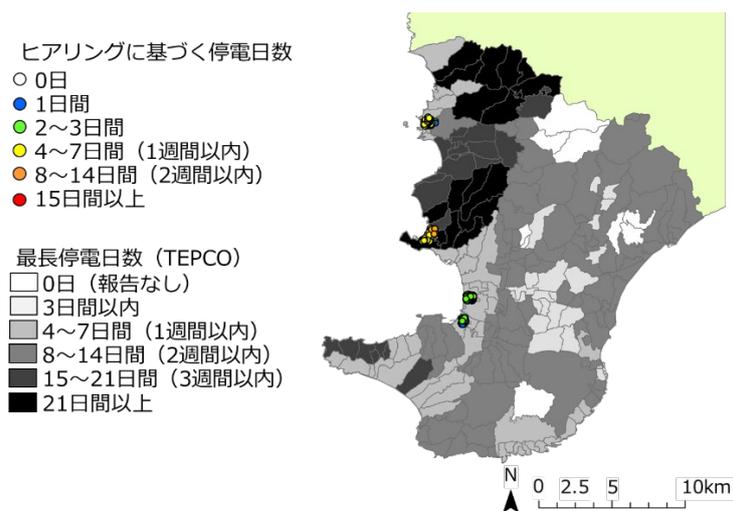


図1 地域ごとの停電日数⁶⁾

表2 ヒアリング調査項目

調査項目		選択肢							
①	ヒアリングの有無	はい	いいえ						
②	ヒアリング対象者	家主	隣人	不明	その他				
③ 1	停電の有無	はい	いいえ						
A	停電日数	1日間	2日間	3日間	4日間	5日間	6日間	8日間	9日間
		10日間	11日間	12日間	13日間	14日間	15日以上		
B	停電時に過ごした場所 (複数回答可)	自宅	避難所	自家用車内	知人宅	その他			
C	どのように過ごしたか (複数回答可)	懐中電灯、ろうそくを使用	太陽光発電による電気の使用	自家用発電機による電気の使用	その他				
D	実施した通電火災予防対策 (複数回答可)	避難時のブレーカーの遮断	電気器具をコンセントから抜く	暖房器具の周辺に可燃物をおかない	行っていない	その他			
2	断水の有無	はい	いいえ						
A	断水日数	1日間	2日間	3日間	4日間	5日間	6日間	8日間	9日間
		10日間	11日間	12日間	13日間	14日間	15日以上		
B	断水時の水の調達、利用の工夫 (複数回答可)	給水所	井戸水	河川から汲んだ	浴槽の貯水利用	雨水	トイレ等には水を使わず、飲料水のみ調達	その他	
C	給水所に行った場合の1日あたりの給水量	1L	2L	2~5L	5~10L	10~15L	15~20L	20~30L	30~50L
		50L以上							
3	被災後の住環境の変化 (複数回答可)	カビ臭い(カビが生えた)	埃っぽい	ジメジメする	乾燥している	暑い	寒い	特になし	その他

図1は、東京電力パワーグリッド(以下、TEPCO)の停電情報による2019年9月8日から10日に発生した停電について、地域内の停電日数^⑥を示したものである。調査は、鋸南町、南房総市、館山市のいずれにおいても、最長停電日数が3週間以上だった地域で実施した。

3. 調査結果

3.1. 停電・断水の状況と住民の行動

図2及び図3に、ヒアリング対象住宅の停電及び断水の有無を示す。いずれの地域も調査を行った住宅の9割以上が、停電となっていた。一方、断水については、今回のヒアリング対象では、館山市の4戸のみであった。内閣府の防災情報ページの報告^⑦によると、電力の最大供給支障戸数は約934,000戸に対し、水道の総断水戸数は139,744戸と1/7程度であり、このうちおよそ80,000戸は停電に伴う同一の浄水場の機能停止によるものであった。また、いずれの断水も停電によるものと報告されている。地震による断水とは異なり、埋設管の損傷がないため、断水のあった多くのエリアで断水後2、3日以内に復旧し、最も遅かった地域でも9月25日に復旧している。今回のヒアリング対象住宅の大部分は、停電があったものの、断水はなかった住宅である。今回ヒアリング対象とした鋸南町で最大230戸、南房総市で最大6,800戸、同一企業団による館山市と南房総市の給水エリアで最大169戸の断水の報告があったが、増圧ポンプを必要としない戸建て住宅では、停電時でも多くの住宅で浄水が利用可能であった。

停電の日数を図4に示す。全体で見ると、およそ7日間以内にほぼ停電が解消されているが、15日以上停電が続

いた住宅もわずかながらあった。地域別にみると、館山市では2, 3日間停電した件数が多く、1日目で解消した住宅も25%程度あり、3日目までで順次停電が解消されていったと考えられる。一方、鋸南町、南房総市は各々5日間、7日間に回答の半分程度が集中しており、各々の日数を復旧におおよそ要したと考えられる。

図5は、TEPCO発表⁹⁾による小地域毎の最長停電日数とヒアリングに基づく停電日数の分布である。(1)の鋸南町の調査地域では、TEPCO発表によると、停電日数は4~7日間ないし8~14日間であるが、ヒアリングにおいても概ね4~7日間で調査地域の停電が解消されていたことがわかる。(2)の南房総市では、TEPCO発表によると、15~21日間ないしそれ以上の停電があった地域であるが、ヒアリング調査によると4~7日間で6割程度、8~14日間までで9割程度の停電が解消されており、TEPCO発表の停電日数より早く停電が解消された住宅が多い。特に調査地域の南部はTEPCOによる最長停電日数が21日以上であるが、多くの住宅が、4~7日間で復旧していた。(3)の館山市では、調査を行った地域は、TEPCO発表の小地域毎の最長停電日数で、4~7日間の地域であったが、南部の方は、停電のなかった住宅ないし1日で復旧した住宅がおおよそ半数で、2~3日間ですべてが復旧していた。北部の方は、多くが2~3日で復旧したが、一部、TEPCO発表の4~7日間を超える停電のあった住宅もあった。全体的には、TEPCOの発表した小地域の停電日数よりも早い段階で、停電が解消された住宅が多かった。停電期間は概ね市・町単位で特徴づけられるが、同市内・町内、あるいは近接する住宅間でも、停電の有無や期間に大きな違いがある場合も見受けられ、個別の停電の要因に関しては更なる精査が必要となる。

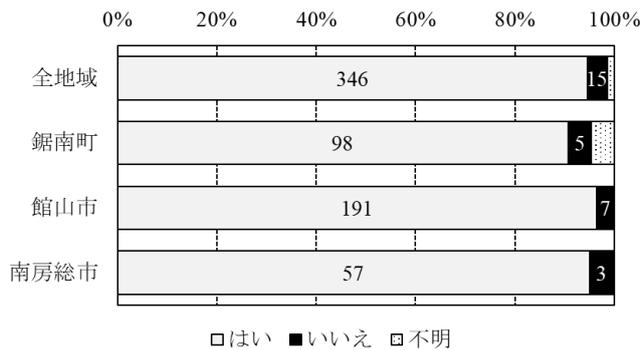


図2 停電の有無

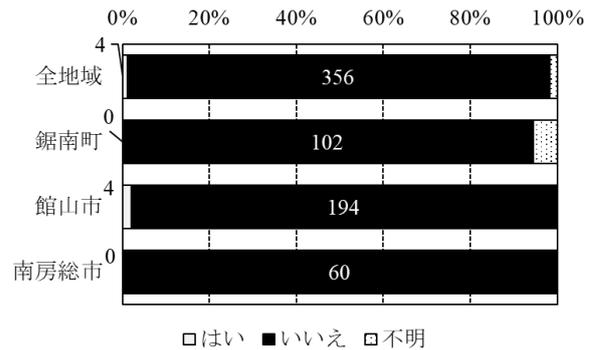
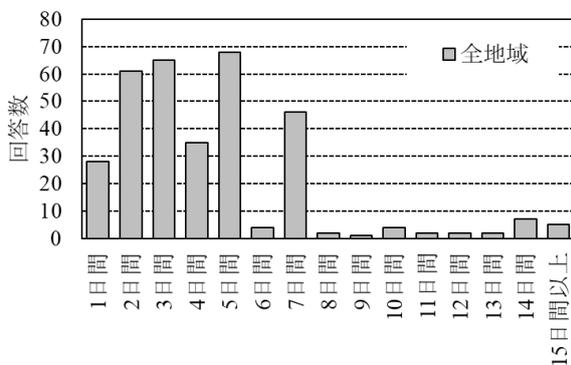
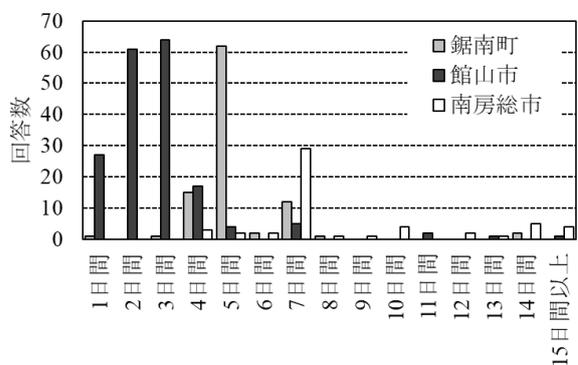


図3 断水の有無



(1) 全地域



(2) 調査地域別

図4 停電日数

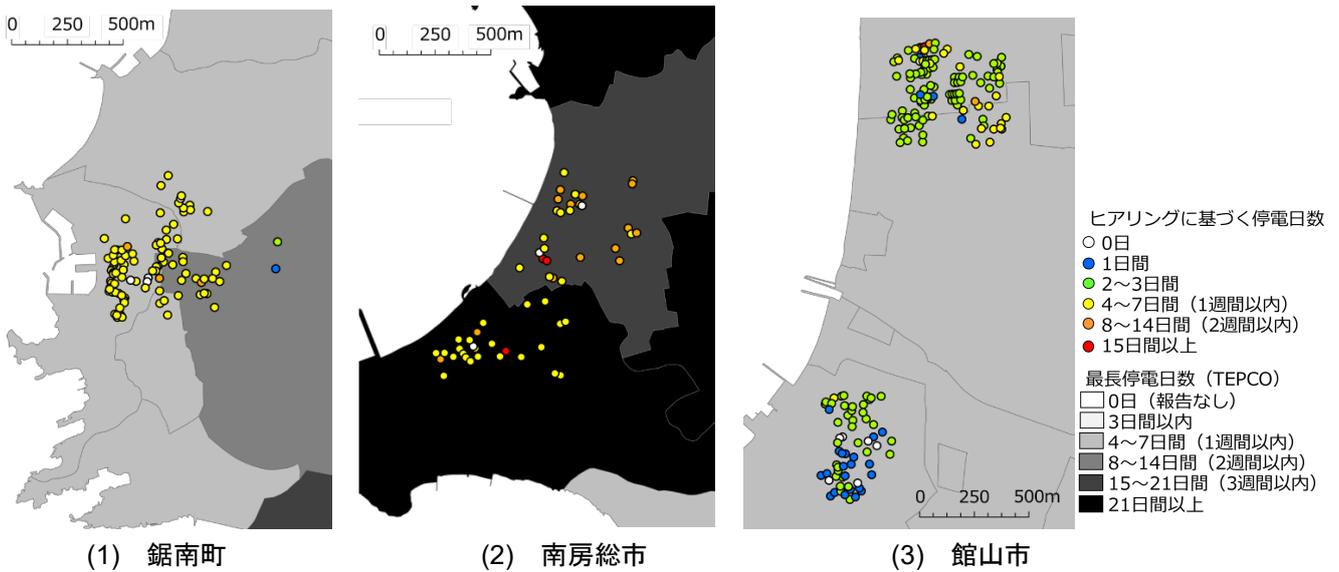


図5 TEPCO発表⁶⁾による小地域毎の最長停電日数とヒアリングに基づく停電日数

図6に停電時の住まい、図7に停電時に自宅で過ごした場合の過ごし方の回答数を示す。全地域では約90%の人が自宅で過ごしたと回答した。次いで知人の家、避難所で過ごしたという回答がみられた。鋸南町での調査では、停電よりも屋根等への被害とその後の雨漏りの問題から自宅で過ごすことが困難になった、という住宅もあった。鋸南町、南房総市では多くの住宅で4~7日間停電しているが、避難所を利用したという人は非常に少ない。調査地域は戸建住宅が中心で、電力への依存度が都市部ほど高くなく、自宅で過ごせたと考えられる。図3にも示したように、今回ヒアリングを行った住宅では、断水は殆どしておらず、地震などの電気、ガス、水道のインフラが遮断され、余震の懸念もある災害とは、災害後の状況が違っていたと言える。停電中は懐中電灯等を利用して過ごしたという住宅が多く、自家用発電機を所有していた住宅は10%に満たなかった。台風15号後に自家用発電機を調達して、台風19号に間に合ったという例も1件あった。日中は屋根に設置された太陽光発電を利用して過ごしたという住宅も数件みられ、住宅の屋根上の太陽光発電パネルは台風15号による強風では損壊しておらず、停電時の電源として利用できることが確認された。なお、館山市では下水道の普及率が低い地域もあり、浄化槽が使われている住宅も多かったが、停電で浄化槽のエアープンプが停止しても、排水を流すことは可能で、トイレ等の使用に支障はなかったとの回答があった。しかし、停電時は浄化槽の浄化機能は低下していた模様で、周辺の排水口から臭気が発生していたとの回答もあった。

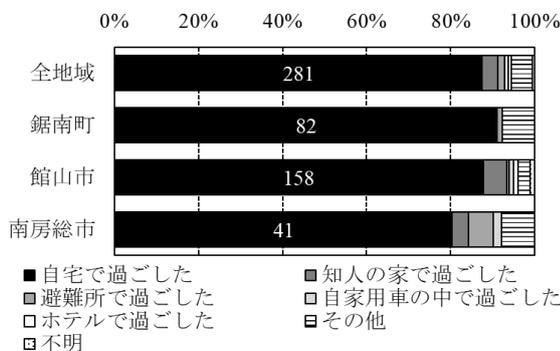


図6 停電時の住まい

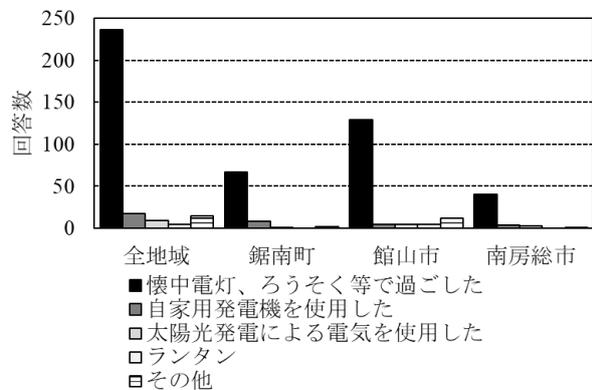


図7 停電時に自宅で過ごした場合の過ごし方

停電のあった住宅で、通電火災対策の実施状況の聞き取りをした結果を図8に示す。通電火災対策は何も行っていない住宅が半数近くあったが、分電盤のブレーカーを遮断したという住宅も同じく半数近くあった。鋸南町では特に分電盤のブレーカーを遮断したという回答が何も行っていないという回答の2倍程度あったが、町役場からの同対策を推奨するアナウンスを聞いて実施した、という例が多く聞かれた。行政からの情報発信により、通電時の適切な行動が促された可能性が高いことがわかった。

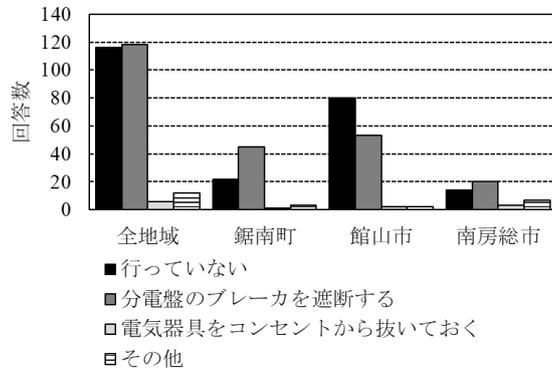


図8 通電火災対策

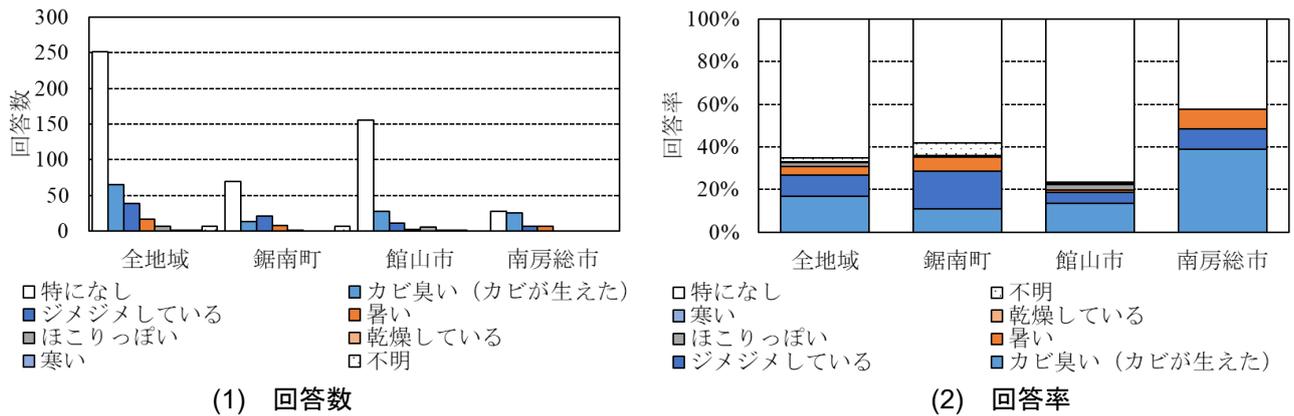


図9 台風後の住環境のアンケート

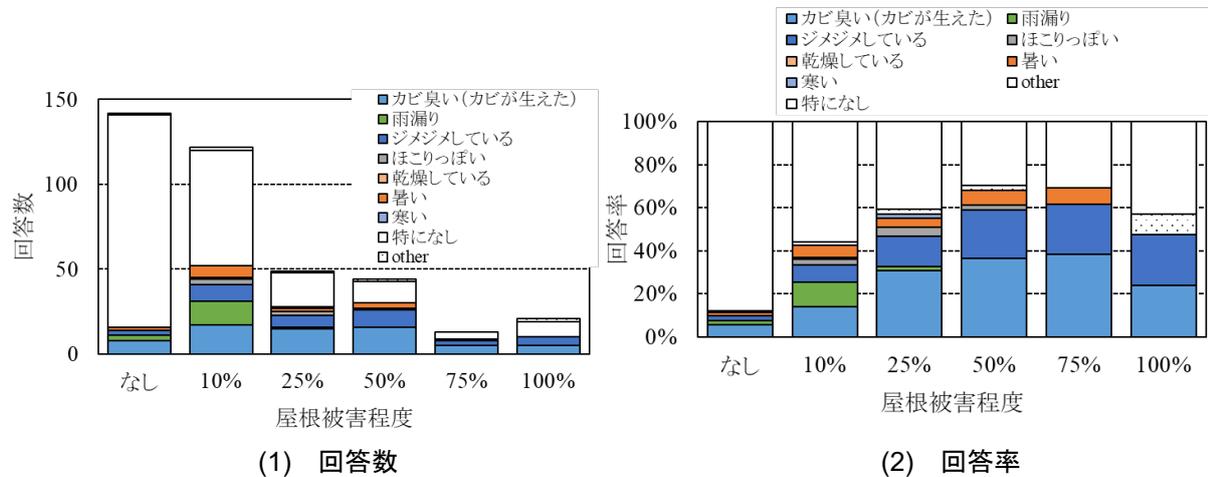


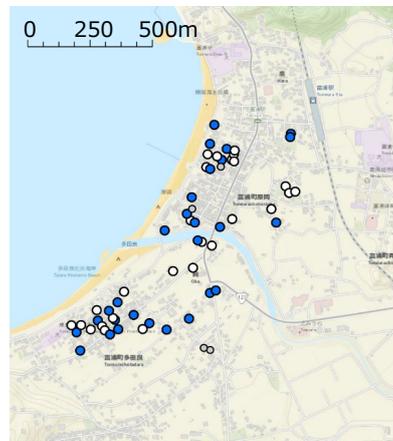
図10 屋根被害程度とアンケートの回答

3.2. 被災後の住環境の変化

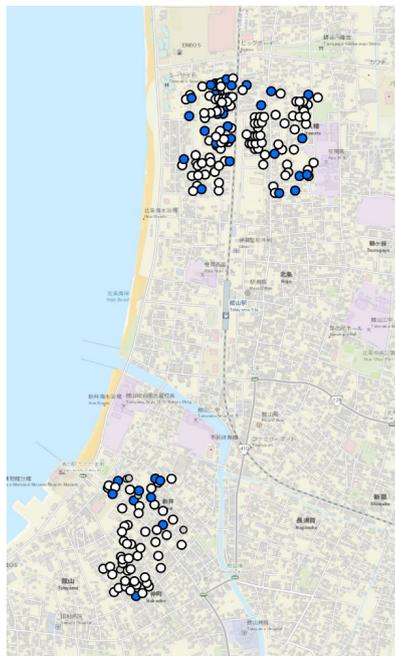
図9に、台風後の住環境のアンケート結果を示す。半数超は、台風前後で住環境の変化は特にないと回答した。しかし、変化があったと回答した住宅においては、カビ臭いやジメジメしている等湿気に関する回答が多い。図10に、屋根被害程度(屋根面積に対する被害を受けた部位の面積の比)毎の回答数を示す。その他で回答したもののうち、雨漏りに関連するものは、「雨漏り」のカテゴリを新たに作り、そこに分類した。湿度環境悪化に関係すると思われる「カビ臭い」、「ジメジメしている」、「雨漏り」と回答した割合は、屋根被害程度とともに増加しており、屋根被害程度が10%で3割程度、25%で半数、50%で6割程度となっている。建物の屋根・外壁および窓の損壊とそれに伴う雨漏り・雨の吹込みの影響で壁体内に高湿度環境が形成され、「カビ臭い」、「ジメジメしている」との回答につながっていると考えられる。また、屋根の被害がない住宅でも、1割程度が「カビ臭い」、「ジメジメしている」、「雨漏り」と回答している。この1割程度うち、屋根被害程度、外壁面被害程度も回答が得られた住宅は12戸で、うち5戸は壁面や開口部の建物外皮の損傷も見られたが、残りの7戸については、外皮の損傷はなかった。



(1) 鋸南町



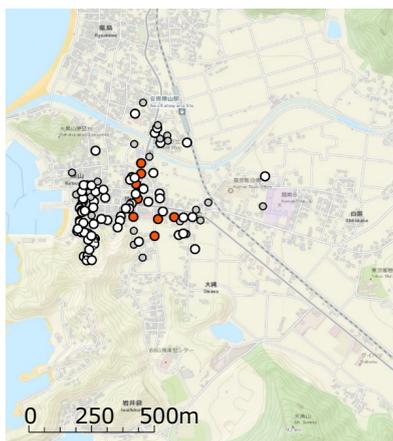
(2) 南房総市



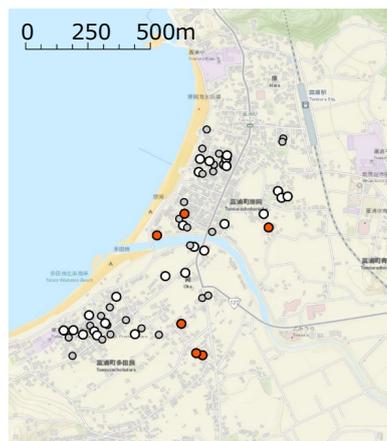
(3) 館山市

- 特になし
- 「ジメジメしている
カビ臭い (カビが生えた)
雨漏り
- その他
- 不明

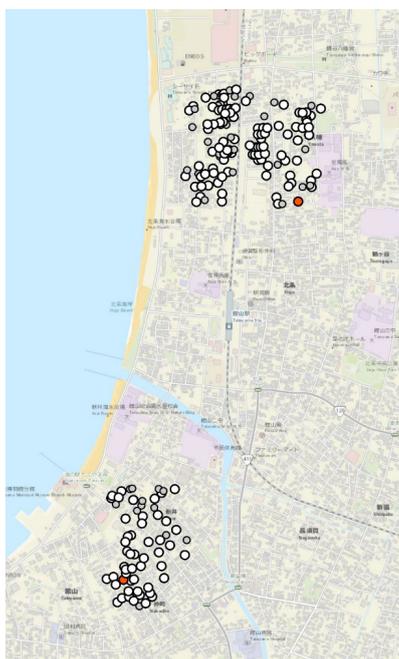
図11 湿度環境悪化に関する回答の有無の分布



(1) 鋸南町



(2) 南房総市



(3) 館山市

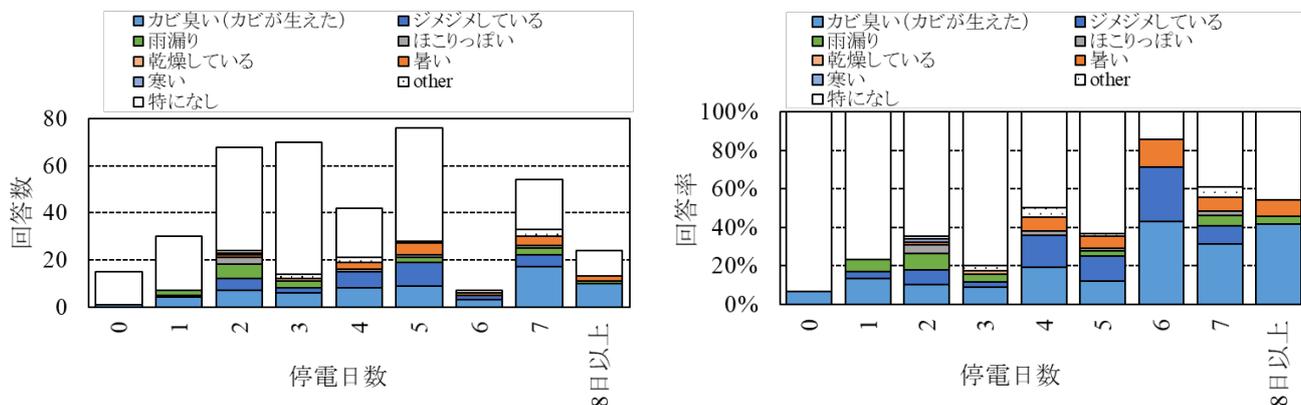
- 特になし
- 暑い
- その他
- 不明

図 12 暑さに関する回答の有無の分布

鋸南町での調査では、建物外皮に特に目立った損傷はないが、台風通過時にわずかながら雨漏りがあったという事例が1件あり、その後の雨等では雨漏りは生じず、特に影響がないということであった。窓の破損による雨の吹込みや雨漏りが生じた住宅において、その後、補修によって表面上は影響がないように見えるものの、壁内部でのカビの発生状況は確かめるすべがないという回答も得られた。外皮の損傷がないにもかかわらず、雨漏りが生じる原因については、雨戸の締め忘れのほか、強風による軒下や換気口への雨水の吹込みなども考えられるが、雨漏りの詳しい発生状況の調査や原因の分析は今後の課題である。

「カビ臭い」、「ジメジメしている」について、「暑い」との回答もみられた。図 12 に示す「暑い」と回答したアンケート結果の分布を見ると、「暑い」と回答した住宅は点在しており、今回調査した3地域間での気候の差や地域内での微気候の影響は少ないと考えられる。図 13 に停電日数とアンケート結果の関係を示す。停電日数が4日以上で「暑い」と回答する割合が増えていることがわかる。図 14 は、最寄りの AMeDAS(館山)の9月8日以降15日間の日平均、日最大、日最低気温の変化である。9月11日までは、日中の最高気温が30℃を超え、熱帯夜となって

いたが、9月12日以降は、日最高気温が30℃に達しない日がほとんどであり、停電日数が4日以降（停電は、9月9日の未明に発生）、顕著に気温が高かったわけではない。被災後、数日が経過し、生活が落ち着いてきた段階で、停電により扇風機やエアコンが使えなかったということが、「暑い」との回答につながったとも考えられる。停電3日目までは AMeDAS によると実際暑かったと推察されるが、停電日数が3日以下だった住宅は、多少不便さを抱えながらも、2、3日で電力状況は改善され、暑かったという記憶がアンケート時には薄れていた可能性がある。千葉県防災危機管理部の令和元年台風15号（第117報）及び台風19号（第60報）について²⁾、によると台風15号による千葉県内での人的被害（死者）は、2件報告されており、いずれも災害関連死である。うち1件は、南房総市で9月10日に発生しており、「停電による熱中症の疑いで死亡」とされている。図14の最寄りの AMeDAS(館山)によると、10日の日中の最高気温が32℃以上となっており、停電による冷房設備が使えない状況下では、熱中症のリスクが高まっていたと考えられる。もう1件については、「停電が発生し、被災者が自宅にて酸素吸入器から携帯用の酸素ボンベの利用に切り替えようとした途中で倒れ死亡したと推測される。」と状況が述べられている。いずれの人的被害も台風の直接的な要因ではなく、停電に伴うものであり、停電時の熱中症などの複合災害対策や在宅医療対策は、今後の課題であろう。



(1) 回答数

(2) 回答率

図13 停電日数ごとの住環境アンケートの結果

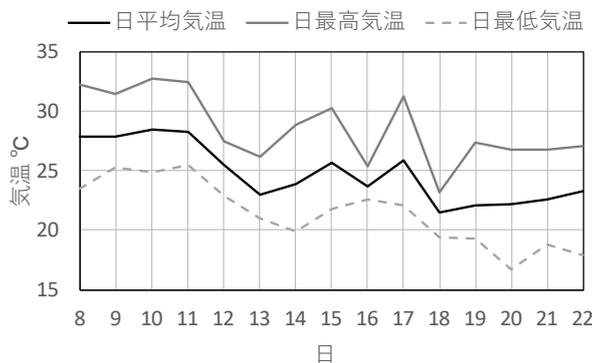


図14 9月8日以降15日間の AMeDAS（館山）の気温の変化

4. まとめ

本報では、住宅の強風による被害調査に加え、停電・断水の有無、それらが遮断された際の居住者の行動、災害の居住環境の変化について住環境に関するアンケート調査を行った。対象住宅の9割以上で停電していたが、停電時も自宅で過ごす住民が多かった。通電時の火災対策は、ブレーカーを遮断する対策が行政より情報提供されていた地域もあり、その地域では、何もしていない住宅よりもブレーカーを遮断する対策を行った住宅が多く、行政の情報が一定の効果を上げていると考えられる。屋根被害程度が大きくなるほど、住環境の変化として「カビ臭い」「ジメジメしている」「雨漏り」と回答する住宅が増加した。住環境に対しては建物外皮の損傷とそれに伴う雨の影響が大きい印象を受けた。一方、屋根に被害がない場合でも、同様の回答をした住宅も1割程度見られた。住環境の調査は、外見では被害の程度が分からない場合が多く、また居住者に詳しく話を聞かないと不明な点も多い。壁体内部の漏水に関する状況や温熱環境などの住環境の変化は必ずしも目視できず、構造的見地からの調査よりも難しいと感じた。

台風15号(9月9日)のおよそ1か月後(10月12日)には広範な地域に記録的な大雨をもたらした台風19号が到来している。また、本調査を行った11月時点でも補修を行っていない住宅が多数を占め、当然台風19号が到来時にはより多くの住宅において補修が行えてない状況であったと考えられる。また、台風15号で屋根等が損壊した住宅においてブルーシートで損壊部を簡易的に保護したものの、台風19号の強風でブルーシートが飛散し、雨漏りを防げなかったという事例も聞かれた。当然のことながら、建物外皮の損壊に対して、迅速かつ効果的な対策が、その後の住環境への影響を低減においても有効であると考えられる。住環境という目的に限定すれば、Webや紙によるアンケートの方が(あるいは併用)サンプルを多く得る意味では有効と思われる。また、その後の冬期の住環境がどうだったかなど、長期的な視点での調査も今後の課題である。

参考文献

- 1) 内閣府: 令和元年台風第15号に係る被害状況等について(12月5日17:00現在)、内閣府防災情報のページ、http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon15/pdf/r1typhoon15_30.pdf
- 2) 千葉県防災危機管理部: 元年台風15号(第117報)及び台風19号(第60報)について(2020年3月5日14時発表)、<http://www.bousai.pref.chiba.lg.jp/portal/servlet/servlet.FileDownload?file=00P0o00002AOxIUEAT>
- 3) 丸山ほか: 平成30年台風21号による強風・高潮災害の総合研究, 平成30年度科学研究費助成事業 研究成果報告書(別冊), 2019
- 4) 大澤 元毅, 柳 宇, 東賢一, 鍵直樹, 池田耕一, 長谷川兼一: 研究概要と対策状況・動向に関する調査水害による住宅の被害と健康影響に関する研究(その1), 2012年度日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, 591-594, 2012
- 5) 笠原裕作, 植松康, 高橋章弘, 南慎一, 堤拓哉: 2006年11月7日北海道佐呂間町で発生した竜巻災害に関する住民アンケート調査—その2 人的被害と生活状況の変化について—, 本建築学会大会学術講演梗概集, 都市計画, pp.341-342, 2008
- 6) 東京電力パワーグリッド, 停電情報, <http://teideninfo.tepco.co.jp/>

リモートセンシングによる建築物屋根被害分布の把握

Detection of damage to houses' roofs using remote sensing imagery

劉ウエン*1, 丸山喜久*2, 石井和樹*3

Wen LIU, Yoshihisa Maruyama, Katsuki ISHII

This study reports on the damage detection of houses' roofs using satellite optical images, aerial photographs and UAV photos. The extraction of blue sheets covering on damaged roofs was conducted using the different remote sensing data respectively. The damage ratio of roofs in Kyonan district, Minamiboso and Tateyama cities in Chiba Prefecture was calculated in a 100 m mesh unit using the pre- and post-event satellite optical images. Those ratio in a building unit was obtained using the post-event aerial photos. In addition, the details of the damaged roofs were observed from the post-event UAV mosaic images. Finally, the results obtained using the satellite optical images and aerial photos were compared with the maximum instantaneous wind speeds. According to the comparisons, the percentage of the roofs with the damage ratio over 20% increased as the maximum instantaneous wind speed went larger.

Keywords : *Pleiades satellite images, aerial photographs, UAV images, damage ratio of roofs, maximum instantaneous wind speeds*

1. 衛星画像による屋根被害検出

2018年3月2日と2019年10月13日（台風通過34日）に撮影したPleiades衛星光学画像を用いて、屋根上のブルーシートを抽出し、台風による屋根被害の把握を行った。検出範囲は図1(a)に示す千葉県鋸南町、南房総市と館山市の西海岸である。使用したPleiades画像は、0.5mの解像度に合成された簡易オルソ化の4バンド画像である。事後画像を基準に、事前画像をサブピクセルベースでの位置合わせを行った。位置合わせの後、鋸南町における事前・事後画像の一部拡大図は図1(a)に示す。位置合わせを行っても、撮影時の観測角度が異なっていたため、同一建物が事前・事後画像における位置にズレが生じている。事前・事後画像を用いた直接の比較は困難である。

また、建物屋根の形状を把握するために、OpenStreetMap¹⁾が公開した建物の輪郭データをダウンロードした。ビニルハウスなど建築物以外のものを除いて、鋸南町の5,374棟、南房総市の15,118棟、館山市の37,025棟の建物が対象範囲内にある。しかし、建物の輪郭データは事前・事後のPleiades画像上の建物と一致しない部分が多かった。そこで、建物ごとの被害判定ではなく、100mメッシュにおける屋根の損傷率を算出した。100mメッシュは3次メ

*1 千葉大学大学院工学研究院 助教・工博

Assist. Prof., Graduate School of Engineering,
Chiba University, Dr.Eng.

*2 千葉大学大学院工学研究院 助手・工修

Prof., Graduate School of Engineering,
Chiba University, Dr.Eng.*3 千葉大学工学部都市環境システムコース 学
士（工学）Grad. Student, Dept. of Urban Environment and Systems,
Chiba University, B.Eng.

ッシュの 1/10 細分区画を利用した。対象範囲内に、建物が存在するメッシュは計 5,318 である。

屋根損傷率の算出方法は図 3 に示す。罹災証明発行の指針となる「災害に係る住家の被害認定基準運用指針 風害編」²⁾によると、屋根の損傷率は以下式から算出される。

$$\text{損傷率} = \frac{\text{損傷屋根面積}}{\text{全屋根面積}} \times \text{各部分の損傷程度(\%)}$$

しかし、台風通過 1 ヶ月以上経過したため、損傷部はほとんどブルーシートに覆われて、損傷程度の判定は困難である。台風前後の衛星画像からバンドの演算よりそれぞれの青屋根を抽出し、台風後の抽出面積から台風前の抽出面積を除いて、台風後増えたブルーシートの面積とみなす。また、メッシュ内に抽出されたブルーシートの面積と建物の屋根（輪郭）面積の割合が屋根の損傷率として計算した。図 2(a)から抽出された青屋根を図 2(b)に示し、100 メッシュにおける損傷率の算出結果を図 4 に示す。

対象地域全体の検出結果を図 1(b)に示す。鋸南町と館山市の洲崎に損傷率が 30%以上のメッシュが集中していた。一方、南房総市の岩井海岸と館山市の北条海岸では比較的損傷率 10%以下のメッシュが多かった。日本気象協会の強風再現解析で得られた最大瞬間風速とメッシュごとの損傷率の関係を調べた。鋸南町、南房総市と館山では、9 月 9 日の早朝 2 時から 4 時までの間が最も風速が高かった。その時間帯において各メッシュの最も高い最大瞬間風速を使用した。メッシュの損傷率 R が 10%未満、10%以上 20%未満と 20%以上の 3 ランクに分けた。最大瞬間風速とメッシュ損傷率のグラフを図 5 に示す。風速が大きくなるにつれ、20%以上の損傷率を持つメッシュの割合が上昇する傾向がみられた。

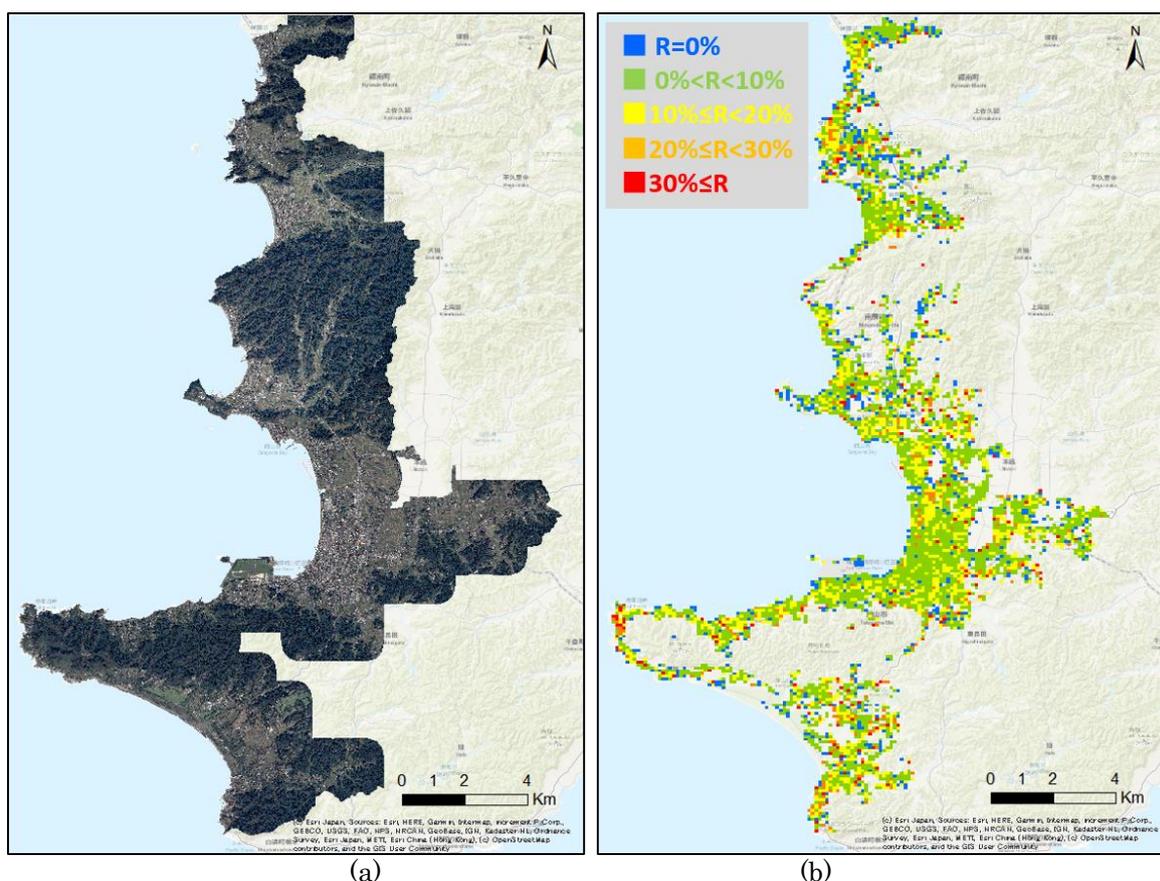


図 1. Pleiades 衛星画像を用いた屋根の損傷検出の対象範囲 (a) と青屋根の抽出により算出された 100m メッシュごとの屋根損傷率 (b)



(a) 事前・事後の衛星画像

(b) 建物輪郭と青屋根の抽出結果

図 2. 鋸南町の一部拡大衛星画像(a)とそれぞれ抽出された青屋根(b); OpenStreetMap からダウンロードした建物輪郭は黄色枠で示す。

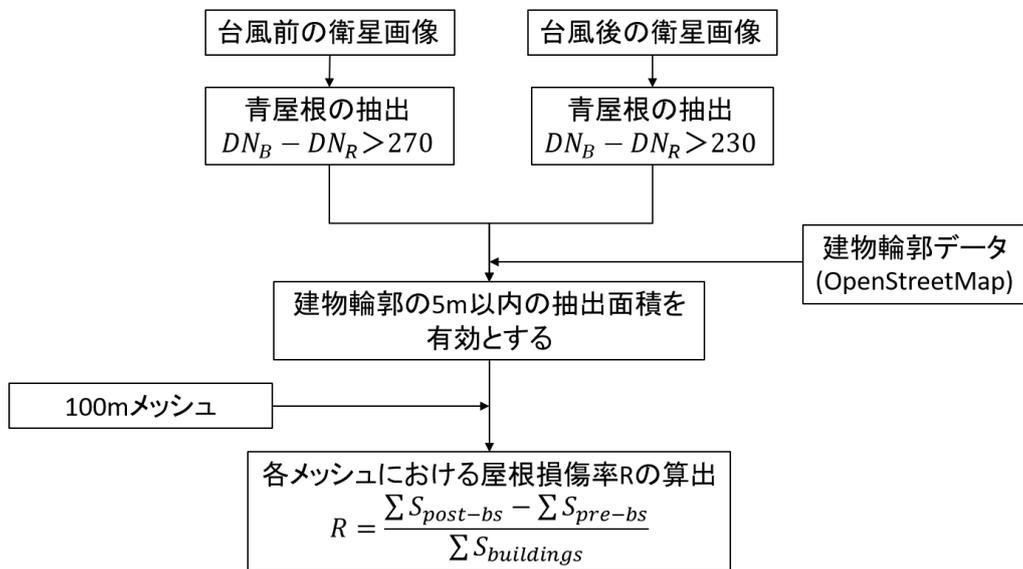


図 3. 100m メッシュごとの屋根損傷率の算出フローチャート。ここ、DN は画像のデジタルナンバー値、S は面積を表す。



図4. 図2に示す衛星画像から抽出された青屋根を用いて算出した100mメッシュの屋根損傷率

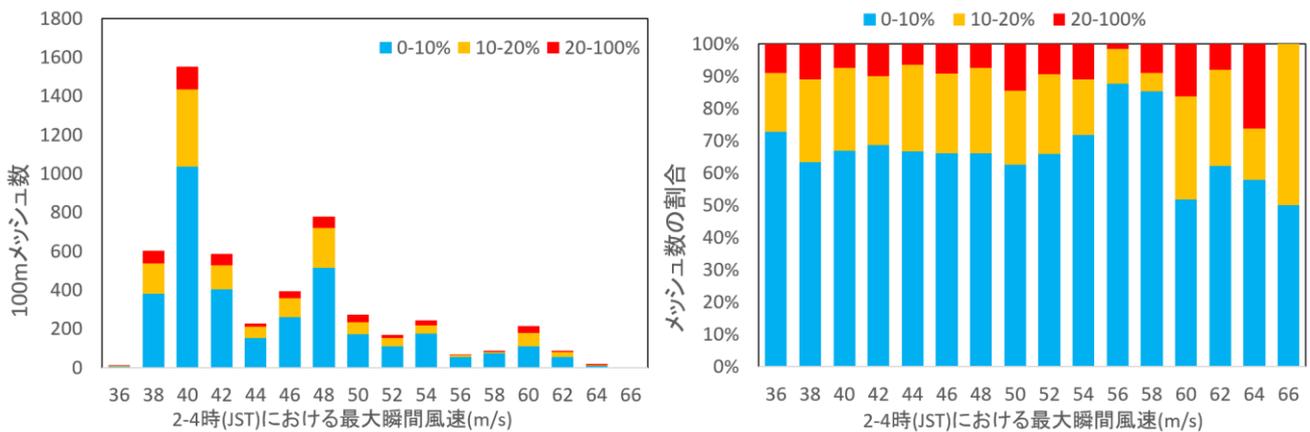


図5. 最大瞬間風速ごとにおける屋根損傷率別のメッシュ数とその割合

2 航空写真による屋根被害の検出

2019年9月19-20日に国際航業と9月27-28日に朝日航洋が撮影した航空写真を用いて、建物ごとの屋根損傷率を検出した。対象範囲は図6(a)に示す。鋸南町と南房総市の北部を撮影した航空写真は20cm解像度のもの、南房総市岩井海岸と館山市を撮影した航空写真は10cm解像度のものである。すべての航空写真は地形データを用いて簡易オルソ化されていた。撮影カメラと撮影日の違いにより、屋根上ブルーシートの抽出に異なる係数を用いた。朝日航洋の航空写真では影が少なく、3つのバンドの情報を利用してブルーシートの抽出を行った。一方、国際航業の航空写真には濃い影が多く存在し、朝日航洋の航空写真と同様な係数を使用すれば影の誤抽出が多かった。そのため、国際航業の航空写真では青と赤のバンドのみ用いた係数を使用した。それぞれの画像におけるブルーシートの抽出条件は以下のようになる。

朝日航洋の航空写真：

$$\frac{(2 \times DN_B - DN_G - DN_R)}{(DN_B + DN_G + DN_R)} > 0.06$$

国際航業の航空写真：

$$\frac{255 \times (DN_B - DN_R)}{DN_R} > 22.0$$

建物の輪郭データは衛星画像と同様に OpenStreetMap のものを使用した。図 2 に示す同地域における朝日航洋の航空写真を図 7(a) に示す。航空写真は衛星画像に比べて、解像度が高いため屋根上ブルーシートが容易に認識できる。また、建物輪郭との一致度が高く、位置ずれが 2m 以内であった。そのため、輪郭内に抽出されたブルーシートの面積と建物屋根面積（輪郭内面積）の割合を屋根損傷率とした。図 7(b) に示すように、3 バンドの演算による求められた係数はブルーシートの抽出に有効であり、ブルーシートがほぼ抽出できた。一方、事前の情報がないため、バンド演算のみでは青屋根とブルーシートの区別ができず、損傷率の過大評価が問題である。前節に使用した Pleiades 衛星の事前画像から抽出された青屋根と照合し、一部の青屋根による誤抽出を目視で修正した。国際航業が撮影した館山市の一部航空写真の拡大図を図 8(a) に示す。青と赤バンドの演算により抽出されたブルーシートを図 8(b) に示す。朝日航洋の航空写真と比べて影による誤抽出が多くなったものの、ブルーシートがほぼ抽出できた。朝日航洋の航空写真と同様な係数を使用した場合、建物屋根上の影がすべて誤抽出されたため、青と赤バンドのみ使用した係数の方が高精度であった。

屋根の損傷率は以下の式で求めた。抽出されたブルーシートの面積が損傷屋根の面積とみなし、建物屋根面積との割合から屋根の損傷率を算出した。

$$\text{損傷率} R = \frac{\text{損傷屋根投影平面積}}{\text{全屋根投影平面積}}$$

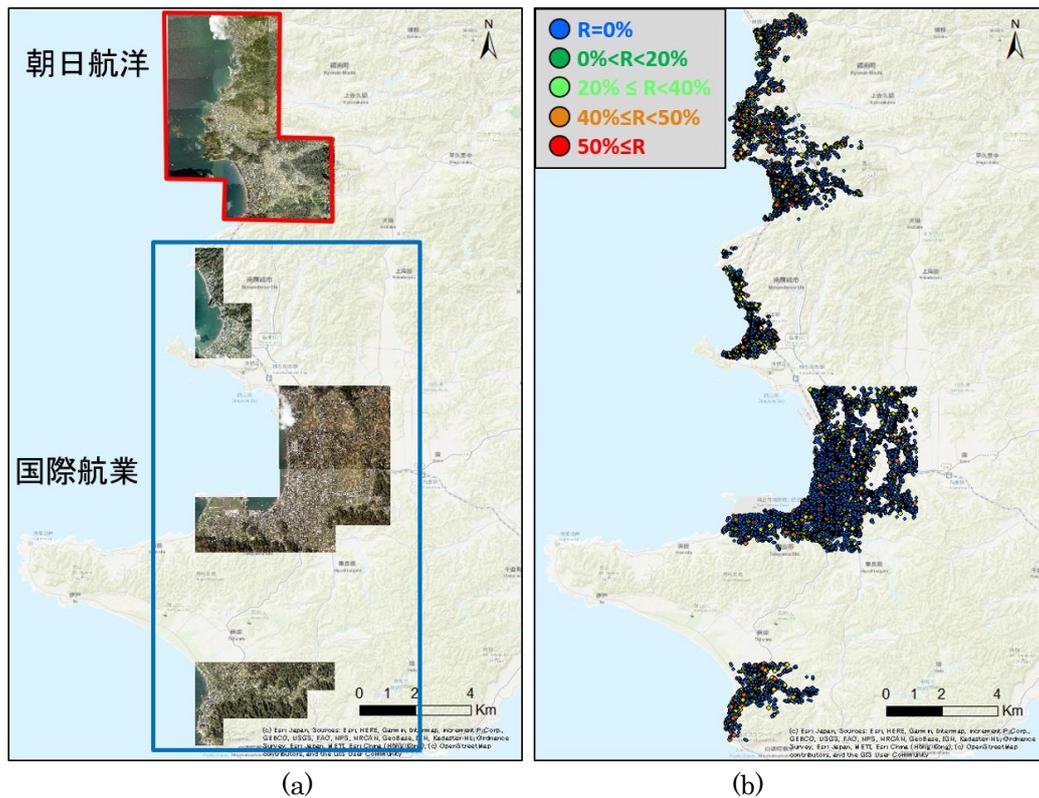


図 6 航空写真を用いた屋根損傷検出の対象範囲 (a) とブルーシートの抽出により算出された建物ごとの屋根損傷率 (b)



図7 鋸南町の一部拡大衛星画像(a)；抽出されたブルーシートと OpenStreetMap の建物輪郭(b)；ブルーシートの抽出結果から算出した屋根損傷率の区分(c)



図8 館山市の一部拡大航空写真(a)；抽出されたブルーシートと OpenStreetMap の建物輪郭(b)；ブルーシートの抽出結果から算出した屋根損傷率の区分(c)

対象範囲内の 39,169 棟建物に対して計算を行った。その結果を図 9(b)に示す。算出された損傷率は罹災証明書と同様に 0%、20%未満、20%以上 40%未満、40%以上 50%未満、と 50%以上の 5 段階で表示した。40%以上 50%未満の損傷屋根の数が少ないため、20%未満、20%以上 50%未満と 50%以上の 3 段階に分けて最大瞬間風速との比較を行った。すべての建物のうち、損傷率が 20%未満の建物が 35,234 棟、20%以上 50%未満が 2,278 棟、50%以上が 1,657 棟であった。9 月 9 日の早朝 2 時から 4 時までの間に最も高い最大瞬間風速と建物数の比較を図 10 に示す。前節と同様に、最大瞬間風速が大きくなるにつれ、屋根損傷率が 20%以上の建物数が増える傾向があった。

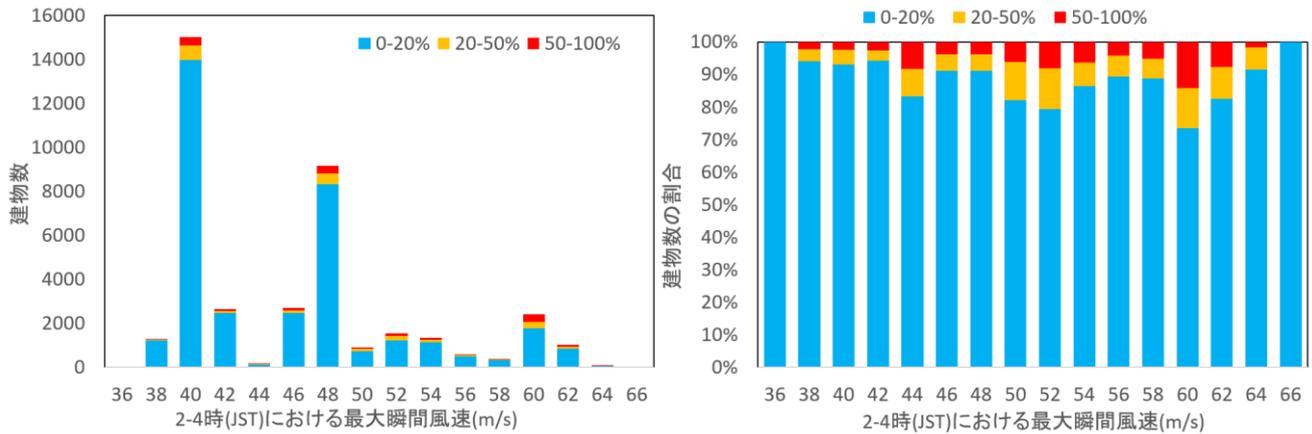


図 9. 最大瞬間風速ごとにおける屋根損傷率別の建物数とその割合

3 UAV 空撮画像による屋根被害検出

2019 年 10 月 15 日に、千葉大学と防災科学技術研究所の合同調査団が図 10 に示すルートで千葉県安房郡鋸南町における被害地域の現地調査を行い、吉浜と岩井袋の 2 地点で UAV 空撮を実施した。鋸南町は、前節より最も被害が大きかった市町村の 1 つであり、2,360 棟の建物が被害を受けた³⁾。災害発生 1 ヶ月後でもブルーシートで覆われていた家屋が多かったが、10 月 13 日に通過した令和元年東日本台風（台風 19 号）の影響で図 11 のようにブルーシートが外れた建物も多く見られた。図 11 に示したブルーシートが外れて屋根では、野地板がはがれて、「災害に係る住家の被害認定基準運用指針 風害編」の損傷程度 IV（75%）か V（100%）に当たる。

吉浜展望台より、保田漁港周辺を UAV の低空飛行で 5 分間の動画を撮影し、150 枚の空撮画像に変換した。SfM 技術⁴⁾を用いた Agisoft 社の Metashape ソフトウェアに、UAV 空撮画像を入力して 1cm 解像度の簡易オルソ画像を作成した。岩井袋でも同様に UAV の低空飛行で 5 分間の動画を撮影し、233 枚の空撮画像に変換して、1cm 解像度の簡易オルソ画像を作成した。UAV 空撮を行う際、基準点の測量が行わなかったため、作成とされたモザイク空撮画像では位置情報がなかった。OpenStreetMap の地図を基準に、モザイク画像を地図上に投影し、図 12 に示す。

UAV 空撮画像について、航空写真と同様に損傷屋根の面積と全屋根の面積から損傷率を算出する。算出された損傷率は罹災証明書と同様に 5 段階に分けて評価した。損傷率は 20%未満が一部損壊、20%以上 40%未満が半壊、40%以上 50%未満が大規模半壊、50%以上が全壊とする。実際の損傷率の算出例を図 13、各被害レベルの例は表 1 に示す。屋根の輪郭を青線で囲い、全屋根投影平面積を算出し、損傷部を赤線で囲い、損傷屋根投影平面積を算出した。



図 10. 2019 年 10 月 15 日に行った現地調査のルートと鋸南町における UAV の空撮範囲



図 11. 岩井袋にて UAV が撮影した被害屋根の例

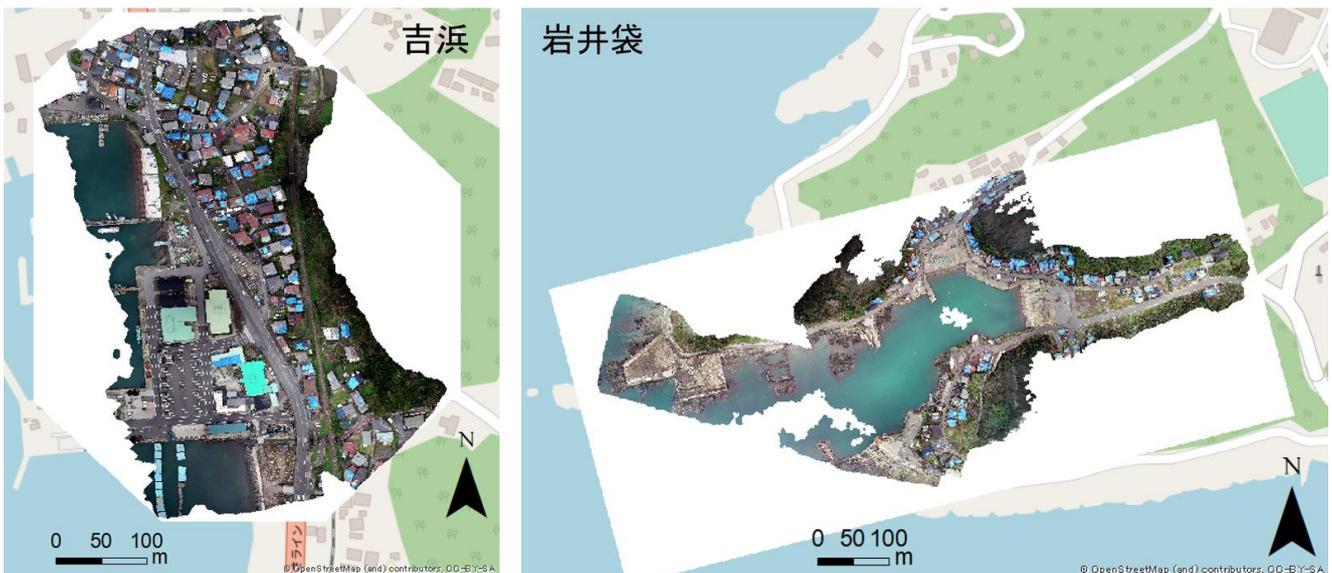
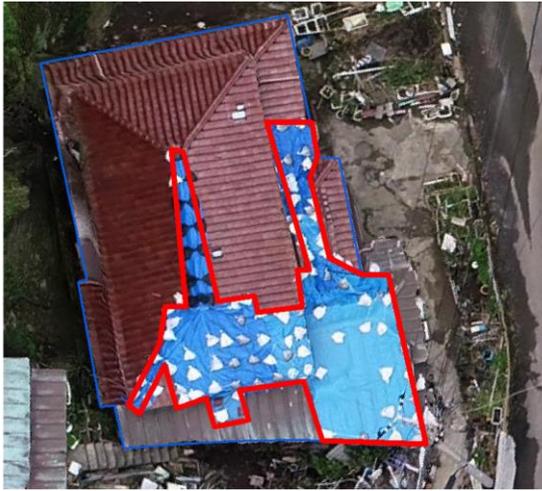


図 12. UAV 空撮動画より作成された簡易オルソモザイク画像



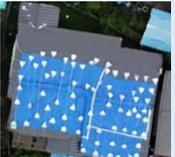
$$R = \frac{\text{損傷屋根投影平面積} : 38.54 \text{ m}^2}{\text{屋根投影平面積} : 112.25 \text{ m}^2} = 34.7\%$$



$$R = \frac{\text{損傷屋根投影平面積} : 30.53 \text{ m}^2}{\text{屋根投影平面積} : 90.38 \text{ m}^2} = 33.8\%$$

図 13. ブルーシートありの損傷屋根とブルーシートなしの損傷屋根から損傷率 R の算出例

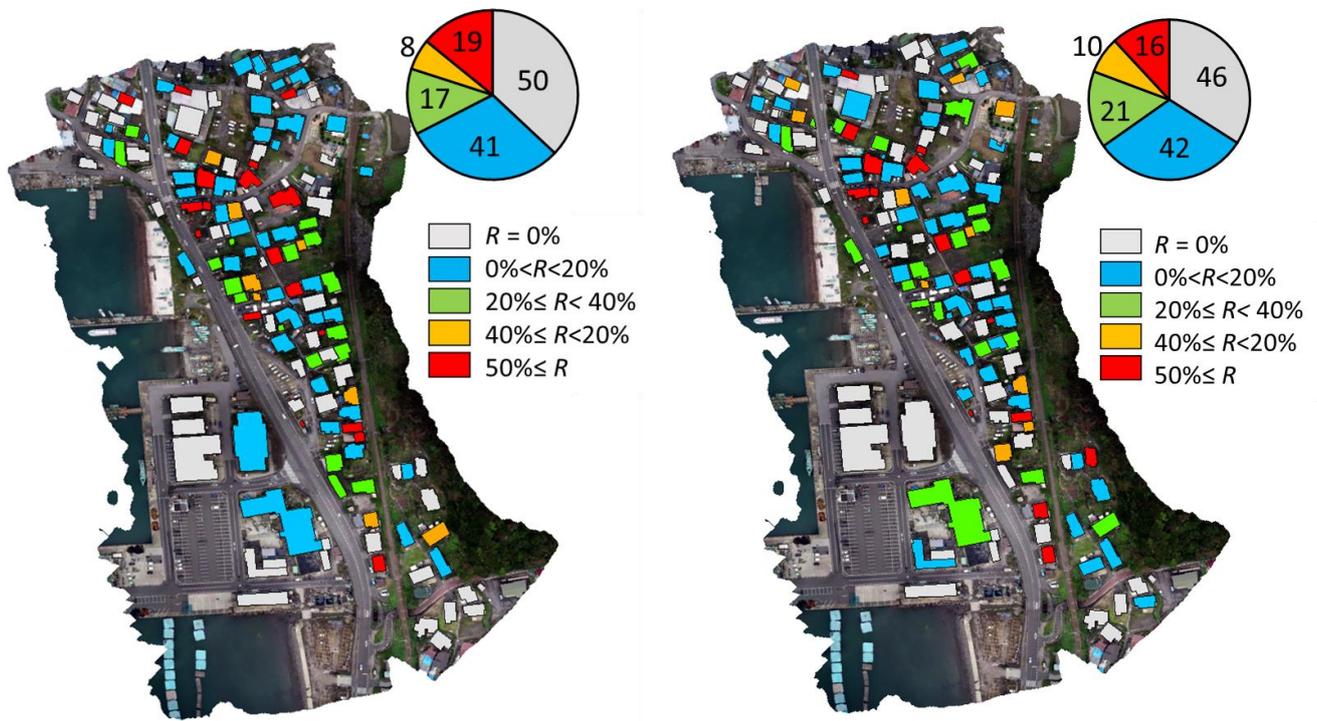
表 1. 屋根損傷率の分類と損傷屋根の具体例

無被害 $R = 0\%$	一部損壊 $0\% < R \leq 20\%$	半壊 $20\% < R \leq 40\%$	大規模半壊 $40\% < R \leq 50\%$	全壊 $R \geq 50\%$
				

吉浜では計 135 棟建物における屋根損傷の目視判読を行った結果、無被害の建物が 50 棟 (37%)、一部損壊が 41 棟 (30%)、半壊が 17 棟 (13%)、大規模半壊が 8 棟 (6%)、全壊が 19 棟 (14%) であった。損傷レベルの判別結果は図 14(a)に示す。

つづいて、広域の屋根損傷率を算出するために、同じ対象地域において教師付き分類による屋根被害有無及び屋根損傷率の自動抽出を行った。目視判読の結果を正解データとして、自動抽出の精度が最も良くなるように、教師付き分類のパラメータを決定した。教師付き分類は ENVI ソフトの Feature Extraction モジュールを用いて行った。ブルーシートから 8 ヶ所、そのほかに道路、植生、裸地、水域と 2 色の屋根から教師地域を選出した。分類に用いるパラメータ「Scale Level」が 60、「Merge Level」が 80 に設定し、教師付きオブジェクト分類を行った。分類結果のうち、目視で作成された屋根輪郭内のブルーシートを抽出し、屋根の損傷範囲とした。目視判読で得られた屋根の損傷部分を正解として、教師付き分類で得られたブルーシートの再現率は 67%、適合率は 73% であった。調和平均の F 値は 0.707、一致度を表す K 係数は 0.656、高い一致度を示した。抽出された屋根の損傷面積と全屋根面積の割合から損傷率を算出し、損壊率を 5 段階で評価した結果を図 14(b)に示す。無被害の建物が 46 棟 (34%)、一部損壊が 42 棟 (31%)、半壊が 21 棟 (10%)、大規模半壊が 10 棟 (7%)、全壊が 19 棟 (14%) であった。損傷レベルの混合行列は表 2 に示す。5 段階評価の正解率は 61.5%、K 係数は 0.479 で中程度の一致度を示した。無被害と全壊以上の建物における判定精度が 65%以上の精度があったが、一部損壊から大規模半壊までの損傷レベルにおける判定ではズレが生じていた。全壊と判定された無被害建物は青屋根であったため、ブルーシートと誤抽出された。また、

ブルーシートが外れた損傷屋根や白い重しが教師付き分類では抽出されないため、損傷レベルの過少評価が生じていた。前節と同様に、バンド演算によるブルーシートの検出も試みたが、解像度が高い分ブルーシートにおける色のばらつきが大きくなり、抽出精度は教師付き分類より低かった。



(a) 目視判読の結果

(b) 教師付き分類の結果

図 14 吉浜における目視判定(a)と教師付き分類結果(b)による屋根損傷率の算出結果の比較 (全 135 棟)

表 2. 吉浜における屋根損傷レベルの検出混合行列

	$R = 0\%$	$0\% < R < 20\%$	$20\% \leq R < 40\%$	$40\% \leq R < 50\%$	$50\% \leq R$	合計戸数	適合率
$R = 0\%$	33	12	1	0	0	46	71.7%
$0\% < R < 20\%$	15	22	4	0	1	42	52.4%
$20\% \leq R < 40\%$	1	6	10	3	1	21	47.6%
$40\% \leq R < 50\%$	0	1	2	4	3	10	40.0%
$50\% \leq R$	1	0	0	1	14	16	87.5%
合計戸数	50	41	17	8	19	135	
再現率	66.0%	53.7%	58.8%	50.0%	73.7%		61.5%

岩井袋の UAV 空撮画像においても同様な解析を行った。岩井袋の撮影範囲内にある 79 棟のうち、無被害の建物が 18 棟 (23%)、一部損壊が 15 棟 (19%)、半壊が 14 棟 (18%)、大規模半壊が 4 棟 (5%)、全壊が 28 棟 (35%) であった。損傷レベルの判別結果は図 15(a)に示す。ブルーシートを含む 7 クラスの教師付き分類を行い、屋根輪郭内に分類されたブルーシートと目視判読の結果を比較した。屋根上ブルーシートの再現率は 69%、適合率は 72% である。調和平均の F 値は 0.705、一致度を表す K 係数は 0.654、吉浜と同程度の一致度を示した。また、5 段階の損傷レベルに分けた結果は図 15(b)に示す。無被害の建物が 16 棟 (20%)、一部損壊が 24 棟 (30%)、半壊が 19 棟 (24%)、

大規模半壊が5棟(6%)、全壊が15棟(19%)であった。損傷レベルの混合行列は表3に示す。5段階評価の正解率は69.6%、K係数は0.447で吉浜と同程度の一致度を示した。

吉浜に比べて、岩井袋における全壊建物の割合が高くなっていた。日本気象協会の強風再現解析によると、吉浜と岩井袋における最大瞬間風速は9月9日2時40分ごろが最も大きくなっていた。吉浜の最大瞬間風速は58.0m/s、岩井袋は58.7m/sであった。また、50m/s以上の強風を続いた時間もほぼ同じであった。しかし、吉浜では海岸と平行に山の斜面があるに対して、岩井袋では海岸と垂直方向に山が続いている。これらの地形の違いによって、地表面の実風速が異なっていたと考えられる。岩井袋の谷沿いに、屋根損傷が大きい全壊建物が多かった。

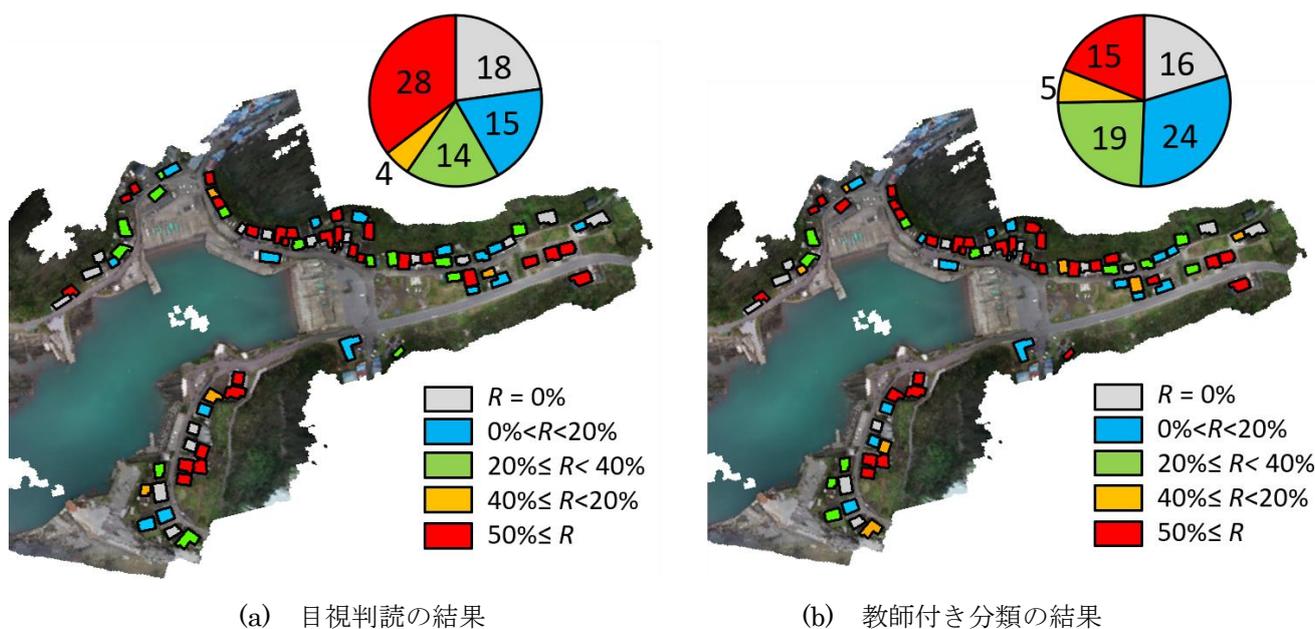


図 1.3.6. 岩井袋における目視判定(a)と教師付き分類結果(b)による屋根損傷率の算出結果の比較 (全79棟)

表 1.3.3. 岩井袋における屋根損傷レベルの検出混合行列

	$R = 0\%$	$0\% < R < 20\%$	$20\% \leq R < 40\%$	$40\% \leq R < 50\%$	$50\% \leq R$	合計戸数	適合率
$R = 0\%$	15	1	0	0	0	16	93.8%
$0\% < R < 20\%$	3	13	3	3	2	24	54.2%
$20\% \leq R < 40\%$	0	1	11	0	7	19	57.9%
$40\% \leq R < 50\%$	0	0	0	1	4	5	20.0%
$50\% \leq R$	0	0	0	0	15	15	100.0%
合計戸数	18	15	14	4	28	79	
再現率	83.3%	86.7%	78.6%	25.0%	53.6%		69.6%

UAV空撮画像は衛星画像や航空写真に比べて、撮影範囲が狭い欠点があるが、低高度の空撮より屋根部分詳細な情報が得ることができる。災害直後にブルーシートが掛ける前に撮影できれば、罹災証明に必要な屋根損傷程度の評価も可能である。また、半自動的な教師付き分類では高い精度で屋根損傷のレベルを把握できるため、広域への被害判定も可能である。

4 まとめ

台風前後の Pleiades 衛星光学画像，台風後の航空写真と UAV 空撮画像を用いて，千葉県鋸南町，南房総市と館山市における屋根損傷の把握を行った。衛星画像では広域の観測と事前・事後画像の入手が可能という利点があるものの，地上解像能が低いかつ位置情報の正確さに欠けるという問題点がある。広域被害におけるマクロの把握に有効である。航空写真では高い地上解像能と正確な位置情報を持つが，事前画像の入手が困難という欠点がある。広域における建物ごとにおける被害の検出が可能である。一方，データ量が大きいため，衛星画像に比べて解析に時間を要する。UAV 空撮画像が観測できる範囲が最も小さいが，地上解像能が高く，屋根の詳細状況の把握に適する。画像解析技術による半自動の被害把握が可能であるが，細かい情報の入手という点で目視判読による分析に適する。対象地域で得られた屋根損傷率と最大瞬間風速との比較により，風速が高いほど損傷率が上昇する傾向が見られた。

謝辞

本報告書に使用した Pleiades データは Centre national d'études spatiales が有するものである。建物輪郭データは OpenStreetMap が有するものである。

参考文献

- 1) OpenStreetMap: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_Features
- 2) 内閣府：災害に係る住家の被害認定基準運用指針，http://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/h3003shishin_4.pdf, 2019.3.
- 3) 千葉県防災危機管理部：令和元年台風 15 号（第 118 報）及び台風 19 号（第 61 報）について，2020.3.12.
- 4) 小花和宏之，早川祐弼，斎藤仁，ゴメス クリストファー：UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング，地形，35(3)，pp283-294，2014.

強風による住宅被害状況

House damage by strong wind

友清衣利子*1, 西嶋一欽*2

Eriko TOMOKIYO, Kazuyoshi NISHIJIMA

This study reports structural characteristics of damaged houses and cause of roof damage due to Typhoon Faxai. The field survey was conducted in three areas in Kyonan, Minamiboso and Tateyama, Chiba Prefecture. It was found that residential damage in these areas was about 60%. Damage to houses equipped with roof tile was remarkable. Although rate of damaged houses decreased as the building age became younger, some houses built after 2010 were suffered damage. However, younger houses had slight damage to roof and the cause was often wind-born debris. Flying debris are born because older houses suffered damage due to strong winds during typhoon. Then relatively younger houses are often damaged due to wind-borne debris from surrounding older ones.

Keywords : field survey, building age, roof damage, wind-borne debris

1. 現地被害調査の概要と被害住宅の分布

1.1 現地調査の概要

2019年11月8日から11月11日までの4日間にわたって、千葉県鋸南町、南房総市および館山市の一部地域で台風による住宅の現地被害調査が行われた。図1に調査地域を示す。調査対象住宅は鋸南町528棟、南房総市600棟、館山市701棟の合計1,829棟で、目視調査およびヒアリング調査を行った。表1に現地調査項目を示す。調査項目は既存の強風被害現地調査項目¹⁾に準ずるものとした。本調査では、住宅の被害状況に加え、補修状況と住環境についてもヒアリングを行ったが、その詳細は3.1.7節および3.2.3節を参照されたい。また、本調査は地上からの目視調査であるため、一定数の住宅で地上から死角となった屋根被害の見落としが生じた。そこで、航空写真を用いた屋根被害抽出結果（詳細は3.2.4節参照）と本調査結果とを照らし合わせ、屋根被害の見落としがあった住宅には航空写真から判別した屋根のブルーシート被覆部の割合を屋根被害程度として調査データに付与した。ただし、航空写真でブルーシート被覆が確認されなかったにもかかわらず、現地調査で屋根被害ありと入力されているケースは、航空写真では軽微な屋根被害が認識されなかったと考えられるため、現地調査の結果をそのまま採用した。

1.2 調査住宅と被害の分布

図2(a)から(c)に3市町村の調査地域での台風による被害の有無とその分布を示す。ここでの被害とは、屋根や外壁等の構造被害以外も含む。図2(a)と(b)に示す鋸南町や南房総市での被害が顕著である一方、図2(c)に示す館山市での被害はやや少なかった。表2に各市町での何らかの被害を受けた住宅数と被害率を示すが、鋸南町と南房総市の調査地域の住宅被害率はそれぞれ63.1%と66.2%であった。

*1 熊本大学大学院先端科学研究部
准教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University,
Ph.D. (Eng.)

*2 京都大学防災研究所 准教授・博士

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Doctor of Sciences

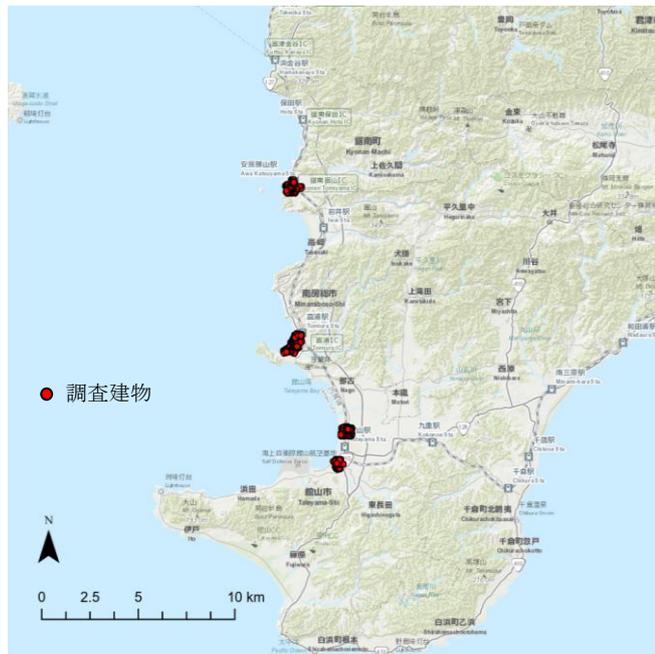
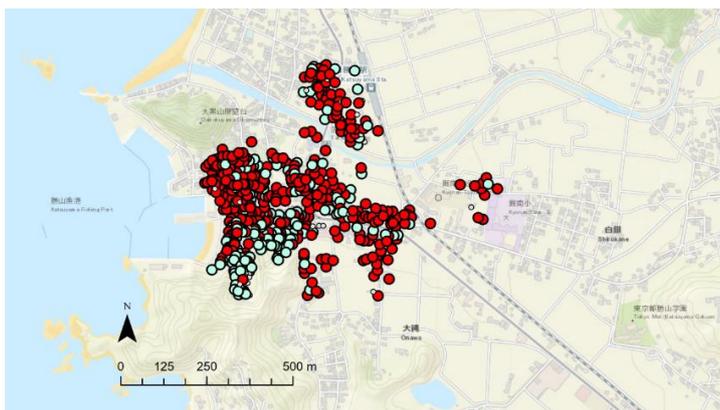
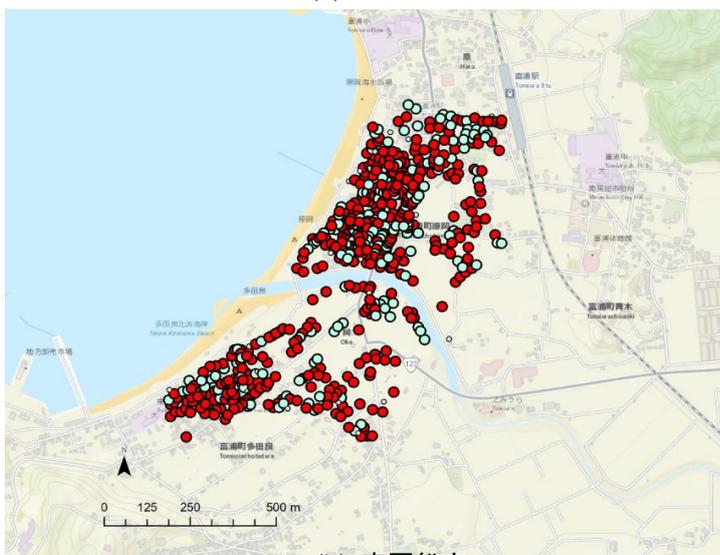


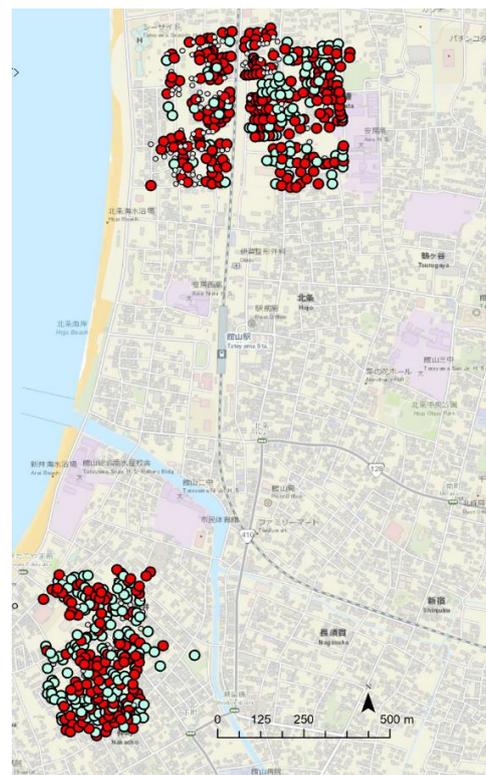
図1 被害調査地区の位置



(a) 鋸南町



(b) 南房総市



(c) 館山市

- 台風による被害あり
- 台風による被害無し
- 不明

図2 台風による被害の有無別分布

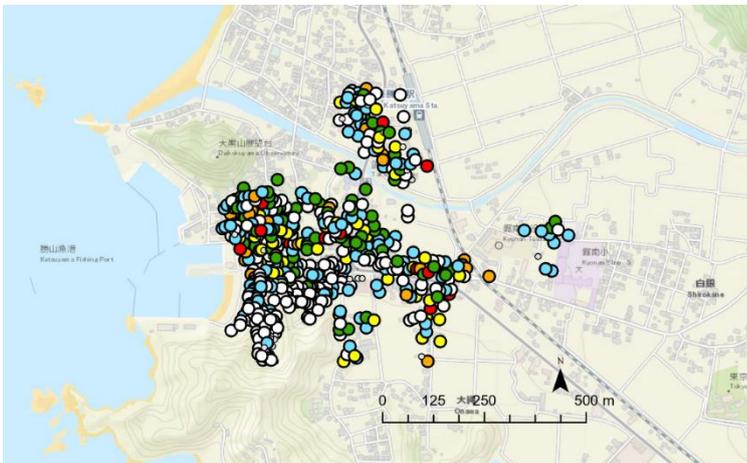
表 1 調査項目

調査項目		選択肢							
1	建物の階数	1階建て	2階建て	3階建て	4階建て	5階以上			
2	住居形態	一戸建住宅	共同住宅	併用住宅	その他				
-1	(共同住宅の場合) 住まいの階数	1階	2階	3階	～11階以上				
-2	(一戸建て・併用住宅の 場合)持ち家か借家か	持ち家	借家	空き家	不明				
3	建物の構造	木造	鉄筋コンクリート造	鉄骨造	組積造	詳細不明 非木造	木造/非 木造混合	不明	その他
4	屋根形状	切妻	寄棟	入母屋	陸屋根	片流れ	のこぎり 屋根	不明	その他
5	屋根葺材	瓦(粘土葺き)	瓦(釘/スクリュー)	瓦(不明)	金属屋根	スレート	アスファルトシングル		
		コンクリート	不明	その他					
6	壁面材料 (複数回答可)	金属系サイディング	窯業系サイディング	樹脂系サイディング	ALC	板張り	トタン		
		コンクリート	モルタル	漆喰	土壁	不明	その他		
7	雨戸の有無	ある		ない					
-1	雨戸の種類	板戸	金属戸	シャッター	その他				
8	建物の建築年	不明	1960年以前	1960～1969年	1970～1979年	1980～1989年			
		1990～1999年	2000～2009年	2010年以降	その他				
9	建物被害の有無	はい	いいえ	不明					
A	屋根の被害率	なし	10%	25%	50%	75%	100%		
-1	屋根の被害箇所 (複数回答可)	軒先	棟	隅角部	中央	ケラバ	不明		
-2	屋根の被害方角 (複数回答可)	北	東	南	西	不明			
-3	屋根の被害要因 (複数回答可)	風を受けた	物が飛んできた	物が倒れてきた	建物破損による水漏れ	浸水	不明	その他	
B	外壁の被害率	なし	10%	25%	50%	75%	100%		
-1	外壁の被害の方角 (複数回答可)	北	東	南	西	不明			
-2	外壁の被害要因 (複数回答可)	風を受けた	物が飛んできた	物が倒れてきた	建物破損による水漏れ	浸水	不明	その他	
C	被災窓の枚数	不明	0	1	2	3	～10以上		
-1	被災窓の方角 (複数回答可)	北	東	南	西	不明			
-2	窓の被災要因 (複数回答可)	風を受けた	物が飛んできた	物が倒れてきた	建物破損による水漏れ	浸水	不明	その他	
D	被災ドアの枚数	不明	0	1	2	3	～10以上		
-1	被災ドアの方角 (複数回答可)	北	東	南	西	不明			
-2	ドアの被災要因 (複数回答可)	風を受けた	物が飛んできた	物が倒れてきた	建物破損による水漏れ	浸水	不明	その他	
E	被災雨戸・シャッターの 枚数	不明	0	1	2	3	～10以上		
-1	被災雨戸・シャッターの 方角(複数回答可)	北	東	南	西	不明			
-2	雨戸・シャッターの被災 要因(複数回答可)	風を受けた	物が飛んできた	物が倒れてきた	建物破損による水漏れ	浸水	不明	その他	
F	その他の被害(複数回答 可)	室内 物置	家財 看板	車庫 ベランダの 屋根	カーポート ブロック塀	アンテナ 雨どい	エアコン の室外機 その他		
10	ヒアリング調査の有無	はい	いいえ 目視調査						
-1	ヒアリング相手	家にお住まいの方	隣人	不明	その他				

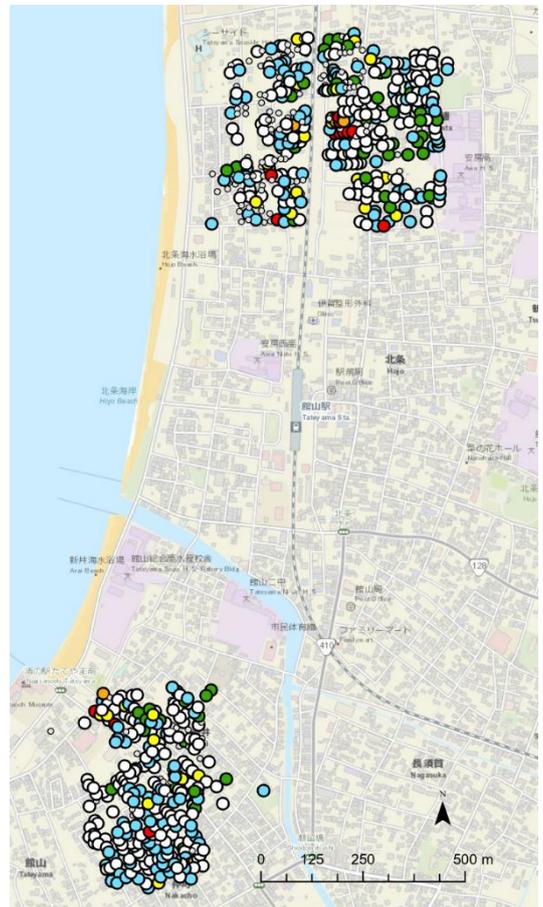
表 2 被災住宅数と屋根被災程度別住宅数

調査地	調査住宅数	被災住宅数	被害率	屋根被災程度別被害住宅数					屋根被害住宅数合計	屋根被害率
				10%	25%	50%	75%	100%		
鋸南町	528	333	63.1%	123	61	41	28	15	268	50.8%
南房総市	600	397	66.2%	157	92	41	23	15	328	54.7%
館山市	701	324	46.2%	166	73	34	17	17	307	43.8%
合計	1829	1054	57.6%	446	226	116	68	47	903	49.4%

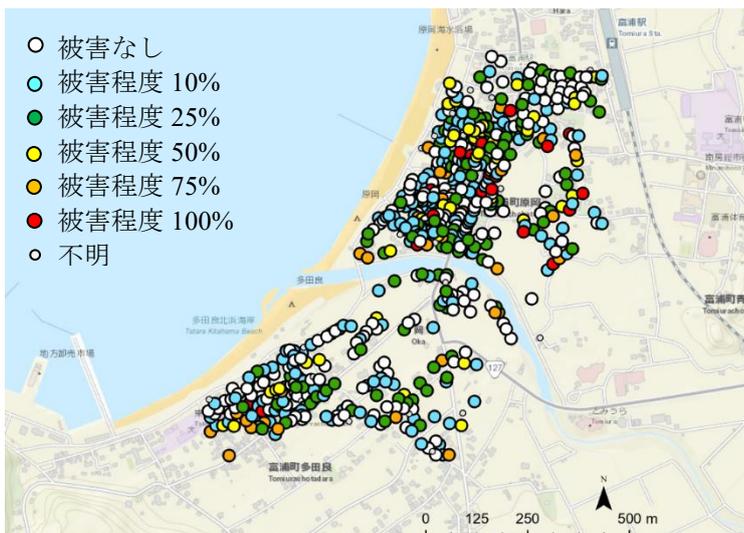
図 3(a)から(c)に屋根被害程度別に住宅の被害分布を示す。屋根の被害程度に着目すると、図 3(a)の鋸南町では調査地域南西側で屋根被害程度がやや低い。この地域は南側に丘陵地があり、強風がさえぎられた可能性がある。図 3(b)の南房総市では調査地域全体に屋根に被害を受けた住宅が分布している。図 3(c)に示す館山市は、やや被害が小さく、特に館山市南部の調査地域では、屋根被害程度が小さい住宅が多かった。表 2 に屋根被害程度別の住宅数を示すが、館山市では屋根被害程度 10%の住宅が多い。



(a) 鋸南町



(c) 館山市



(b) 南房総市

図 3 屋根被害程度別住宅分布

2. 被害住宅の特徴

2.1 被災住宅の構造的特徴

図 4(a)から(h)に調査対象地域の全調査対象住宅および被害住宅（屋根以外の被害も含む）と屋根被災住宅の構造的特徴を示す。調査地区の対象住宅に着目すると、2階建てが7割を占め、9割が一戸建て住宅であった。

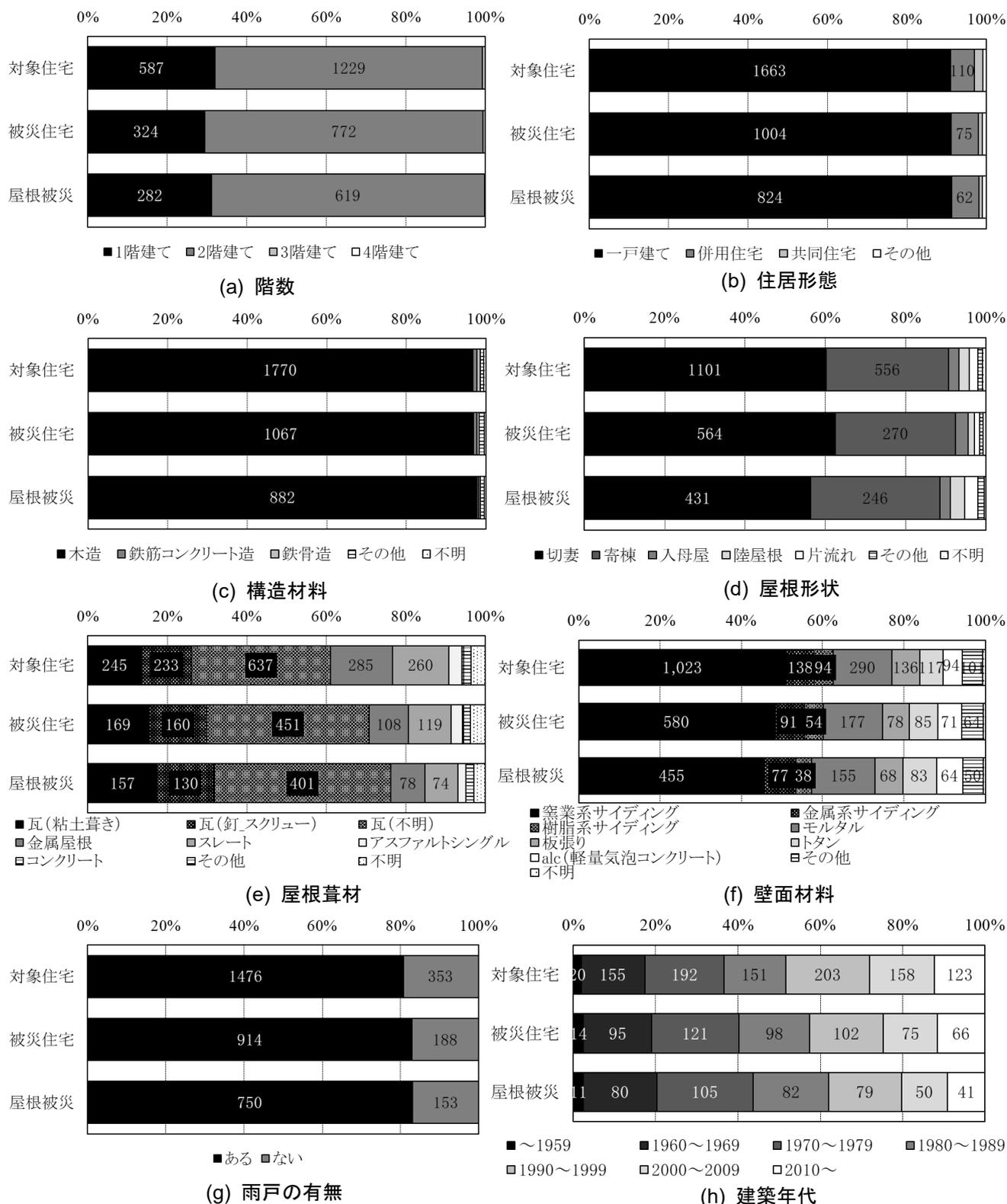


図 4 調査対象住宅、被災住宅および屋根被災住宅の特徴

また、ほぼ全ての住宅が木造である。屋根形状は切妻が6割、寄棟が約3割だった。約6割の住宅が瓦葺き屋根を持つ。外壁材は6割強が各種サイディングを使用しているが、15%程度はモルタルであった。次いで板張り、トタン、ALC等の素材が使用されている。8割の住宅では開口部に雨戸が設置されていた。図4には建築年不明の住宅を除いた年代別の住宅数と割合を示す。ヒアリング調査でも建築年代を尋ねたが、ここでは千葉県より提供いただいた被災地区における建築物に関する情報をもとに、調査住宅の築年数を特定し、10年ごとの建築年代としてまとめた。調査住宅の45%は建築年代が特定できず、図には建築年が不明の住宅を除いた数を示した。建築年の特定に用いた情報には、1959年以前の住宅情報がほとんど含まれていなかったため、1959年以前に建てられた住宅の割合が少ないが、それ以外の年代の住宅はほとんど偏りなく存在していた。

同図より、被災住宅および屋根被災住宅の構造特性に着目すると、階数、住居形態、構造材料と被害の発生には関連がなかった。図4(d)より、屋根が被災した住宅では切妻屋根が減り片流れ屋根や陸屋根の割合がわずかに増える傾向があるが、屋根形状と強風被害には明確な関連は見られなかった。図4(e)の屋根葺材に着目すると、屋根被災住宅では瓦葺き屋根の割合が顕著に増大した。一方で、金属屋根やスレート屋根の被害は少ない。図4(f)に示す外壁に着目すると、被災建物ではサイディングの割合が減少し、モルタル、トタンおよびALCの割合が増加した。雨戸の有無と建物の被災との関連はみられない。図4(h)の建築年代に着目すると、被災住宅では1990年代以降に建築された住宅の割合が減少する。屋根被災住宅ではその傾向が顕著であった。

屋根葺材と外壁材および建築年代と被害との関連が見られたことから、図5(a)から(c)に建築年代と屋根形状、屋根葺材および外壁材との関係を示す。図5(a)より、1980年頃を境に切妻屋根が減り寄棟屋根が増加する。2010年以降は切妻屋根の割合が再び増え、片流れ屋根の割合が増えた。図5(b)より、建築年代が新しくなるにつれて瓦屋根の割合は徐々に減少している。図5(c)より、1980年ころからサイディングを使用した住宅の割合が増加している。建築年代によって屋根形状や外壁材に特徴が見られた。

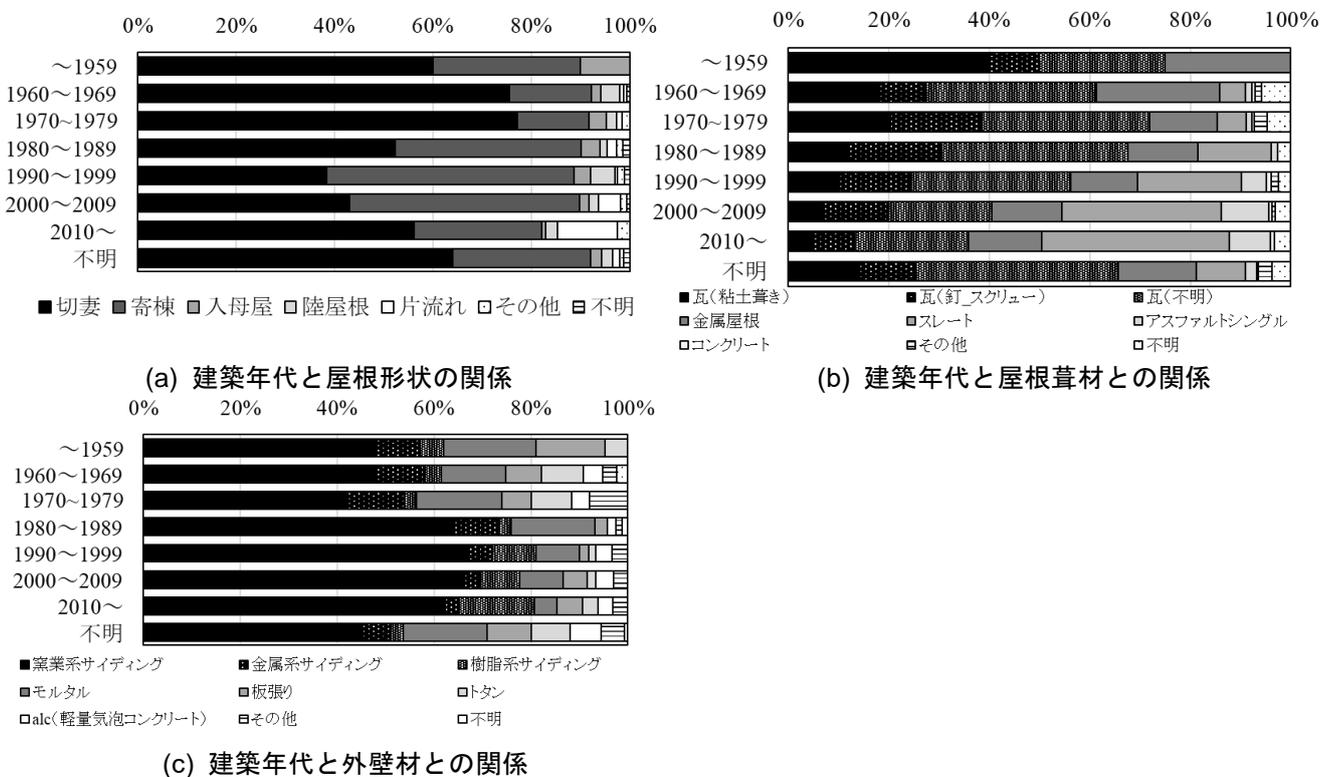


図5 建築年代ごとの屋根形状、屋根葺材、外壁の特徴

2.2 屋根被害の拡大要因

前節より、強風被害、特に屋根被害に最も影響を与えるのは屋根葺材と建築年代であると考えられる。表 3 に建築年代別に住宅の被害の有無を集計した。図 6 に建築年代ごとに屋根被害の有無を割合で示す。表と図より、どの年代でも瓦屋根に屋根被害が多く発生しているが、1990 年代を境に屋根被害発生割合は 50%程度から 30%程度に減少している。表 4 に屋根葺材別の屋根被害の有無と被害率をまとめ、図 7(a)と(b)に屋根葺材別に建築年代ごとの屋根被害率を示す。瓦屋根住宅全体で見ると屋根被害率は約 67%で、非瓦屋根住宅の屋根被害率は約 32%である。瓦屋根、非瓦屋根住宅ともに、建築年代が新しくなるにつれて屋根被害率はおおむね低減する傾向が見られた。しかし、建築年代が 2010 年以降であっても屋根被害は発生していた。

次に屋根に被害を受けた住宅に着目し、建築年代別に屋根被害程度ごとの住家割合を図 8 に示す。屋根被害程度が 25%を超える住宅の割合は、1980 年頃を境に 50%から 40%に減少しているが、2010 年以降に建てられた住宅にも大きな被害程度のものであった。図 9 に建築年と屋根被災要因との関係を示す。この屋根被災要因は、現地調査のヒアリングに基づく結果である。屋根が被災した要因は不明のものが約半数を占めるが、建築年代が新しくなるにつれて、被災要因に「物が飛んできた」との回答が増えた。図 10(a)と(b)に屋根葺材別に建築年代と被災要因との関係を示す。瓦葺住宅に比べて非瓦葺住宅の方が、建築年代が新しくなるにつれて屋根被災要因は飛来物であると回答する割合が増えた。

表 3 建築年代別の屋根被害住宅数と屋根被害率

建築年代	対象住宅数	屋根被害あり	屋根被害率	屋根被害なし	被害不明
～1959	20	11	55%	6	3
1960～1969	155	80	52%	66	9
1970～1979	192	105	55%	57	30
1980～1989	151	82	54%	51	18
1990～1999	203	79	39%	98	26
2000～2009	158	50	32%	101	7
2010～	123	41	33%	81	1
不明	827	455	55%	305	67

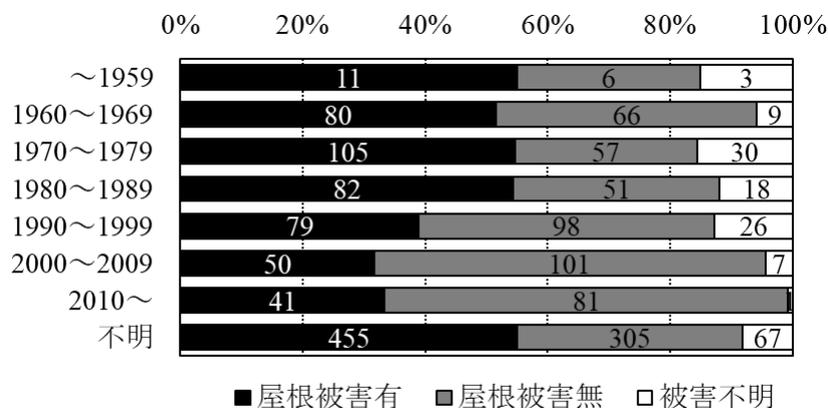


図 6 建築年代ごと屋根被害の有無

表 4 建築年代および屋根葺材別の屋根被害率

建築年代	瓦			非瓦		
	被害あり	被害なし	被害率	被害あり	被害なし	被害率
～1959	9	5	64%	2	1	67%
1960～1969	62	27	70%	15	34	31%
1970～1979	78	34	70%	22	21	51%
1980～1989	70	22	76%	10	27	27%
1990～1999	64	42	60%	14	52	21%
2000～2009	31	32	49%	19	64	23%
2010～	23	21	52%	17	57	23%
不明	351	160	69%	89	137	39%

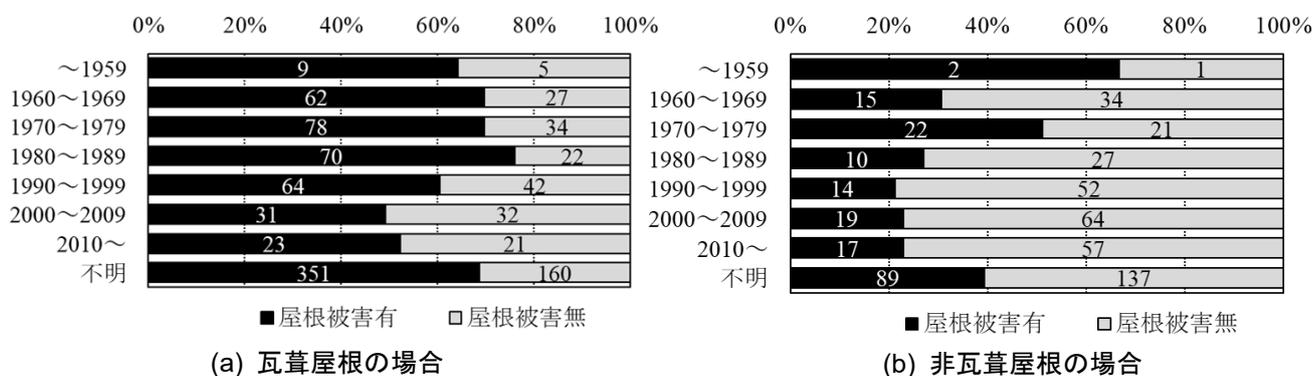


図 7 屋根葺材別の建築年代ごと屋根被害の有無

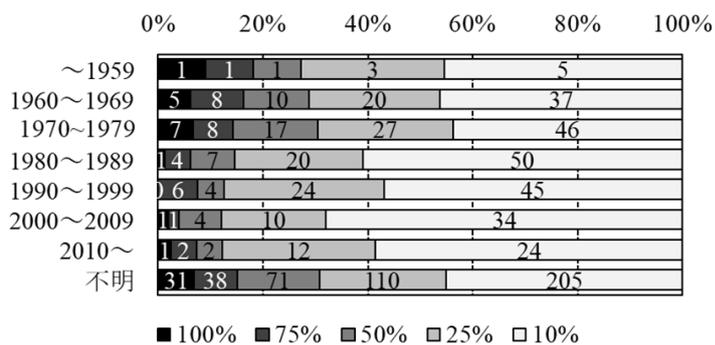


図 8 建築年代別の屋根被害程度ごとの住宅割合

図 11(a)と(b)に建築年代ごとの屋根被災要因と被災程度の関係を示す。ここでは被災要因として「風を受けた」と「物が飛んできた」のみに着目し、その他の要因や複数要因が記載されている場合は検討していない。図 11(a)より「風を受けた」場合には、建築年代が古いもので被害程度がやや大きい。しかし、建築年代が新しくなるにつれて被害程度は低減する傾向が見られた。図 11(b)に示す「物が飛んできた」場合は、被害件数自体が少ないものの、屋根被害程度はすべて 25%より小さく、深刻な被害は生じていない。図 2.1.12 に建築年代別に屋根被災要因と被災部位との関係を示す。図 12(a)の「風を受けた」場合には、棟部の被害が多い。建築年代ごとの顕著な傾向はないが、建築年代が新しいほど棟部被害の割合が増加する傾向がある。図 12(b)より、「物が飛んできた」場合には、全体の件数が少ないものの、中央部での被害がやや多い。

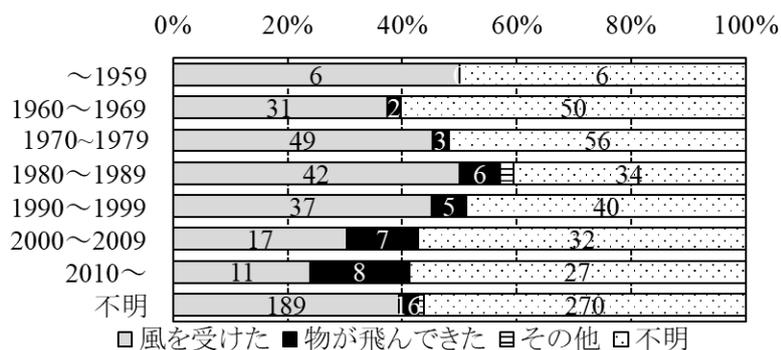
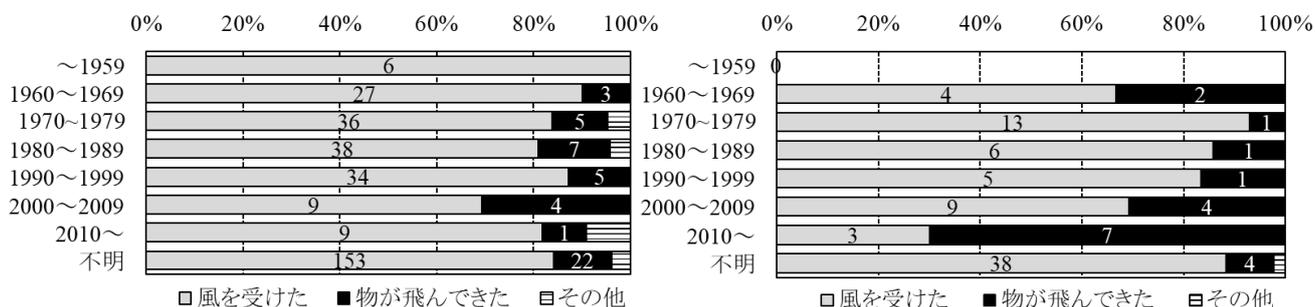


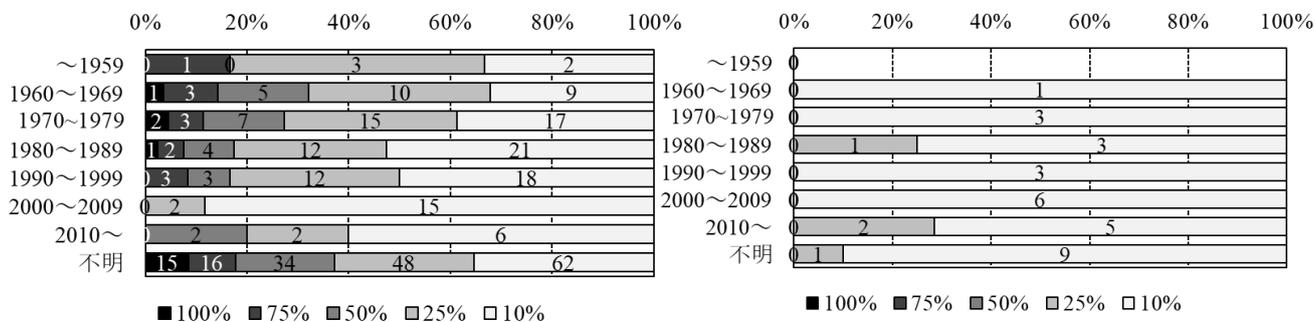
図 9 建築年代別の屋根被災要因



(a) 瓦葺屋根の場合

(b) 非瓦葺屋根の場合

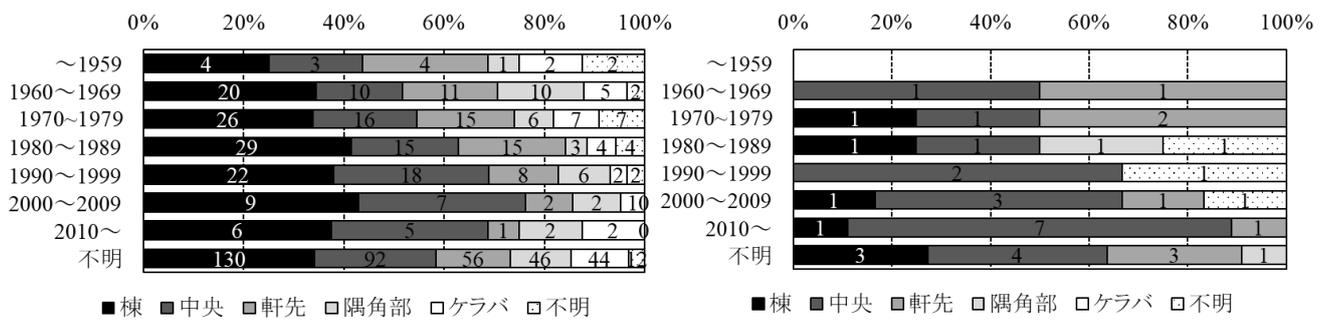
図 10 屋根葺材別の建築年代と屋根被災要因との関係



(a) 風を受けた場合

(b) 物が飛んできた場合

図 11 屋根被災要因別の建築年代と屋根被害程度との関係



(a) 風を受けた場合

(b)物が飛んできた場合

図 12 屋根被災要因別の建築年代と屋根被災部位との関係

3. まとめ

台風 15 号による住宅被害が顕著であった千葉県鋸南町、南房総市および館山市の一部地域で行われた現地被害調査に基づき、住家被害の特徴と要因をまとめた。調査地域内で何らかの被害を受けた住宅の被害率は約 60%であった。被害は調査地域に広く分布していたが、鋸南町では被害が少ない地域も存在し、地形の影響等で強風が遮られた可能性がある。調査対象住宅のほとんどは木造の戸建て住宅であった。スレート、シングル材などの非瓦屋根に比べて、瓦葺屋根の被害が多かった。また、外壁がサイディングの住宅に比べて、モルタルや ALC パネルの住宅が被災する割合が高かった。しかし、住宅の外装材は建築年代とも関連を持つため、外装材料のみが被害に関連をするわけではない。建築年代が新しくなるにつれて被災する住宅の割合は減少したが、2010 年以降に建てられた住宅でもある程度の被害が見られた。しかし、新しい住宅では屋根の被害程度が比較的小さく、飛来物によって被害を受けたとの回答の割合が増えた。古い住宅が強風によって被災することで飛来物が発生し、周辺の比較的新しい住宅にも被害をもたらしていると考えられる。

参考文献

- 1) 西嶋一欽, 竹内崇他: 2018 年台風 21 号による住宅に関する強風被害調査および結果の概要, 日本風工学会誌, Vol.44, No.3, pp.294-302, 2019.7.

住宅の補修状況ならびに火災保険等を活用した補修実態 Rehabilitation situation and repair practice using fire insurance

西嶋一欽*¹, 高橋 徹*², 友清衣利子*³

Kazuyoshi NISHIJIMA, Toru TAKAHASHI, Eriko TOMOKIYO

This study reports situations on rehabilitation of damaged houses and repair practice using fire insurance or mutual. The study takes its basis in field survey and questionnaire survey respectively. The field survey was conducted in three severely affected areas by Typhoon Faxai; namely, coastal areas in Kyonan, Minamiboso and Tateyama in Chiba prefecture. The questionnaire survey was conducted through post mailing, website and settlement of questionnaire booth in the abovementioned three areas and Katsuura in Chiba prefecture. The surveys revealed, among others; (1) 80% of damaged houses are waiting for rehabilitation without knowing when it starts at the time of two months after the impact, and 30% of damaged houses are still waiting for rehabilitation at the time of six months after the impact; (2) repair of only damaged part of roof is common practice, which does not lead to the improvement of wind-resistant performance of roof as a whole, and the reasons include not only budget limitation but also presumably disbelief toward up-to-date roofing materials and constructions (even up-to-date roofing would fail due to future strong wind) and the fact that windborne debris from surrounding exposures cannot be avoided by wind-resistance improvement of own houses.

Keywords : field survey, questionnaire survey, fire insurance, rehabilitation

1. 現地調査に基づく建物の補修状況

2019年11月8日から11月11日に行われた、千葉県鋸南町、南房総市および館山市の一部地域での現地被害調査では、建物の補修状況に関するヒアリングもあわせて行った。補修に関するヒアリング項目を表1に示す。台風によって何らかの被害を受けた住宅1133棟を対象に調査を行ったが、回答が得られたのは鋸南町168棟、南房総市196棟、館山市243棟である。図1に市町村ごとの被害補修状況を示す。鋸南町と南房総市では、約8割の住宅で補修が行われていないが、館山市で補修が行われていないのは65%程度である。補修していない理由を図2に示す。約半数は理由があって補修していないと回答しており、最多の理由は修理業者が不足していることであった。補修できない理由を地域別に整理すると図3のようになる。鋸南町と南房総市は修理業者が不足しているとの回答が最も多い。南房総市は、被害程度の小さい住宅が多く、補修の依頼中や補修の必要がないという回答も多かった。

図4に補修時期の目処をまとめた。8割程度の住宅では補修時期に目処が立っていなかった。しかし、図5に示すように目処がついた住宅は、一か月以内に補修予定であるとの回答が多かった。一方で補修開始まで1年以上という回答もあった。

-
- *1 京都大学防災研究所 准教授・博士 Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Doctor of Sciences
 - *2 千葉大学大学院工学研究院 教授・工学博士 Prof., Department of Architecture, Graduate School of Engineering, Chiba University, Doctor of Engineering
 - *3 熊本大学大学院先端科学研究部 准教授・博士(工学) Assoc. Prof., Faculty of Advanced Science and Technology, Kumamoto University, Ph.D. (Eng.)

表 1 補修に関する調査項目

G	被害箇所の補修状況	不明	補修していない	被害箇所の一部を補修した	被害箇所全てを補修した		
-1	補修していない理由 (複数回答可)	補修の依頼中である(近日補修予定)	補修の見積もり中である	補修業者が不足しているため	補修資材が不足しているため	罹災証明手続き中であるため	住宅再建支援法による手続き中であるため
		保険金申請の手続き中であるため	経済的な理由	補修の必要はない	不明	その他	
-2	補修時期の目途	不明	未定	補修時期に目処がついている			
-3	補修時期の予定	1か月以内	3か月以内	半年以内	1年以内	それ以降	

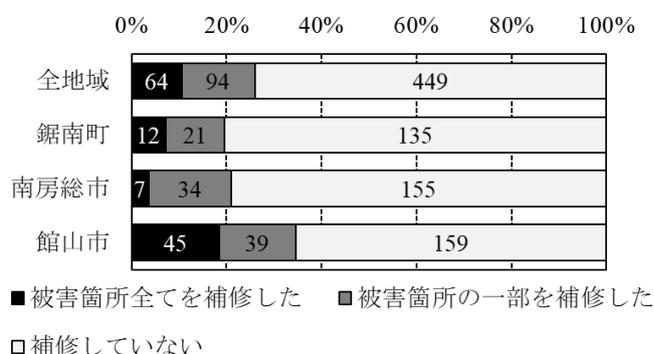


図 1 被害の補修状況

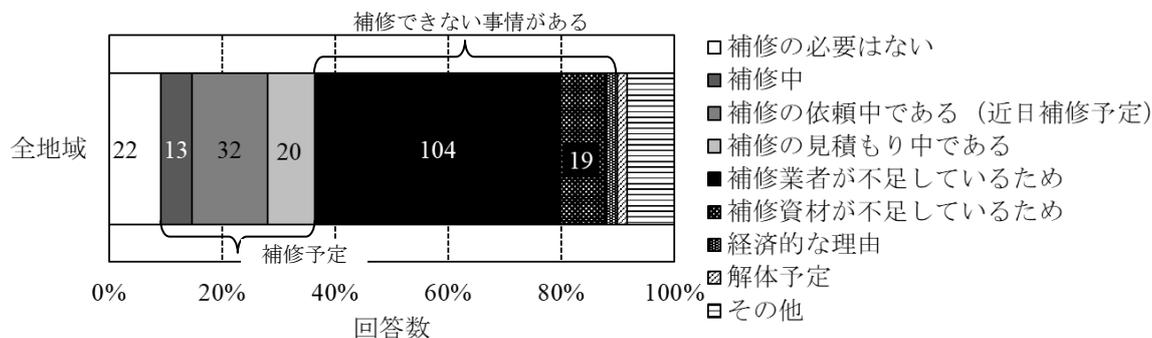


図 2 被害を補修しない理由

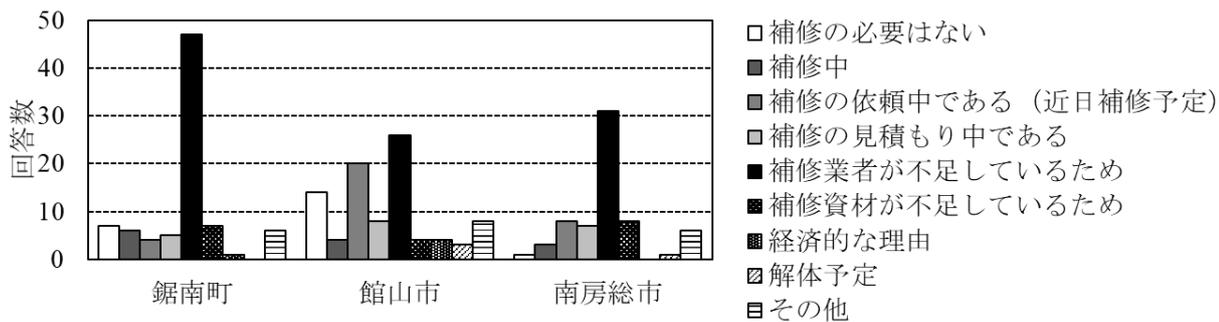


図3 地域別の被害を補修しない理由

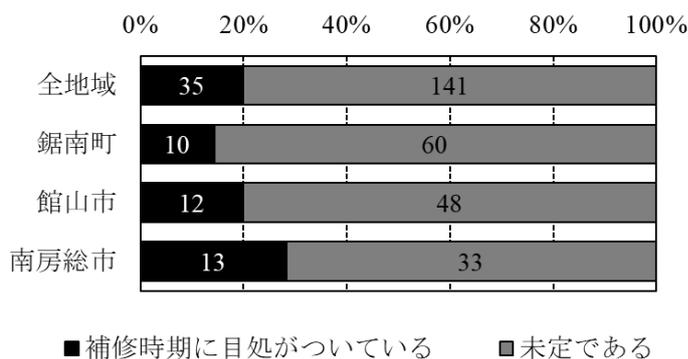


図4 補修時期の目処

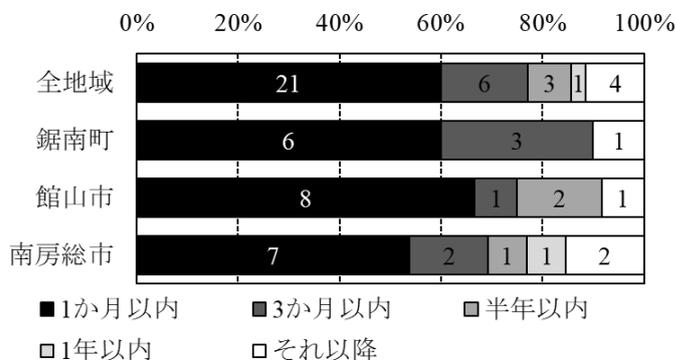


図5 補修時期

2. 火災保険等を活用した補修実態のアンケート調査

2.1. アンケート調査概要

2020年2月下旬から3月中旬にかけて、郵送、Webサイト、アンケートブース設置による火災保険等を活用した補修実態のアンケート調査が行われた。郵送によるアンケートは、鋸南町勝山地区(391戸)、南房総市多田良(468戸)、館山市八幡(1039戸)、勝浦市勝浦(352戸)、勝浦市浜勝浦(382戸)を対象に実施した。カッコ内は配布数。ただし、配達時点までの転出入等により若干数の変動がある。2月18日に発送手続きを完了し、3月19日までの回答数は688である。Webサイトによるアンケートは、勝浦市の広報(広報かつうら)を通じた告知によりアンケート用ホームページアクセスのためのURLならびにQRコードを周知した。3月19日までの回答数は14である。アンケートブース設置によるアンケートは、鋸南町役場、館山市役所、南房総市役所、館山市コミュニティセンター、

千倉介護予防センターゆらり，勝浦市役所の計 6 か所に設置した。3 月 9 日までの回答数は 48 である。火災保険等を活用した補修実態の分析においては，これらの異なる手段によるアンケートへの回答を区別せずに集計し分析を行った。

2.2. アンケート項目および集計結果

アンケートは住宅に関する項目，屋根修理に関する項目，火災保険（火災共済含む）の活用に関する項目で構成される。設問数は合計で 19 問あるが，回答者は回答内容に応じて以降の回答する設問を選択するので，回答者によって設問する回答数は異なる。図 6～8 に設問，設問に対する選択肢，回答を集計した結果を示す。

Q1-1		
	割合(%)	回答数
戸建て	96.5	709
集合住宅	3.5	26

Q1-2		
	割合(%)	回答数
持ち家	90.7	673
借家	9.3	69

Q1-3 築年数		
	割合(%)	回答数
築1年未満	0.7	5
築1年以上、5年未満	5.3	40
築5年以上、10年未満	6.8	51
築10年以上、20年未満	16.2	121
築20年以上、30年未満	17.6	132
築30年以上	53.4	400

Q1-4 令和元年台風15号による住宅屋根の被害およびその修理についてお伺いします。		
	割合(%)	回答数
被害を受け、修理した。	34.8	254
被害を受け、修理する予定である。	25.6	187
被害を受けたが、修理しない。	4.0	29
被害を受けていない。	35.6	260

※「被害を受けたが，修理しない。」「被害を受けていない。」を回答した回答者は Q-11 へ進む。

図 6 住宅に関するアンケートの設問，選択肢，回答結果

アンケート回答者の住宅に関して 97%の回答者の住宅が戸建てであり，また 90%の回答者の住宅が持ち家である。築年数に関して築 30 年以上の住宅の割合が 53%である一方，築 5 年未満の住宅は 6%である。回答者のうち，住宅屋根に被害を受けた割合は 64%である。図 7 および図 8 の Q2-1 以降の回答はこれらの住宅の特徴によらず単純集計した結果である。

Q2-1 被害範囲と修理範囲をお答えください。			
	割合(%)		回答数
損傷した箇所は一部分で、その部分のみ修理した。		61.5	260
損傷した箇所は一部分だが、屋根を全面修理した。		11.8	50
屋根全体が損傷したので、全面修理した。		10.4	44
その他		16.3	69

Q2-2 Q2-1で「損傷した箇所は一部分だが、屋根を全面修理した。」とお答えした方にお伺いします。そのような判断に至った理由をお答えください。(複数回答可)			
	割合(%)		回答数
何度も被害を受けているから。	-		20
被災前から、元々改修するつもりだった。	-		5
この機会に改修しようと思った。	-		42
修理業者に提案を受けたから。	-		22
その他	-		13

Q3-1 修理の際に、耐風性能が向上するような改修を実施、あるいは検討しましたか。			
	割合(%)		回答数
実施した。		38.9	149
検討したが、実施しなかった。		14.4	55
検討していない。		46.7	179

※「実施した。」と回答した回答者は Q3-2 へ、「検討したが、実施しなかった。」と回答した回答者は Q3-3 へ、「検討していない。」と回答した回答した回答者は Q4 へ進む。

Q3-2 Q3-1で「実施した」とお答えした方にお伺いします。具体的にどのような屋根材を使って修理したかお答えください。			
	割合(%)		回答数
損傷した屋根材をそのまま再利用した。		10.6	17
損傷したものと同じ屋根材を新調してそれを使用した。		33.8	54
損傷したのものよりも耐風性能が強い屋根材を使用した。		50.0	80
分からない。		5.6	9

Q3-3 Q3-1で「検討したが実施しなかった」とお答えした方にお伺いします。そのような判断に至った理由をお答えください。(複数回答可)			
	割合(%)		回答数
見積もりが高いと感じたため。		11.7	12
手元の資金不足。		34.0	35
改修に時間がかかりすぎるため。		16.5	17
特段修理業者から提案されなかったため。		16.5	17
建物構造上、改修が困難なため。		4.9	5
保険契約上困難なため。		5.8	6
その他		10.7	11

Q4 修理業者(工務店等)はどのように見つけましたか。(複数回答可)			
	割合(%)		回答数
保険会社・保険代理店の推薦		3.2	14
自治体(都道府県・市区町村)の推薦		1.4	6
Web		1.4	6
知り合い等からの紹介		46.6	205
新築・購入時の連絡先		31.8	140
修理業者からの連絡		2.3	10
その他		13.4	59

Q5 修理業者はどのエリアにいる業者でしょうか。			
	割合(%)	回答数	
同じ町内		27.1	117
同じ市内		33.2	143
同じ県内		25.5	110
他県		11.8	51
その他		2.3	10

Q6 修理が始まったのは、被害を受けてからどれくらい経過した後でしょうか。			
	割合(%)	回答数	
当日～3日		3.4	15
3日～1週間		5.2	23
1週間～2週間		6.1	27
2週間～1か月		7.9	35
1ヶ月～3か月		19.1	85
3ヶ月～6か月		28.1	125
まだ修理は始まっていない。		30.3	135

図7 屋根修理に関するアンケートの設問，選択肢，回答結果

屋根の修理に関して、「損傷した箇所が一部分で、その部分のみ修理した。」という回答が260であるのに対して、「損傷した箇所が一部分で、屋根を全面補修した。」という回答は50（前者の約1/5）にとどまった。「損傷した箇所が一部分で、屋根を全面補修した」理由として最も多かったのが、「この機会に改修しようと思ったから。」（41%）であり、次いで「修理業者に提案を受けたから。」（22%）であった。修理の際に耐風性能が向上するような改修を実施したと回答した回答者は39%である一方、改修を検討しなかった回答者は46%に上った。改修を検討したが実施しなかった場合の理由として最も多かったのが、手元の資金不足（34%）であった。

修理業者に関して、知り合い等のつての紹介（47%）や新築・購入時の連絡先（32%）を頼りに修理業者を選ぶケースが多くみられた。また、これらの修理業者は同じ町内（27%）、同じ市内（33%）または同じ県内（26%）が大半であり、他県の修理業者に修理を依頼するケースは12%にとどまった。また、修理開始時期については、発災から約半年が経過したアンケート時点でもまだ修理は始まっていないと回答した回答者が最も多かった（30%）。

Q7 今回の台風で被害を受けた箇所の修理費用は、どのような方法で手当されましたか。（複数回答可）			
	割合(%)	回答数	
手元資金（金融機関からの借入れ含む）	-	-	146
国・地方自治体からの支援（見舞金など）	-	-	84
火災保険（火災共済含む）	-	-	314
その他	-	-	41

Q8 加入している火災保険（火災共済含む）が風災を補償していることを事前にご存知でしたか。			
	割合(%)	回答数	
はい		76.0	294
いいえ		24.0	93

※Q8は、Q7で「火災保険（火災共済含む）」と回答した回答者のみ回答。

Q9 保険の支払額には満足していますか。(複数回答可)		
	割合(%)	回答数
満足している。	-	173
支払額が修理費に届かなかった。	-	109
支払いのタイミングが遅くなった。	-	21
その他	-	53

※Q9は、Q7で「火災保険(火災共済含む)」と回答した回答者のみ回答。

Q10 保険金を受け取ったのは、被害を受けてからどれくらい経過した後でしょうか。		
	割合(%)	回答数
当日～3日	1.1	4
3日～1週間	0.8	3
1週間～2週間	3.6	13
2週間～1か月	13.2	47
1ヶ月～3か月	40.1	143
3ヶ月～半年	21.0	75
まだ受け取っていない。	20.2	72

Q11-1 受け取った保険金に自己資金などを上乗せして、全面リフォームすることができる場合あることをご存知でしたか？		
	割合(%)	回答数
はい	50.9	353
いいえ(受け取った保険金は、必ず被害の修理のみに使わなくてはならないと思っていた。)	49.1	341

Q11-2 自己負担額がどの程度であれば、屋根の全面リフォームをしたいと思いますか。		
	割合(%)	回答数
残りの費用150万円すべてを自己負担して、全面リフォームする。	22.1	151
自己負担金が100万円までなら、全面リフォームする。	20.2	138
自己負担金が50万円までなら、全面リフォームする。	23.1	158
自己負担金が20万円までなら、全面リフォームする。	7.9	54
自己負担金が10万円までなら、全面リフォームする。	3.4	23
自己負担金が発生するなら、全面リフォームはしない。	23.4	160

※Q11-2の設問の前に、『以下の状況において、もしあなたがAさんの立場だった場合を想像してください。「台風により屋根に一部被害を受けたAさんは、被害を受けた部分を修理できるだけの保険金50万円を受け取りました。Aさんはこの機会に、より耐風性能の高い屋根に全面リフォームしようと考え、見積もりを取り寄せたところ、おおよそ200万円の費用がかかることがわかりました。』という条件設定あり。

Q12 Q11-2で「自己負担金が発生するなら、全面リフォームはしない。」とお答えした方にお伺いします。自己負担金が発生するなら、全面リフォームしない理由は何ですか。(複数回答可)		
	割合(%)	回答数
自分が住んでいる間に、もう一度台風が来ることはないと思うから。	4.1	7
再び台風が来て被害が発生しても、保険金が支払われるから。	9.4	16
全面リフォームしても、再び台風が来たら被害が発生すると思うから。	49.1	84
リフォーム以外にお金を使いたいから。	17.5	30
その他	19.9	34

図8 火災保険(火災共済含む)の活用に関するアンケートの設問、選択肢、回答結果

火災保険等の活用実態に関して、被害を受けた箇所の修理費用として火災保険(火災共済含む)が主要な役割を果たしていること(Q7回答数314)が確認された。一方で、回答者のうち24%は加入している火災保険(火災共済含む)が風災を補償していることを事前に知らなかったことも明らかになった。保険の支払額に満足しているとい

う回答も多くあった（Q9 回答数 173）が、支払額が修理費に届かず（Q9 回答数 109）、手元資金の持ち出しの場合が多くあることが明らかになった。保険の受け取り時期については、発災後 1 か月～3 か月（40%）という回答が最も多く、まだ受け取っていないという回答も 20%あった。また、受け取った保険金に上乗せして全面改修できる場合（復旧義務のない契約。近年の火災保険ではこのような契約が主流）があることを約半数の回答者が知らなかった。

屋根の全面改修に関して、相当額（150 万円）の自己負担があっても全面改修するだろうと回答した回答者が 22%である一方、自己負担金が発生するなら全面改修しないと回答した回答者も同程度（23%）であり、両極端な結果となった。自己負担金が発生するなら全面改修しない理由で最も多かったのは、「全面リフォームしても、再び台風が来たら被害が発生すると思うから。」であった。これには、建設技術に対する不信あるいはあきらめ、または周辺の住宅からの飛来物による被害は自身では防ぎようがないというような理由があるものと推察される。

2.3. 耐風性能が向上する改修に関する実態の分析

将来の強風災害低減には住宅ストック全体の耐風性能を上げていく必要があるが、本アンケート結果によれば、既存の住宅についてはたとえ被災したとしても損傷個所が一部分にとどまる場合にはその部分のみを修理する場合（Q2-1 の回答結果）および耐風性能が向上するような改修を実施検討しない場合（Q3-1 の回答結果）が多く、当該住宅屋根の耐風性能向上にはつながりにくい実態が明らかになった。そこで、全面修理が進まない要因について、アンケート結果を用いてより詳細な分析を行った。

まず、Q2-1（被害範囲と修理範囲をお答えください。）と Q3-1（修理の際に、耐風性能が向上するような改修を実施、あるいは検討しましたか。）の回答結果をマトリクスで集計した結果を図 9 に示す。この結果から、全面修理する場合には耐風性能が向上するような改修を実施する割合が極めて高い（90%）ことがわかる。一方、一部のみ修理する場合には耐風性能が向上するような改修実施する場合は低い（26%）ことがわかる。局所的に耐風性能が向上する改修を行っても屋根全体の耐風性能向上への寄与は限定的であるから、屋根全体の耐風性能を上げるためには屋根全面の修理の際に耐風性能が向上する改修を行うのが好ましく、上の結果はこのようなことが実際に行われていることを裏付けている。

	Q3-1 修理の際に、耐風性能が向上するような改修を実施、あるいは検討しましたか。			
Q2-1（被害範囲と修理範囲をお答えください）の回答より	実施した。	検討したが、実施しなかった。	検討していない。	計
一部のみ修理した。	26%	16%	58%	213
全面修理した。	90%	6%	4%	79

図 9. 修理範囲と耐風性能向上の改修の実施あるいは検討有無の関係

次に、Q2-1（被害範囲と修理範囲をお答えください。）と Q11-2（自己負担額がどの程度であれば、屋根の全面リフォームをしたいと思いますか。）の回答結果をマトリクスで集計した結果を図 10 に示す。この結果から、損傷した箇所は一部分であった回答者のうち、その部分のみを修理した回答者と屋根を全面修理した回答者との間では、全面リフォームに対する自己負担に対する考えが大きく異なることがわかる。すなわち、前者では残りの費用をすべて負担してでも全面リフォームする割合が 13%であるのに対して、後者は 30%である。Q3-3 で耐風性能を向上する改修を検討したが実施しなかった理由で「手元の資金不足」が最も多かった（34%）ことも踏まえると、金銭的負担が耐風性能向上に資する改修をためらう要因であることが確認できる。一方で、Q3-3 で「改修に時間がかかり

すぎる」(16.5%)、「特段修理業者から提案されなかったため」(16.5%) という回答も相当数あり、供給側の工夫で全面改修が進む余地があることも示唆される。

		Q11-2 自己負担額がどの程度であれば、屋根の全面リフォームをしたいと思いますか。						
Q2-1 (被害範囲と修理範囲をお答えください。)の回答より	残りの費用150万円すべてを自己負担して、全面リフォームする。	自己負担金が100万円までなら、全面リフォームする。	自己負担金が50万円までなら、全面リフォームする。	自己負担金が20万円までなら、全面リフォームする。	自己負担金が10万円までなら、全面リフォームする。	自己負担金が発生するなら、全面リフォームはしない。	計	
損傷した箇所は一部分で、その部分のみ修理した。	13%	22%	25%	9%	4%	28%	221	
損傷した箇所は一部分だが、屋根を全面修理した。	30%	24%	22%	4%	0%	20%	46	

図 10. 修理範囲と全面リフォームに対する自己負担金に対する考え方との関係

続いて、築年数と耐風性能が向上する改修の実施・検討との関係を分析する。このため、Q1-3 (築年数) と Q3-1 (修理の際に、耐風性能が向上するような改修を実施、あるいは検討しましたか。) の回答結果をマトリクスで集計した結果を図 11 に示す。築年が古くなるほど、補修の際に耐風性能が向上する改修を実施する割合が顕著に高くなるのがわかる。一般的に、築年が古い住宅は耐風性能が低いことが多いので、このような住宅の耐風性能が改善されることは住宅ストック全体の耐風性能向上への寄与は大きいと考えられる。裏を返せば、築年が古いにもかかわらず耐風性能が向上するような改修を検討していない回答者 (41%) に対して、改修実施へ誘導することが課題であると言える。

Q1-3 築年数	Q3-1 修理の際に、耐風性能が向上するような改修を実施、あるいは検討しましたか。			計
	実施した。	検討したが、実施しなかった。	検討していない。	
築1年未満	0%	0%	100%	2
築1年以上、5年未満	13%	31%	56%	16
築5年以上、10年未満	16%	11%	74%	19
築10年以上、20年未満	24%	21%	56%	34
築20年以上、30年未満	44%	14%	42%	66
築30年以上	48%	11%	41%	206

図 11. 築年数と耐風性能向上の改修の実施あるいは検討有無の関係

2.4. 修理業者の所在地と修理開始時期の関係に対する考察

修理業者の所在地と修理が始まった時期との関係を調べるために、Q5 (修理業者はどのエリアにいる業者でしょうか。) と Q6 (修理が始まったのは、被害を受けてからどれくらい経過した後でしょうか。) の回答結果をマトリクスで集計した結果を図 12 に示す。この結果から、まず身近なところから修理業者を探し、県外の修理業者へと範囲が広がっていることが示唆される。また、他県の修理業者が修理を行う場合で、「まだ修理は始まっていない」ケースは9%であり、県内の業者 (33~34%) と比較すると著しく低い。この背景には、多少時間がかかっても繋がりがあある業者に修理を実施してほしいという被災者の方針 (Q4 の回答と整合する) と修理を待てないという妥協があるものと推察される。復旧遅延による間接的な被害を低減するためにも、県外の信頼できる業者が復旧に参入できる環境づくりが望まれる。

		Q6 修理が始まったのは、被害を受けてからどれくらい経過した後でしょうか。							
Q5 修理業者はどのエリアにいる業者でしょうか。								計	
	当日～3日	3日～1週間	1週間～2週間	2週間～1か月	1ヶ月～3か月	3ヶ月～6か月	まだ修理は始まっていない。		
同じ町内	4%	9%	5%	7%	22%	20%	34%	104	
同じ市内	3%	4%	10%	9%	14%	27%	33%	125	
同じ県内	3%	4%	4%	9%	18%	29%	33%	106	
他県	0%	0%	2%	7%	27%	55%	9%	44	
その他	0%	0%	0%	0%	25%	0%	75%	4	

図 12. 修理業者の所在地と修理開始時期の関係

3. まとめ

本報告では、現地調査およびアンケート調査に基づいて被災住宅の補修状況および火災保険等を活用した補修実態を分析した結果を取りまとめた。補修開始時期について、2019年11月中旬時点（発災から2か月）では80%の被災住宅で見通しがたっておらず、2020年2月下旬から3月上旬時点（発災から6か月）においても30%の被災住宅で補修が開始されていない実態が明らかになった。復旧遅延の原因は補修に関する人的資源の不足であると考えられるが、県外の修理業者も含めたより広域での供給を考えた場合には、復旧遅延が低減されることが示唆される調査結果も得られた。将来発生する可能性がある広域強風災害時における間接的な被害の低減のために、このようなミスマッチを解消するための施策を検討する必要があると考える。

また、被害を受けた屋根の補修に関して、損傷した箇所が一部分の場合には多くの場合、当該箇所のみを修理を行っている実態が確認された。住宅ストックの大半は築年が古い住宅（新築住宅ではないということ）であることを考えると、このような補修に関する慣行では、強風に対して脆弱な住宅は脆弱なままで、住宅ストック全体の耐風性能が向上せず、将来の強風被害の低減は望めない。被災時に耐風性能が向上するような改修を行わない要因として、金銭的な理由と建設技術に対する不信、さらには自身の努力では周辺からの飛来物による被害には対処できないなどの理由が挙げられる。金銭的な理由によるものに対しては耐風補強に関する支援策、建設技術に対する不信に対しては啓蒙活動、飛来物による被害については国民の生命、健康及び財産の保護の観点から対処方法についての検討が必要であると考えられる。

謝辞

本アンケート調査を実施するにあたっては、SOMPO リスクマネジメント株式会社リスクマネジメント事業本部 桑原健氏、棟方章晴氏、東京海上日動リスクコンサルティング株式会社林孝幸氏、篠原瑞生氏、池田昌子氏、岸田夏葵氏、エーオンベンフィールドジャパン株式会社越智紗香氏、ウイリスリー ジャパン株式会社山本耕嗣氏、四井早紀氏、ガイカーペンター株式会社久下康太郎氏、MS&AD インターリスク総研株式会社堀江啓氏、損害保険料率算出機構栗林薫氏、清水アレックス氏に多大なるご協力いただきました。ここに謝意を示します。

航空写真を用いた住宅屋根被害の分析

Analysis of roof damage on residential houses with aerial photo image

河野祐哉*1, 西嶋一欽*2

Yuya KONO, Kazuyoshi NISHIJIMA

This study reports the result of the analysis of roof damage on residential houses by using aerial photo image. The analysis focuses on the damage ratio of roof by utilizing blue sheet as proxy of roof damage. The focused areas are south part of Chiba prefecture including Kyonan, Minamiboso and Tateyama. The analysis revealed, among others; (1) highly damaged areas are observed at coastal area of Kyonan, western coastal area of Minamiboso, and southern coastal area of Tateyama, where roof damage ratios reach 30-40%; (2) a higher roof damage ratio (12%) is observed in areas close to coastline (below 200 meters to coastline) as compared to more distant areas (7%); (3) higher damage ratio is observed by the field survey compared to the damage ratio estimated by aerial photo image and satellite image.

Keywords: aerial photographs, remote sensing, geographic information system, roof damage

1. 航空写真を用いた屋根被害部の判別

1.1. 分析対象地域と用いた航空写真

令和元年台風 15 号襲来後に撮影された航空写真から千葉県南部の沿岸部について広域で被害分布を把握することを目的として分析を行った。分析には図 1 (a)に示す国際航業社のデジタルオルソ画像データ（分解能 0.1m, 令和元年 9 月 19 日, 20 日撮影）と図 1 (b)に示す朝日航洋社の簡易オルソデータ（分解能 0.2m, 令和元年 9 月 27 日, 28 日撮影）を用いた。両者が重なっている南房総市西側沿岸部については分解能の高い国際航業社の方を用いた。また、館山市西側沿岸部については、該当の航空写真において被雲部であったため、分析の対象外とした。



(a) 国際航業社 デジタルオルソ画像データ



(b) 朝日航洋社 簡易オルソデータ

図 1 用いた航空写真の範囲

*1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
修士課程

Master's Course Program, Department of Architecture and Architectural
Engineering, Graduate School of Engineering, Kyoto University

*2 京都大学防災研究所 准教授・博士

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Doctor of Sciences

1.2. 判別手順

住宅の屋根被害をブルーシートの被覆によって判別した。そのため、本手法では屋根に被害があったとしてもブルーシートで覆われていない住宅は被害なしと判別される。以下に判別手順を示す。

- ① 航空写真を GIS ソフト（本手法では ESRI 社の ArcGIS Pro）に読み込み、建物の位置がオープンストリートマップと正確に合うように適宜位置情報の修正を行う。読み込んだ航空写真の例を図 2 (a)に示す。
- ② 各ピクセルの RGB 値を参照し、ブルーシートの青色の特性を示すピクセルを抽出する。ブルーシート被覆部として抽出したピクセルを図 2 (b)に赤色で示す。
- ③ ZENRIN 社の建物ポリゴンデータのうち、階数が 2 以下で床面積が 30~220 m²のものを住宅として抽出し、②で抽出されたブルーシート被覆部と住宅ポリゴンを重ね合わせる。図 2 (c)にその様子を示す。
- ④ ブルーシート被覆部が屋根面積の 5%以上を占める住宅を屋根被害住宅と判別する。②で抽出したブルーシート被覆部のノイズ除去のため、ブルーシート被覆部が屋根面積の 5%未満のものは被害なしとして扱う。屋根被害住宅と判別された住宅を図 2 (d)に緑色で示す。



(a) 読み込まれた航空写真



(b) ブルーシートの青色部分を抽出



(c) 住宅ポリゴンとの重ね合わせ



(d) 屋根被害住宅の判別

図 2 屋根被害住宅の判別手順

1.3. 判別結果の精度検証

1.2.節に示した手順で行った屋根被害住宅の判別結果を目視で判別したものと比較して精度検証を行った。特に被害が多かった南房総市の富浦駅西側 250m 四方に存在する住宅 190 軒を対象に精度検証を行った。対象地域と実際に目視判別に用いた航空写真を図 3 に示す。

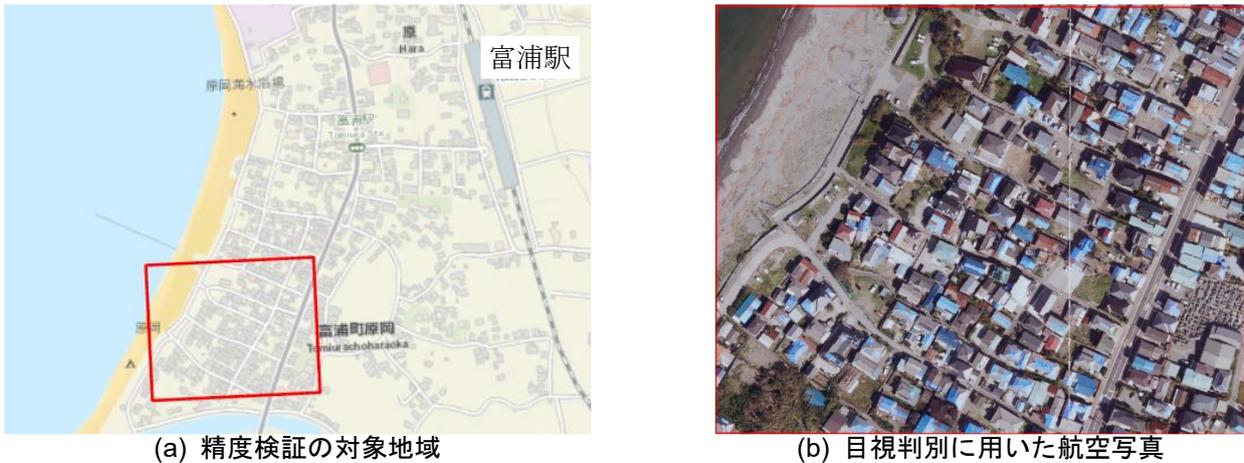


図 3 精度検証の対象地域と用いた航空写真

精度検証の結果を表 1 に示す。目視判別の結果を真として扱い、目視判別では被害がなかったにも関わらず 1.2 節で説明した判別方法（以下、自動判別と呼ぶ）で被害ありと誤判別した場合をタイプ 1 エラー、目視判別で被害なしであった住宅棟数に対するタイプ 1 エラー数の割合をタイプ 1 エラー率と定義する。同様に目視判別では被害があったにも関わらず自動判別で被害なしと誤判別した場合をタイプ 2 エラー、目視判別で被害ありであった住宅棟数に対するタイプ 2 エラー数の割合をタイプ 2 エラー率と定義する。

エラーの数と割合を表 2 に示す。千葉県南部の対象地域全域で航空写真から判別した屋根被害住宅の割合が全住宅の約 8%であることから、タイプ 1 エラー率はタイプ 2 エラー率の約 11.5 倍誤判別の数に影響を与えることを考えると、基本的にトレードオフの関係であるタイプ 1 エラー率とタイプ 2 エラー率は概ね均衡がとれていると考える（実際、1.2 節の④における 5%はこれらのトレードオフを考慮して設定したものである）。

表 1 精度検証結果

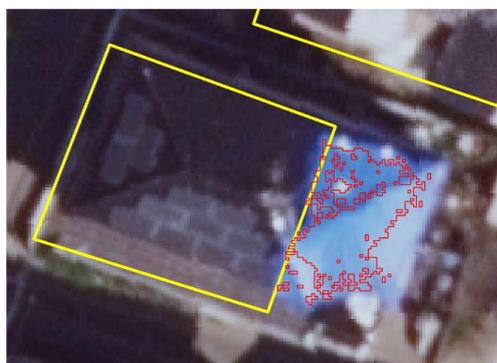
	目視判別 被害あり	目視判別 被害なし	計
自動判別 被害あり	52	4	56
自動判別 被害なし	33	100	134
計	85	105	190

表 2 エラーの数と割合

タイプ 1 エラー数	4
タイプ 2 エラー数	33
タイプ 1 エラー率	3.8%
タイプ 2 エラー率	38.8%

タイプ 1 エラーとタイプ 2 エラーの要因の内訳を表 3 に、各要因の実例を図 4 に示す。図 4 において黄色の線は住宅ポリゴンの輪郭、赤色の線は抽出したブルーシート被覆部の輪郭である。「ポリゴンのずれ」は住宅ポリゴンの輪郭と航空写真で撮影された建物の輪郭が異なっているためにブルーシート被覆部と住宅屋根が上手く重ならない場合、「色アルゴリズム」はブルーシートを抽出する時に設定した RGB 値ではうまくブルーシート被覆部を抽出できていない場合、「ノイズ除去の閾値」はブルーシート被覆部が屋根面に対して小さくノイズとして除去されてしまっている場合、「青色屋根」は屋根面がブルーシートの色と似ているために誤ってブルーシート被覆部と判別された場合のことである。

これらの要因のうち色アルゴリズムとノイズ除去の閾値に関しては調整が可能であるが、先述の通りタイプ1エラーとタイプ2エラーはトレードオフの関係にあるため、均衡がとれている現状において現状以上にタイプ2エラーを少なくする必要はないと考えられる。青色屋根については台風襲来前の航空写真を用いて元の屋根が青色である住宅を除く方法で改善が可能である。ポリゴンのずれについては現状では改善が難しく、本手法での判別結果にはこれに起因する誤判別が一定数含まれることを考慮する必要がある。



(a) ポリゴンのずれが要因となった例



(b) 色アルゴリズムが要因となった例



(c) ノイズ除去の閾値が要因となった例



(d) 青色屋根が要因となった例

図 4 各エラー要因の実例

表 3 エラーの要因内訳

	タイプ1エラー	タイプ2エラー
ポリゴンのずれ	2	19
色アルゴリズム	0	7
ノイズ除去の閾値	0	7
青色屋根	2	0

2. 被害分析結果

分析は標準地域メッシュの5次メッシュ（約250m四方）を単位として行った。メッシュ内に存在する住宅に対する屋根被害住宅の棟数の割合を屋根被害率と定義して各メッシュで算出した。

千葉県南部の沿岸部から抽出した6地点の位置を図5に、各地点における屋根被害率を図6に示す。なお、南房総市東側の沿岸部についてはほとんどのメッシュにおいて屋根被害率が0.1未満であるため省略する。また、住宅棟数が10未満のメッシュは図6では除外している。図6より、鋸南町西側沿岸部、南房総市西側沿岸部、館山市南側沿岸部において屋根被害率が比較的高くなっていることが分かる。

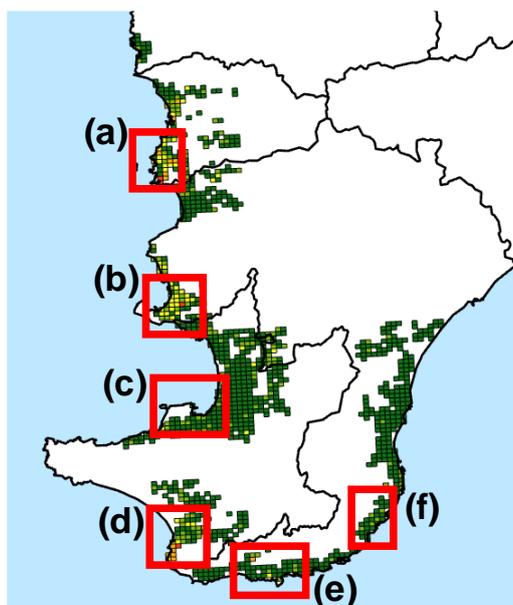
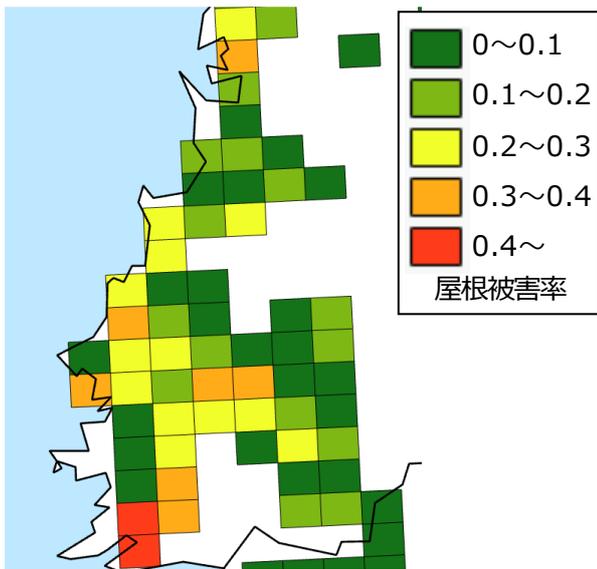
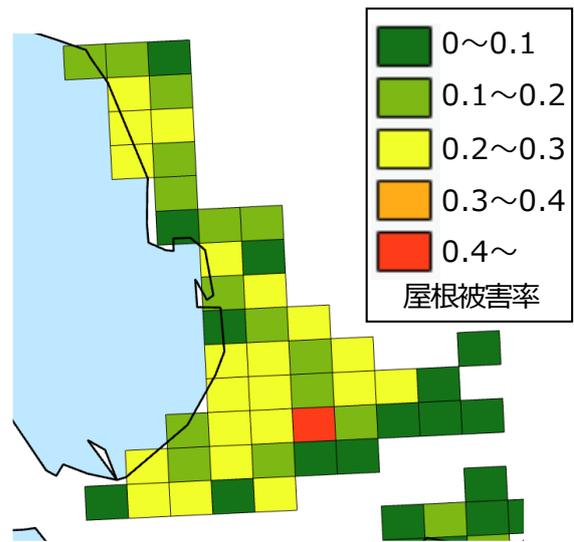


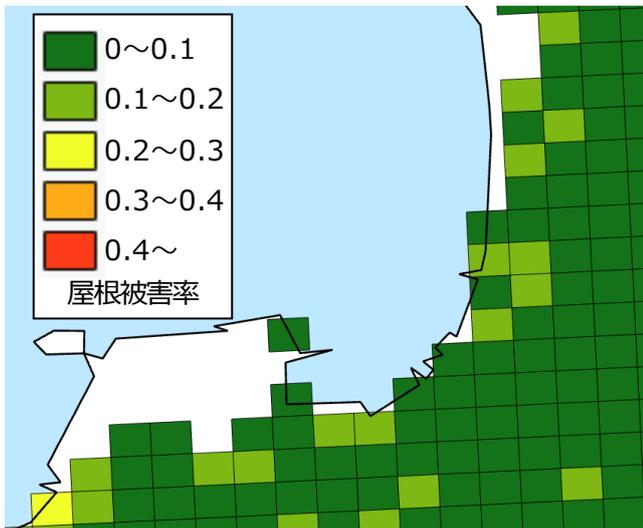
図 5 (a)～(f)6地点の位置



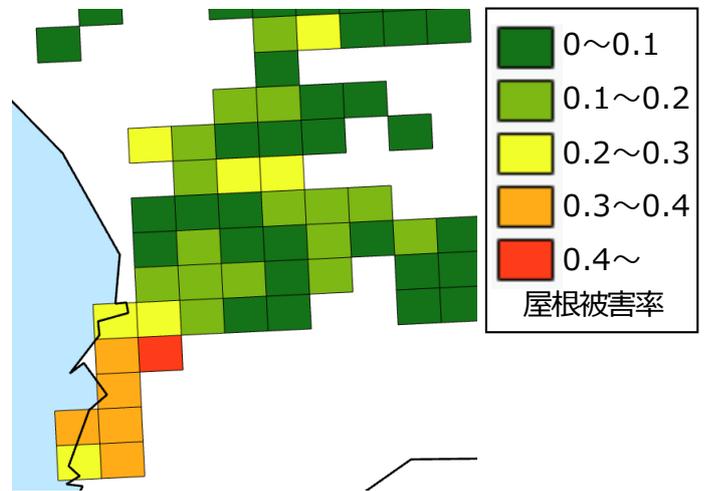
(a) 鋸南町西側沿岸部における屋根被害率



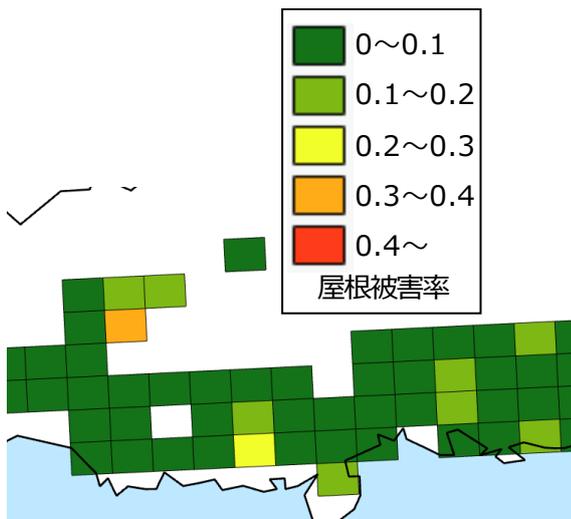
(b) 南房総市西側沿岸部における屋根被害率



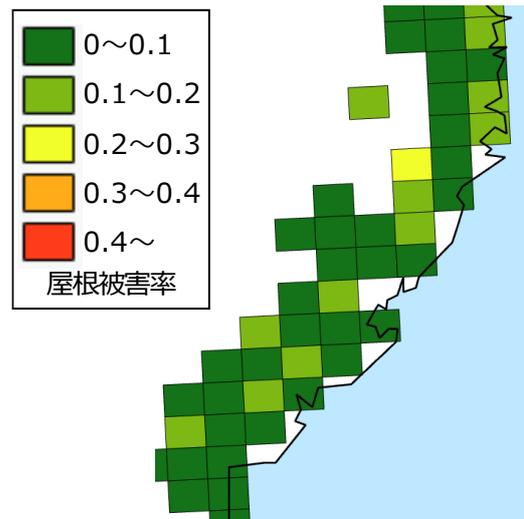
(c) 館山市北側沿岸部における屋根被害率



(d) 館山市南側沿岸部における屋根被害率



(e) 南房総市南側沿岸部における屋根被害率



(f) 南房総市南側沿岸部における屋根被害率

図 6 (a)～(f)各地点における屋根被害率

3. 海岸線からの距離 200m 以下と 200m 超の地域における被害率の比較

建設省告示第 1458 号では屋根ふき材の安全性を確かめる基準に関して、海岸線からの距離が 200m 以下の地域であっても建築物の高さが 13m 以下であれば地表面粗度区分Ⅲ相当の風速を用いて設計してよいとされている（告示第 1454 号の Er）。そこで千葉県南部の沿岸部における屋根被害率を海岸線からの距離が 200m 以下の地域と 200m 超の地域に分けて、その被害率について比較分析を行った。

海岸線からの距離が 200m 以下の地域と 200m 超の地域全体での屋根被害率の比較を表 4 に示す。海岸線からの距離 200m 以下の地域では 200m 超の地域に比べて 1.7 倍ほど屋根被害率が高いという結果が得られた。このことから海岸線からの距離 200m 以下の地域において高さが 13m 以下の建築物に対する耐風性能の基準を上げることで被害を低減できる可能性が示唆された。

次に、2 章で分析に用いた 5 次メッシュを海岸線からの距離 200m 以下と 200m 超の地域に分割し、屋根被害率ごとのメッシュ数の割合を集計した結果を図 7 に示す。また、2 章と同様に千葉県南部の沿岸部 6 地点における屋根被害率の分布を図 8 に示す。図 8 において赤線は海岸線からの距離 200m のラインを示しており、各メッシュの中心に位置する円の色が屋根被害率、円の面積が該当メッシュ内の住宅棟数を示している（円の面積が住宅棟数に比例）。なお、図 7、図 8 の両方において住宅棟数 10 未満のメッシュは除外している。図 7 より、海岸線からの距離 200m 以下の地域は 200m 超の地域と比較すると被害率が 0.1 を超えるメッシュの割合が総じて高いことが分かる。

表 4 海岸線からの距離 200m 以下と 200m 超の地域における屋根被害率

	200m 以下	200m 超
住宅数	10,718	46,758
屋根被害住宅数	1,279	3,311
屋根被害率 (%)	11.9	7.1

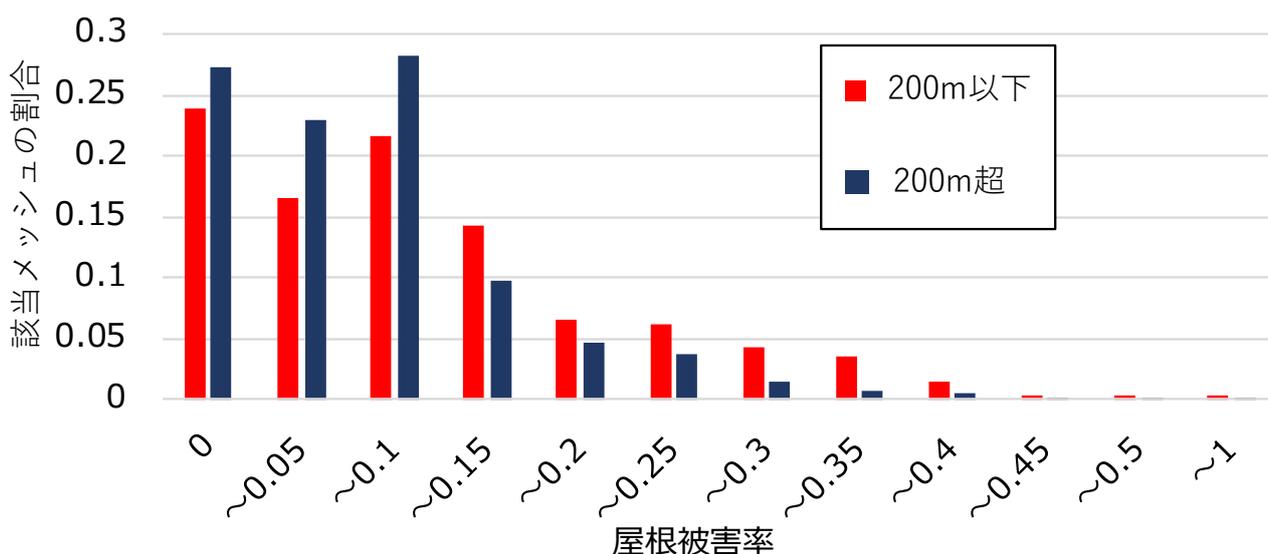
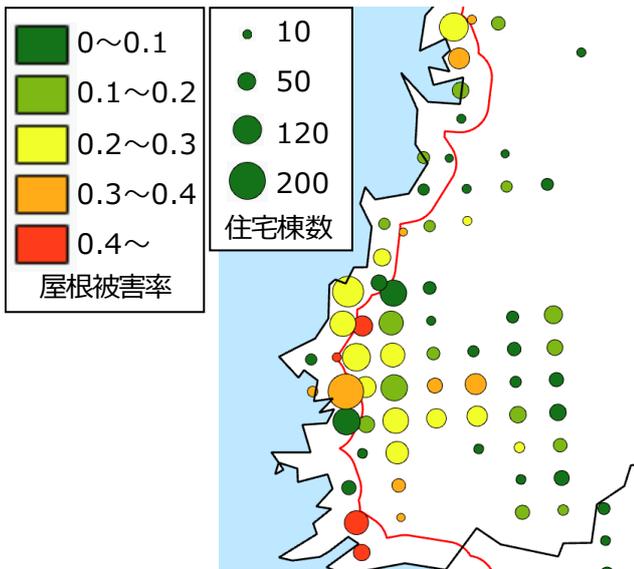
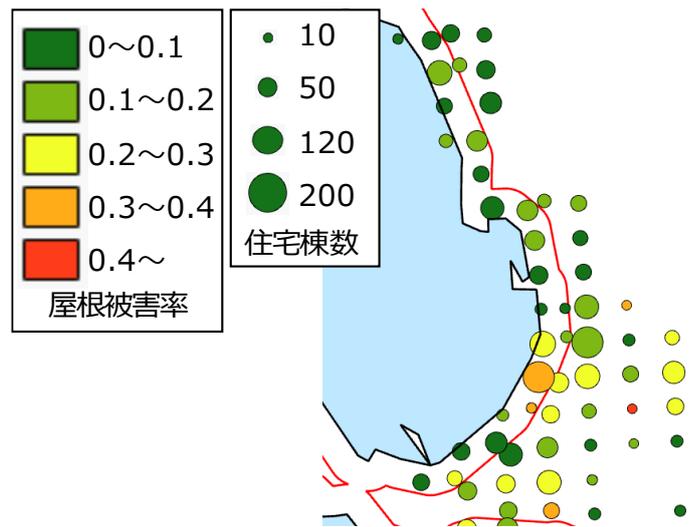


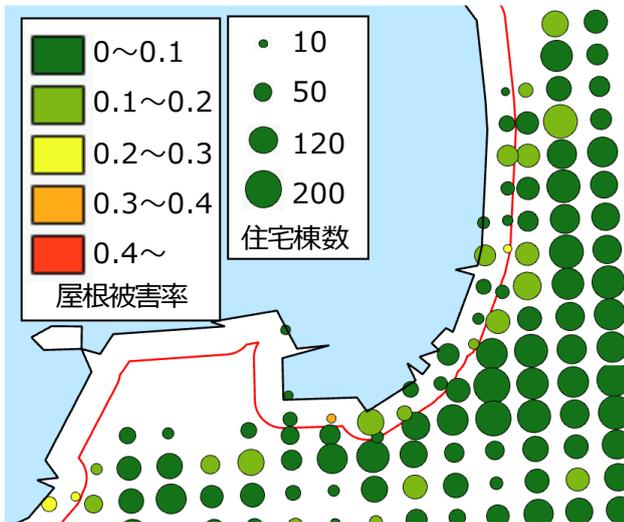
図 7 海岸線からの距離 200m 以下と 200m 超の地域における屋根被害率ごとのメッシュ数



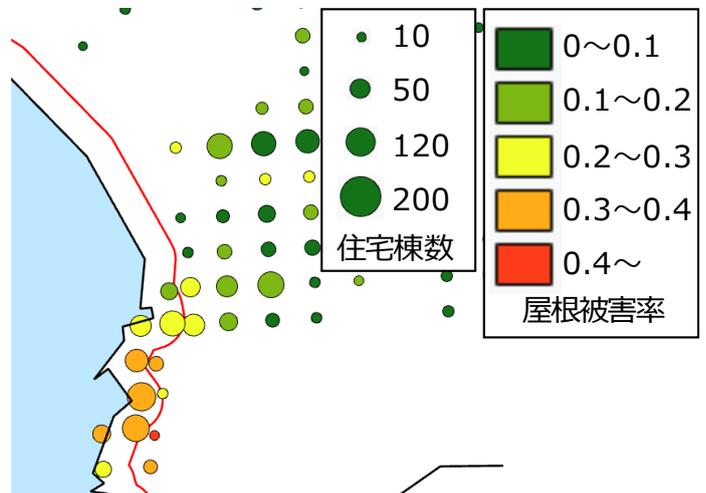
(a) 鋸南町西側沿岸部における屋根被害率



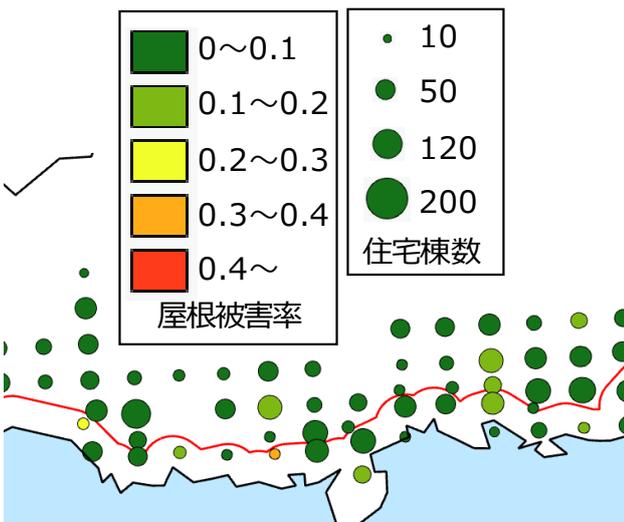
(b) 南房総市西側沿岸部における屋根被害率



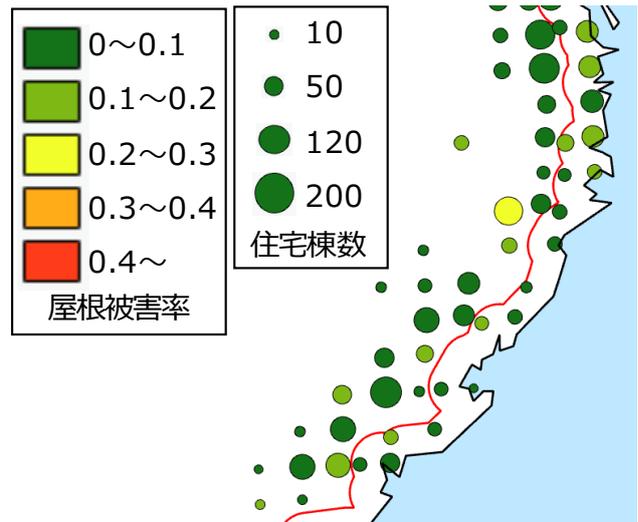
(c) 館山市北側沿岸部における屋根被害率



(d) 館山市南側沿岸部における屋根被害率



(e) 南房総市南側沿岸部における屋根被害率



(f) 南房総市南側沿岸部における屋根被害率

図 8 海岸線からの距離 200m 以下と 200m 超の地域における屋根被害率の分布

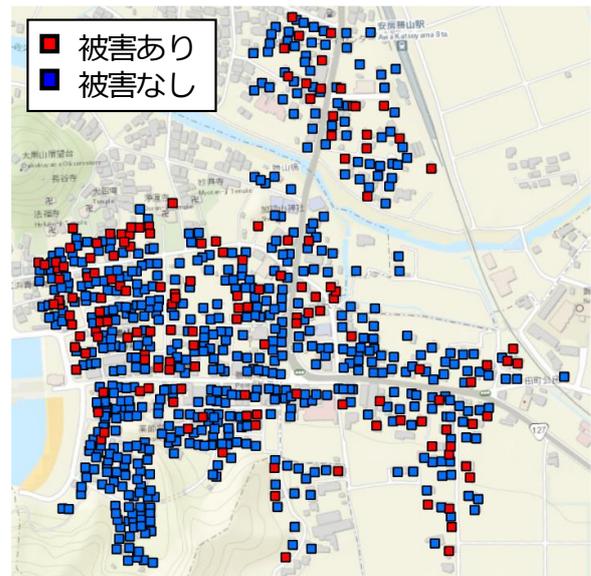
4. 他の手法との比較

航空写真を用いて屋根被害住宅の判別を行った本報告の結果を、衛星画像を用いて同様に判別を行った結果と、現地調査で得られた屋根被害情報とで比較する。比較の対象となる衛星画像による屋根被害住宅の判別結果は Airbus 社の Pleiades 衛星画像(分解能 0.5m, 令和元年 10 月 13 日撮影)を用いたもので、現地調査の結果は令和元年 11 月 8 日から 11 月 11 日に行われたものである。

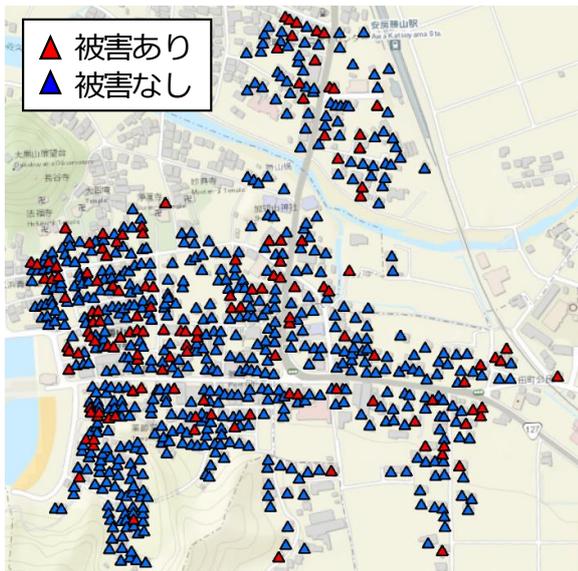
比較の対象地域は図 9 (a)に示す鋸南町の安房勝山駅南西の地域であり、鋸南町において現地調査を行った範囲に合わせている。各手法によって判別された屋根被害の有無を図 9 (b)~(d)に示す。また、対象地域内全体での屋根被害率を各手法で比較した結果を表 5 に示す。現地調査で得られた屋根被害率が航空写真、衛星画像を用いて得られた屋根被害率よりも約 2.5 倍大きいということが表 6 から分かる。この要因について以下に考察を続ける。



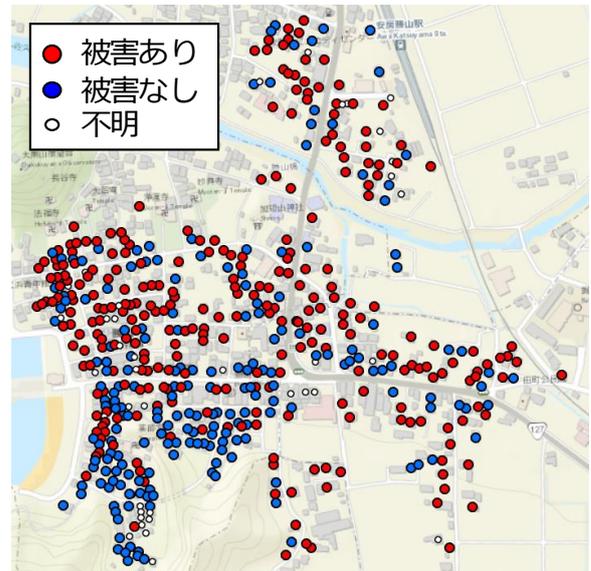
(a) 比較の対象地域



(b) 航空写真(9月27日,28日撮影)による結果



(c) 衛星画像(10月13日撮影)による結果



(d) 現地調査(11月8日~11日実施)による結果

図 9 比較の対象地域と各手法による結果の比較

表 5 各手法における屋根被害率の比較

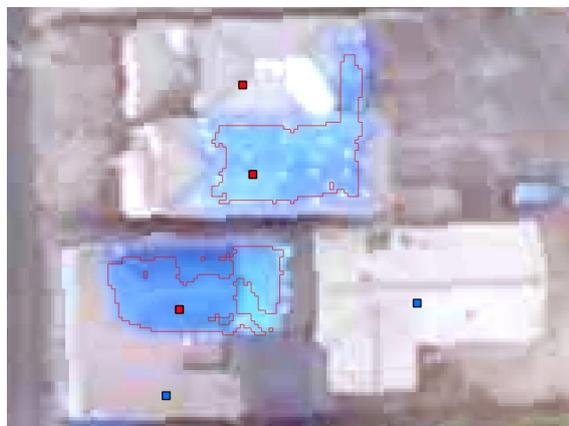
	住宅数	屋根被害住宅数	屋根被害率
航空写真(9月27日,28日撮影)	702	148	0.211
衛星画像(10月13日撮影)	702	137	0.195
現地調査(11月8日~11日実施)	516	279	0.541

まず、現地調査から得られた屋根被害率が他と比べて大きい要因のひとつに母数の違いがあり、これは航空写真と衛星画像で分析する際に全建物ポリゴンデータのうち階数が 2 以下で床面積が 30~220 m²のものを住宅として扱っていたのに対し、現地調査では実際に住宅と思われる建物についてのみデータを付与していたためである。

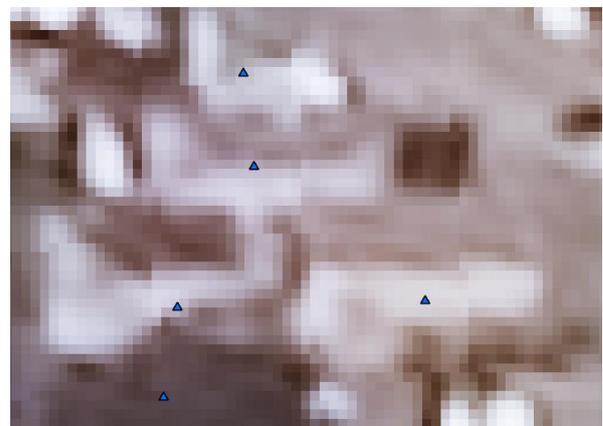
さらに、現地調査では目視調査に加えてヒアリング調査を行っており、ブルーシートで覆っていないような比較的規模の小さい屋根被害も集計している。航空写真と目視で見比べた結果、ブルーシートで覆っておらずヒアリング調査で初めて屋根被害が分かったと思われる住宅は 32 棟であった。

この二つを考慮してもまだ航空写真、衛星画像から判別した屋根被害率は現地調査と比較すると小さく、ブルーシート被覆部を正確に抽出できていない、住宅ポリゴンデータがずれている等の改善すべき課題があると思われる。

また、航空写真から分析した屋根被害率に比べて衛星画像から分析した屋根被害率が小さくなっている要因のひとつに航空写真では確認されたブルーシートが衛星画像では確認されなかったという事例がいくつかあった。これについては復旧が完了した、もしくは 10 月 12 日に襲来した令和元年台風 19 号によって飛散したという可能性が考えられる。



(a) 航空写真(9月27日,28日撮影)



(a) 衛星画像(10月13日撮影)

図 10 ブルーシート被覆部が消滅した例

5. まとめ

航空写真を用いて広域で住宅屋根被害の判別を行う手法を確立し、目視による判別と比較することでその精度を確認した。被害なしの住宅を被害ありと誤判定してしまうタイプ 1 エラー率が 3.8%、被害ありの住宅を被害なしと誤判定してしまうタイプ 2 エラー率が 38.8%であり、屋根被害率約 10%の地域で分析する上では均衡がとれていることが確認された。

千葉県南部の沿岸部で屋根被害率を分析したところ鋸南町西側沿岸部、南房総市西側沿岸部、館山市南側沿岸部において特に高く、0.4 を超える地域もあった。さらに、海岸線からの距離 200m 以下の地域と 200m 超の地域を分けて比較したところ、海岸線からの距離 200m 以下の地域は 200m 超の地域より約 1.7 倍屋根被害率が高いことが分かった。このことから建設省告示第 1454 号において高さ 13m 以下の建築物であれば地表面粗度区分Ⅲ相当の風速を設計に用いてよいとされている海岸線からの距離 200m 以下の地域について、耐風設計の基準を向上させることで被害を低減できる可能性が示唆された。

航空写真から分析した屋根被害率を、衛星写真から分析したものおよび現地調査から得られた被害情報と比較した。衛星画像による結果とは時系列の違いにより多少の差はあるものの概ね同程度の結果が得られたが、現地調査の結果と比べると屋根被害率が小さく、改善の必要性があることが示された。

Damage and chemical releases from industrial facilities affected by Typhoon 15 (2019)

*Ana Maria CRUZ*¹, Hiroshi ISHIMARU*², Shin-ichi AOKI*³*

This study reports on the analysis of impacts of Typhoon 15 on industrial installations in Chiba and Ibaraki Prefecture based on field visits and interviews in Tokyo and Ichihara City, and review of News articles. The interviews revealed that the onsite gust wind speed near the Chiba Police Headquarters reached to 53 m/s, and exceeded 42 m/s at Sodegaura and Anegasaki districts. Despite the record wind speeds, the typhoon caused relatively minor damage to industrial installations. Damage reported included the collapse of a cooling water tower, and damage to scaffoldings, step ladders and equipment insulation. A minor hazardous materials release was reported with no injuries or offsite consequences.

Keywords: *hazardous material releases, industrial installations, wind damage*

This section provides an analysis of the impact of typhoon 15 in 2019 on industrial installations located in Chiba and Ibaraki prefectures. The results here presented are based on the review of News articles, government webpages, and two sets of interviews in Tokyo and Ichihara City. These were carried out in December 2019 and in February 2020, respectively. Typhoon 15 caused relatively minor damage to installations including falling of scaffoldings and insulation damage, and only one minor hazardous material release was reported. The interviews revealed that onsite gust wind speeds in at least three locations exceeded 42m/s. This will be discussed further in the next sections.

1 Damage and hazardous materials releases

Based on the interviews and data collected, the following cases were identified:

1. A cooling tower collapsed at the Japan Atomic Energy Agency Oarai, Research and Development Institute (North District site) in Ibaraki Prefecture. The accident occurred at 7:40 am on September 9, 2019 at the secondary cooling tower of the material testing reactor (JMTR). According to the interviews the cooling tower collapsed due to deterioration and rotting of the internal wood structure of the cooling tower, lack of adequate inspection and structural integrity check, and the strong wind. Figure 1 shows the cooling tower before (a) and after typhoon 15 (b), and a map showing the location of the facility (c).

* 1	Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Ph.D. (Eng.)
* 2	Prof., Department of Management of Industry and Technology, Osaka University Ph.D. (Eng.)
* 3	Prof., Department of Civil Engineering, Osaka University Ph.D. (Eng.)



Figure 1. Cooling tower at JMTR before typhoon 15 (left); and (b) Collapsed cooling tower at JMTR after typhoon 15 (right).

2. A stripping tower of a gas converter collapsed outside of the No. 1 steel mill at the oil complex in Kimitsu City at Nippon Steel Co., Ltd. Kimitsu Steel Works in Chiba Prefecture on September 9, 2019. The collapse of the stripping tower resulted in damage to the dust collecting pipes and gas pipes of the converter. However, no gas leak and no injuries were reported. Furthermore, there was confirmation that there was no risk of fire by the local fire department (FDMA 2019).
3. A pipe below a storage tank containing hydrochloric acid (concentration: 17%) was damaged by a steel step ladder that fell due to high winds during the typhoon at JFE Chemical East Japan, Chiba Works at 4:30 am on September 9, 2019. The damage caused leakage of hydrochloric acid. The released hydrochloric acid mixed with rainwater and flowed out from a drain to the sea. The concentration of the hydrochloric acid and rain water solution was measured and confirmed to be less than 1% in the drain.
4. A steel ladder on a flare stack fell due to the strong wind at an industrial installation “Y” (due to confidentiality issues, we cannot reveal the name of the installation) in Ichihara City. There was no gas release or major damage due to the ladder collapse. Damage to scaffoldings and insulation in several areas of the plants was also reported. Furthermore, a small truck was lifted and turned over by the wind, and a temporary warehouse at the plant in Sodegaura District was damaged. No injuries were report.

2 Analysis and discussion

Figure 2 shows a map indicating the path of Typhoon 15 and the location of the affected installations. Three installations were within approximately 10 km from the center of the typhoon on the front right quadrant which experiences the highest wind speeds (Simpson and Riehl 1981). An anemometer located near the Chiba Prefecture Police Headquarters measured a maximum wind speed of 53 m/s. Measurements at “Y”'s two plants, one in Anegasaki District and the other one in Sodegaura District both recorded maximum wind speeds of 42.6 m/s. According to company officials the plant follows the Building Standards Law (38m/s - 10 min average wind speed at 10m based on the Provisions of the Revised Building Code). However, they did not confirm if they apply a safety factor, and if so, what the equivalent return period is above the 50-year return period. The 10 min average wind speeds recorded by the company were 18m/s at the plant in Anegasaki District, and 23m/s at the plant in Sodegaura District. Company officials expressed their concern for the high wind speeds experienced, which registered record wind speeds

for these locations.

Due to the limited number of visits and interviews carried out so far (as companies are not eager to allow visits), it is not clear how wide spread minor damage occurred. Further visits and interviews are needed to ascertain the extent of impacts, even if minor. The preliminary results of this analysis indicate that industrial installations performed well. However, past experience from hurricanes in the Gulf of Mexico show that even minor damage to non-critical items and appurtenances (step ladders, hand rails, purge pipes and valves, insulation and scaffoldings) can result in flying debris that can cause further damage, and in extended shutdown periods for inspection before start-up (Cruz et al. 2001; Cruz and Krausman 2009).

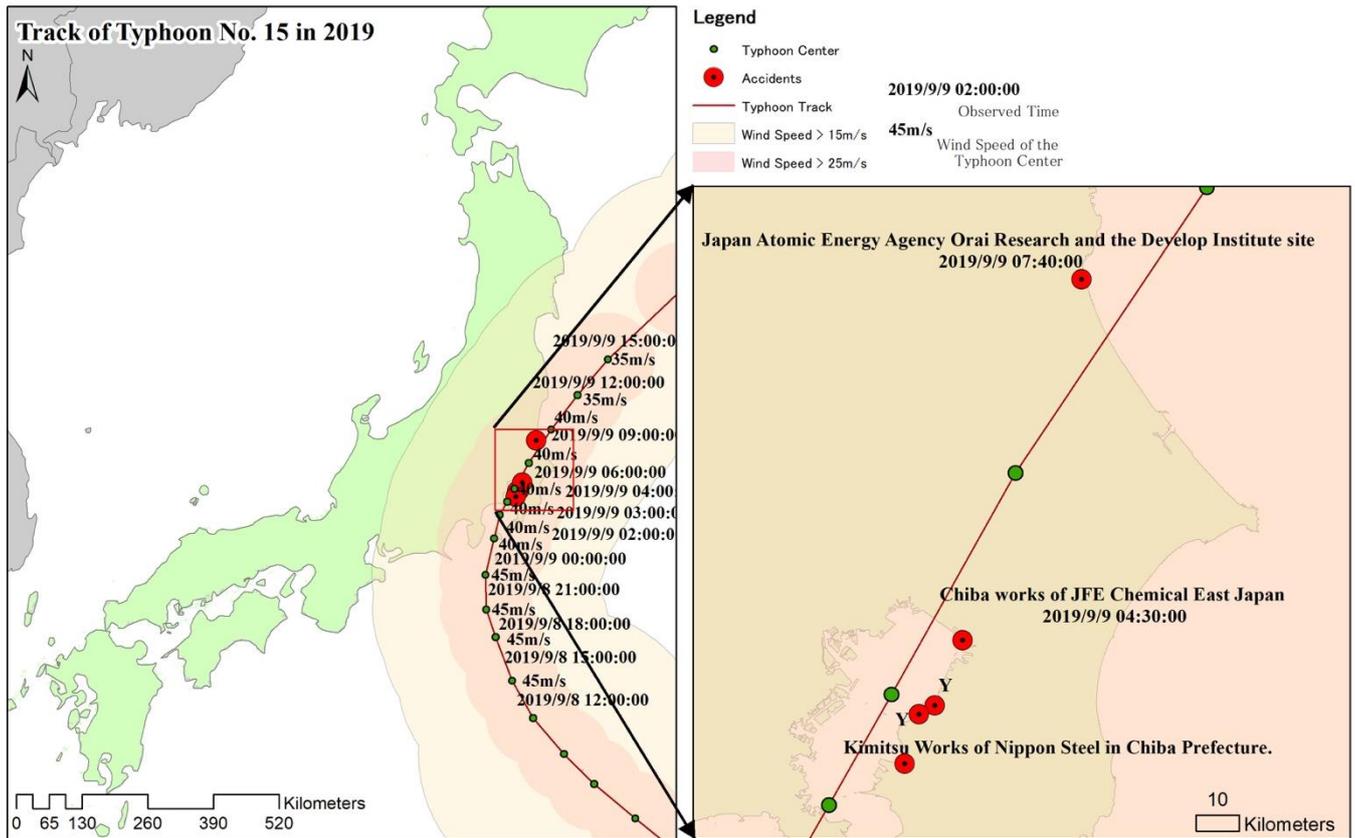


Figure 2. Path of Typhoon 15 showing the location of affected installations.

In the case of the facilities visited, no shut-down was performed prior to typhoon landfall, and the installations continued normal operation during the typhoon. In the United States Gulf of Mexico, industrial installations systematically perform shutdown operations, de-inventorying of storage tanks that are considered more hazardous and take other precautions before the arrival of a major hurricane (Category 3 on the Saffir-Simpson Hurricane Scale) (Cruz and Krausmann 2009). In the future, the possibility of stronger typhoons affecting coastal areas in Tokyo Bay, Nagoya and Osaka Bay should be considered, and in particular, whether or not shut-down procedures should be carried out before the arrival of typhoon force winds. Furthermore, during the interviews, company officials expressed their concern regarding the possibility of tornadoes which could generate winds exceeding the design wind loads. In fact, just before the arrival of typhoon force winds during Typhoon 19 on October 12, 2019, a tornado was reported in Ichihara City (Takahashi 2019; Spectee 2019). Thus, the potential for tornadoes is a real possibility. Finally, damage to the cooling tower at JMTR showed the need to prevent deterioration of equipment through appropriate

inspection and maintenance.

References

- Cruz, A. M., and E. Krausmann (2009). Hazardous Materials Releases from the Offshore Oil and Natural Gas Facilities Following Hurricanes Katrina and Rita. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22** (1), 59-65.
- Cruz, A. M., L. J. Steinberg, and R. Luna (2001). Identifying Hurricane-Induced Hazardous Materials Release Scenarios in a Petroleum Refinery. *Natural Hazards Review*, **2** (4): 203-210.
- Fire and Disaster Management Agency (FDMA) (2019). 令和元年台風第15号による被害及び消防機関等の対応状況（第39報） <Accessed December 12,2019> <https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/taihuu15gou39.pdf>
- Simpson, R. H., & Riehl, H. (1981). *The hurricane and its impact*. Baton Rouge, LA: Louisiana State University Press.
- Takahashi, Ryusei (2019) Powerful Typhoon Hagibis tears through Tokyo region, killing two and prompting rare weather warnings. *The Japan Times. National*. October 12, 2019. <Accessed 15 March> <https://www.japantimes.co.jp/news/2019/10/12/national/powerful-typhoon-hagibis-lashes-japan/#.XnMoYpMzZBw>
- Spectee (2019) Japan: Tornado Touches Down in Chiba Due to Typhoon Hagibis. Video. Reuters. October 12, 2019. <Accessed 15 March> <https://spectee.com/detail/26505>

2019 年台風 15 号と 2018 年台風 21 号の被害の比較検証

— 住家と配電設備の被害に関して —

Comparative Study on Damage Characteristics due to Typhoons Faxai and Jebi

- study on damage to residence and facility of electric power distribution -

丸山 敬*¹, 西嶋 一欽*², 友清 衣利子*³

Takashi MARUYAMA, Kazuyoshi NISHIJIMA, Eriko TOMOKIYO

The severe winds damage by Typhoon Faxai (2019) and Jebi (2018) were surveyed. Characteristics of damage to residence and facility of electric power distribution were comparatively studied. The damage by typhoon Jebi was more extensive than that by typhoon Faxai. The numbers of damage to residence, casualties and inundation by typhoon Jebi was larger than those by typhoon Faxai. On the other hand, the number of totally and half destroyed houses by typhoon Faxai was larger than that by typhoon Jebi. The facility of electric power distribution was extensively damaged in both typhoons and the blackout occurred a lot in the east side and the coastal area of the typhoon center trajectories. The maximum blackout number of houses by typhoon Faxai was less than that by typhoon Jebi. On the other hand, as for the loss and the collapse of the telephone pole and the days until the restoration of the blackout by typhoon Faxai, the damage was about 1.5 times in comparison with typhoon Jebi.

Keywords : comparative study, damage characteristics, typhoon, residence, facility of electric power distribution

3.3.1 はじめに

2019 年台風 15 号 (Faxai : 以降”台風 15 号”と表記) の強風被害は 2018 年 9 月の台風 21 号 (Jebi : 以降”台風 21 号”と表記) と類似する点が多い。いずれも強風・高潮高波・浸水被害を伴っており、引き起こされた被害は現代社会が遭遇する複合災害の典型である。さらに、電力施設の被害および復旧の遅れ等により、電力供給システム、さらには、電力を根幹とした現代社会の脆弱性を露わにした。ここでは主に住家と電力施設の被害に関して、台風 15 号および台風 21 号の強風被害を比較検証して現代社会が抱える強風災害リスクを明らかにし、防災・減災対策に有用な情報を提供する。

3.3.2 台風および被害の概要

台風 15 号は、2019 年 8 月 30 日にマーシャル諸島近海で発生し 9 月 5 日 15 時に台風となった。8 日 21 時には神

*1 京都大学防災研究所 教授・博士 (工学)

Prof., Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University Ph.D. (Eng.)

*2 京都大学防災研究所 准教授・博士

Assoc.Prof., Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University Doctor of Sciences

*3 熊本大学大学院先端科学研究部 准教授・博士 (工学)

Assoc. Prof., Faculty of Advanced Science and Technology,
Kumamoto University, Ph.D. (Eng.)

津島付近で中心気圧 955hPa・最大風速 45m/s の「非常に強い」台風に発達した。その後勢力を保ったまま三浦半島に接近、9日3時前に三浦半島を通過した。台風の中心は東京湾に抜けて北東に進み、9日5時前には千葉県千葉市付近に上陸した。台風の経路を図 3.3.1 a に示す。台風が「非常に強い」勢力を保ったまま関東に接近するのは非常に珍しく、千葉市付近に上陸するときの勢力は中心気圧 960hPa・最大風速 40m/s の「強い」勢力であったが、上陸時の勢力は関東としては過去最強クラスとなった。その後、茨城県水戸市付近で海上に出た台風は、福島県や宮城県を暴風・強風域に巻き込みながら東進し、日本の東海上を北東に進んだ。台風の接近・通過に伴い、伊豆諸島や関東地方南部を中心に猛烈な風、猛烈な雨となった。特に、千葉市で最大風速 35.9m/s、最大瞬間風速 57.5m/s を観測するなど、多くの地点で観測史上1位の最大風速や最大瞬間風速を観測する記録的な暴風となった。

この台風による被害は関東地方を中心に静岡県や福島県まで 8 都県に及んだ。主な被害は、人的被害が死者 3 名、負傷者 150 名。住家被害は、全壊 391 棟、半壊 4,204 棟、一部破損 72,279 棟、床上浸水 121 棟、床下浸水 109 棟、非住家被害 1,660 棟であった¹⁾

台風 21 号は、2018 年 8 月 28 日に南鳥島近海で発生し 31 日 9 時には 915hPa に達し、“猛烈な（最大風速 54m/s 以上）”勢力に発達した。台風 21 号は伊勢湾台風と比較的似た経路で北上し、その後、やや西寄りに向かい、第 2 室戸台風に近い経路をとり、9 月 4 日 12 時に 950hPa で徳島県南部に上陸した後、紀伊水道をぬけ、淡路島を通過して 4 日 14 時には神戸市に上陸した。9 月 5 日 3 時に北海道渡島半島西部に達し、5 日 9 時に温帯低気圧に変わった。台風の経路を図 3.3.1 b に示す。本州上陸時に 950hPa で、非常に強い勢力のまま上陸したのは、1993 年の 13 号台風以来 25 年ぶりであった。台風 21 号は、上陸時の移動速度も早かったため、四国、近畿から北海道に至る広範囲で強風が観測され、近畿を中心として広い範囲に大きな被害をもたらした。台風の進路近くでは最大瞬間風速 30m/s 以上を観測した地点が集中しており、高い値では 50m/s を超え、最大瞬間風速の上位 6 位が 50m/s を超えており、それらの風向のほとんどは南南西から南で概ね台風最接近時に観測された。特に近畿圏では、関空島（大阪府泉南郡）で南南西の風・最大瞬間風速 58.1m/s（最大風速 46.5m/s）。和歌山（和歌山市）で南南西の風・最大瞬間風速 57.4m/s（最大風速 39.7m/s）。室戸岬（高知県室戸市）で西の風・最大瞬間風速 55.3m/s（最大風速 48.2m/s）を記録するなど、これまでの記録を更新する強風が観測された。さらに、関東地方のように中心経路からかなり離れている地域でも 40m/s 近い最大瞬間風速を記録し、広域にわたって強風をもたらした²⁾。

この台風による被害は、四国・中国地方から北海道までの 33 都道府県に及んだ。主な被害は、人的被害が死者 14 名、負傷者 980 名。死者が多かったのは台風中心が通過した大阪府の 8 名であった。住家被害は、全壊 68 棟、半壊 833 棟、一部破損 97,009 棟、床上浸水 244 棟、床下浸水 463 棟、非住家被害 6,527 棟であった³⁾。

表 3.3.1 台風 15 号および台風 21 号の強風被害の特徴

	台風 15 号	台風 21 号
進路	浦賀水道から東京湾を北上	紀伊水道大阪湾を北上
上陸時の勢力	960hPa で「強い」	950hPa で「非常に強い」
都市部の風速 の最大値	千葉市で最大風速 35.9m/s 千葉市で最大瞬間風速 57.5m/s	和歌市で最大風速 39.7m/s 和歌山市で最大瞬間風速 57.4m/s
強風被害範囲	関東地方を中心に静岡県や福島県まで 8 都県	四国・中国地方から北海道までの 33 都道府県
人的被害	死者 3 名、負傷者 150 名	死者 14 名、負傷者 980 名
住家被害	全壊 391 棟、半壊 4,204 棟、一部破損 72,279 棟	全壊 68 棟、半壊 833 棟、一部破損 97,009 棟
浸水被害	床上浸水 121 棟、床下浸水 109 棟	床上浸水 244 棟、床下浸水 463 棟

両者の強風被害を比較すると、表 3.3.1 に示すように、いずれの台風も上陸直前まで海上（東京湾と大阪湾）を進み（図 3.3.1）勢力があまり衰えなかった。上陸時の勢力は台風 21 号の方が少し強く、都市部で観測された風速の最大値も大きかった。また、台風 21 号の方が広範囲に及び（図 3.3.2）、住家被害数、死傷者の数（図 3.3.3）および浸水被害も台風 21 号の方が多かった。ただし、半壊以上の被害程度の大きい住家数は台風 15 号の方が多く、また、一部破損以上の住家被害総数の世帯数に対する割合としてみた住家被害率の市町村別の分布（図 3.3.4）をみると、台風 15 号の被害地域で住家被害率が 1% を超える市町村の数が台風 21 号の被害地域よりも多くなった。

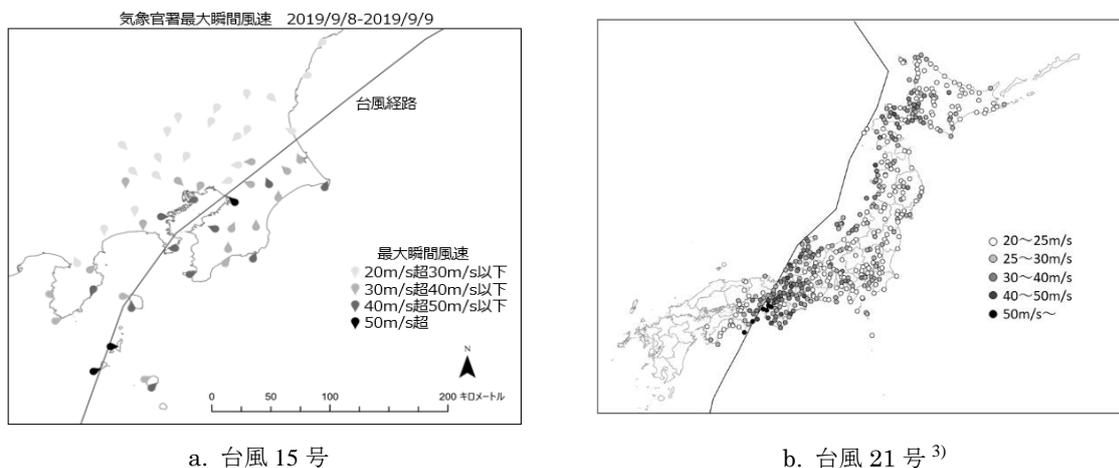


図 3.3.1 最大瞬間風速の観測記録

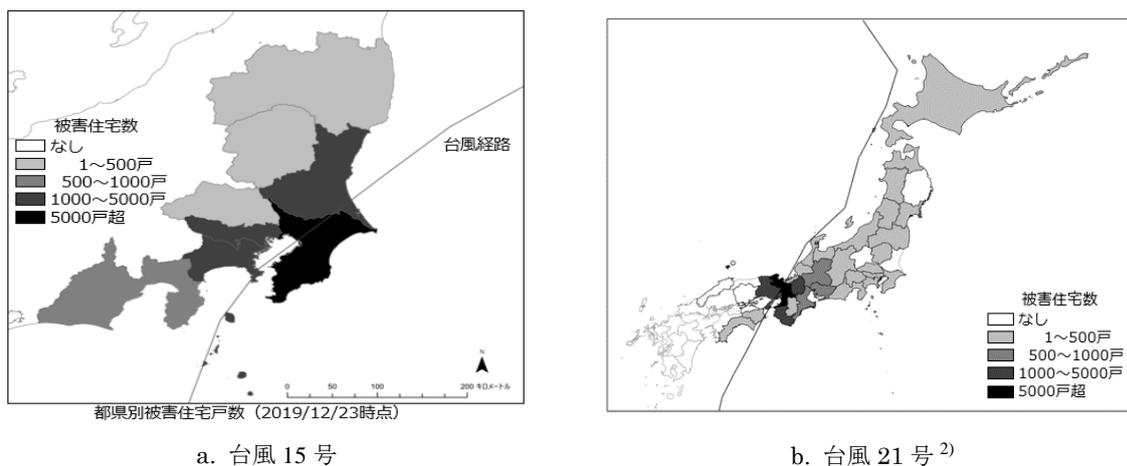


図 3.3.2 建物被害の分布

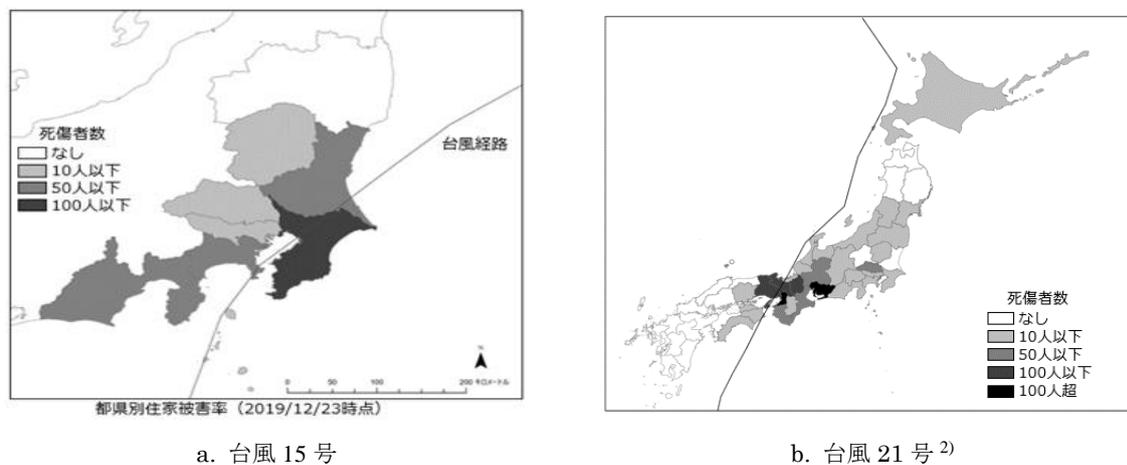
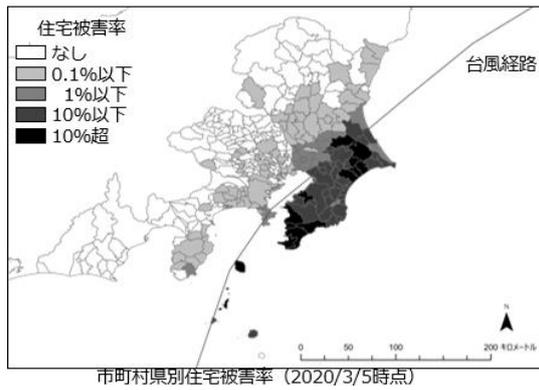
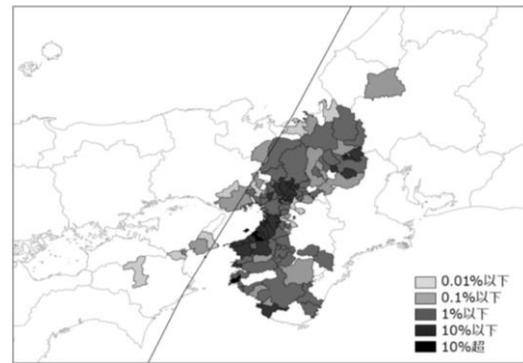


図 3.3.3 都道府県別の死傷者の分布



a. 台風 15 号



b. 台風 21 号²⁾

図 3.3.4 市町村別の住家被害率（一部破損以上の住家被害総数／世帯数）の分布

電力施設は両台風共に広範囲にわたって被害を被り停電が発生した。資料 4)によると図 3.3.5 に示すように、最大停電戸数は台風 21 号では関西電力管内で約 240 万戸、台風 15 号では東京電力管内で約 93 万戸となり台風 15 号の方が少なかったが、停電の復旧までの日数は台風 15 号で 25 日（9 月 4 日から 9 月 20 日：99%解消までは約 12 日）、台風 21 号で 16 日（9 月 9 日から 9 月 24 日：99%解消までは約 5 日）と台風 21 号の約 1.5 倍の時間を要した。停電の主な原因は、暴風雨・飛来物による配電設備の被害（表 3.3.2）⁵⁾で、図 3.3.6 に示すように台風中心経路の東側と沿岸部で多く発生している^{5,6)}。電柱の破損や倒壊に関しては台風 21 号で 1,343 本、台風 15 号では 1,996 本と台風 21 号に比べて約 1.5 倍の被害が生じた。電柱の破損や倒壊の被害の原因としては、倒木、飛来物、建物の倒壊、土砂崩れや地盤のゆるみなどの地盤の影響であったと報告されている。

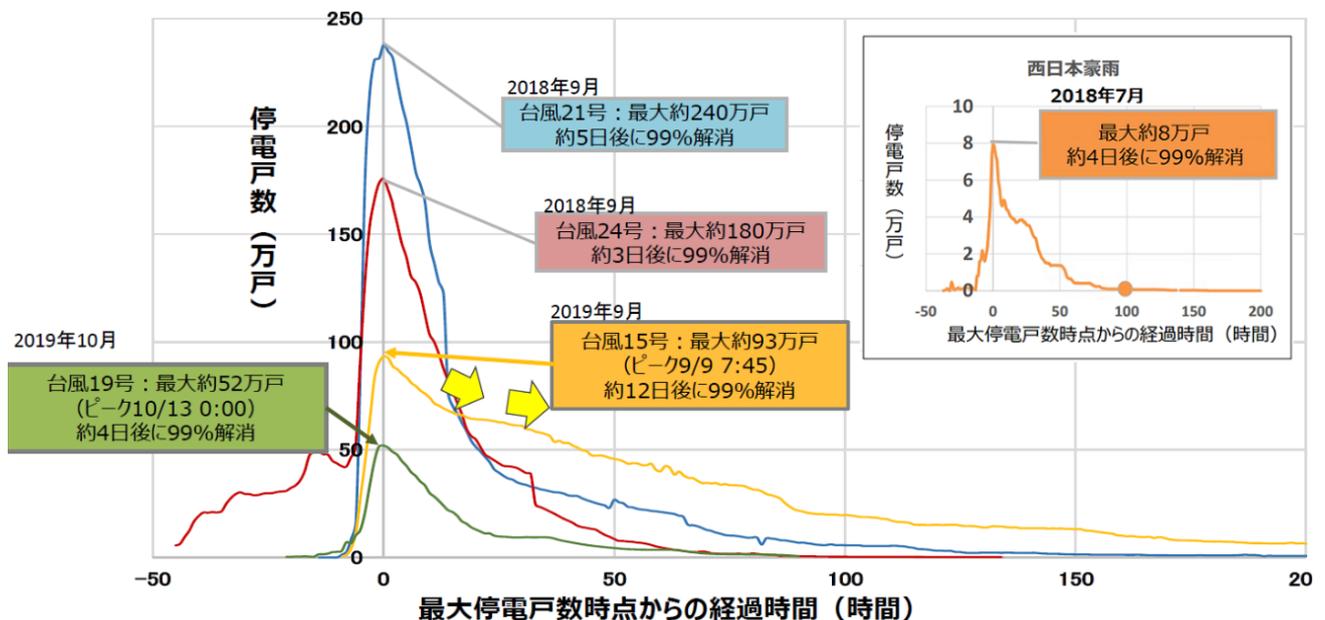


図 3.3.5 2018, 2019 年に台風で生じた停電戸数の時間変化⁴⁾

表 3.3.2 配電設備の被害状況⁵⁾

台風 15 号による配電設備被害

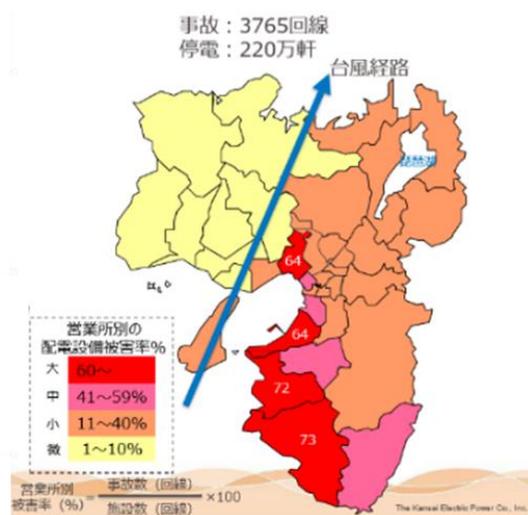
架空線			地中線		
支持物(電柱) (折損・倒壊等)	架空線 (断線・混線等)	変圧器 (損傷・傾斜等)	地上機器 (浸水等)	地上機器 (損傷・傾斜等)	ケーブル (損傷等)
1,996本	5,529経間	431台	0台	1台	0m

《参考：関西電力 台風21号による配電設備被害》 台風21号対応検証委員会報告（平成30年12月13日）抜粋

1,343本	4,914経間	362台	38台	0台	544m
--------	---------	------	-----	----	------



a. 台風 15 号東京電力管内
電柱の被害発生状況分布（赤：折損・倒壊，青：傾斜）⁵⁾



b. 台風 21 号関西電力管内
営業所別の配電設備被害率⁶⁾

図 3.3.6 配電設備の被害分布

3.3.3 考察

住家被害について

今回比較した 2 つの台風だけでなく、近年の台風による建物の強風被害のほとんどは住家で発生している。被害発生の原因は風圧力によるものと飛来物によるものに大別でき、被害の大半は外装材である。住家の被害調査結果（文献 2）および 3.2 節）によると、外装材の中でも屋根被害が最も多くを占め、築年代が古い住家ほど被害が生じやすく被害の程度も大きい。屋根被害に関しては、建築年代が新しくなるにつれて風圧力によるものよりも飛来物による被害が増加する。ただし、古い住家であっても屋根葺き材の維持管理が行われていたものには被害が生じにくい。屋根葺き材の種類に関しては、瓦葺屋根に比べて非瓦葺屋根の方が建築年代が新しくなるにつれて被害原因が飛来物である割合が増加する。風圧力による屋根被害は棟部に多く、建築年代が新しくなるにつれて棟部の被害割合は増加する。新しい住家の場合、屋根の被害程度は古い住家に比べて小さくなるが、飛来物による被害の割合は増加する。屋根以外の外装材の被害に関しては飛来物によるものが非常に多い。以上から判ることをまとめると以下のようなになる。

- ・ 外装材は経年劣化によって耐風性能が落ちる。とくに、めくれ、剥がれ、飛ばされるなどの風圧力による被害に弱くなる。
- ・ 外装材の劣化は適切な維持管理を行うことにより低減でき、耐風性能を維持することができる。
- ・ 建築年代が古い住家の被害程度が大きく数も多くなるのは、経年劣化や、瓦を置いているだけ、一部のみ緊結、あるいは緊結材にくぎを用いているなど緊結力の小さい工法が用いられているためと考えられる。
- ・ 建築年代が古い住家の割合が多い地域で住家の被害率（被害住家の戸数／世帯数）は大きくなる。
- ・ 飛来物による被害は住家の新旧に関係しない。すなわち、外装材の種類や劣化の程度には関係しないが、飛来物の発生量を抑えるという意味では、外装材の耐風性能を高め、維持することが有効となる。

さらに、新しい住家や適切に維持管理がなされている住家では屋根被害がほとんど確認されていない²⁾ことから、現行の屋根葺き材の耐風設計に関する規則やガイドラインに沿った設計を行えば、今回の台風程度の強風に十分耐えることができると考えられる。一方、周囲からの飛来物をなくすことは難しいので、耐衝撃性能の低い窓ガラスについては、雨戸、シャッター、合わせガラスを用いるなどの防備が人的および住家被害低減に有効となる。

電力施設の被害について

今回比較した2つの台風では強風により広範囲にわたる停電が生じた。その原因は、倒木、飛来物、建物の倒壊、土砂崩れや地盤のゆるみなど地盤の影響による電柱の破損や倒壊であり、電柱そのものの耐風設計だけでなく周囲の影響も考慮した耐風性能の向上が求められ、技術基準の見直しが検討されている⁷⁾。

資料 8)によると、現行の鉄塔および電柱の耐風設計は、電気事業法第 39 条に基づく電気設備の技術基準に基づいて行われており、風速 40m/s の風荷重に耐えられるように設計されなければならない。実際の設計に際して、支持物（電柱や鉄塔）に関しては構成する部材の種類や形状により風圧力が定められている。さらに、架渉線、碍子や腕木などに加わる風圧力も定められており、それらの値を使って耐風設計が行われる。技術基準における風速 40m/s に関しては電気学会の標準規格（JEC-127-1965）に基づいており、10 分間平均風速の最大値に相当している。さらに、被害を受ける際の風速は瞬間風速に対応して考えねばならないので、最大瞬間風速による荷重の増大分は構造安全率で対応することとし、その値は 1.5 としている。これらの基準に従って設計された鉄塔を用いた実大実験で、破壊荷重は 10 分間平均風速 40m/s による常時設計荷重の 1.8 から 2.0 倍またはそれ以上であることが示されている。なお、局地風による風荷重に関しては、シミュレーションや観測データを参考に決定しているが、電柱に関して全ての地点で局地風による風荷重の増加を考慮、検討されているとは考えられない。したがって、局地風による風荷重の増加が予想される地点における耐風設計用の風速の推定に関しては、今後より詳細な検討を行うべきであろう。

3.3.4 まとめ

2019 年台風 15 号および 2018 年台風 21 号は、いずれも強風・高潮高波・浸水被害を伴っており、引き起こされた被害は現代社会が遭遇する複合災害の典型である。本報では両者による強風被害を比較検証し、その特徴を住家と電力施設の被害に関して明らかにした。以下にそれらをまとめる。

住家被害に関して、

- ・ 風圧力による被害は外装材から始まる。外装材は経年劣化によって耐風性能が落ちるが、適切な維持管理を行うことにより劣化の程度を押さえることができ、耐風性能を維持することができる。

- ・ 飛来物による被害は外装材の種類や劣化の程度には関係しないが、飛来物の発生量を抑えるという意味では、外装材の耐風性能を高め、維持することが有効である。また、飛来物に対する外壁材、とくに耐衝撃性能の低い窓ガラスの防備も重要である。

電力施設の被害に関して

- ・ 今回比較した2つの台風では強風により広範囲にわたる停電が生じた。その原因は、倒木、飛来物、建物の倒壊、土砂崩れや地盤のゆるみなど地盤の影響による電柱の破損や倒壊であり、電柱そのものの耐風設計だけでなく周囲の影響も考慮した耐風性能の向上、復旧対策の策定が求められる。
- ・ 一部の鉄塔では風力による折損、倒壊の可能性も示唆されている。電柱に加わる風力の評価、とくに、突風や局地風による風荷重の増加分の評価に関しては、今後より詳細な検討を行うべきであろう。

以上を踏まえると、今後起こるであろう台風に伴う強風災害に対する防備としては、住家における外装材の耐風性能の向上と定期的なメンテナンスによる耐風性能の維持が肝要である。また、強風被害を正確に予測し、それに対する事前の方策を立てるためにも、被害予測の精度向上は必須であり、外装材の耐風性能の正確な評価が不可欠である。したがって、外装材の耐風性能の劣化性状を明らかにするとともに、メンテナンスの時期や方法の明確化、指標化の早急の整備が望まれるところである。

電柱被害による停電によって、広範囲で長期間にわたり不便な生活を余儀なくされたが、これは電力を根幹とした現代社会の脆弱性が露呈したともいえる。地球温暖化による気候変動により、日本付近で台風の発生数は減るものの、猛烈な台風の出現頻度が増加し、接近時のコースも東側にずれると予想されている⁹⁾。実際、2016年には台風28号が東北地方に初めて上陸し、2019年には台風15号が東京湾を北上して千葉県に甚大な被害をもたらした。突風による電柱の風荷重の増加分の評価に関して、10分間平均風速40m/sによる荷重の2.0倍程度であるとする⁹⁾と、風速では $\sqrt{2}$ 倍、約57m/sとなり、2019年台風15号および2018年台風21号において観測された最大瞬間風速と同程度の風速で倒壊が始まってもおかしくない。実際、2004年台風14号では、宮古島で最大瞬間風速が60m/sを超え、電柱が多数倒壊している¹⁰⁾。したがって、これまで以上の強い台風の襲来により多大な強風被害が予想され、電柱に関しては都道府県単位を超えるような広範囲にわたって倒壊する可能性があり、現状の配電システムでは復旧も数カ月に及ぶことは想像に難くない。これに対して、太陽光発電、風力発電、ハイブリッドカー、住家への蓄電設備の普及などを利用した電源・蓄電施設の分散化が、広域の強風被害発生時の電力供給維持に有効な対策であると考えられる。スマートシティなど、小規模地域単位でのエネルギー管理は、広範囲の強風被害に対する配電システムの耐風性能の向上という観点からも有効な対応策であると考えられるので、強風被害に対する防備を十分考慮したうえで進めることが望まれる。

参考文献

- 1) 令和元年台風第15号による被害及び消防機関等の対策状況（第40報）、消防庁応急対策室、令和元年12月23日（月）15時00分
- 2) 2018年度科学研究費助成事業 - 科研費 - 特別研究促進費研究（代表：丸山 敬）：「2018年台風21号による強風・高潮災害の総合研究」成果報告書。
- 3) 平成30年台風第21号による被害及び消防機関等の対策状況（第10報）、消防庁応急対策室、令和元年8月20日（火）13時00分

- 4) 「台風」と「電力」～長期停電から考える電力のレジリエンス, 経済産業省資源エネルギー庁, 2020-02-23, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/typhoon.html>
- 5) 台風 15 号対応検証委員会報告 (最終報告), 東京電力ホールディングス株式会社, 2020 年 1 月 16 日, <http://www.tepco.co.jp/press/release/2020/pdf1/200116j0101.pdf>
- 6) 台風 21 号対応検証委員会報告, 関西電力株式会社, https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2019/pdf/0704_1j_01.pdf
- 7) 令和元年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討 WG (第 6 回), 産業構造審議会保安・消費生活用製品安全分科会 電力安全小委員会, 2020 年 3 月 23 日
- 8) 2019 年台風 15 号における鉄塔及び電柱の損傷事故調査検討ワーキンググループ中間整理, 2019 年 12 月 4 日, 経済産業省産業保安グループ, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/hoan_shohi/denryoku_anzen/tettou/pdf/20191204_report_01.pdf
- 9) Hiroyuki Murakami, Ryo Mizuta & Eiki Shindo, Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM, *Climate Dynamics* volume 39, pages2569–2584(2012); <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-011-1223-x>
- 10) 丸山 敬・河井宏允・奥田泰雄・林 泰一: 宮古島を来襲した台風 0314 号について, 京都大学防災研究所年報, 2004.4, pp.491-502, 第 47 号 B-1.

4.1 高潮、高波メカニズム

4.1.1

神奈川・千葉・茨城の高波被害

High wave damage caused by 2019 Typhoon Faxai in Kanagawa, Chiba, and Ibaraki

高木 泰士*¹, Md Rezuhanul ISLAM*², Le Tuan ANH*², 高橋 篤平*³, 杉生 高行*³, 古川 郁貴*³

Hiroshi TAKAGI, Md Rezuhanul ISLAM, Le Tuan ANH, Atsuhei TAKAHASHI, Takayuki SUGIU, Fumitaka FURUKAWA

This report summarizes our reconnaissance survey after Typhoon No.15 (Faxai), which struck Tokyo Bay on September 9, 2019. In Kanagawa, there was no major damage on the Sagami Bay side, but on the Tokyo Bay side, overtopping over an upright revetment with a height of 3.3 m above the sea occurred. In Chiba, there was no conspicuous high wave damage, except a building in Kujukurihama Beach that was obviously struck by wave run-up and splash. On the other hand, wind disasters were severe, and damage occurred in various places, such as the scattering of building roofs and the collapse of power poles. Wave damage in Ibaraki was also minor. In Ibaraki, the breakwaters should have been constructed against severe winter storms, and the embankments have been substantially upgraded after the 2011 Earthquake and Tsunami. These structural resilience may have contributed to limiting typhoon impacts. Compared with other 16 major typhoons that landed in the Kanto region, this typhoon was characterized as a strong small typhoon that slowly moved through Tokyo Bay.

Keywords: 2019 Typhoon Faxai, field survey, Kanto, Kanagawa, Chiba, Ibaraki, Tokyo Bay, high wave impacts

4.1.1.1 はじめに

都市インフラなどと比べると、海岸で生じた被害は人目につきにくく、情報も少ないため、状況の全体像が把握しにくい。そこで本節では、15号の直後に、神奈川、千葉、茨城の海岸線を踏査した結果にもとづき、各地の状況を報告する。東京湾内の高波被害の詳細や波浪追算については、前項ならびに既発表論文も参照されたい^{1),2)}。

4.1.1.2 各地の被害状況

神奈川、千葉、茨城の各海岸を現地踏査した結果に基づき、筆者らが確認した範囲で被害の概要を示す。台風が強い勢力で接近したものの、ほぼ無被害な場所も多かったため、そのような状況も併せて報告する。各地の状況を

*1 東京工業大学環境・社会理工学院 准教授・博士 (工学)

Associate Prof., School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

*2 東京工業大学環境・社会理工学院 博士課程学生・修士 (工学)

Doctor-course Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, M.Eng.

*3 東京工業大学環境・社会理工学院 修士課程学生・学士 (工学)

Master-course Student, School of Environment and Society, Tokyo Institute of Technology, B.Eng.

図-4.1.2.1（神奈川）、図-4.1.2.2（千葉、茨城）に分けて示し、目視で判断した被害レベルを3段階で分類する。

(1) 神奈川県

神奈川では台風通過10～11日後に、横浜から真鶴の範囲で調査を実施した。明らかな高波被害が東京湾に面した横浜市中区や金沢区の港湾区域で確認された。本牧ふ頭（図-4.1.2.1のKG-1）や横浜ベイサイドマリナー近く（KG-2）では、越波により護岸上のフェンスが倒れていた。KG-1地点では広い範囲でフェンスが倒れていたが、KG-2では被害は護岸隅角部1か所のみであった。KG-2地点の護岸高さは、海面上2.7m（計測日時9/19 12:30）であった。横浜市金沢区で浸水が発生し始めたのは、9月9日午前2時頃である。同時刻の横浜新港検潮所（海上保安庁所管）の観測潮位T.P.+0.51mを基準に潮位補正を施すと、観測潮位上1.95m、すなわちT.P.+2.46mまで少なくとも波が達したと推定される。金沢区福浦地区では、東側の護岸の一部が決壊し、越波・越流により背後の工場地区で大規模な浸水被害が発生した。KG-3地点ではパラペットが倒壊し、その背後の公衆トイレで地面より約4mの高さの窓ガラスが破損していた。強風が原因の可能性も否定できないが、陸側すなわち風下側の壁部分の窓ガラスを含めて、何枚ものガラスが割れていた状況より判断すると、波による破損と考えられる。国土地理院の数値標高モデルによると周囲の標高は+3m前後であるため、越波による水塊が護岸背後でT.P.+7mくらいまで到達したと予想される。浸水発生時の潮位偏差は0.7m程度であり、極端に高かったわけではない。このため大規模な浸水の主要因は、高波やウェーブセットアップで打ち上がった海水がパラペット倒壊部より大量に流れ込んだことによるものと考えられる。八景島寄りの福浦地区南側の護岸・パラペットには目立った被害は見られなかったが、その前面の消波ブロックの一部で破損が確認された（KG-4）。また、パラペット背後約5mの歩道沿いには、緑地を保護する法尻ブロック（0.9m×0.3m×0.15m）が多数飛散していた。パラペットの天端高は計測時点（9/19 14:00）で海面上+4.1mであった。前述と同じ方法で潮位補正を行うと、T.P.+3.83m（観測潮位上3.32m）となり、越波がその高さを乗り越えたと考えられる。このように、福浦地区では東側（KG-3）でパラペットの倒壊が生じていたが、南側（KG-4）では生じていなかった。Google Earthの衛星画像で確認すると、南側の護岸は約半分の区間で消波工が設置されているが、東側は消波工が配置されていない。波当たりの違いの他、消波工の有無がパラペットの被害や越流に関係していた可能性もある。相模湾に面する横須賀市秋谷港（KG-5）は、2017年台風21号（Lan、以下2017年21号）では防波堤のパラペットの一部区間が倒壊する被害を受けていたが³⁾、15号では目立った被害は生じていなかった。ただし、港内の物揚げ場で越波が生じたためか、海面上約1mの場所に枝木が飛散していた。2017年21号により甚大な越波被害を受けた江の島においても³⁾、今回は目立った被害は確認されなかった（KG-6）。茅ヶ崎漁港西隣の海岸では流木、枝木がほぼ一直線上に漂着していた（KG-7）。ハンディー光波（TruPulse 360; Laser Technology, Inc.）で計測したところ、その位置は汀線からおよそ37mの位置、海面上1.7mであった（計測日時9/20 9:20）。近隣の小田原地点の天文潮位より推定すると、標高T.P.+2.05mに相当する。台風時の観測最高潮位（気象庁小田原検潮所）は、9月9日午前1時10分のT.P.+1.74mであったため、漂流物はピーク水位に近いところに滞留したことになる。大磯港（KG-8）やそれ以西では高波の痕跡は確認されなかった。2007年台風9号（Fitow）や2017年21号、2019年台風21号（Hagibis）の際に一部区間が崩壊した西湘バイパスも、15号では目立った被害は生じていない。また、伊豆半島の真鶴港や熱海（静岡県）でも明確な高波被害は確認されなかった。

(2) 千葉県

千葉では台風通過4日後に、銚子から南房総までの九十九里浜・外房の範囲、館山から金谷までの南房総・内房

の範囲で調査を実施した。ただし、行程の都合上、千葉市など東京湾奥は調査できなかった。房総半島の南端に向かうにつれて屋根瓦の飛散や電柱の倒壊が多く見受けられるようになり、海岸に近い場所では屋根自体が吹き飛んでいた建物もあった。台風接近・通過時の強風のすさまじさを物語っており、このように千葉では広い範囲で強風による被害が特に顕著であった。銚子漁港、片貝漁港（図-4.1.2.2 CB-1）、勝浦漁港、小戸漁港、金谷港などを踏査したが、筆者らが確認した範囲では護岸や防波堤など外郭施設で目立った被害は見られなかった。房総半島の先に位置する相浜漁港の港内では、明らかに風による建物損壊も確認したが、この被害に高波が影響したかは不明であった（CB-3）。九十九里浜や外房、南房総、内房の海岸では、流木の漂着・打ち上がりを確認したが、海岸堤防や防潮堤などインフラに大きな被害は見られなかった。今回の調査では、九十九里浜ビーチの管理施設の扉が打ち破られている状況（CB-2）を目撃したが、これが千葉において確認できた高波被害の唯一の事例であった。ハンディー光波を用いて計測を行った結果では、この施設は汀線からおおよそ 104m の位置にあり、破損した窓ガラスの中央の高さは海面上 4.1m であった（計測日時 9/13 9:30）。窓ガラスより 1.5m ほど上の室内天井には、砂が全面に付着していた。高波が扉を打ち破り、砂を大量に巻き込んだ海水が建物内に充満したことが原因と推察される。筆者らは関東広域で大きな被害をもたらした 2017 年 21 号の直後にも千葉・房総で調査を行っているが³⁾、2つの台風を比較すると、千葉の高波被害については 2017 年のときの方が明らかに甚大であった。例えば、2017 年 21 号では高波により被害を受けて金谷港の護岸が大きく陥没していたが、今回は同じ場所で目立った被害は見られなかった（CB-4）。ただし、15 号直後も強風による建物被害は金谷港において生じていた。また、2017 年 21 号の際には、房総半島南端の岩礁海岸で約 80m 波が遡上し、標高約 6m の丘陵上のレストランが高波被害を受けていたが³⁾、今回は同じ場所で高波被害は見られなかった。建物の外壁に損傷を被っていたが、これは強風被害と判断された。

(3) 茨城県

茨城県では台風通過 3 日後に県北の日立から調査を始めて、利根川河口に位置する神栖市波崎までの範囲を踏査した。風は千葉市に上陸した後、茨城県・鹿嶋市辺りを通過し、太平洋に抜けている。強い勢力を保ったままであったため、千葉ほど激甚な強風被害ではなかったものの、茨城でも所々で立木が倒れているような状況を見かけた。日立港や大洗漁港（図-4.1.2.2 IB-1）、鹿島港（IB-3）など太平洋に面する港を確認して回ったが、港内より目視で確認できる範囲で高波や高潮による明瞭な被害は見られなかった。いずれも大きな港で、冬季波浪に耐えるため、もともと防波堤の設計波が大きく設定されており、今回の高波にも難く耐えられたものと予想される。波崎漁港（IB-4）では、港内の岸壁に魚が打ちあがっていた。この地域は風が強いことで有名で、踏査時も晴天でありながら風は非常に強く、港内で 30～50cm ほどの波が立っていた。15 号の通過時にはかなりの波が港内で発達していたはずで、岸壁に越波が生じていたのではないかと推測される。大洗ビーチの砂浜海岸でも特段大きな被害は見られなかった（IB-2）。この海岸では、東日本大震災後に標高約 4m の非常に緩やかな丘陵状の傾斜堤防が築かれている。前面の砂浜も非常に広く、この堤防を乗り越えるような越波が生じていたとは考えにくい。なお、筆者らは 2018 年台風 13 号（Shanshan）の直後にも、茨城の海岸を調査しているが、このときも港や海岸で大きな被害は確認されなかった。この台風 13 号は、最終的に上陸はしなかったものの、茨城の至近をほぼ海岸線に平行に北進した珍しい台風で、発生波浪も相当に大きかったはずである。このように直近の 2 つの強い台風でともに大きな被害が生じていなかった状況を考えると、茨城の海岸は神奈川県や千葉県と比べても高波への備えが進んでいるといえる。これは前述したように冬季の高波に対する防護水準が高いことのほか、震災復興で防波堤や海岸堤防の改修が進んでいるためと考えられる。

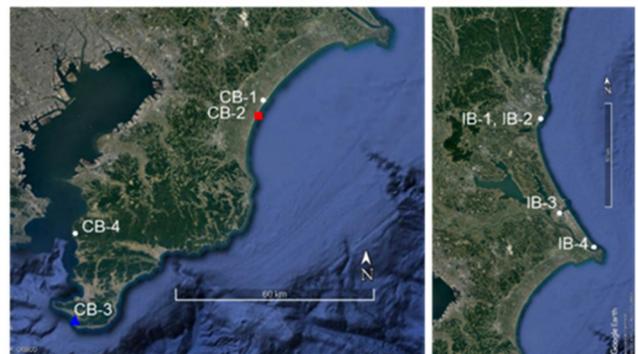
目視による海岸の状況確認・被害区分

○ 高波被害なし ▲ 高波の痕跡あり・被害不明瞭 ■ 高波被害あり



目視による海岸の状況確認・被害区分

○ 高波被害なし ▲ 高波の痕跡あり・被害不明瞭 ■ 高波被害あり



参考文献

1. 高木泰士, Md Rezuatul Islam, Le Tuan Anh, 高橋篤平, 杉生高行, 古川郁貴: 2019年9月台風15号による神奈川・千葉・茨城の高波被害および東京湾の波浪追算, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 土木学会, Vol. 76, No. 1, pp. 12-21, 2020.
2. Suzuki T. *et al.*: Post-event survey of locally concentrated disaster due to 2019 Typhoon Faxai along the western shore of Tokyo Bay, Japan, Coastal Engineering Journal, 2020.
3. Islam, M. R., Takagi, H., Anh, L. T., Takahashi, A., Ke, B.: 2017 Typhoon Lan Reconnaissance Field Survey in Coasts of Kanto Region, Japan, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), Vol. 74, No. 2, pp. 593-598, 2018.

4.1.2

2019年台風15号による横浜市金沢区福浦地区の高波被害および波浪追算

FIELD AND QUANTITATIVE INVESTIGATION OF WIND WAVE DAMAGE CAUSED BY TYPHOON FAXAI 2019 IN FUKUURA, TOKYO BAY

稲垣 直人*¹, 柴山 知也*², 高島 知行*³

Naoto INAGAKI, Tomoya SHIBAYAMA and Tomoyuki TAKABATAKE

This report summarized the site reconnaissance and hindcast about Typhoon Faxai, which struck Tokyo Bay on September 9, 2019. One of major damage to coastal structures was found at Fukuura (Yokohama City), which is located along the west coast of Tokyo Bay. We confirmed the failure of upper part of the dyke and the trace of run-up by overtopping waves. Our numerical analysis underestimated the maximum height of wind waves compared to observed values. This was because the observed meteorological data utilized time-averaged sustained wind field, which could not capture the instantaneous strong wind field that Faxai could have. In fact, west-ward gusted wind was observed along the west side of Tokyo Bay, which could cause further wind set-up. This report attributed the characteristics of the coastal damage at Fukuura to a disaster mechanism related to local-scale gusted wind.

Key Words : 2019年台風15号, 東京湾, 現地調査, 波浪推算モデル, 高波, 越波, 突風

4.1.2.1 台風の概要

2019年9月に発生した台風15号Faxai（以降、Faxaiと呼称）は8日に非常に強い台風に発達し、その勢力を保ちつつ、9日午前2時から3時にかけて三浦半島を通過し、東京湾を縦断する経路をとった¹⁾。今回の台風は翌月の台風19号Hagibisのように大雨をもたらす台風ではなく、に強い風を伴うものであった。図-4.1.2.1から東京湾を通過するとき最大風速41m/sを維持していたことがわかる。Faxaiのパラメータに注目すると、強度が高く、かつ風域が小さいことがわかる。暴風域の最大直径は190kmであり、Hagibisの650kmや2018年台風21号Jebiの370kmと比較しても小さい²⁾。さらに、中心気圧が低い状態を維持したので、大きな気圧降下が傾度風の卓越につながったと考えられる。

強い風により、沿岸域は高波の被害を受けた。東京湾の西側に面した横浜市金沢区福浦では高波による浸水が生じ、臨海部の工業団地の機械設備に被害をもたらした³⁾。このような背景から、今回の東京湾内で生じた高波被害

*1 早稲田大学 大学院創造理工学研究科 修士
課程学生・学士（工学）

Master-course Student, School of Creative Science and Engineering,
Waseda University, B. Eng

*2 早稲田大学 理工学術院教授・工学博士

Professor, Faculty of Science and Engineering
Waseda University, PhD

*3 早稲田大学 理工学術院・研究院講師

Assistant Professor, Faculty of Science and Engineering
Waseda University, Dr. Eng

の特徴とFaxaiの特性を整理し、高波の越波と局所的な強い風の関連を検討した。

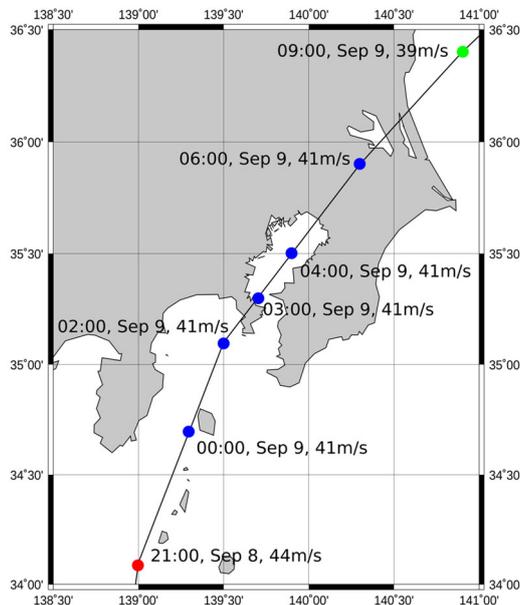


図-4.1.2.1 2019年台風15号Faxaiの中心経路，中心気圧および最大風速．赤，青，緑色は中心気圧を表し，それぞれ955, 960, 970hPaを示す^{1), 2)}．

4.1.2.2 横浜市金沢区福浦地区での被害状況

高波によって東側の護岸の一部が決壊し、後背地域に越波と越流被害が生じた横浜市金沢区福浦地区での現地調査の結果をまとめる。図-4.1.2.2は福浦地区の衛星写真である。浸水高さの計測結果は氾濫時の天文潮位からの高さに補正した。海岸から300m離れた計測点で4mを超える浸水高さを確認した。また、東京湾に面した護岸のうち北側約200mの範囲には決壊は見られなかったが、南側約900mにわたって部分的に決壊した。図-4.1.2.3は決壊した護岸の一部を示している。天端高1.49mのパラペットの上部0.51mが抜けるように倒壊した。

また、南側には高さ10m程度の小高い丘（築山）があり、その斜面に遡上した越流の洗掘跡が見られた（図-4.1.2.4）。築山の頂部は図-4.1.2.4の石垣の奥にあり、T.P. +10.7mの位置に塩枯れ跡が確認され、これが同地域で最も高い位置にある痕跡であった。この痕跡により、高波の遡上が10mを超えたと報じられたが³⁾、図-4.1.2.5の遡上跡は築山の中腹で途切れており、頂部まで遡上が達したとは考えにくい。



図-4.1.2.2 福浦地区の衛星写真. 浸水高さの計測結果は氾濫時の天文潮位からの高さに補正した. さらに護岸が決壊した領域と築山の位置を示した. (Google Earthに加筆)



図-4.1.2.3 倒壊したパラペットの様子



図-4.1.2.4 築山の斜面の洗掘の様子



図-4.1.2.5 築山の頂部の塩枯れの様子

国土地理院の数値標高モデルより護岸近傍の標高は+3mである。決壊したと考えられる9日2時の潮位偏差が約0.8mであったので、波浪の打ち上げ高は最低でも約3.7mを超えていたと考えられる。後背地への浸水被害は、打ち上がった海水が護岸の決壊部分から流入したとみられる。

4.1.2.3. 東京湾での波浪追算

前節で紹介した福浦地区における高波被害が、波浪数値計算により再現できるかを確かめるために、東京湾での波浪追算を試みた。

(1) 計算モデル

波浪追算には気象庁の提供するメソ数値気象モデル(MSM)と第三世代波浪推算モデルSWAN (Simulating WAVes Nearshore)を組み合わせた^{4),5)}。通常、気象場の再現計算にはWRF (Weather Research and Forecast)が用いられるが、これを台風に応用すると、上陸後の挙動を再現できない場合がある。東京湾は陸域に囲まれた半閉鎖的な水域であり、WRFを利用して計算を行ったところ、台風の経路を正しく再現できなかった。一方、MSMの気象場では東京湾を通過する9日午前5時頃まで、観測地とほぼ一致する経路を示したため、これを用いた。

SWANでは波の発達や伝播について様々な物理設定が可能である。本計算では、風波の発達についてはKomenモデルを採用した。計算にはネスティングを行い、最も細かい計算格子は0.002度である。また、SWANの計算は7日の9時から9日の9時までを行い、外湾からのうねりの影響を考慮した。

(2) 波浪追算の結果

計算結果を東京湾内の2つの観測地と比較する。8日の18時から、Faxaiが東京湾を通過する9日6時頃までの約12時間を比較対象とした。東京湾口に位置する第二海堡の波浪観測値はNOWPHASより取得した⁶⁾。図-4.1.2.6 a)ではピーク時の観測値に欠損が多く、波浪の発達の様子が不明であるが、9日の2時過ぎに有義波高のピークを迎えたことがわかる。しかしながら、第二海堡では3.5m近くの有義波高が生じたと考えられ、本計算のモデルでは2.7mが有義波高の最大値となっている。

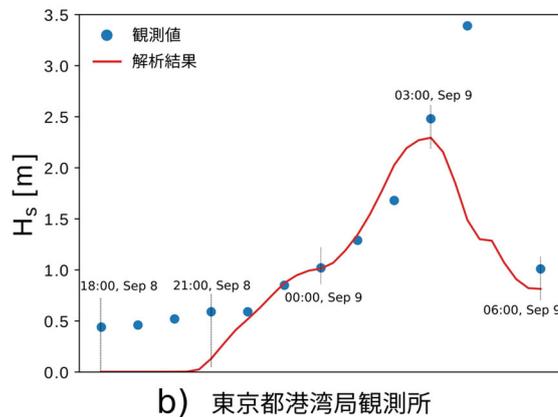
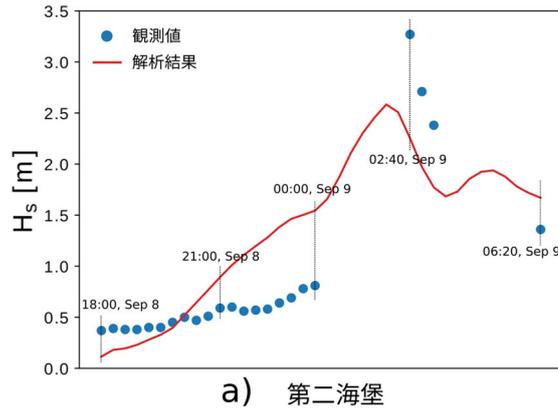


図-4.1.2.6 東京湾内2地点での有義波高の比較. a) 第二海堡, b) 東京港湾局観測所^{6),7)}

図-4.1.2.6 b)は東京都港湾局による観測値との比較である⁷⁾。8日の22時から9日の3時までは波浪の発達の傾向を捉えられているが、ピーク時の波高は観測値よりも小さくなった。観測地と台風的位置を考慮すると、9日の4時前後に最大有義波高3.5mの波が生じたと考えられる。

いずれの地点においても、有義波高の最大値は計算結果では2.5m前後となったが、観測値によると3.5m程度の波が生じたと考えられる。一方で、波高がピークとなる時間は概ね一致している。

4.1.2.4. 考察

(1) 福浦地区での波浪の様子

前節で用いたモデルを福浦地区の沖側に適用した。有義波高の時間変化は図-4.1.2.7のようになった。Faxaiの経路を考えると、9日2時20分に最大値となるという結果は妥当である。一方で、前節で検討したように、この数値モデルは有義波高の最大値を小さく評価する傾向があり、実際にはより高い波が生じた可能性は十分にある。第2節で言及したように、天端高の超える波が生じるには、当時の潮位を考慮しても3.7m以上の波が生じる必要があり、観測波高でも大規模な越波を生じさせる波としては若干小さいと言える。

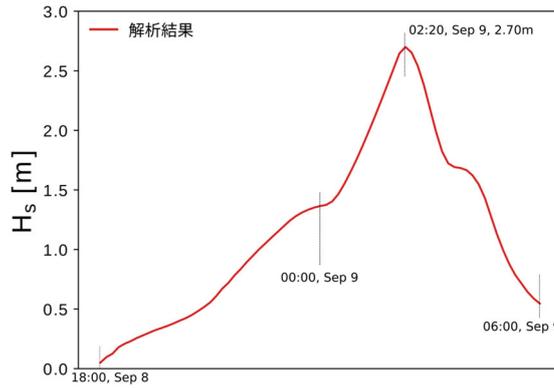
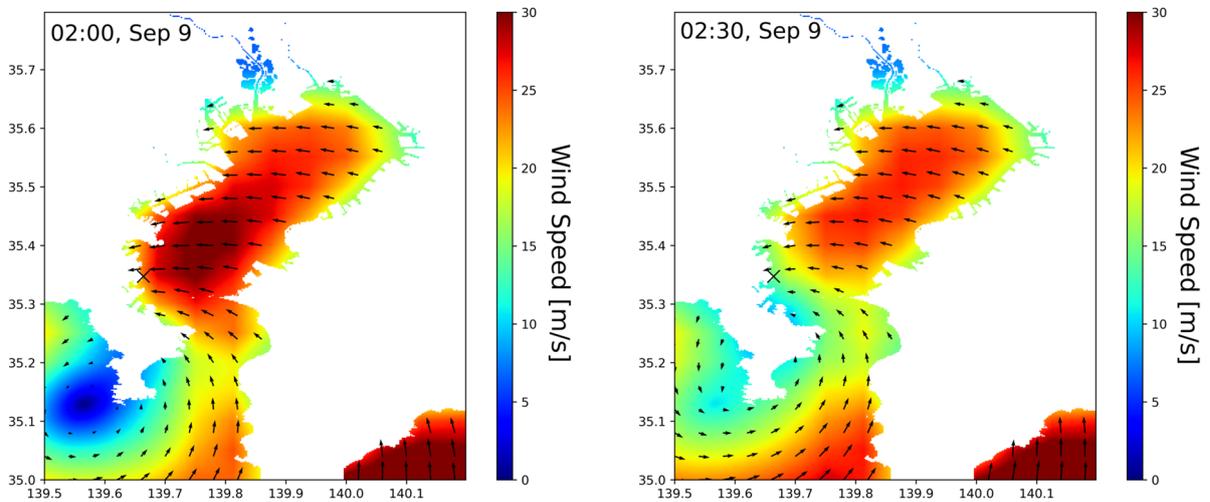


図-4.1.2.7 福浦地区での有義波高の時間変化

(2) 風の間と波浪場の様子

MSMから得られる風の間とSWANで計算した波浪場について、福浦地区で波浪が大きくなる9日2時から3時にかけての図を示した（図-4.1.2.8および図-4.1.2.9）。図-4.1.2.8からは9日2時頃に強い東風が福浦地区に向かって吹いたことがわかる。図-4.1.2.9からは9日2時から2時30分にかけて湾奥から高まる波と湾口から進行してきた波が福浦地区に押し寄せていることがわかる。MSMの風の間は1時間平均風速であり、その最大値は30m/s程度である。第1節で述べたように、Faxaiは強い風が特徴であり、同時間帯の最大風速は40m/s程度である。中心経路や風速分布が比較的良好に再現できているのにも関わらず、波高が小さく算定されるため、MSMの風の間では捉えられない瞬間的な風が高波の波高に影響した可能性を以下で検討した。



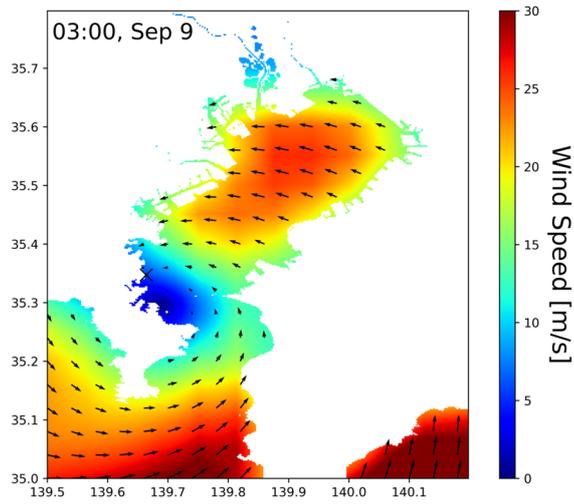


図-4.1.2.8 波浪のピーク時における風の場の変化 (X印は福浦地区)

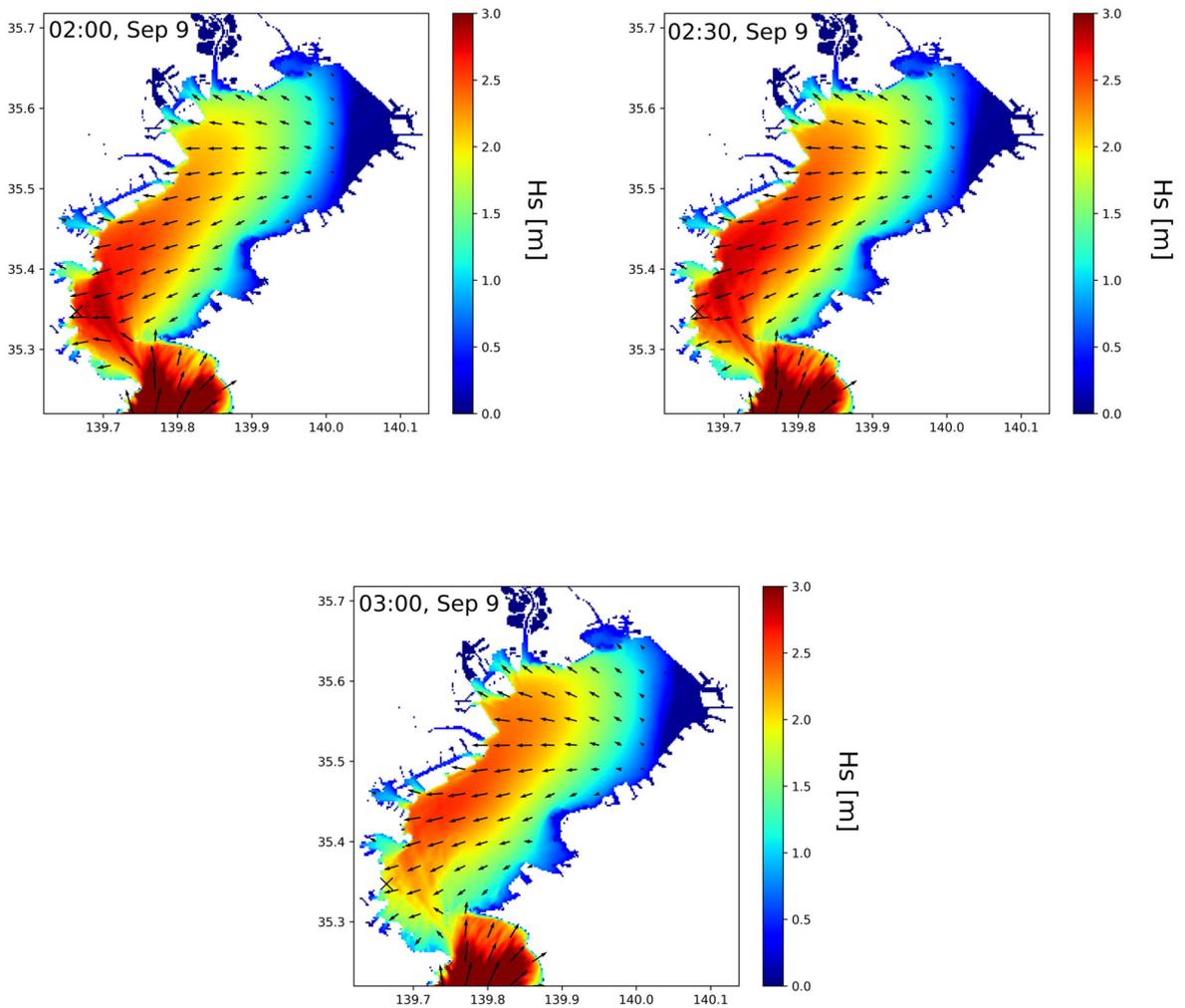


図-4.1.2.9 波浪のピーク時における波浪場の変化 (X印は福浦地区)

(3) 瞬間的な突風

AMEDASの観測値から風配図を作成し、瞬間的な風と時間平均的な風の違いを検討した⁸⁾。福浦地区は三浦と横浜の観測所の間位置するため、この2地点を選んだ。図-4.1.2.10および図-4.1.2.11は9日0時から9日6時において、10分毎の平均風速と最大瞬間風速を風速で色分けし、存在割合を16方位毎に示したものである。三浦観測所での観測結果を示した図-10では、平均風速 a) と最大瞬間風速 b) 共に強い風は東方向から吹いてきたことがわかる。東風に次いで南西からの風の割合が多いのは、Faxaiが三浦半島を通過した後、この地域が台風の進行方向左側の領域に入ったためである。横浜観測所の観測結果を示した図-4.1.2.11では、a) とb) 共に東北東の風の割合が最も大きいことがわかる。しかしながら、図-4.1.2.11 a) では東北東の風は8.0 - 10.9m/sの範囲にあるが、図-4.1.2.11 b) では同方向の風は31.3 - 36.5m/sの範囲の値が観測されている。つまり、東からの風について、強い最大瞬間風速を平均風速では捉えられていない。これは強い東風が瞬間的に吹いたことを示唆している。

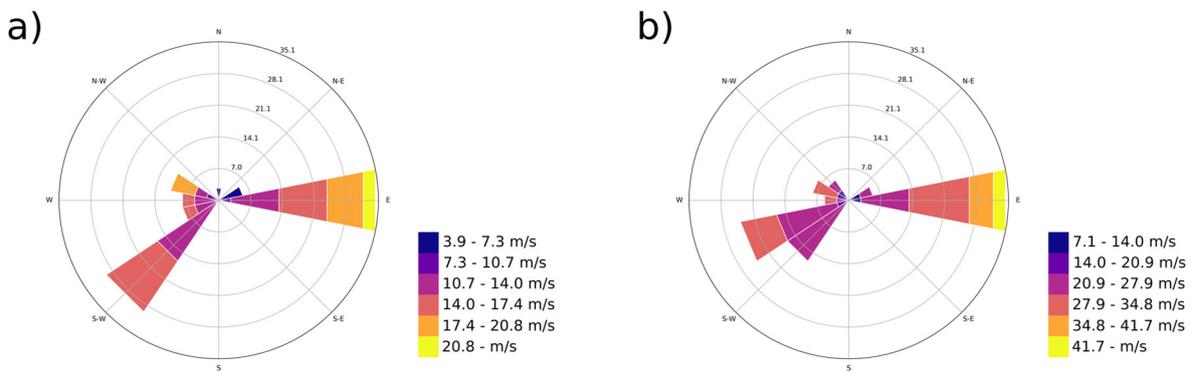


図-4.1.2.10 AMEDAS三浦観測所における風配図 a) 10分間平均風速とその風向, b) 10分間最大瞬間風速とその風向⁸⁾

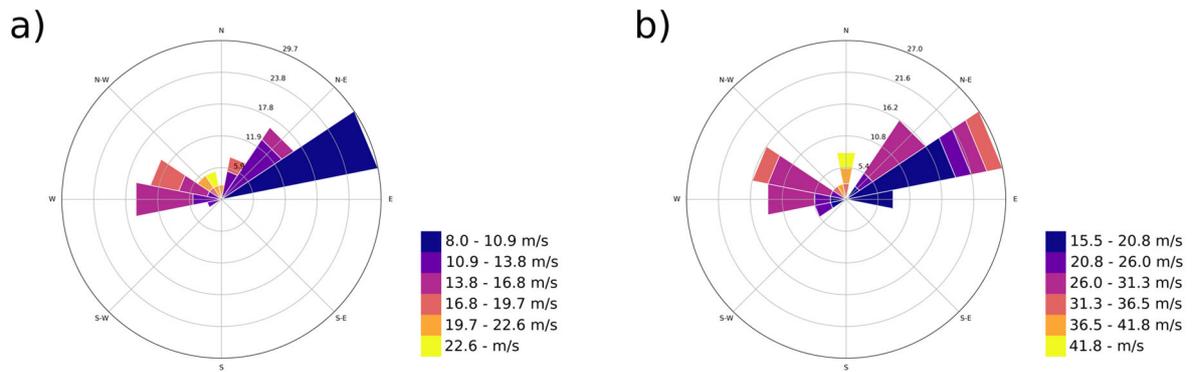


図-4.1.2.11 AMEDAS横浜観測所における風配図 a) 10分間平均風速とその風向, b) 10分間最大瞬間風速とその風向⁸⁾

(4) パラメトリック台風モデルとの比較

本報告で用いた気象データと波浪推算モデルでは、Faxaiによる東京湾内の高波の最大波高は観測値よりも小さくなった。これがMSMに代表される気象場では局所的かつ瞬間的な風の影響を考慮できないためである。高木ら⁹⁾はパラメトリック台風モデルを用いた風の間をSWANに入力し、最大波高は観測値よりも傾向にあるものの、本解析より良好な結果を得ている。高木らが利用した風の間では最大風速40 - 50m/sの風が含まれており、本解析で用い

た風の場合とは風速が異なる。Faxaiは風域が小さかったために、ある地点での風速と風向が短い時間で変わりやすい。そのため、時間幅をもった気象データよりも、パラメトリック台風モデルを用いた解析の方が推定精度が高かったと考えられる。

一方で、台風による災害の性質は気候変動により変化している。気象場の変化を捉え、沿岸域にとどまらない台風による災害に関する知見を蓄積していく方向性から見ても、気象データを用いた波浪推算が必要である。

4.1.2.5. 今後の研究方針

(1) 局所的で瞬間的な強風による越波機構の解明

前節では、観測された波による越波よりも高い打ち上げ高になることの原因として、局所的で瞬間的な強風が越波に影響した可能性について考えた。風波の推算において、SWANに代表されるスペクトル法は、波の生成、伝播、減衰のそれぞれのプロセスをエネルギーという観点からモデル化したものである。しかしながら、強風が越波にもたらす影響は、その瞬間的スケールゆえ、このような風波のメカニズムとは異なっている。むしろ、風による水塊輸送として運動量の観点から議論される現象である。風と越波の相互作用および構造物に与える影響を明らかにするためには、局所的な領域でのVOF法や粒子法を用いた数値解析が有効ではないかと考えている。

(2) 局所的三次元渦による水塊飛散現象

第2節で築山頂部の痕跡と洗掘位置が離れていることを指摘した。この場合、強風により空中に巻き上げられた水塊が離れた地域に飛来した可能性がある。台風ではその内部に短命で微小な旋風が生じている場合があり、これが局所的なスケールで陸上への侵水に影響していると考えられる。

謝辞

福浦の現地調査に協力頂いた、早稲田大学大学院創造理工学研究科博士課程Martin Mäll, Thit Oo Kyaw両氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 気象庁：台風ベストトラックデータ， <https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>
- 2) デジタル台風： <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>
- 3) 神奈川新聞：【台風15号】10メートル超に高波到達 横浜・金沢区，2019年9月18日(水)，2019.
- 4) 京都大学生存圏データベース：気象庁数値予報データ， <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>
- 5) The SWAN Team: Swan User Manual, SWAN Cycle III version 41.10, Delft Univ. Tech., 127p, 2016
- 6) 国土交通省港湾局：全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS， <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 7) 東京都港湾局：東京都の潮位・波浪， <https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/yakuwari/choui/>
- 8) 気象庁：過去の気象データ， <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 9) 高木泰士, Md Rezuanul ISLAM, Le Tuan ANH, 高橋篤平, 杉生高行, 古川郁貴：2019年9月台風15号による神奈川・千葉・茨城の高波被害および東京湾の波浪追算，土木工学論文集 B3（海洋開発），Vol. 76 No.1, 2020

4.2 船舶漂流物の予測と対策

4.2.1

2019年台風15, 19号時の東京湾における

船舶の漂流距離の実態と予測計算

Local Situation and Prediction for Vessel Drift Distance due to Typhoon FAXAI and HAGIBIS

徳永 正吾*1・黒澤 一真*2・渡部 真史*3・有川 太郎*4

Shogo TOKUNAGA, Kazuma KUROSAWA, Masashi WATANABE and
Taro ARIKAWA

Collision accidents caused by the anchoring of a ship during a typhoon cause severe damage to offshore structures and coastal areas, but the differences in drifting distances and the relationship between the sizes of ships following the anchoring have not been clarified. No specific berthing position has been proposed. In this study, we focused on the drift of a ship during a typhoon, and reached a collision from the relationship between the size and the moving distance of the ship located in Tokyo Bay at the time of Typhoon 15, 19 in 2019, and the wind field at the time of landing. We examined the berthing position of the ship. As a result, it was found that the overall tendency was that the smaller the vessel, the longer the distance traveled and the easier it was to fall into an anchor. In addition, using a numerical analysis, we reproduced the ship that collided with the Hama Road in Minami-Honmaki, Yokohama City during Typhoon No. 15, and reproduced the drift direction and the collision point.

Key Words : *drifting, typhoon, wind, STOC-ML, STOC-DM, Tokyo bay*

4.2.1.1 はじめに

(1) 研究背景及び目的

近年、地球温暖化の影響で日本に災害をもたらす台風及び降水の強度や頻度が増大するとされており、将来の台風は強い勢力を保ったまま日本に接近する可能性がある。これにより沿岸地域では高潮災害リスクの増大とともに、それに伴う湾内での船舶の座礁・衝突事故も多く発生することが懸念される。

*1 中央大学理工学研究科 修士課程学生・学士 (工学) Master-course Student, Graduate School of Science and Engineering, Chuo University, B.Eng.

*2 中央大学理工学部 学生 Undergraduate Student, Faculty of Science and Engineering, Chuo University

*3 中央大学理工学部 助教・博(工) Assistant Prof., Faculty of Science and Engineering, Chuo University
Dr.Eng.

*4 中央大学理工学部 教授・博(工) Professor, Faculty of Science and Engineering, Chuo University
Dr. Eng.

2019年9, 10月に東京湾を通過した台風15号（アジア名：FAXAI），19号（アジア名：HAGIBIS）により，主に関東地方を中心に高潮・高波や降雨で甚大な被害が及んだ．また，台風15号時，東京湾では錨泊していた多くの船舶が走錨に陥っていたことが確認されており，横浜市南本牧のはま道路に，強風により走錨に陥った貨物船が衝突する事故も発生している．また，海上構造物への衝突だけでなく，船舶同士の衝突も確認された．台風時の船舶の走錨に関して，高橋らは2007年台風9号時の東京湾において船舶の避泊実態や泊地規模について分析を行っており，山本らは2018年台風21号時の大阪湾を対象に，船舶の避泊実態だけでなく走錨についても分析を行っている．しかし，このような衝突事故を防ぐためには，錨鎖を使用した適切な錨泊方法や，例え走錨し漂流状態に陥っても，衝突事故に至らないような適切な停泊位置をとっていることが重要である．走錨後の船舶の漂流に着目した研究は少なく，徳永らは数値解析を用いて台風時の風場を精度よく推算できれば，船舶の漂流は再現可能であることを示した．

本研究では，台風時における船舶の漂流に着目し，2019年台風15,19号を対象に東京湾における船舶規模と走錨距離の関係について検討を行う．本研究で用いるAIS (Automatic Identification System: 船舶自動識別装置) はすべての旅客船，300 総トン数以上の国際航海に従事する船舶，500 総トン数以上の国際航海に従事しない船舶への搭載が義務付けられている．AISデータとは，AISから発信された情報であり，船舶の船名，位置，針路，速力，目的地などの情報を自動的に識別することが可能である．また，それぞれの台風時の風場や移動速度との関係について議論を進めるとともに，台風15号時，横浜市南本牧のはま道路に衝突した船舶を対象に数値解析を用いて再現解析を行い，船舶規模と走錨距離の関係性，台風時の風場から適切な停泊位置に関する検討を行う．

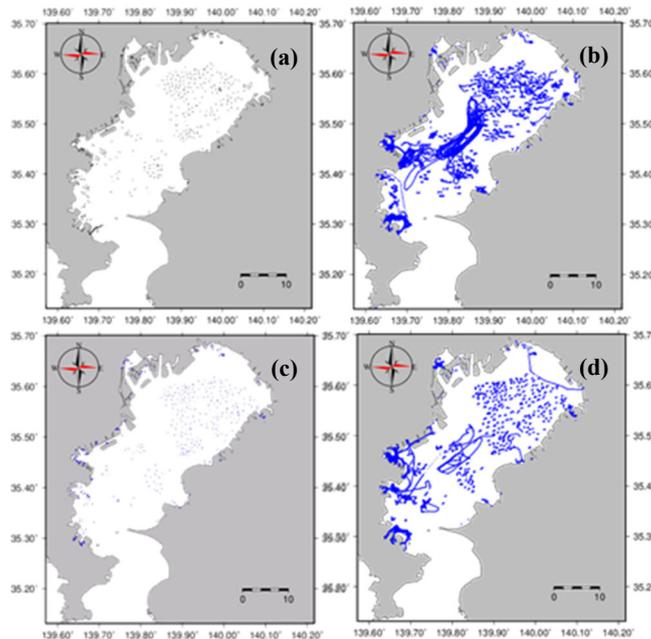


図-4.2.1.1 (a)台風15号時の初期位置，(b) 台風15号時の船舶動向図
(c)台風19号時の初期位置，(d) 台風19号時の船舶動向図

4.2.1.2 AISデータを用いた船舶動向解析

(1) 台風15, 19号時の船舶の動向

解析対象船舶は2019年台風15, 19号時，東京湾に所在していた全船舶とし，AISデータの抽出時間は台風15号時9月9日1:00 - 4:00，台風19号時10月12日19:00 - 22:00とした．図-4.2.1.1は台風15, 19号時の船舶の初期位置と抽出終了時刻までの船舶の動向図を示している．船舶の初期位置はいずれの台風時も同様であることが確認できる．また，船舶の動向は，台風19号よりも台風15号の方が移動距離が長いことがわかる．

(2) 台風時の風場，船舶規模と移動距離

図-4.2.1.2に台風15, 19号時の最大風速と移動速度を示す．移動速度が上がる前は，台風15, 19号どちらも最大風速は大きくなっているが，移動速度が上がり始めると最大風速は小さくなっていることが確認できる．上陸時，台風15, 19号時の最大風速は同程度であるが，移動速度は台風15号時で約20 km/h，台風19号時で約50 km/hと台風15号時の方が2倍以上遅い．また，図-4.2.1.3は台風15, 19号時の船舶規模と移動距離の関係

図であり、船舶の全長50 m毎、重量5,000 t毎の最大値と最小値を示している。重量は船舶の全長、型幅、喫水深、海水密度（1.025 kg/m³）から算出し、移動距離は、台風15、19号時の船舶の移動開始から終了までを直線で近似しそれぞれ算出した。台風19号時に比べ、台風15号時の方が移動距離が長いことがわかる。これは、台風15号は移動速度が遅く、長く湾に停滞しており、結果として船舶への風の作用時間が長かったことが挙げられる。また、台風15号時は、全長200 m級、重量30,000～35,000級の船舶の移動距離が長い。全体的な傾向として船舶規模が小さい方が移動距離が長く、走錨距離も長かったことがわかる。図は台風15、19号時の船舶規模の分布を示しており、どちらの台風時も全長30-39 m、60-79 m級の船舶が多く、重量は軽くなるほど船舶数が多いことが確認できる。また、船舶規模の分布と移動距離の関係から、走錨に陥りやすい規模の小さい船舶が東京湾に多く所在していたことがわかる。

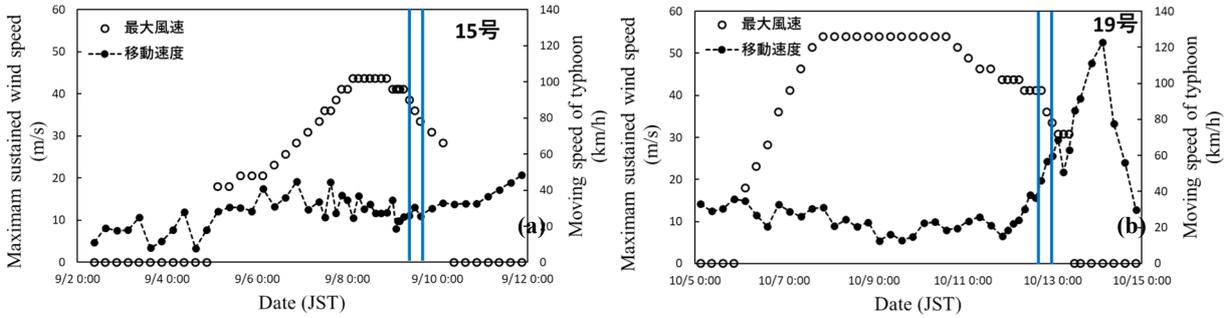


図-4. 2. 1. 2 (a)台風15号と(b)19号の最大風速と移動速度
(青線：上陸時の時間帯)

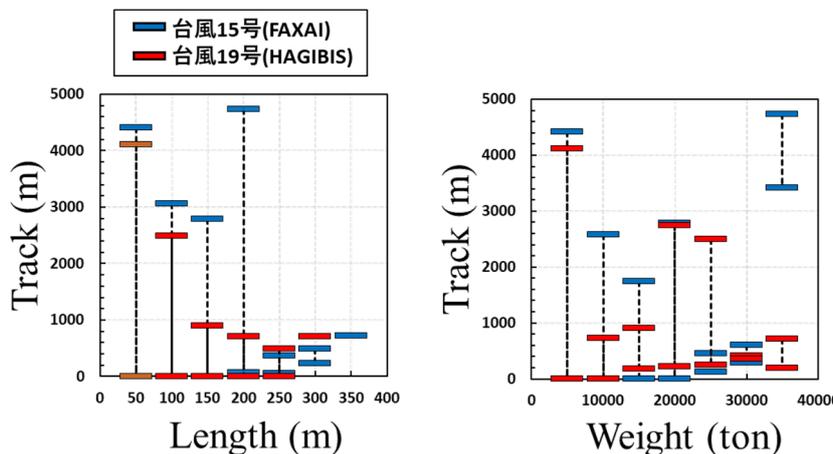


図-4. 2. 1. 3 (a)船舶の全長と移動距離、(b)重量と移動距離の関係

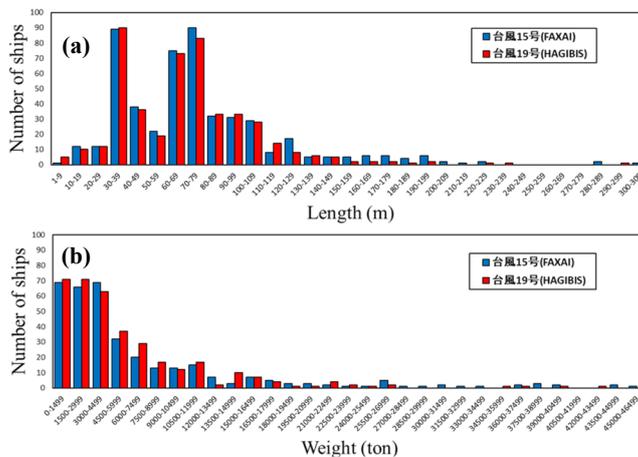


図-4. 2. 1. 4 (a)船舶の全長と船舶数、(b)重量と船舶数

表-4.2.1.1 衝突船舶の詳細

船名	M/V Bungo Princess
L × B (m)	103.64 × 18.80
総トン数 (ton)	6,736
喫水深 (m)	5.2

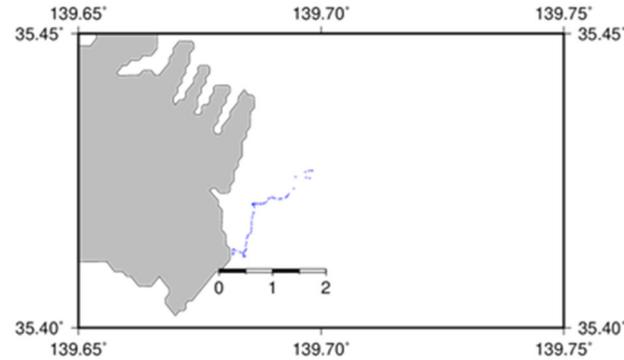


図-4.2.1.5 南本牧のはま道路に衝突した船舶の漂流経路

(3) 衝突船舶の詳細

台風15号により、9月9日3:10頃に走錨した船舶が横浜市南本牧のはま道路に衝突した。本船舶の詳細を表-4.2.1.1に示す。本船舶は、9月8日5:30頃(JST)に横浜沖で錨泊を開始し、9月9日1:30頃(JST)、強風により流され衝突に至った。漂流開始から衝突までの経路を図-4.2.1.5に示す。当時の風向きは東から北向きであり、風下方向に漂流している。徳永ら(2019)は、走錨に陥り漂流した船舶は、風下方向にほぼ線形に漂流しており、その漂流方向や標着地点は、錨鎖の外力を考慮せずとも数値解析で概ね再現できることを示している。しかし、本船舶は線形ではなく、風下方向に蛇行しながら漂流しているため、錨鎖や主機を使用して抵抗の効果があったと考えられる。

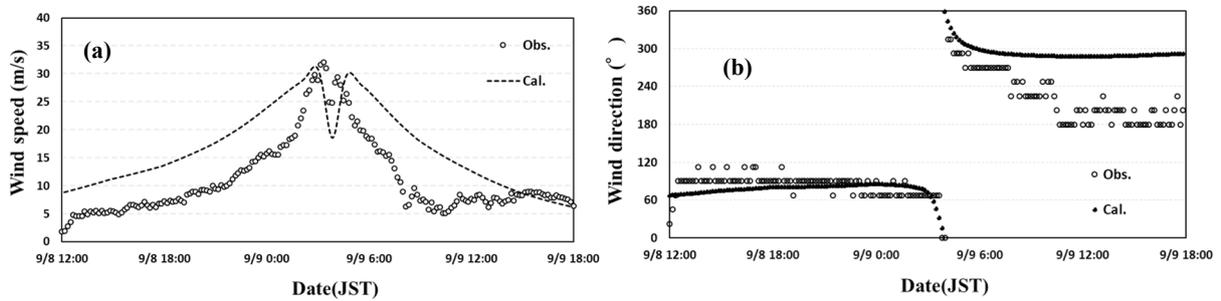


図-4.2.1.6 東京港における(a)海面更正気圧、(b)海上平均風速、海上平均風向の観測値と計算値の比較

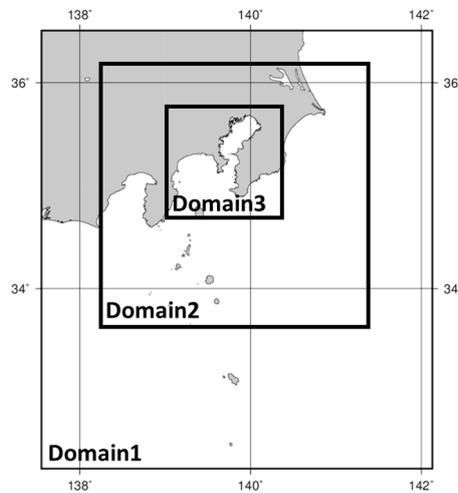


図-4.2.1.7 高潮推算領域と台風15号の台風経路

表-4.2.1.2 高潮推算の計算条件

	1	2	3
格子数	200×200	360×360	360×360
格子サイズ	2430m	810m	270m
dt	1.0s	1.0s	1.0s
計算時間	2019/9/7 0:00 – 2018/9/9 18:00 (JST)		

4.2.1.3 台風15号船舶漂流解析と停泊位置の検討

(1) 気場の作成

気圧分布にMyers and Malkin⁸⁾の方法を用い、海上分布には気圧傾度力、コリオリ力、遠心力のつり合いを解くMitsuta and Fujii⁹⁾の方法を用いる経験的台風モデルにより外力気象場を作成した。これらのモデルの入力値としては、中心気圧の値と位置、及び中心気圧と最大風速半径の関係式(河合¹⁰⁾)から求められる最大風速半径を代入する方法を用いた。尚、風場の観測値と計算値の比較を図-4.2.1.5に示す。(羽田を代表として示す。)

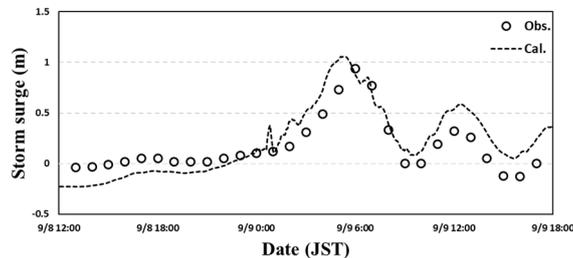


図-4.2.1.8 東京港における観測潮位と計算値の比較

(2) 高潮推算モデル

本検討では、高潮推算を富田ら¹¹⁾が開発した高潮津波シミュレータSTOC (Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas)のうち、鉛直方向に静水圧近似を用い、連続式と運動量方程式を連立して解く方法である多層海洋モデルSTOC-MLを用いて潮位偏差を推算する。海面抵抗係数は本多・光易¹²⁾による式を用いる。

(3) 高潮推算の計算条件

高潮推算は2段階のネスティングを行い、3つの領域で計算を行う。それぞれの領域の計算条件は表-4.2.1.1に示し、計算期間は2019年9月7日0:00 – 9日18:00とする。潮位観測地点は、東京港とした。図-4.2.1.4に計算領域を示す。

(4) 高潮推算の計算結果

東京港における潮位偏差の観測値と計算値の比較を図に示す。台風の接近により9月9日0:00まで、気圧の低下に伴い緩やかに潮位が上昇しているが、それ以降は急激に潮位が上昇している。これは台風の接近による吹き寄せ効果であると考えられる。ピーク時において計算値は観測値を概ね再現できており、船舶漂流計算に水位・流速の変化を適用することが目的であるので、再現性は十分であると判断できる。

(4) 漂流物解析モデル

船舶の漂流計算には、高潮津波シミュレータ(STOC)のうち漂流物移動解析モデルSTOC-DM¹⁴⁾を用いた。このモデルは池谷ら¹⁵⁾を参考にモリソン式を拡張したものであり、式(1)から式(3)に示すように、漂流物長軸方向の力 F_{X1} 、長軸垂直方向の力 F_{Y1} およびヨウモーメント M_{Z1} の3成分を評価する。本研究では、船舶に作用する抗力として水流による抗力に加えて、風による抗力を考慮する。

$$F_{X1} = (1 - w)F_{DX1} + wF_{DX2} + F_{WX} \quad (1)$$

$$F_{Y1} = (1 - w)F_{DY1} + wF_{DY2} + F_{WY} \quad (2)$$

$$M_{Z1} = (1 - w)M_{DZ1} + wM_{DZ2} + M_{WZ} \quad (3)$$

表-4.2.1.3 船舶漂流解析の計算条件

	1	2	3
格子数	250×250	270×270	270×270
格子サイズ	2430 m	810 m	270 m
dt (STOC-ML)	1.0 s	1.0 s	1.0 s
dt (STOC-DM)	0.01 s		
計算時間①	2019/9/7 13:38:19 – 2018/9/9 3:09:00 (JST)		

右辺第 1 項 F_{DX1} は流体が物体の周りを流れるときに生じる鉛直方向変化に起因した抗力，第 2 項 F_{DX2} は流れが平面内で変化することによって生じる抗力，第 3 項 F_{WX} は風により流れが鉛直面内で変化する抗力である． w は，水深 h と喫水 AD の比が小さい場合と大きい場合に用いるモデルの重み付けの係数であり，以下の式(4)で表される．

$$w = \begin{cases} 1 - \frac{0.95}{0.2} \left(\frac{h}{AD} - 1 \right) & \frac{h}{AD} \leq 1.2 \\ 0.05 & \frac{h}{AD} > 1.2 \end{cases} \quad (4)$$

水流による抗力の評価には，式(4)を用いた水深と喫水の比により，流れが鉛直または平面的に変化することによって生じる抗力に分けている．本検討では，風による抗力も考慮する¹⁶⁾．風による抗力においては，大気と水面上の漂流物の高さの比が極めて大きいことから風の流れが鉛直的に変化することによって生じる抗力のみを考慮している．風による抗力を以下の式(5)～式(7)に示す．

$$F_{WX} = \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{sm} C_{DX1,sm} U_{r,sm} |U_{r,sm}| dY + \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{sn} C_{DX1,sn} U_{r,sn} |U_{r,sn}| dY \quad (5)$$

$$F_{WY} = \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{ps} C_{DY1,ps} V_{r,ps} |V_{r,ps}| dX + \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{sb} C_{DY1,sb} V_{r,sb} |V_{r,sb}| dX \quad (6)$$

$$M_{WZ} = -\frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{sm} C_{DX1,sm} U_{r,sm} |U_{r,sm}| Y dY - \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{sn} C_{DX1,sn} U_{r,sn} |U_{r,sn}| Y dY + \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{ps} C_{DY1,ps} V_{r,ps} |V_{r,ps}| X dX + \frac{\rho_\alpha}{2} H_u \int_{sb} C_{DY1,sb} V_{r,sb} |V_{r,sb}| X dX \quad (7)$$

ここで， H_u は漂流物の水面上に出た部分の高さ， ρ_α は空気の密度， U_r 及び V_r は x 及び y 方向の風に対する漂流物の相対速度である． $C_{DX1,sm}$ ， $C_{DX1,sn}$ ，及び $C_{DY1,ps}$ ， $C_{DY1,sb}$ は抗力係数であり，漂流物の面から離れる向きに風が吹いている場合は 0.4，面におつかる向きに風が吹いている場合は 0.8 とした． sm は船首， sn は船尾， ps は左舷， sb は右舷を表している．

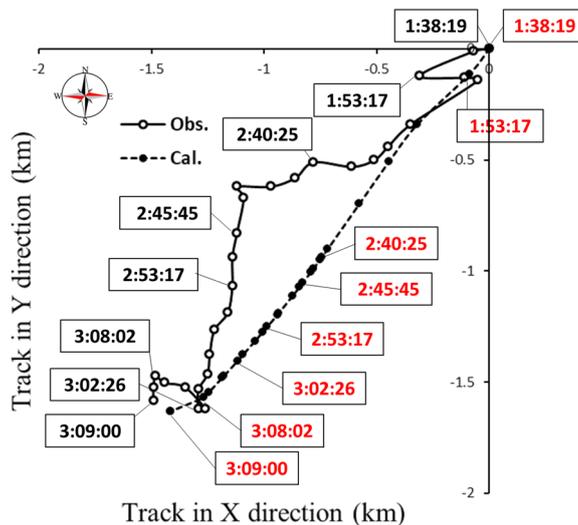


図-4.2.1.9 台風15号時における衝突船舶の軌跡と再現計算の比較

(5) 船舶漂流解析による再現解析

計算負荷軽減のため、高潮推算と同様に船舶漂流計算は2段階のネスティングを行い、それぞれ3つの領域で計算を行う。領域の計算条件とそれぞれの船舶の計算期間を表-4.2.1.3に示す。尚、実際に船舶が漂流を開始した時間を計算開始時間とした。図-4.2.1.9は、AISデータによる船舶の航跡と計算結果の比較図を示しており、しかし、実測値の蛇行している航跡を再現できておらず、計算値は線形に漂流する結果となったが、漂流方向、衝突地点は概ね再現できている。

参考文献

- 1) 国立情報学研究所：デジタル台風 <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>、参照 2019-04-27.
- 2) 山本康太，江本翔一：AISデータを用いた2018年台風21号時の大阪湾内船舶の避泊実態に関する分析，国土技術政策総合研究所資料，No.1052，December 2018
- 3) Myers, V. A. and Malkin, W.: Some properties of hurricane wind fields as deduced from trajectories, *U. S. Weather Bureau, National Hurricane Research Project, Report 4*, 1961.
- 4) Mitsuta, Y. and Fujii, T.: Analysis and synthesis of typhoon wind pattern over Japan, *Bulletin Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol.37, Part4, No.329, pp.169-185, 1987.
- 5) 河合弘泰：高潮数値計算技術の高精度化と気候変動に備えた防災への適用，港湾空港技術研究所資料，No.1210，97p，2010.
- 6) 富田孝史，柿沼太郎：海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用，港湾空港技術研究所報告，Vol.44, No.2, June 2005.
- 7) 本多忠夫・光易恒：水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究，第27回海岸工学講演会論文集，pp.90-93，1980.
- 8) 本多和彦，富田孝史，西村大司，坂口章：多数の津波漂流物を解析する数値モデルの開発，土木学会論文集B3(海洋開発)，第25巻，pp.39-44，2009.
- 9) 池谷毅，朝倉良介，藤井直樹，大森政則，武田智吉，柳沢賢：浮体に作用する津波波力の実験と評価方法の提案，海岸工学論文集，第52巻，pp.761-765
- 10) 富田孝史，廉慶善：風応力を考慮した漂流物モデル，Vol.67, No.2, I_316-I_320, 2011.
- 11) 国土交通省，気象庁：<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>、参照 2019-04-27.

4.2.2

船舶漂流衝突メカニズムと対策

Mechanism of Drifting Ship Collision and Its Mitigation

平石哲也*1・飯干 歩*2・奥谷哲也*2

Tetsuya HIRAISHI, Ayumu IIBOSHI, Tetsuya OKUTANI

Typhoon No.15 in 2019 was generated in the vicinity area of South Torishima Island on September 5th. It became a very strong typhoon and passed across the Tokyo Bay from south to north. Yokohama Harbor located at the north part of the bay was heavily damaged by large waves mainly due to the typhoon's strong east winds. The damages were classified to the road bridge crush by a ship collision, the seawall collapse by wave-overtopping and the combined damage of fishing pier. Especially the damage at the road bridge has caused traffic interrupt in the harbor.

Keywords : mooring force, anchor, drifting ship, ship collision, typhoon 1915

4.2.2.1 はじめに

2019年9月5日に南鳥島近海で発生した台風15号は、7日午後に強い勢力で小笠原諸島に接近した後に8日午後に非常に強い勢力で伊豆諸島に近づいた。そして9日午前2時から4時ころに東京湾内の横浜港域を通過し、強い勢力を保って同日午前5時ころに千葉市付近に上陸した。この台風による大雨と強風により沿岸部は甚大な被害を受け、特に進路の東側に当たる伊豆諸島や房総半島で記録的な暴風が観測された。千葉県内では送電鉄塔の被災や電柱の倒壊により大規模な広域停電が生じている。本調査報告では、横浜港域での港湾施設の被災状況に着目し、その特徴と今後の防災への手がかりを考察する。

4.2.2.2 調査の概要

図-4.2.2.1 に調査地点の位置を示す。横浜港付近では中心気圧 960ha、最大風速 43m/s が記録され金沢区福浦、幸浦地区、本牧ふ頭護岸などにおいて想定以上の高波による護岸上部構造の損壊や背後地への浸水などの被害が生じた。また、本牧ふ頭沖に停泊していた貨物船の一部が強風によって走錨し、そのうちの一隻が南本牧はま道路の

*1 京都大学防災研究所 教授・博(工)

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
Dr.Eng.

*2 京都大学工学部地球工学科 学生

Student, Earth Engineering Department, Kyoto University

海上橋げた部分に衝突し、橋げたの一部損壊をもたらした。図-4.2.2.2に例として調査時（2019年11月18日）のはま道路の被災・復旧状況を示す。



図 4.2.2.1 横浜港における調査地点

南本牧はま道路の被災状況（1）

概要

南本牧はま道路は南本牧ふ頭と首都高を繋ぐ全長6.0kmの臨港道路である、そのうち約610mは南本牧運河上に架かっており、海上部分は110mのPC栈橋部分と500mの鋼床版箱桁橋部分からなる。台風1915号の際には、本牧ふ頭沖に停泊していた貨物船が強風によって走舛し、南本牧はま道路の橋桁に衝突した。これにより、PC栈橋部分及びPC栈橋と箱桁橋の接合部分において、船舶が下から突き上げたことによる床版のめくれ上がり、繰り返しの衝突による壁高欄及びPC桁の脱落、接合部における伸縮装置の破壊といった被害が生じた。



PC栈橋部分



箱桁橋部分



PC栈橋と箱桁橋の接合部分①



PC栈橋と箱桁橋の接合部分②

図 4.2.2.2(1) 本牧はま道路の被災状況（橋脚）

南本牧はま道路の被災状況（2）

概要

南本牧はま道路は南本牧ふ頭と首都高を繋ぐ全長6.0kmの臨港道路である。そのうち約610mは南本牧運河上に架かっており、海上部分は110mのPC栈橋部分と500mの鋼床版箱桁橋部分からなる。台風1915号の際には、本牧ふ頭沖に停泊していた貨物船が強風によって走錨し、南本牧はま道路の橋桁に衝突した。これにより、PC栈橋部分及びPC栈橋と箱桁橋の接合部分において、船舶が下から突き上げたことによる床版のめくれ上がり、繰り返しの衝突による壁高欄及びPC桁の脱落、接合部における伸縮装置の破壊といった被害が生じた。



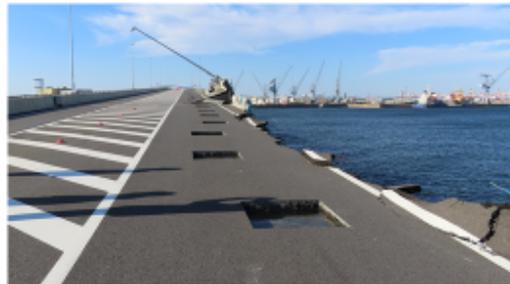
箱桁橋部分床版のめくれ上がり①



箱桁橋部分床版のめくれ上がり②



PC栈橋と箱桁橋の接合部分



PC栈橋部分

図 4.2.2.2(2) 本牧はま道路の被災(上部工)

衝突船舶は船尾が繰り返して衝突したと考えられており、プレキャストの栈橋が座屈被害を受けていた。係留船舶の漂流(走錨)に伴う橋脚被害は2018年の台風19号においても大阪湾で関西空港島連絡橋の一部損壊事故等で問題となっており、今後、アンカーの重量化等による走錨対策が課題となる。

福浦・幸浦海岸ではそれぞれ約600mおよび230mにわたって護岸上部工(パラペット)が損壊し、背後地が大規模に浸水被害を受けている。この上部工は後退パラペット型の護岸構造となっており、直立護岸タイプとは異なる。今後の復旧方法としては直立消波護岸が検討されているが、周期が長い波に対しては消波メカニズムが複雑であり模型実験による検証が必要と考える。

4.2.2.3 シーバスの被災

横浜港内の船舶の漂流による沈船事故としては、定期航路である“シーバス”の沈船と漂流が注目できる。シーバスは、横浜の観光名所である山下公園とみなとみらい地区および横浜駅を結ぶ定期航路であり、おおよそ20分毎に乗客を運んでいる。台風来襲時の9月4日3:00頃山下公園に係留していた2隻の船は、波により大きく動揺し、通常より多くの係留索で係留されていたにもかかわらず、ロープが切断され、1隻がその場で沈没、1隻が漂流し、隣に係留されている氷川丸にぶつかるような形で止まっていた。

図-4.2.2.3に山下公園の位置を示す。なお、事故の2週間後に来襲した台風19号については、避泊係留位置を図の左手奥の横浜駅裏手の遮蔽された水域に位置する“横浜駅栈橋”に変更して、係留索の切断をまぬかれたとのことである。なお、台風19号については、港湾における被害は確認されていない。図-4.2.2.4は沈没船事故が生



図-4.2.2.3 山下公園棧橋の位置



図-4.2.2.4 シーバスの係船状況

別図2 係留索の状況図

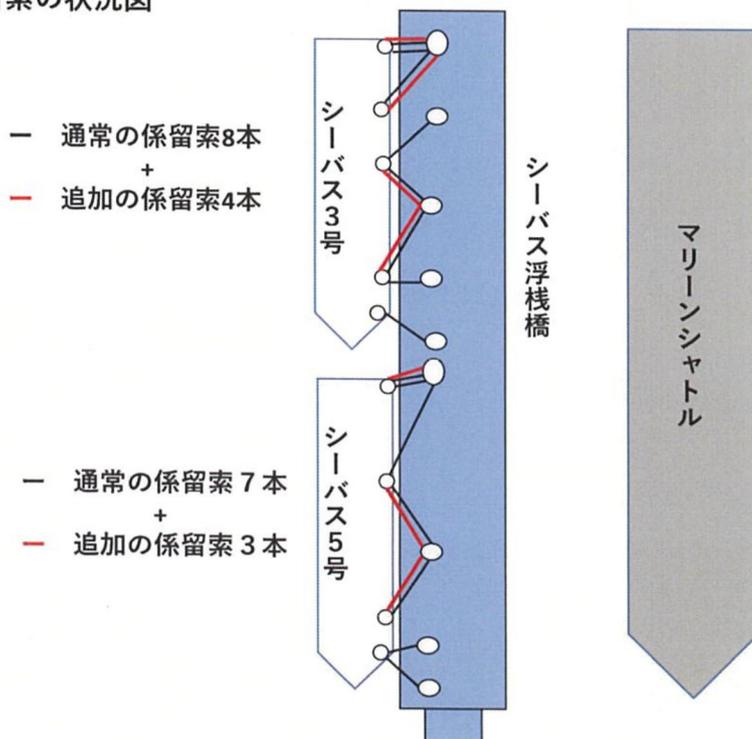


図-4.2.2.5 シーバスの係留索取付位置の模式図

じた山下公園浮き桟橋におけるシーバスの通常時の係留状況を示す。シーバスの長さ、幅、高さおよび重さは、それぞれ約 20m、5m、2m および 45 総トンである。係留ロープは、ナイロン製の径 30 mm を使用しており、通常の日時係留は 8 本で係船するが、今回の台風では増し取りを行って 12 本のロープを用いた。図-4.2.2.5 に係留の様式図を示す。

台風来襲時には、2 人の当直がついていて、シーバスの制御をしようと試みたが動揺が大きくなり、上部デッキが波をかぶるようになっていたので、浮き桟橋に同時に係船されていた大型船“マリンシャトル”に避難している。この時の波の高さは目視から約 2m と推測でき、最高波は約 3m 程度であったと思われる。一方、係船索は 12 本がすべて作用するわけではなく船体の位置によって力が作用するロープの位置は変化し、極端な場合には 1 本のロープで全荷重を受け持つ場合もある 1)。船に作用する外力は、船体が低く風の抗力を受ける形ではないために波による力（水平力）を主に受けるものと考えられ、その作用及び抵抗の様子は図-4.2.2.6 のように模式化できる。ここで、 F は波力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h は作用波高、 h_s は船体の高さ、 B は船体の幅である。また、 T は係留索の最大張力、 eN は張力が作用する索の全体数に対する比率、 S は係留索の破断強度に対して乗する安全率である。係留索 1 本の径 ϕ は 30 mm であり、その破断強度 W はカタログ値から、17.6 トンである 2)。 N は索本数である。以上の値を用いると、船体に対する波による水平力は次式で示される。

$$F = \rho g h B h_s \dots \dots \dots (4.2.2.1)$$

係留索による係留力は、次式で示される。

$$T_{all} = \frac{T}{S} Ne_N B \dots \dots \dots (4.2.2.2)$$

両者の eN に対する変化を計算したものが図-4.2.2.7 である。この図より、波高を 3m 程度と考えると、 $eN=0.4$ 程度で係船索は保持できなくなり、沈船あるいは漂流現象が生ずる可能性が高くなることから分かる。逆に、 eN が 1.0 に近づくほど船舶の安全性は高くなる。このためには、AI 等を活用した係留張力を測りながら係船索長を調整する新しいシステムの開発等の技術革新が必要になってくる。

波作用時の係留状態のイメージ

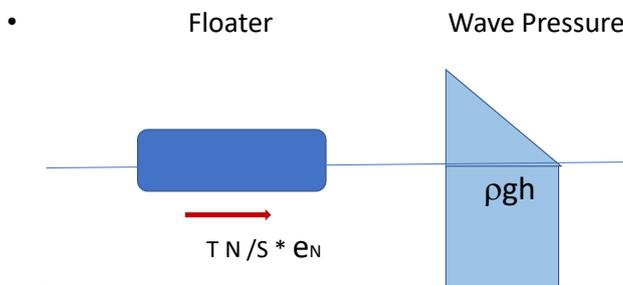


図-4.2.2.6 小型係留船舶に作用する波の力の模式図

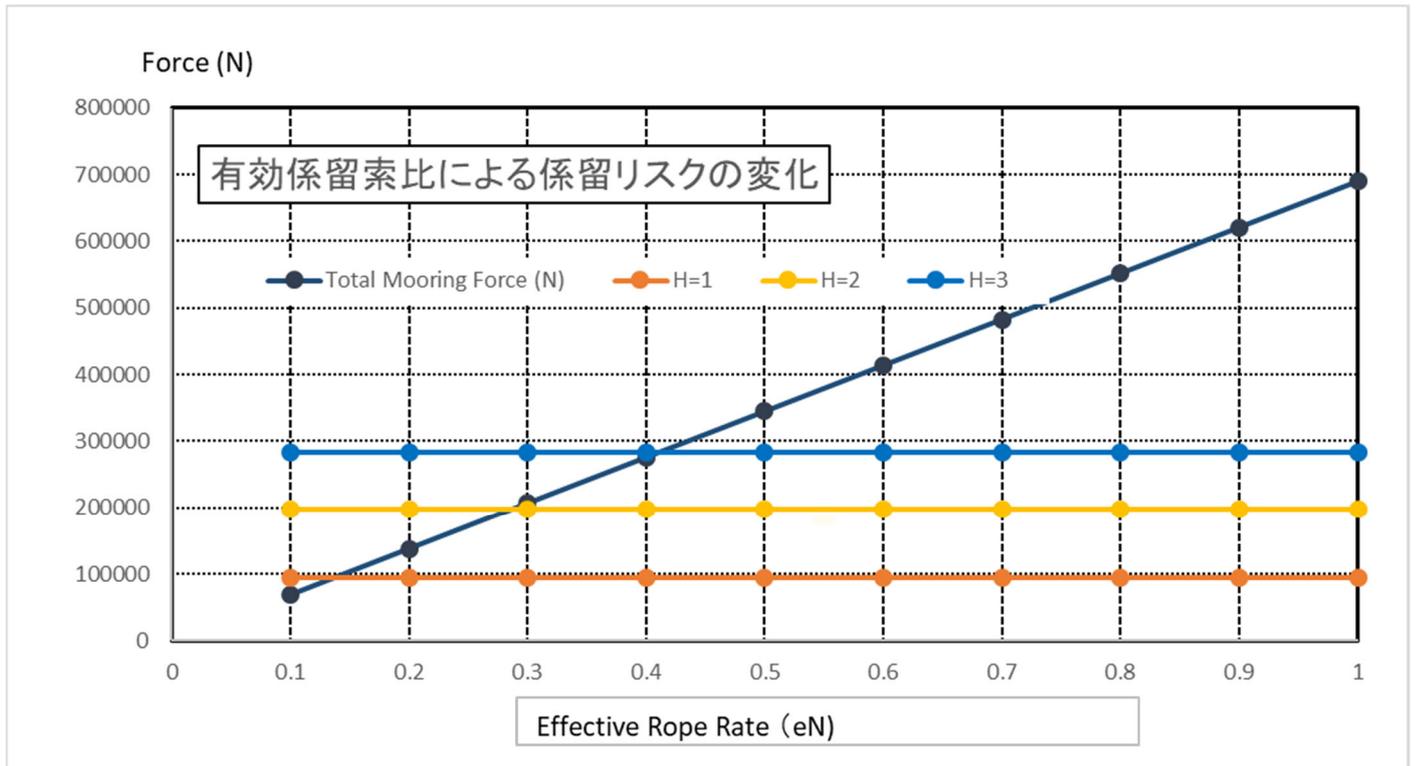
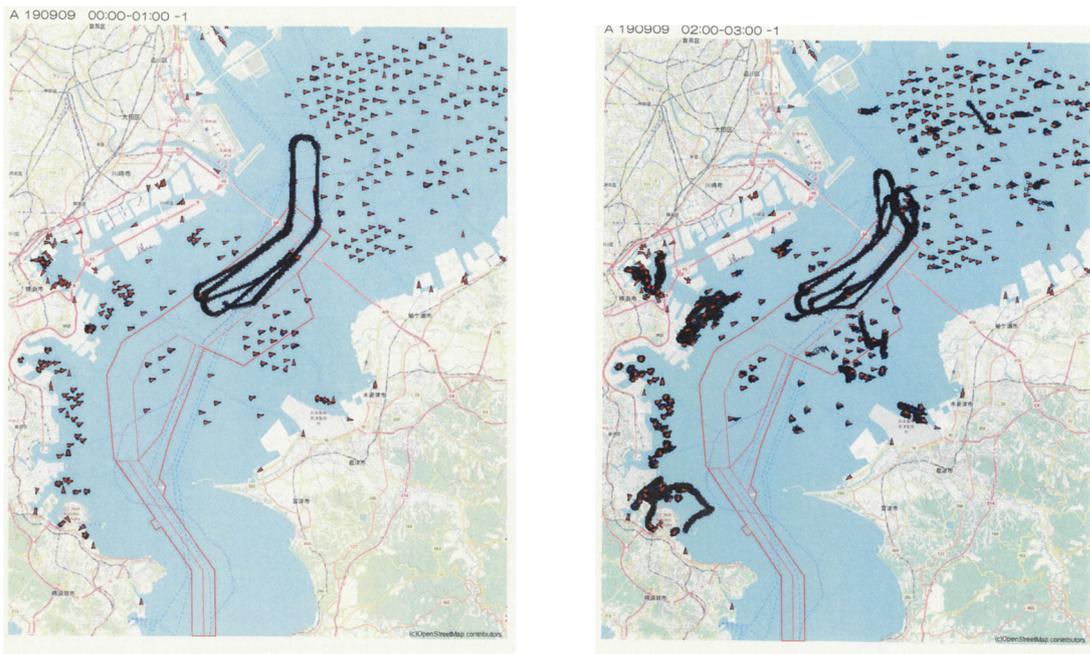


図-4.2.2.7 有効係留索比に対する波力と係船張力の変化

4.2.2.4 係留船舶の被害対策に向けて

図-4.2.2.8 に国土交通省調査による AIS の船舶位置調査結果を示す。台風 15 号の来襲にあたって、係船避難していた船舶は一斉に振れ回り運動を開始し、その軌跡が AIS データに表れている。本牧沖で走錨を始めた船があり



(1) 9月9日 0:00-1:00

(2) 2:00-3:00

図-4.2.2.8 東京湾の係留船舶の位置 (国土交通省)



図-4.2.2.9 衝突した ぶんご ぷりんせす 号 (排水量 20,228ton)

- アンカーが外れて、地鎖による把駐力のみになる。→ 走錨が始まる。
- ◎ 走錨してもいいような位置に停泊しなさい。
(勧告)

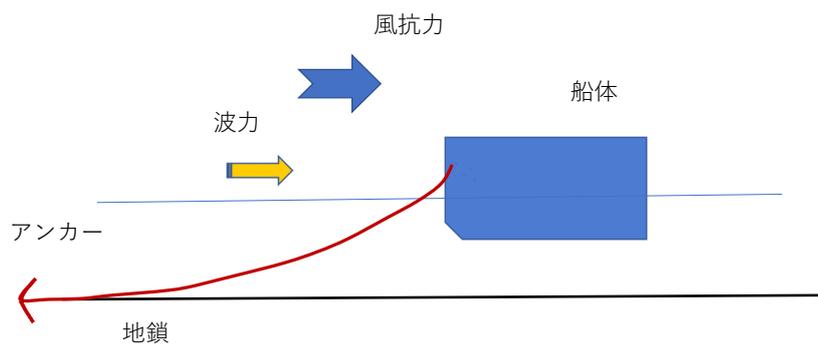


図-4.2.2.10 船舶係留の模式図

その 1 隻が、前述の“横浜はま道路”にぶつかり交通障害を与えた“ぶんご ぷりんせす”（図-4.2.2.9）である。図-4.2.2.10 は船舶係留の模式図で、船体はアンカーを打った後に地鎖を垂らして所定の泊地に係船されている。一般には中型船以上は風が吹くと風抗力により押し流されて、さらに強い風が吹くとアンカーの把駐力よりも大きくなり、アンカー（錨）が外れる。これを“走錨”といい、地鎖の有する摩擦力のみで抵抗をしているのみの状態となる。現在の対策は、走錨をたとえても、何にも当たらないような場所に錨を打つことというもので、急激な風の変化等を考慮したものではない。今後は、高把駐力アンカーの開発等の技術開発が必要と考えられる。

4.2.2.5 まとめ

本調査では、横浜港を対象に係留船舶の漂流・沈船被害を調べた。その結果、有義値で 2m 程度の波の作用によりシーバスの沈船が生じたことや漂流船舶による”はま道路“の被害が生じたことが明らかになった。対策としては、係船位置の再考、高把駐力アンカーの採用等が上げられる。

参考文献

- 1) 平石哲也・本城智・古川正美（1991）：避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動、海岸工学論文集、Vol.38, pp.731-735.
- 2) 東京製綱繊維ロープ(株)ホームページ <http://www.fiber-tokyorope.jp/rope/8strand.html#Stand01>（参照日 2020/3/4）

4.3.1

堆積岩の挙動とメカニズム

Transportation process and mechanism of coastal boulders

渡部 真史*¹, 清野 聡子*², 岩崎 由美子*³, 有川 太郎*⁴

Masashi WATANABE, Satoko SEINO, Yumiko IWASAKI and Taro ARIKAWA

At Okinoshima, Chiba prefecture, several tones of coastal boulders were transported by storm surge and waves during Typhoon No.15 (Faxai). This report summarizes the distribution trend of these boulders and simulation results of the storm surge and waves during this event. As a result of our simulation, the computed maximum wave height and velocity over the shoreline was respectively 7.9 m and 7.1 m/s, thus this size of storm wave formed the boulders located at this area.

Keywords: coastal boulder, *field survey*, *storm waves*, *numerical simulation*

4.3.1.1 はじめに

房総半島南部にある千葉県館山市沖ノ島では2019年台風19号で運搬された数tの巨礫が沿岸部に打ち上げられていた。これらの巨礫のサイズと分布は台風15号によって生じた波浪や高潮の規模に依存していると考えられる。そこで、本章では、これらの巨礫の分布調査を行い、どの程度の流体力であれば、これらの巨礫分布を形成可能かを台風19号で生じた高潮・波浪の数値計算に基づき、検証した。

4.3.1.2 沖ノ島における巨礫の打ち上げ状況

2020年2月23日にNPO法人たてやま・海辺の鑑定団の竹内聖一氏によって、同地域にある巨礫群の分布調査が行われた。調査エリアは図-4.3.1.1に示した通り、沖ノ島北西部である。このエリアには3つの巨礫が陸上部に打ち上げられていた(図-4.3.1.2)。図-4.3.1.3に示しているそれぞれの巨礫の寸法は岩①(長辺約120cm 短辺約60cm 高さ約30cm)、岩②(長辺約130cm 短辺約100cm 高さ約20cm)、岩③(長辺約250cm 短辺約140cm 高さ約30cm)である。現地調査にあたったNPO法人たてやま・海辺の鑑定団によると、岩の付着物は石灰藻類サンゴモ科に属するヘリトリカニノテ (*Marginisporum crassissima*) またはヒライボ (*Lithophyllum okamurae*) の残骸と推測されている。両種とも潮下帯に生息し、後者は潮間帯下部も生息域としている。このことから、これらの巨礫は潮下帯より水深が深い地点から陸上に打ち上げられたと想定できる。

*1 中央大学理工学部 助教・博(工)	Assistant Prof., Faculty of Science and Engineering, Chuo University Dr. Eng.
*2 九州大学大学院工学研究院 准教授・博(工)	Associate Prof., Graduate School of Engineering, Kyushu University, Dr. Eng.
*3 九州大学大学院工学研究院 研究員・博(理)	Researcher, Graduate School of Engineering, Kyushu University, Dr. Sci.
*4 中央大学理工学部 教授・博(工)	Professor, Faculty of Science and Engineering, Chuo University Dr. Eng.



図-4.3.1.1. 沖ノ島前景。赤い四角は調査エリア。

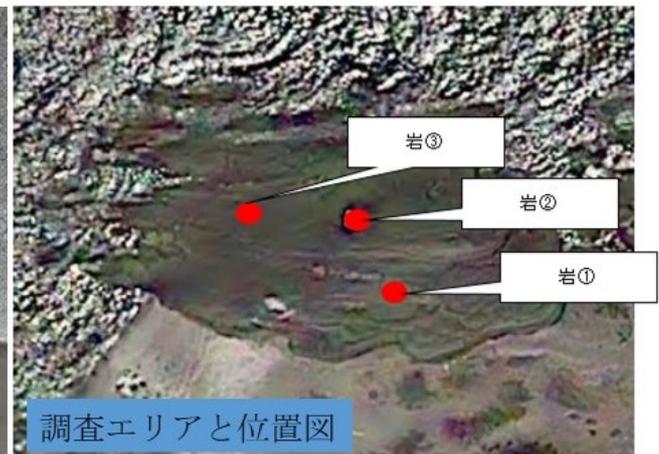


図-4.3.1.2. 3つの巨礫のロケーション。

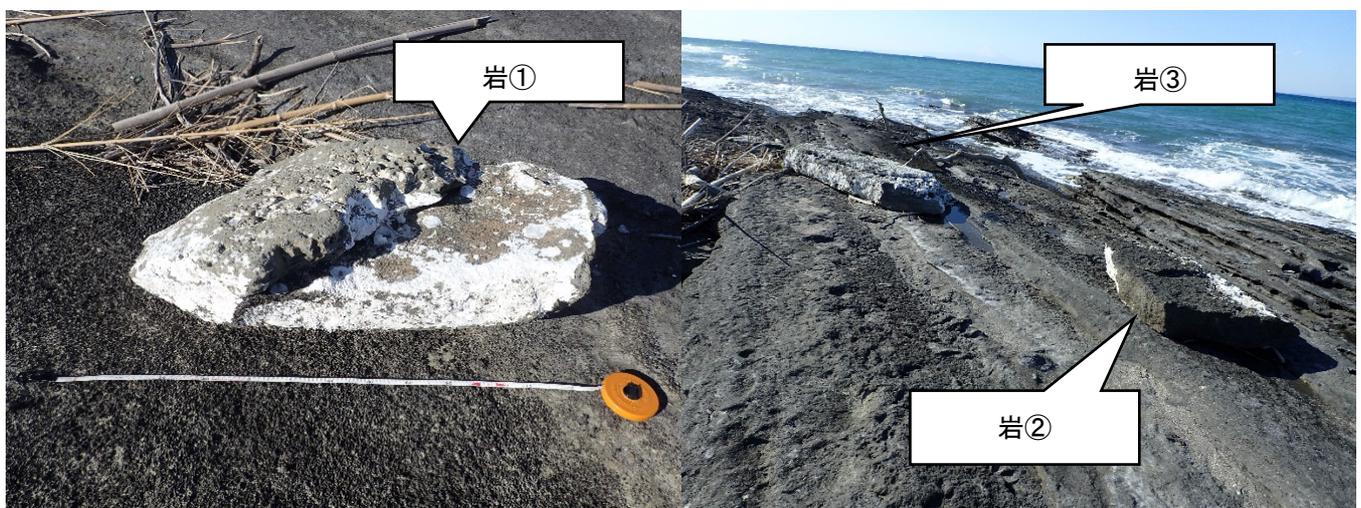


図-4.3.1.3. 3つの巨礫の写真

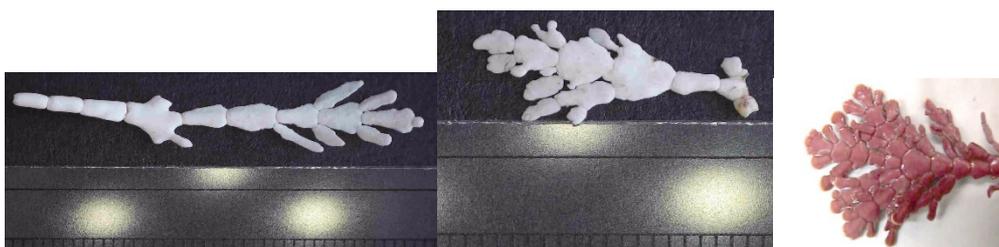


図-4.3.1.4. 左・中央は現場の岩②および③から取ったヘリトリカニノテのサンプル。スケールバーは1mm単位。右はウェブサイト (http://soruipc2.bio.mie-u.ac.jp/sourui_photo/rhodo/heritorikaninote.html) より。色の違いから、サンプルは長い間日差しにさらされ白化したと思われる。

4.3.1.3 沖ノ島における2019年台風15号による高潮・波浪の数値計算

沖ノ島にする巨礫群がどの程度の流体力で陸上部に打ち上げられたのかを検証するために、千葉県南部沖を対象に2019年台風15号での波浪推算を行なった(図-4.3.1.4)。潮位計算には富田ら(2005)が開発した多層型非線形浅水長波方程式を基にした数値シミュレータを用いた。波浪計算には Delft 工科大学が開発した第三世代波浪推算モデ

ルである SWAN(ver41.10) (Ris et al., 1999)を用いた。計算の結果、沖ノ島沖合の最大有義波高と周期はそれぞれ 3.1 m, 13.2 s であり、この値を入力条件として、Navier-Stokes 方程式を基にした三次元数値シミュレーション(有川ら, 2005)を用いて、3次元の波浪計算を実施した(図-4.3.1.5)。現地に分布する最大の巨礫の摩擦力は $14 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ であり、水深 8.8 m 以浅のエリアでこの値を上回る流体力が発生していたため、水深 8.8 m 以浅に巨礫が存在しており、波浪によって陸上部に打ち上げられたと考えられる。一方、沖ノ島の海岸線で最大波高と流速を算出した結果、それぞれ 7.9 m, 7.1 m/s であり、この程度の規模の波浪で現地の巨礫分布が形成されたことが明らかとなった。

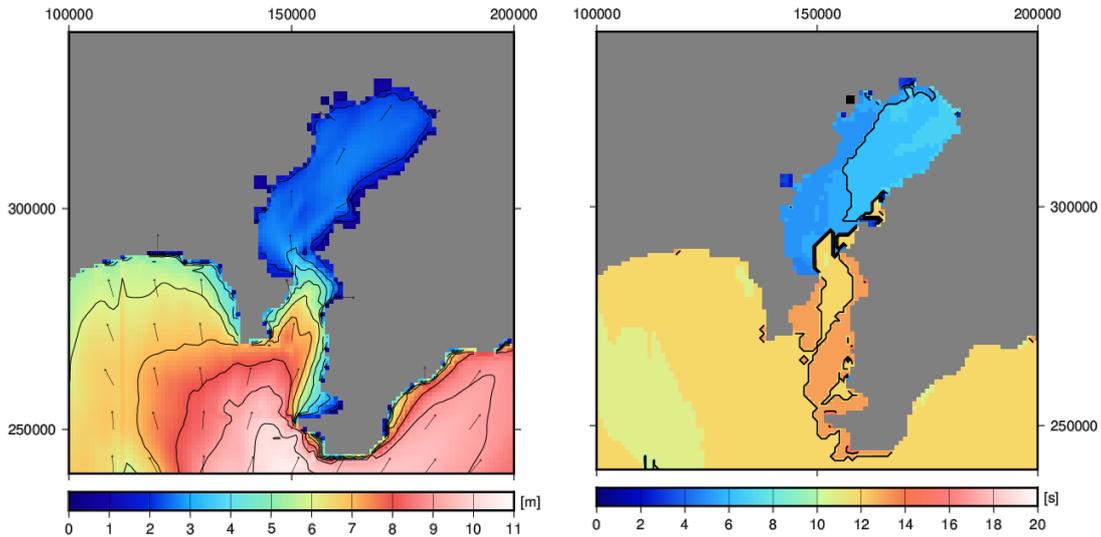


図-4. 3. 1. 4. SWAN による 2019 年台風 15 号の波浪推算結果。左図が有義波高，右図が卓越周期の分布を示す

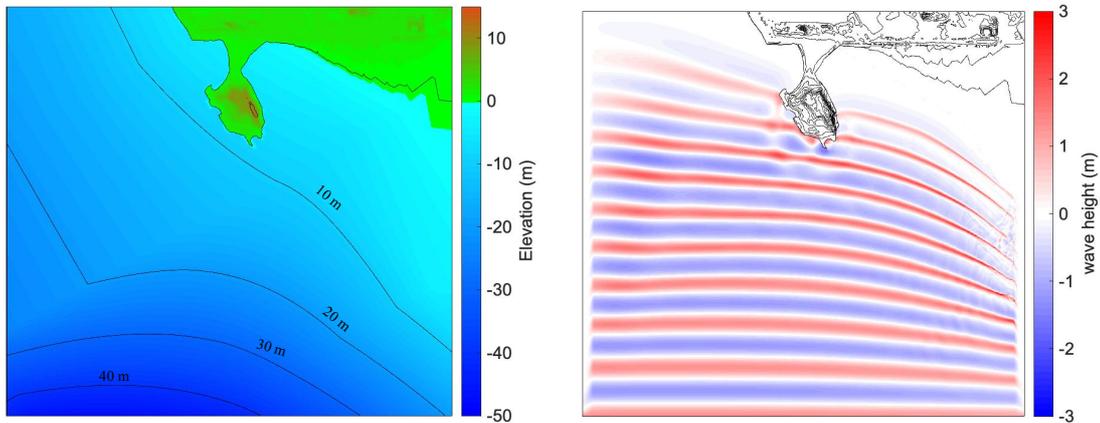


図-4. 3. 1. 5. 2019 年台風 15 号で生じた波浪を入力条件とした時の波浪計算結果。左から，計算領域の地形，波浪が沖の島の陸上部を遡上している時(計算開始から 128 秒後)の波高分布。

参考文献

1. 富田孝史, 柿沼太郎：海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波の数値シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44, No.2, June 2005.
2. Ris, R.C., N. Booij and L.H. Holthuijsen., A third-generation wave model for coastal regions, Part II, Verification, J. Geophys. Res, C4, 104, 7667-7681, 1999.

3. 有川太郎, 山田文則, 秋山実:3次元数値波動水槽における津波波力に関する適用性の検討, 第52回海岸工学講演会論文集, pp.46-50, 2005.

千葉県における台風 15 号, 19 号, 21 号関連豪雨災害の比較：降雨特性, 流域特性からみた浸水メカニズムの比較

Mechanism of flooding in Chiba Prefecture by the Typhoon 15, 19 and 21-related heavy rain with respect to rain and watershed characteristics

田中規夫*¹, 小野寺 祐乃*²

Norio TANAKA, Yoshino ONODERA

The flooding characteristics in Chiba Pref. by Typhoon 15, 19 and 21-related heavy rain are classified. Similar to the critical line in landslide disaster which uses rainfall intensity and cumulative rainfall, this study tried to classify the three events in a simple method because flooding in branches or creeks are sometimes decided by the rainfall intensity and that in main river are related to the cumulative value. The indices can express well the differences of three disasters. The watershed characteristics, bed-slope change, river confluence and meandering, also greatly affected the flooding locations. The threshold values should be further investigated for roughly estimating the critical condition for what type of disaster may occur at each future flood event.

Keywords : *rainfall intensity, cumulative rainfall, slope change, confluence, meandering*

5.1.1 はじめに

令和元年台風 15 号, 台風 19 号, 10 月 25 日の大雨 (以後, 1025R) により, 千葉県の多くの地域で河川氾濫や浸水被害が報告された。大雨による浸水は, 図 5.1.1(a)のように①小水路から水が溢れたことによる浸水, ②支川の氾濫などによる浸水, ③支川と本川の合流部付近の氾濫などによる浸水, ④本川の氾濫などによる浸水の 4 つのステップに分類される。土砂災害は, 1 時間雨量と土壌雨量指数を用い, 雨量が土砂災害警戒避難基準線を超えるかどうかで災害危険度を判定している。そこで, これに類似した方法で河川の浸水形態判定を行えるかどうかを評価することを試みた。降雨勾配 (=累加雨量(mm)/降水時間(h): 単位は降雨強度と同じだが, 意味合いは降り始めからの平均降雨強度) と累加雨量(mm)の関係により, 浸水形態判定は図 5.1.1(b)のようになると予想される。降雨勾配は小水路から河川に水を流せるかの判定指標として, 時々刻々の降雨強度ではなく降水開始からの累加雨量に対する勾配を選定し, 河川流入前の浸水と河川流入後の浸水の 2 つに分類可能かを評価することを目的とする。

*1 埼玉大学大学院理工学研究科 (兼) レジリエント社会研究センター 教授・工博

Prof., Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, International Institute of Resilient Society, Saitama University, Dr.Eng.

*2 埼玉大学大学院理工学研究科 修士 1 年

Master course student, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, B.Eng.

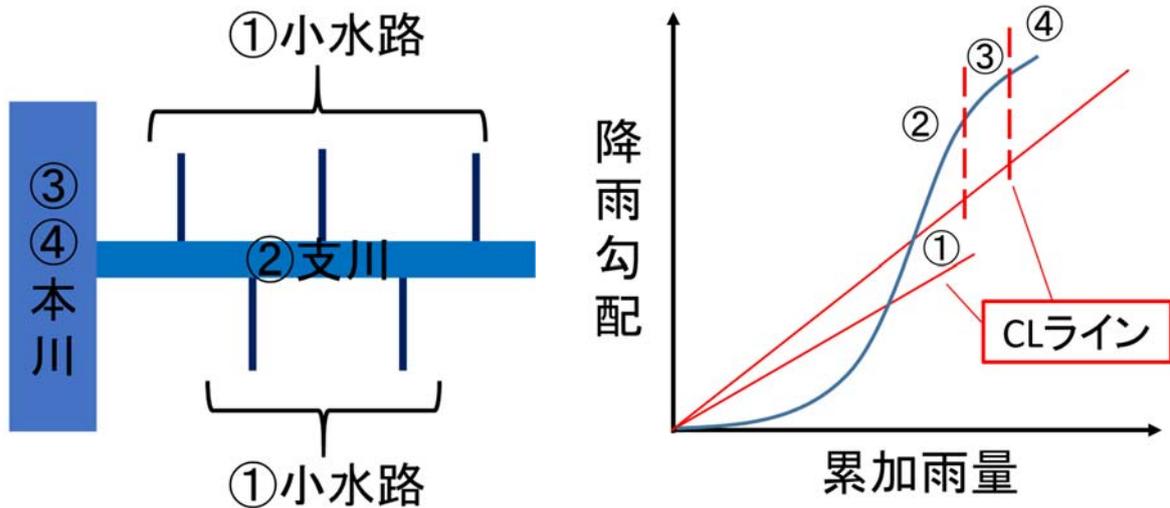


図 5.1.1 浸水ステップ ((a)浸水発生の原因となる箇所, (b)浸水形態判定図 (例))

5.1.2 各降雨の比較

(1). 降雨状況

図 5.1.2(a)-(c)に各豪雨の降水量分布を示す。千葉県気象速報¹⁾より台風 15 号は千葉県南部を中心に、99.5mm (勝浦) から 237.5mm (坂畑)、台風 19 号は千葉県南西部を中心に、71.0mm (横芝光) から 195.0mm (牛久)、1025R は千葉県中央部の広範囲を中心に、87.5mm (銚子市) から 280.0mm を超える降雨が観測された。また、降雨の継続時間は、台風 15 号は約 12 時間、台風 19 号は約 27 時間、1025R は約 13 時間であった。以上より、千葉県内においては、台風 15 号は短時間で一部地域に、台風 19 号は長時間かけて一部地域に、1025R は短時間で広域に大雨をもたらしたといえる。

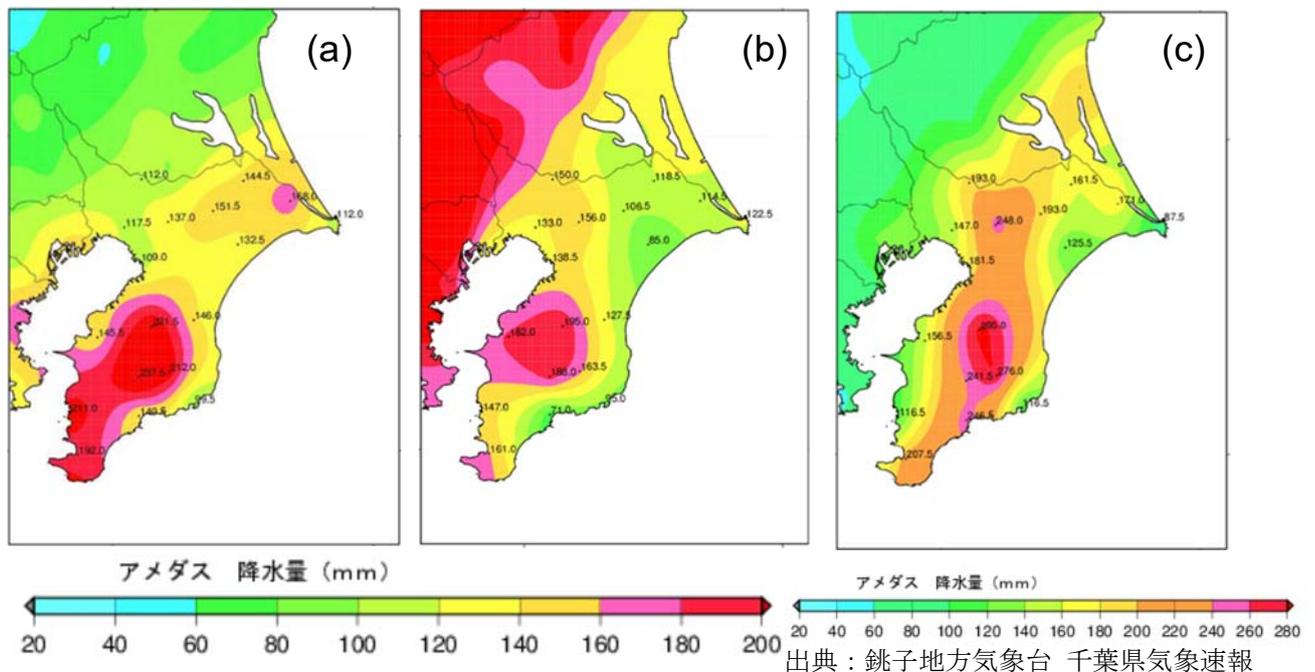
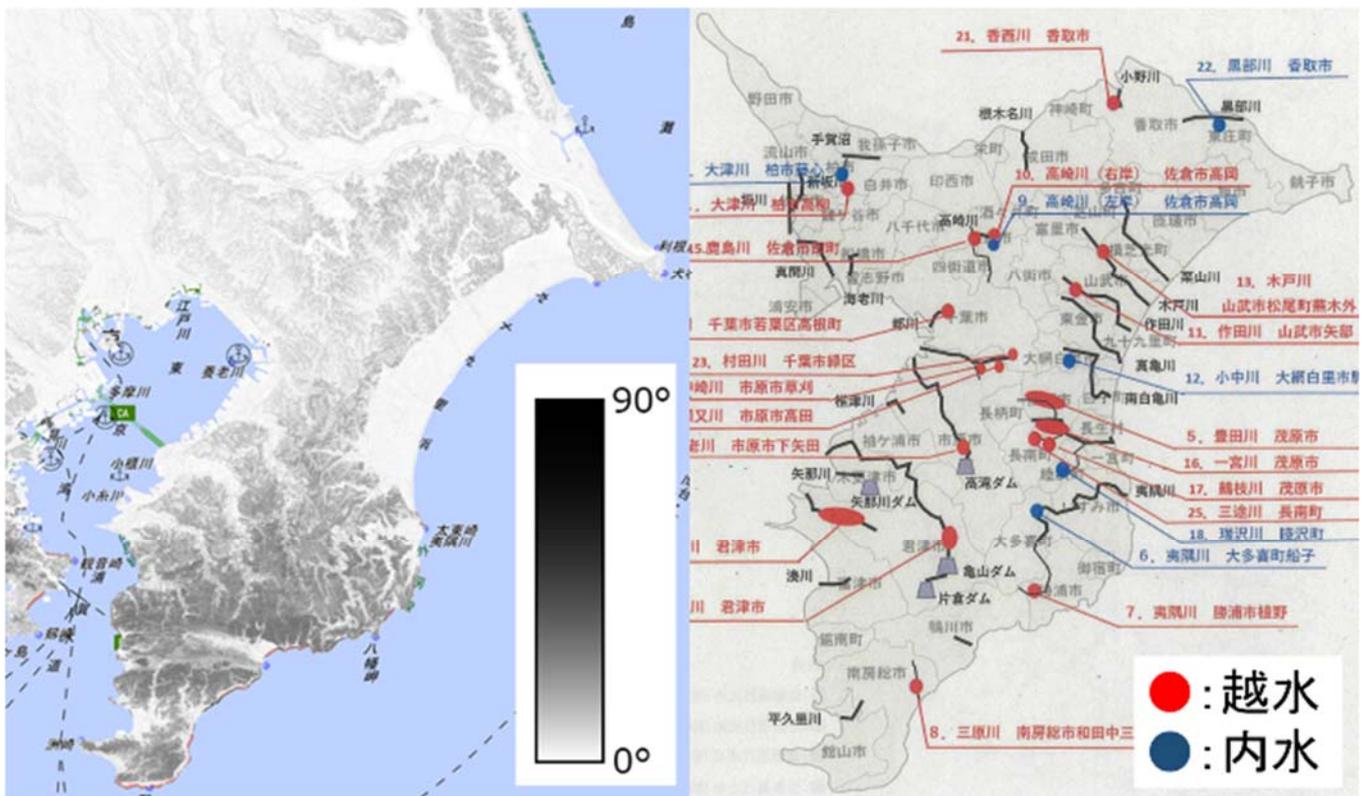


図 5.1.2 降水量分布図¹⁾ ((a)台風 15 号 (9/8 10時-9/9 24時) , (b)台風 19 号 (10/10 0時-10/13 24時) , (c)10 月 25 日の大雨 (10/25 0時-24時))

(2). 被害状況

内閣府の発表資料²⁾より、台風15号では作田川（山武市）、阿久川（茂原市）で溢水被害が生じた。また、千葉県災害対策本部会議資料³⁾より、氾濫が原因の家屋浸水はないが、家屋の浸水被害は床下65棟、床上37棟で生じた。これらは主に、降雨による表流水が千葉県管理河川に流入する前に生じた浸水であると考えられる。台風19号は、千葉県管理河川の氾濫はなく、浸水被害は利根川が氾濫した銚子市のみであった。1025Rは、千葉県管理河川25か所で氾濫が生じた。図5.1.3の傾斜量図と河川氾濫箇所を比較すると、一部は山地部の谷底平野であるが、傾斜が緩勾配に切り替わる地点と氾濫箇所がおおよそ一致している。緩勾配となった河川中流部では、支川が合流する場所がかつ勾配変化により水位が上昇しやすい地点で、現況流下能力が雨量に対して不十分であったことが原因と考えられる。浸水被害は、河川氾濫が原因のものを含め、床下1279棟、床上1379棟であった。



出典：国土地理院⁴⁾（左）、第17回千葉県災害対策本部会議資料³⁾（右）（それぞれ凡例を追記）

図 5.1.3 傾斜量図（左）と河川氾濫箇所（右）

5.1.3 河川整備計画

ここでは、特徴的な河川の河川整備計画に記載された内容から、今回の氾濫に関連した事項をまとめる。

(1) 一宮川水系

「二級河川一宮川水系河川整備計画（千葉県）」によると、一宮川水系の流域面積約203km²、幹線流路延長約37kmの二級河川で、上流区間は標高150m程度の上総丘陵北端に位置し、三途川合流点での河床勾配は1/300、中～下流区間は九十九里平野に位置しており、河床勾配は1/1,000～1/3,000と緩やかになっている。この地域は昭和50年代以降は千葉市並びに首都圏への通勤圏内となり、茂原市を中心として、宅地化、工業団地、商用地等への土地利用の改変により市街化が急速に進んだ。特に、4支川を合流し河床勾配が1/1,000程度から1/3,000へと緩くなる一宮川中流区間の茂原市街地においては、急激な市街化によって流域の保水・遊水能力が低下し、直接的な洪水被害が発生しやすくなった。一宮川流域では、昭和45年7月豪雨、昭和46年台風25号、平成元年8月台風12号

や、平成8年台風17号、平成25年台風26号などで甚大な浸水被害が生じている。図5.1.4に浸水被害に関係した台風の進路を示す。多くの場合は、房総半島に上陸、または、かすめるコースで被害が生じている。

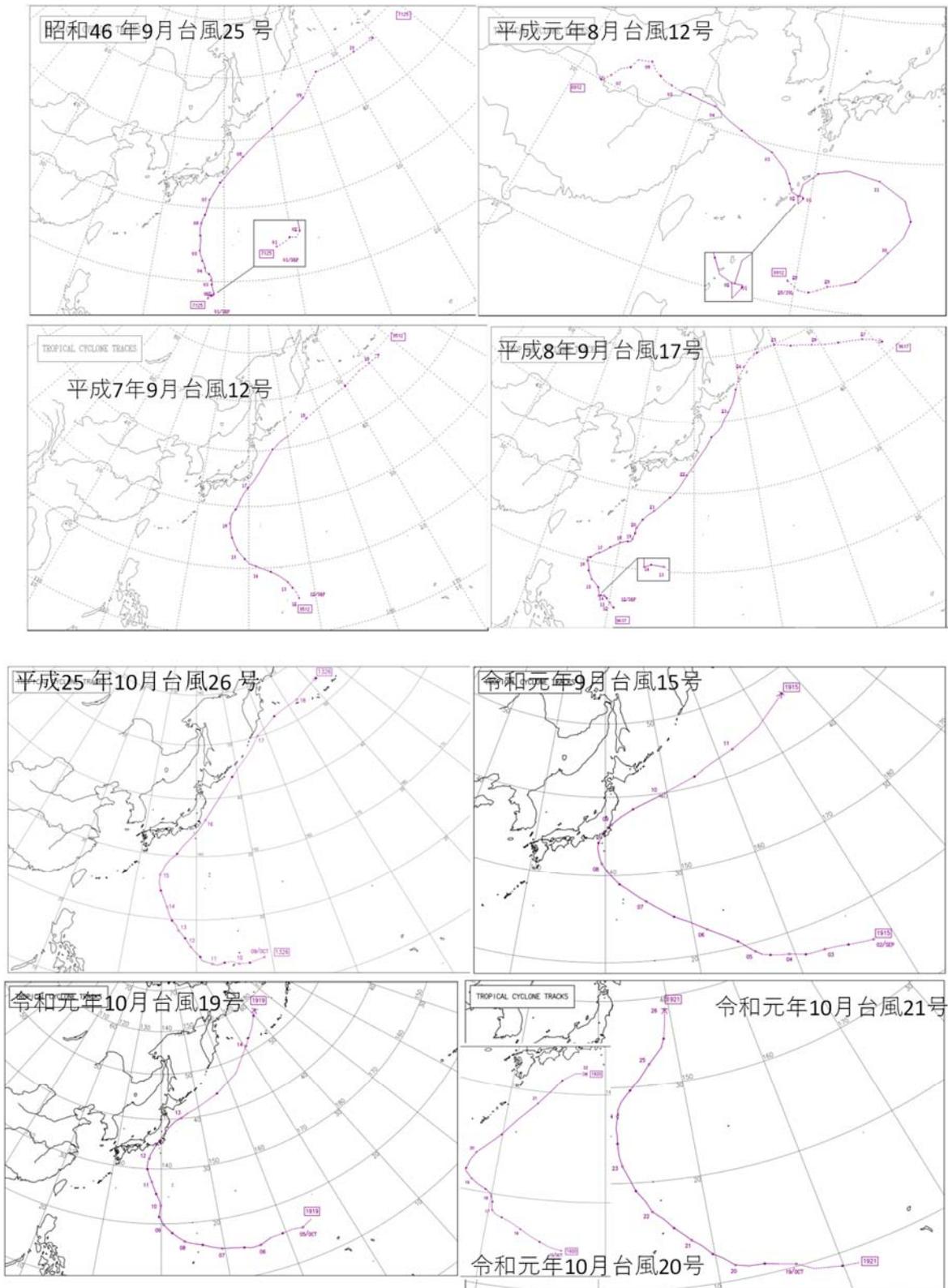


図 5.1.4 浸水被害をもたらした主な台風のコース (tenki.jp⁷⁾より入手した図面を改変)

(2) 夷隅川(図 5.1.7)

千葉県内では、いすみ市から鴨川市にわたる地域は千葉県でも多く雨が降る地域であり、10月の千葉豪雨ではその地域の降水量が特に多い。夷隅川流域は年間降水量が約 1,900mm で、千葉市の年間降水量約 1,300mm に対し約 1.5 倍となっている。千葉県を流れる河川のうち一級河川利根川を除くと、夷隅川の流域面積は 299.4km² とともに大きい川である。「隈」「曲」等のついている河川の多くと同様（例：阿武隈川，千曲川），激しく蛇行を繰り返す河川である。

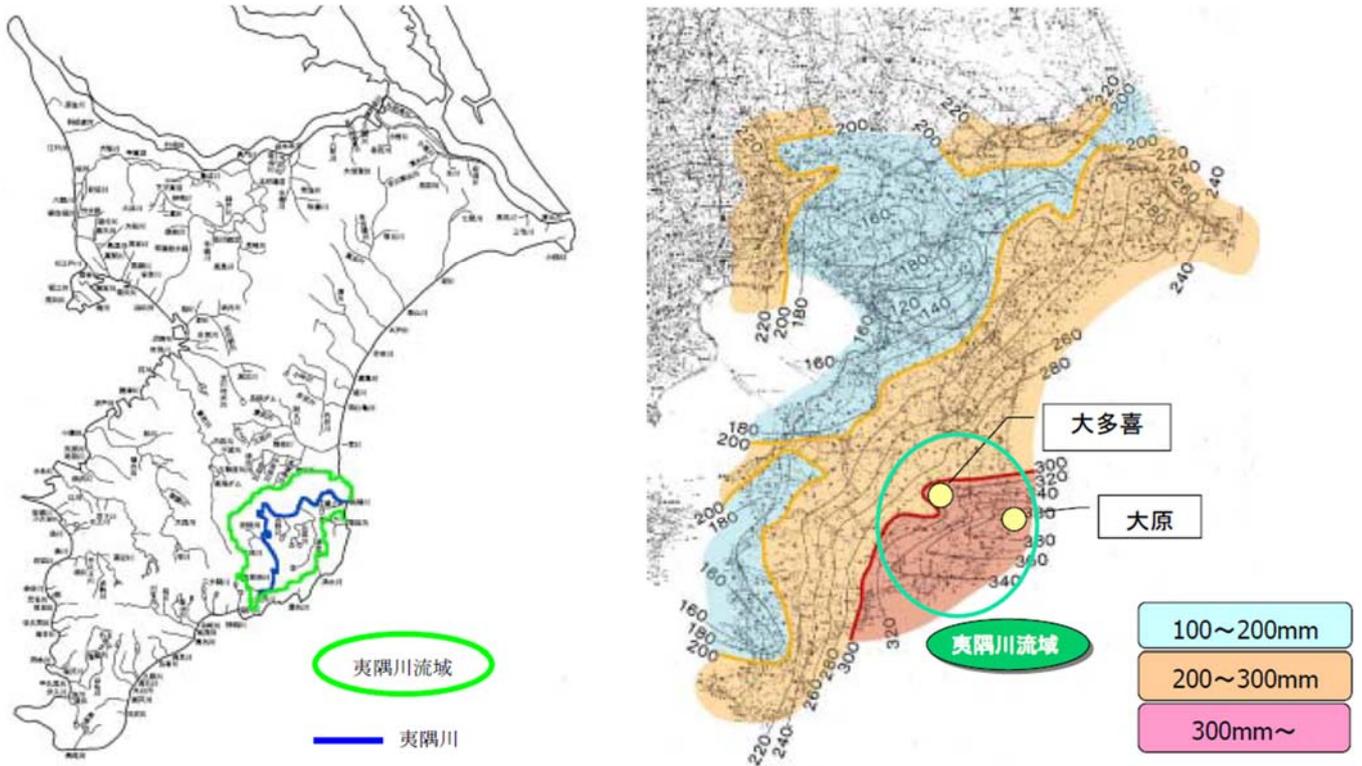


図 5.1.7 千葉県河川図，夷隅川の位置図，平成 16 年 10 月洪水の累加降雨（夷隅川流域委員会資料より抜粋）⁶⁾

この河川上中流部では屈曲した河岸段丘がよく発達している。隆起と完新世の水量増加により、激しい下刻が生じた河川である。下刻の休止期には側刻が行われ、何段もの段丘面が作られている。また、曲流しながら下刻し形成されたという特徴をもつ。

新たに河川沿いで宅地化された箇所での浸水被害や、道路冠水により孤立集落が生じる河川ではあるが、流域内は人口の増加が無いこと、密度が低いこと、宅地化が大きく進展していないことから、夷隅川流域委員会資料⁶⁾では、夷隅川の特徴である蛇行の洪水ピーク流量低減機能を極力活かすこととしている。すなわち、不要な河川の直線化を避け、蛇行を保全し、段丘面の氾濫を許容することで、背後に繁茂する樹林帯とともに河道内貯留を増大させ、洪水のピーク流量を低減させる効果を活用する方針が立てられている。

5.1.4 浸水・河川氾濫危険度判定図

図 5.1.8 に、解析対象とする観測所の位置図を示す。また、図 5.1.9(a)~(g)に、大雨による被害が生じた 7 箇所の地域（船橋市，佐倉市，茂原市，香取市，千葉市，勝浦市，市原市牛久）に関する降雨勾配（=累加雨量(mm)／降水時間(h)）と累加雨量(mm)の関係を示す。降雨勾配は、tenki.jp⁷⁾の降水量データを参考に作成した。7 箇所の地域は、それぞれ図 5.1.8 の黄丸で囲った場所に位置する。

ドマップ⁹⁾は、2日間総雨量 324mm を想定している。平均して 1 時間に 6.8mm の降水によって氾濫の危険があるといえる。台風 15 号、1025R の降雨勾配はともに 6.8mm を大幅に超えており、その状態が長時間継続した 1025R では複数の河川氾濫と浸水被害が生じたと考えられる。

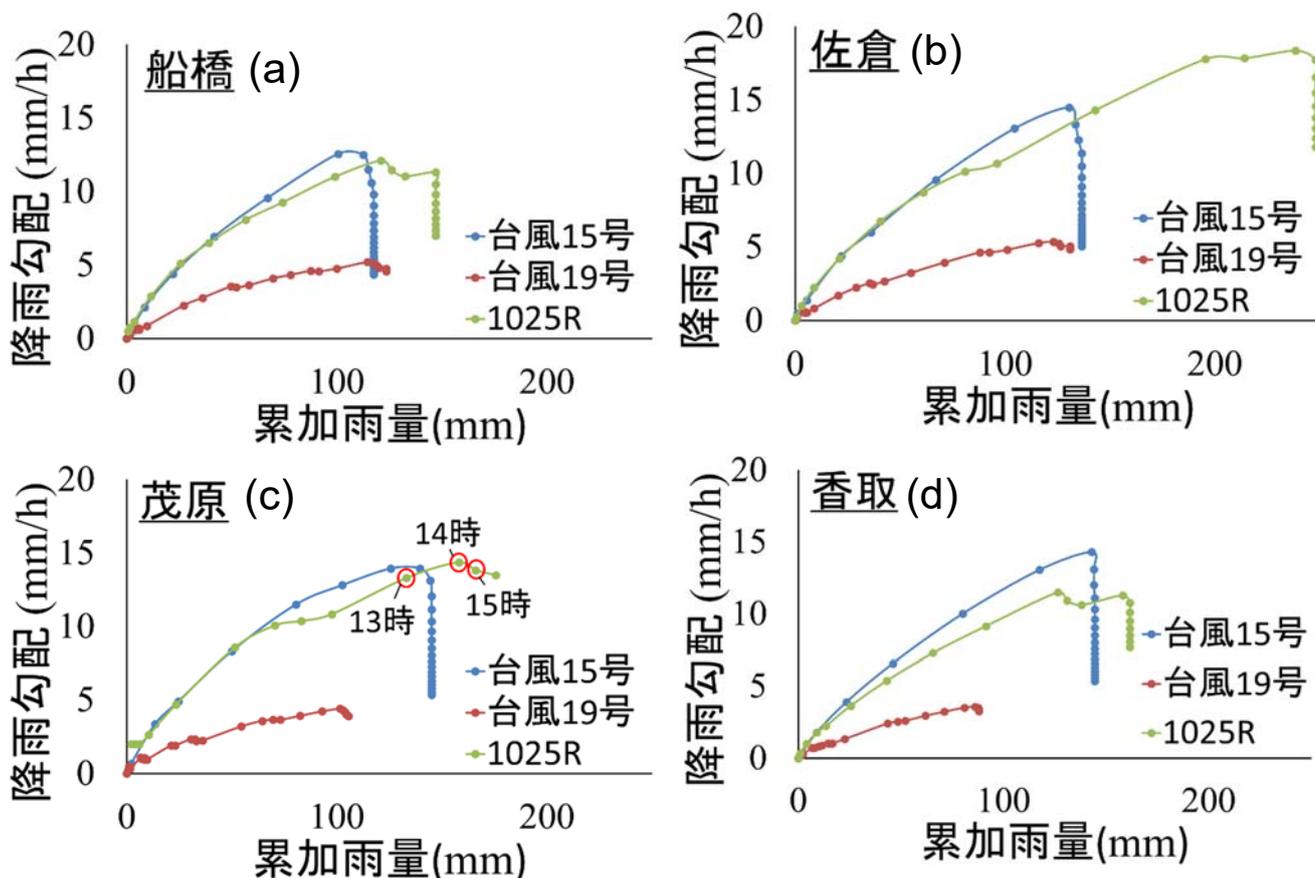
香取市では 1025R で香西川が氾濫したが、どの大雨でも浸水被害が生じなかった。図 5.1.9 (d) のすべての降雨勾配は降雨勾配の限界を下回っており河川流入前の浸水が生じなかったといえる。香西川の氾濫の限界は、台風 15 号の累加雨量 144.5mm と 1025R の累加雨量 161.5mm の間に存在すると考えられる。

千葉市では台風 15 号と 1025R で浸水被害が生じ、1025R では都川と村田川で河川氾濫が生じた。図 5.1.9 (e) より、台風 15 号と 1025R の降雨勾配はほとんど一致しているため、河川流入前の浸水が生じる降雨勾配の限界もおおよそ一致すると考えられる。1025R では、河川氾濫が生じる累加雨量の限界を超えて都川と村田川での氾濫が生じたといえる。

勝浦市では 1025R で 1 棟の床下浸水があり、夷隅川で氾濫が生じた。図 5.1.9 (f) より、夷隅川の河川氾濫の限界は、台風 15 号の累加雨量 99.5mm と 1025R の累加雨量 115.0mm の間に存在すると考えられる。夷隅川流域委員会資料³⁾には、「宅地以外の段丘面では洪水の氾濫を許容し、段丘面の洪水低減機能を活かすこととする。」と記載されている。降水量があまり多くないことと浸水件数が少ないことから、宅地以外の段丘面での氾濫と考えられる。

市原市牛久では台風 15 号で浸水が生じ、1025R で養老川が氾濫した。図 5.1.9 (g) より、台風 15 号と 1025R の降雨勾配はほとんど変わらず、降雨勾配の限界もおおよそ一致すると考えられる。河川氾濫の限界は、台風 15 号の累加雨量 221.0mm と 1025R の累加雨量 285.0mm の間に存在すると考えられる。

以上より、降雨勾配と累加雨量の関係から作成した危険度判定図は、おおよそ生じた被害と一致した。



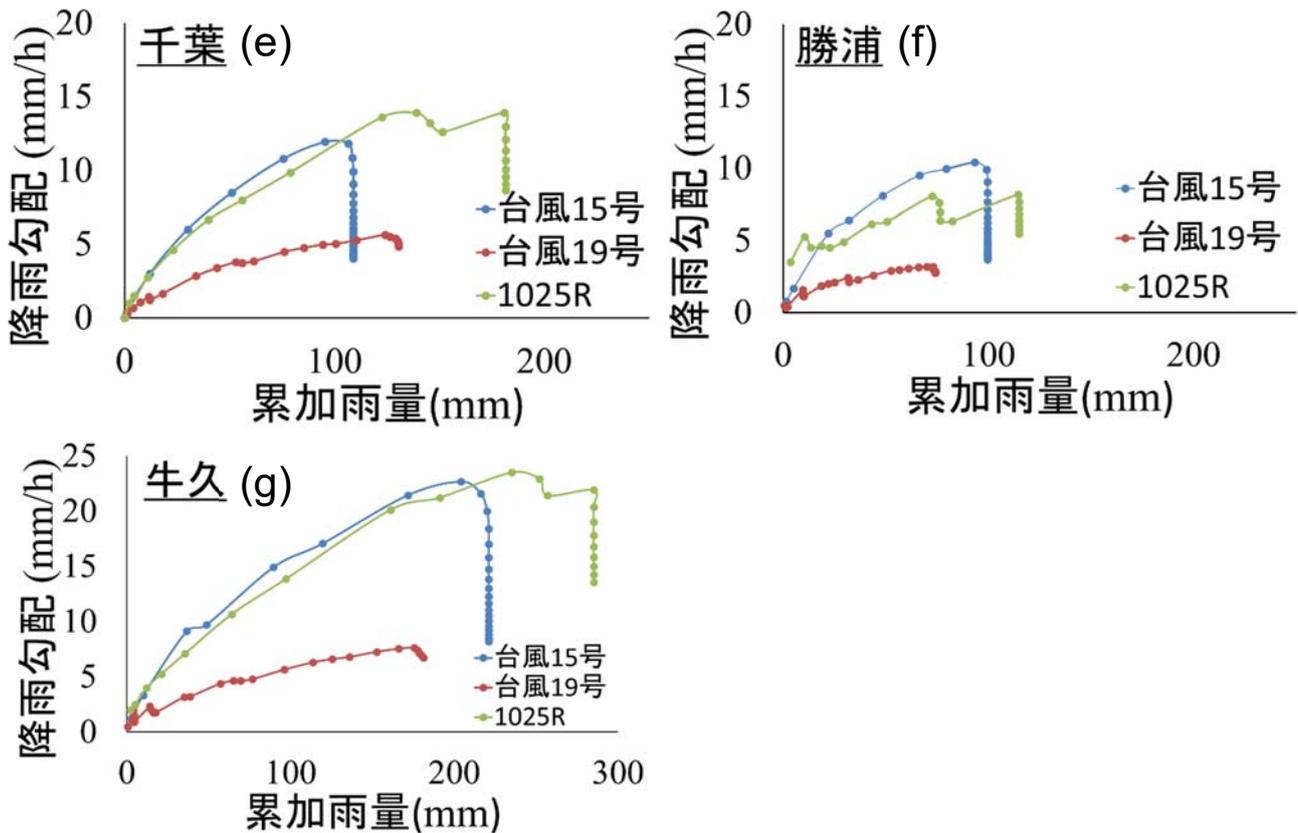


図 5.1.9 浸水・河川氾濫危険度判定図

5.1.5 おわりに

本研究では、土砂災害の CL 線を参考に、河川の出水に対しても降雨勾配と累加雨量を用いて、千葉県で浸水が生じた河川に対して、実際の浸水形態を広域において簡易に説明できるような判定図を作成した。しかし、本研究で用いたデータでは厳密な閾値を決定することができない。今後は、過去の雨量データなどを加えていくことで、詳細な限界線を定めることができるか、検討を行う必要がある。

謝辞

本研究には特別研究促進費（台風 15 号）の予算を使用した。千葉県県土整備部河川環境課，山武市役所，茂原市役所，長柄町役場に電話による聞き取り調査を行った。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 銚子地方気象台ホームページ：<https://www.jma-net.go.jp/choshi/>
- 2) 内閣府ホームページ：<https://www.cao.go.jp/>
- 3) 千葉県ホームページ：<https://www.pref.chiba.lg.jp/>
- 4) 国土地理院ホームページ：<https://www.gsi.go.jp/index.html>
- 5) 千葉県，二級河川一宮川水系河川整備計画，2015.
- 6) 千葉県夷隅川流域委員会，2006. (<https://www.pref.chiba.lg.jp/kasei/kawazukuri/isumi/documents/ism-4-si4-1.pdf>)
- 7) tenki.jp：<https://tenki.jp/>
- 8) ウェザーニュース：<https://weathernews.jp/onebox/>
- 9) 茂原市ホームページ：<https://www.city.mobara.chiba.jp/>

令和元年台風 15 号, 19 号, 21 号時における市川市の水害と避難状況

Relationship between inundation and evacuation status in Ichikawa City during Typhoons 15, 19 and 21 in 2019

八木澤 順治*¹

Junji YAGISAWA

In this study, the relationship between rainfall, river water level and evacuation status was investigated in Ichikawa City, Chiba prefecture, where inundation was caused by Typhoon Nos. 15, 19 and 21 in 2019. For evacuation status information (total number of evacuees, evacuation centers, evacuation information issued by Ichikawa City), data obtained from local government was used.

As a result, during the three typhoons, not only the rainfall and the peak river water level in this city, but also the announcement status of flood warning information was almost the same. Nevertheless, it was found that the total number of evacuees was larger at Typhoon No.19 than at other typhoons about 100 times.

Keywords : inundation, evacuation status, Ichikawa City

5.2.1 はじめに

2019年9月から10月にかけて来襲した複数の台風は各地に甚大な被害を及ぼした。そのうち、台風15号(9月9日)、台風19号(10月12日)、台風21号(10月25日)は関東地方周辺に接近し、このうち台風15号では千葉県内において顕著な風水害をもたらしたことは記憶に新しい。図5.2.1に市川市の行政界と市内の主な河川の位置図を示す。図5.2.1に示すように、市川市では西側境界に江戸川、旧江戸川といった比較的規模の大きな河川があり、市内を江戸川左岸から分派する利根川水系の一級河川である真間川(河川延長8.5km、流域面積65.6km²)が東京湾まで流れている。また、この真間川の支川として、国分川、大柏川が真間川左岸に合流し、それぞれ市内の西部、東部を流れている。市内の南西部では江戸川と真間川に、市内の中央部では国分川と春木川に挟まれた湛水型氾濫が生じやすい地形を有している。実際に時間雨量が大きな降雨時には、こうした地域において、過去度々内水被害を受けていることが報告されている¹⁾。また、図5.2.2に示す市川市が公開している真間川洪水・内水ハザードマップ²⁾においても、江戸川と真間川に挟まれた市内南西部、真間川-国分川合流点付近、真間川-大柏川合流点付近において、0.5-2.0m程度の浸水が生じる可能性が示されている。

本報告で対象とする台風15号、19号、21号においては、市川市では規模は異なるものの市内において内水被害が生じている。これらの台風時には幸いにして江戸川あるいは真間川といった比較的大きな河川からの外水氾濫は生じなかったものの、外水氾濫が同時に生じた場合、地域住民の避難行動がより困難になると考えられる。八木澤ら³⁾は荒川本川および支川群に囲まれた埼玉県川島町において、外水氾濫が生じた際の避難経路に関する検討を行

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 (兼)レジリエント社会研究センター 准教授・博(学術)

Assoc. Prof., Graduate school of science and technology, International Institute for Resilient Society, Saitama University, Ph.D.



図 5.2.1 市川市外観と市内の河川網
(google earth を一部改変)



図 5.2.2 真間川洪水・内水ハザードマップ
(<https://www.city.ichikawa.lg.jp/common/000291169.pdf> ²⁾を改変)

っており、外水氾濫開始からの経過時間に応じて、避難経路がかなり限定的となり避難が困難になる可能性を指摘している。そのため、避難状況に大きな影響を及ぼす外水氾濫が生じる前段階(内水氾濫時)における地域住民の避難状況を把握する必要がある。

また、今回の上記3台風は、台風15号-19号間が1カ月、台風19号-21号間が2週間程度、と比較的短いスパンで生じている。及川ら⁴⁾は災害履歴に対する時間感覚(忘却時間)について調べており、一定期間後、災害への関心が大幅に薄れることを示しているものの、年スケールでの比較的長期間の検討であるため、今回の3つの台風のようにごく短時間の災害履歴が避難行動に及ぼす影響は不明である。今後も今回のような複数の大型台風が短い間隔で来襲する可能性は大きく、その際の短期間の被災履歴と被災地域住民の避難行動がどのような関係にあるか把握することは重要であると考えられる。

上述した問題意識に基づき、本検討では、3つの台風が短いスパンで来襲した千葉県市川市を対象として、(1) 水害状況と避難状況との比較、(2) 水害間の避難状況の変化、に焦点をあて、それらの調査結果を報告する。

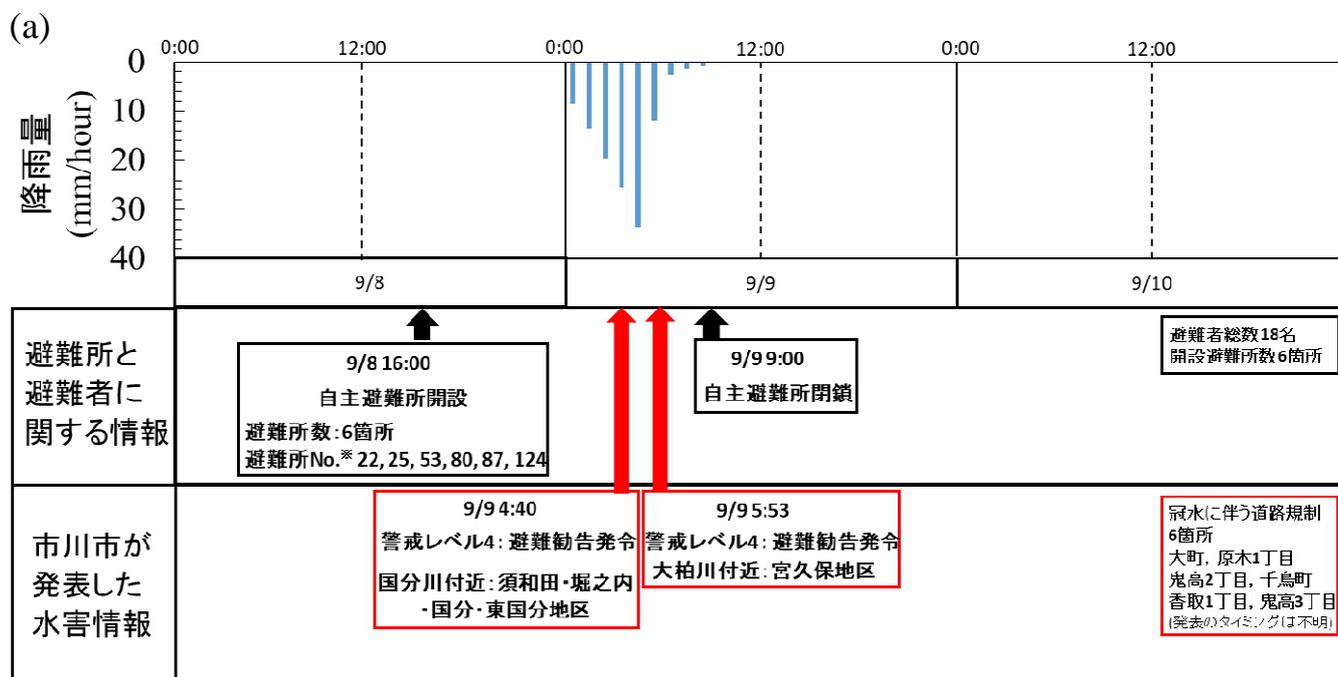
5.2.2 各台風時の降雨および避難状況

ここでは、5.2.1に記した「(1) 水害状況と避難状況」の関連を明らかにするため、各台風時の時間降雨量(直近の船橋降雨観測所⁵⁾)、地域住民の避難状況、市川市が発令した避難関連情報および指定避難所の開設情報を時系列で整理した。なお、地域住民の避難状況、避難関連情報、指定避難所の開設情報については、市川市危機管理課に資料を提供頂いた。以下にそれぞれの台風時における状況について述べる。

【台風15号】

図5.2.3(a)に台風15号時の時間降雨量、避難状況、避難情報発令状況の時系列を示す。台風15号は2019年9月8日から9日にかけて関東地方に接近し、市川市周辺では、9月9日未明から6時間程度5.0-30数mmの時間雨量が継続した。このような降水外力条件のもと、冠水に伴う道路規制地区は計6ヶ所に及んでおり(図5.2.3(b))、大柏

川合流後の真間川右岸側(鬼高地区)で比較的広範囲で冠水が生じたことがわかる。また、市が発令した避難情報として、9/9 4:40, 5:53 の計2回、国分川付近、大柏川付近に警戒レベル4の避難勧告が発令されている。このような状況下では、9/8 16:00 に6箇所の自主避難所が開設され、9/9 9:00 に閉鎖されるまで避難者数は最大で18名であった。



※ 図中の避難所No.は図5.2.3(b)の避難所No.と対応

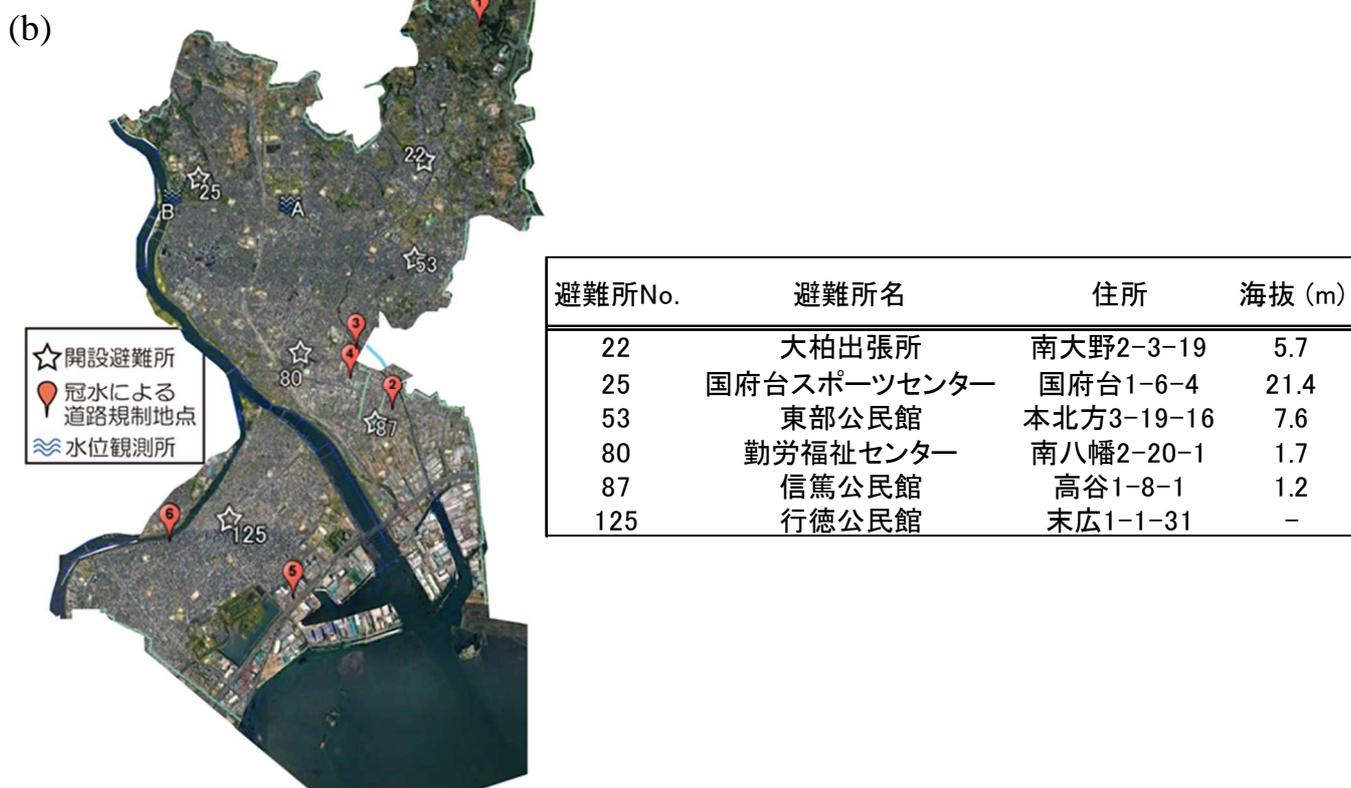
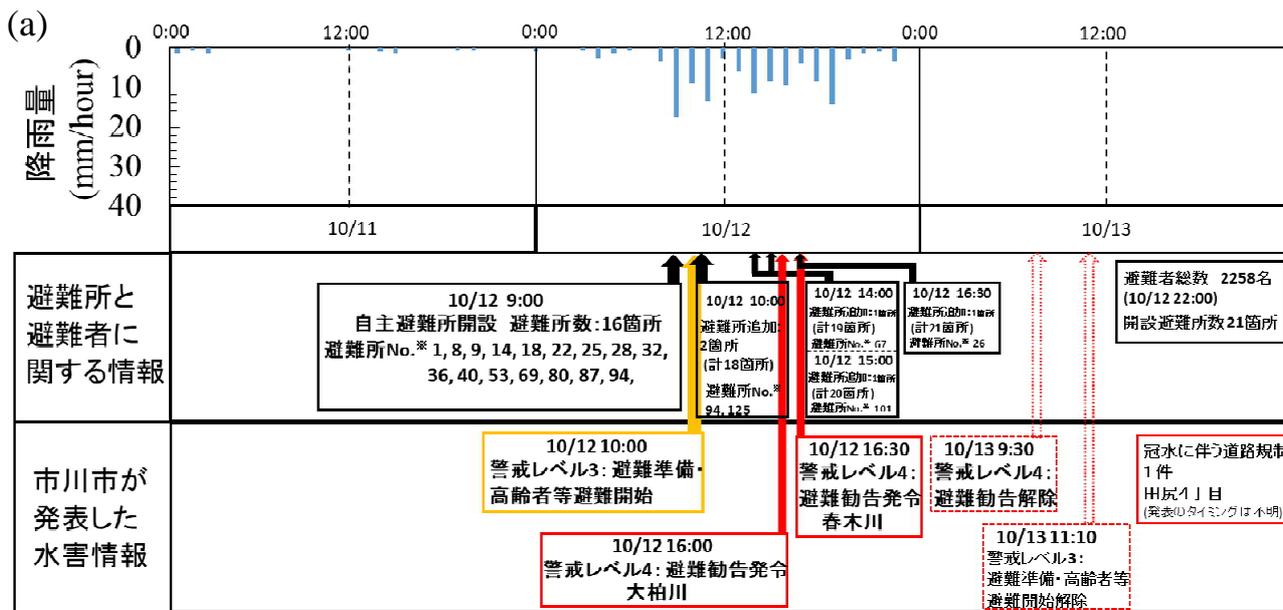


図 5.2.3 台風 15 号時における降水外力と避難状況

(a) 時間降雨量, 避難状況, 避難情報発令状況の時系列, (b) 各避難所および冠水による道路規制地区

【台風 19 号】

図 5.2.4(a)に台風 19 号時の時間降雨量，避難状況，避難情報発令状況の時系列を示す。台風 19 号は 2019 年 10 月 11 日から 12 日にかけて関東地方に接近し，市川市周辺では，10 月 12 日 9:00 から 8 時間程度，5.0-17.5mm の時間降雨量が継続した。このような降水外力条件のもと，冠水に伴う道路規制地区は 1 ヶ所であり(図 5.2.4(b))，大柏川合流後の真間川右岸側で比較的狭い範囲で冠水が生じたことがわかる。また，市が発令した避難情報として，10/12 9:00 に警戒レベル 3 避難準備・高齢者等避難開始が，同日 16:00, 16:30 の計 2 回，それぞれ大柏川付近，春木川付近に警戒レベル 4 の避難勧告が発令されている。この状況下で，10/12 9:00 に 16 箇所，10:00 に 2 箇所，14:00 に 1 箇所，15:00 に 1 箇所，16:30 に 1 箇所の計 21 箇所の避難所が開設され，この間の避難者数は最大で 2258 名であった。



※ 図中の避難所No.は図5.2.4(b)の避難所No.と対応



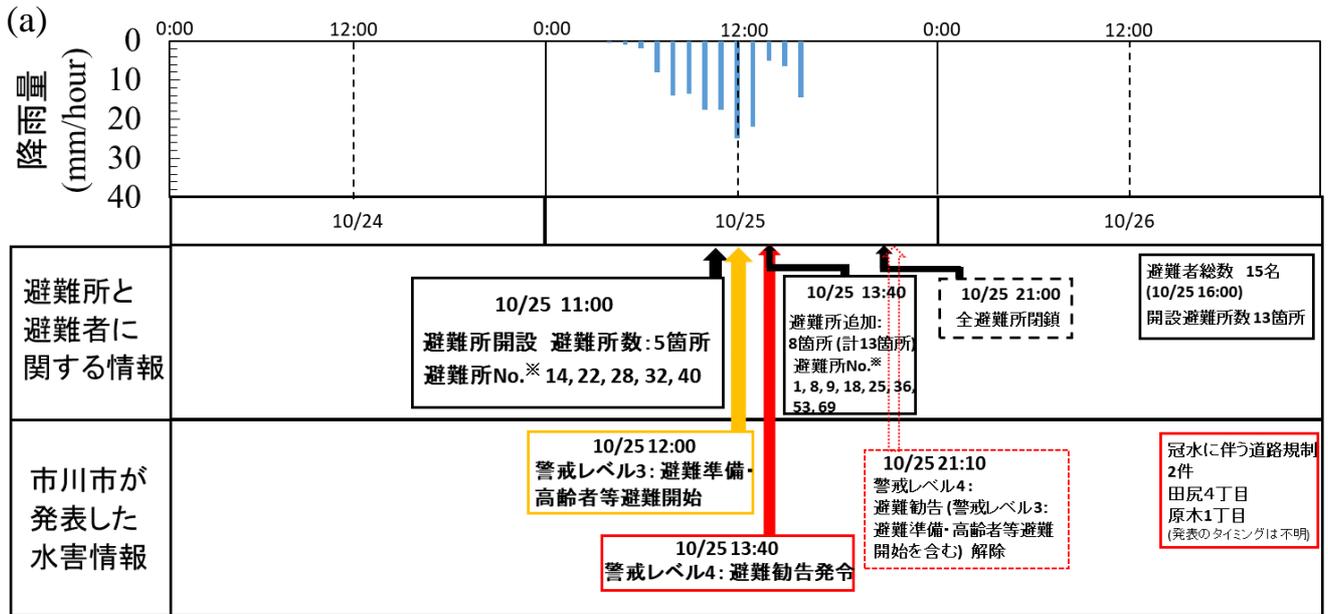
避難所No.	避難所名	住所	海拔 (m)
1	大町小学校	大町84-10	24.2
8	稲越小学校	稲越町518-2	4.9
9	中国分小学校	中国分1-22-1	16.9
14	大柏小学校	大野町2-1877	24.1
18	曾谷小学校	曾谷7-18-1	4.7
22	大野公民館	南大野2-3-19	5.7
25	国府台スポーツセンター	国府台1-6-4	21.4
26	大野小学校	南大野1-42-1	5.5
28	第三中学校	曾谷3-2-1	21.4
32	柏井小学校	柏井町1-1149-1	23.6
36	真間小学校	真間4-1-1	2.9
40	宮久保小学校	宮久保5-7-1	3.8
53	東部公民館	本北方3-19-16	7.6
67	こども発達センター	大洲4-18-3	1.7
69	中山小学校	中山1-1-5	17.1
80	勤労福祉センター	南八幡2-20-1	1.7
87	信篤公民館	高谷1-8-1	1.2
94	本行徳公民館	本行徳12-8	3
101	第七中学校	末広1-1-48	0.9
124	南行徳公民館	相之川1-3-7	-
125	行徳公民館	末広1-1-31	-

図 5.2.4 台風 19 号時における降水外力と避難状況

(a) 時間降雨量，避難状況，避難情報発令状況の時系列，(b) 各避難所および冠水による道路規制地区

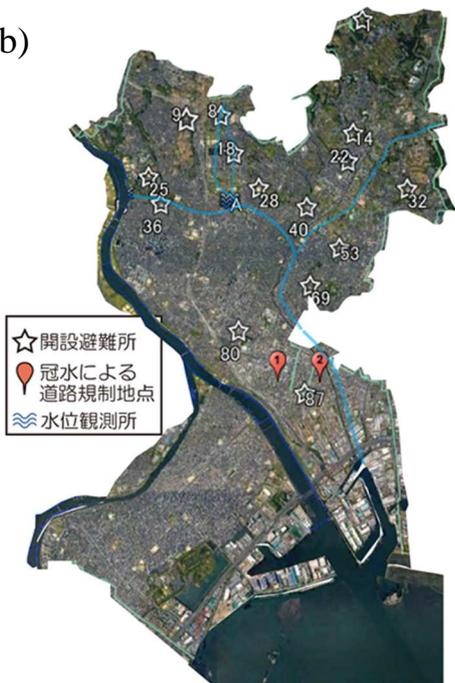
【台風 21 号】

図 5.2.5(a)に台風 21 号時の時間降雨量，避難状況，避難情報発令状況の時系列を示す。台風 21 号は 2019 年 10 月 24 日から 25 日にかけて関東地方に接近し，市川市周辺では，10 月 25 日 7:00 から 10 時間程度 5-20 数 mm の時間降雨量が継続した。このような降水外力条件のもと，冠水に伴う道路規制地区は 2ヶ所であり(図 5.2.5(b))，台風 19 号と同様，大柏川合流後の真間川右岸側で比較的狭い範囲で冠水が生じたことがわかる。また，市が発令した避難情報として，10/25 12:00 に警戒レベル 3 避難準備・高齢者等避難開始が，同日 13:40 に警戒レベル 4 の避難勧告が発令されている。このような状況下で，10/25 11:00 に 5 箇所，13:40 に 9 箇所の計 14 箇所の避難所が開設された。同日 21:00 にはすべての避難所が閉鎖されており，この間の避難者数は最大で 15 名であった。



※ 図中の避難所No.は図5.2.5(b)の避難所No.と対応

(b)



避難所No.	避難所名	住所	海拔 (m)
1	大町小学校	大町84-10	24.2
8	稲越小学校	稲越町518-2	4.9
9	中国分小学校	中国分1-22-1	16.9
14	大柏小学校	大野町2-1877	24.1
18	曾谷小学校	曾谷7-18-1	4.7
22	大野公民館	南大野2-3-19	5.7
25	国府台スポーツセンター	国府台1-6-4	21.4
28	第三中学校	曾谷3-2-1	21.4
32	柏井小学校	柏井町1-1149-1	23.6
36	真間小学校	真間4-1-1	2.9
40	宮久保小学校	宮久保5-7-1	3.8
53	東部公民館	本北方3-19-16	7.6
69	中山小学校	中山1-1-5	17.1

図 5.2.5 台風 21 号時における降水外力と避難状況

(a) 時間降雨量，避難状況，避難情報発令状況の時系列，(b) 各避難所および冠水による道路規制地区

5.2.3 各台風時の降雨・河川水位および避難状況の共通点と相違点

前節 5.2.2 では、各台風時の時間降雨量、冠水による道路規制箇所といった水害に関連した情報と、避難状況、避難情報発令状況を時系列でまとめた。その結果として見られた大きな特徴として、台風 19 号時の総避難者数(2258 名)が台風 15 号(18 名), 21 号(15 名)と比較して突出して多くなっている。このようになった要因を探るため、それぞれの台風時の台風外力(本検討では降雨, 河川水位)および避難状況の共通点と相違点について述べる。

3つの台風時の避難判断のトリガーとなり得る降雨状況については、図 5.2.3-5.2.5 に示すように、各台風の時間最大降雨量は台風 15 号で 33.5mm/hour, 19 号で 17.5mm/hour, 21 号で 25.0mm/hour と異なるものの、日総降雨量はそれぞれ、117.5mm/day (9/9), 122.5mm/day (10/12), 147.5mm/day (10/25)と大きな変化はない。さらに 1mm/hour 以上の降雨の継続時間をみても、各台風でそれほど大きな違いは見受けられない。また、冠水による道路規制地点から浸水状況を推測すると、台風 15 号時は 6 箇所であり、台風 19 号, 21 号はそれぞれ 1 箇所, 2 箇所と少なくなっているが、集中的に冠水が生じた地区をみると、図 5.2.3-5.2.5 に示すように、真間川右岸の鬼高, 田尻, 原木地区といった、同じような箇所に集中していることがわかる。さらに、真間川に設置された須和田水位観測所⁹⁾(図 5.2.3(b)- 図 5.2.5(b)の水位観測所 A)の各台風時の水位時系列をみると、各台風時の洪水ピーク水位はいずれもほぼ同等程度であることがわかる。このように、市川市周辺で考えると、周辺住民の避難判断に影響を及ぼす可能性のある降雨, 浸水状況, 市内河川水位は3つの台風で概ね同様の状況であったと考えられる。

一方、市が発令した避難情報(図 5.2.3-5.2.5)をみると、3つの台風時に警戒レベル 3 避難準備・高齢者等避難開始あるいは警戒レベル 4 避難勧告が発令されており、市川市内を流れる各河川周辺の住民にとっては、積極的に避難をする条件は整っていると考えられる。

上記のような状況にもかかわらず、本節冒頭で示したように、台風 15 号から台風 19 号にかけては総避難者数が急増し、台風 19 号から 21 号にかけては総避難者数が急減している。この原因として、台風 15 号では市内の 6 箇所において冠水被害が生じたことで、約 1 カ月後に生じた台風 19 号の際に、先だつて生じた台風 15 号の内水氾濫による浸水被害の災害履歴が周辺住民の避難判断にプラスに働いた可能性が考えられる。一方、台風 19 号から 21 号にかけて総避難者数が急減した原因としては、同程度の降雨, 市内の河川(真間川)水位を記録している台風 19 号を 2 週間前と直近に経験していることで、警戒レベル 4 の避難勧告が発令されているにもかかわらず、避難意識の薄れが生じた可能性が考えられる。このことは台風間の被災間隔があまりにも短いと、ある種の「慣れ」が避

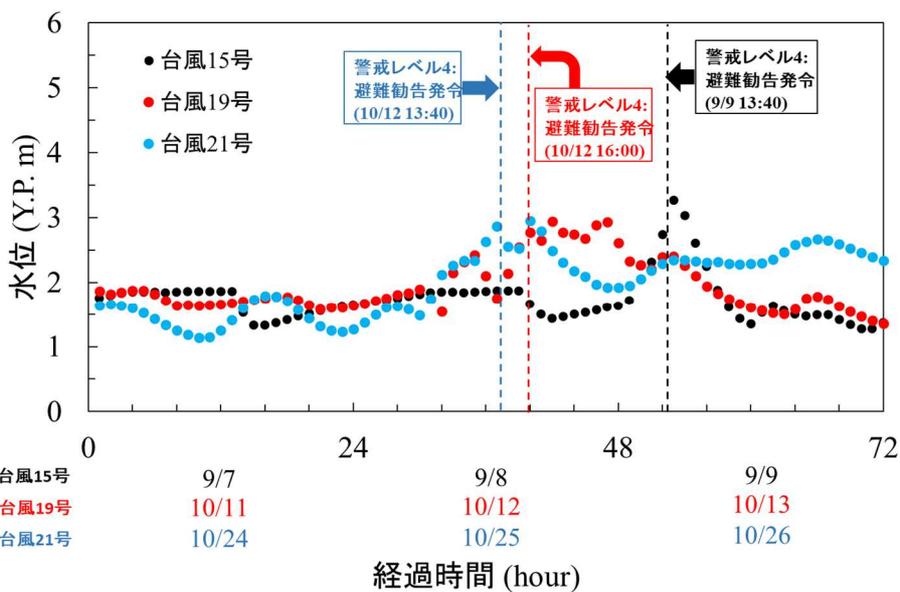


図 5.2.6 各台風時における須和田水位観測所(図 5.2.3(b)-5.2.5(b)の水位観測所 A)の水位時系列

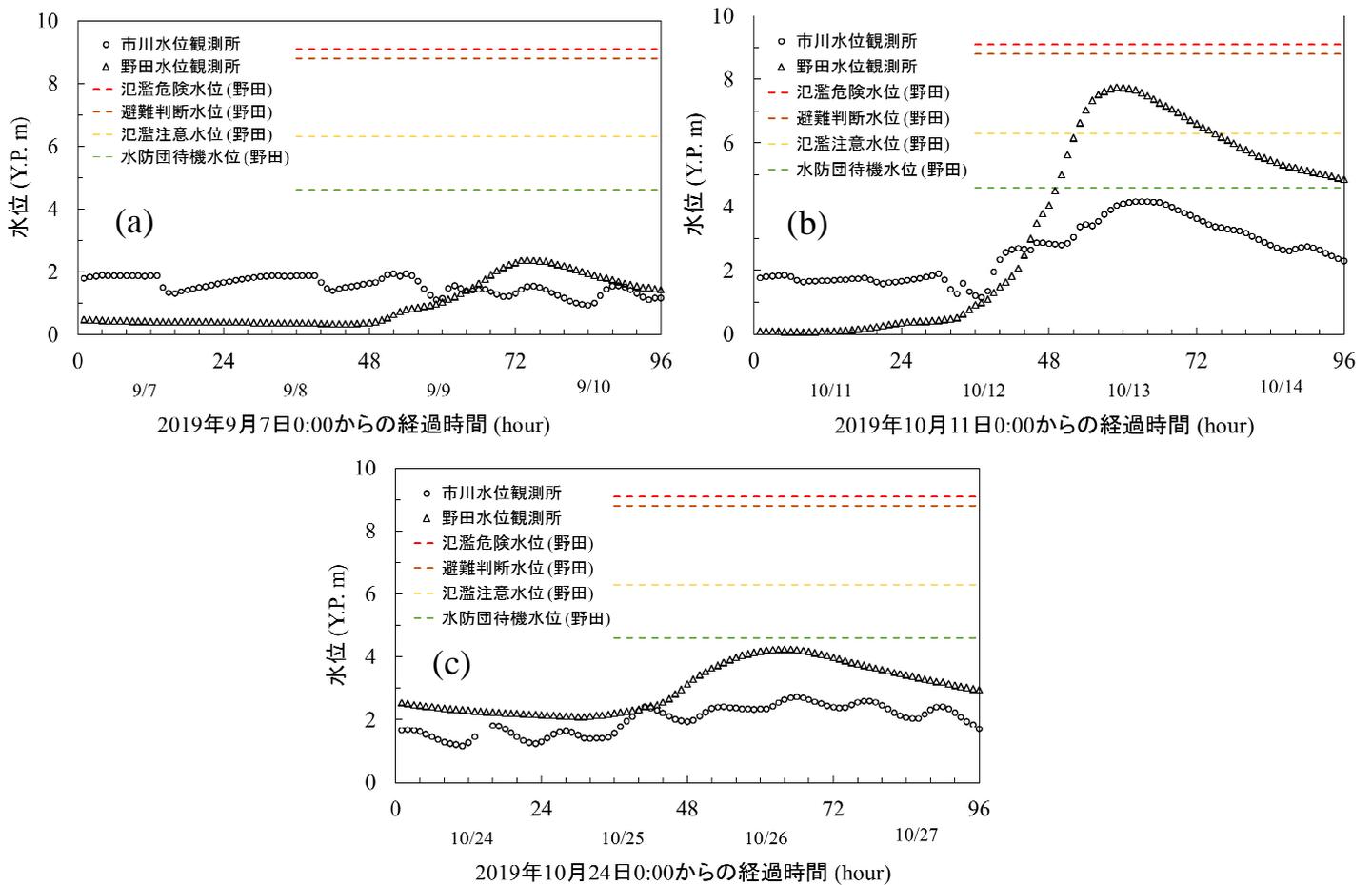


図 5.2.7 各台風時における市川水位観測所(図 5.2.3(b)の水位観測所 B)と野田水位観測所の水位時系列
 (a) 台風 15 号, (b) 台風 19 号, (c) 台風 21 号

難判断に影響を及ぼすことを示唆している。また、市内での降雨、河川水位、冠水状況は3つの台風で概ね同様であることは上述したが、真間川の本川である江戸川の水位変化をみると、台風間で大きな違いがあった。図 5.2.7 は各台風時における市川水位観測所⁷⁾(図 5.2.3(b)– 図 5.2.5(b)の水位観測所 B)と市川水位観測所よりも 20 数 km 上流の野田水位観測所⁷⁾の水位時間変化を示している。同図には合わせて、野田水位観測所の水防団待機水位、氾濫注意水位、判断避難水位、氾濫危険水位を示している。この図より、台風 15 号(図 5.2.7(a))、台風 21 号(図 5.2.7(c))では、野田水位観測所において、総じて水位は低く水防団待機水位にも達していない。その一方で、台風 19 号(図 5.2.7(b))時には、市が警戒レベル 4 避難勧告を発令した 10/12 16:00 以降、江戸川の水位も急上昇し、野田水位観測所ではピーク時に氾濫注意水位を超え、避難判断水位まであとわずかというところまで達している。実際には江戸川と真間川の合流点に位置する根本排水樋門が閉められ、真間川には江戸川からの流入がなくなるものの、隣接する大きな河川の状況から市内の氾濫を連想することで、他の台風と比較して総避難者数が急増した可能性がある。

5.2.4 おわりに

本検討では、3つの台風が短いスパンで来襲した千葉県市川市を対象として、(1) 水害状況と避難状況との比較、(2) 水害間の避難状況の変化、について、台風時の住民の避難判断に大きな影響を与えられ、台風時の降雨・水位状況から考察した。今後、周辺住民への意識アンケート等を実施し、今次災害時においてどのように避難判断を決定したかを追加調査する必要がある。

謝辞：本項を取りまとめるにあたり，市川市危機管理課には，避難情報の発令状況，冠水による道路規制箇所，指定避難所における総避難者数等の貴重なデータをご提供頂いた。ここに謝意を記す。

参考文献

- 1) 本間樹，田賀利輝，矢内栄二：市川市真間川における洪水被害の検討，第47回土木学会関東支部技術研究発表会，II-76, 2020.
- 2) 市川市：真間川水系洪水・内水ハザードマップ，<https://www.city.ichikawa.lg.jp/common/000291169.pdf> (2020年2月16日閲覧)
- 3) 八木澤順治，大窪和明，田中規夫，赤崎佑太，埼玉県川島町を対象とした洪水氾濫解析に基づく避難支援バスの最適運行経路の検討，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.73, No.4, I_313-I_318, 2017.
- 4) 及川康，片田敏孝，Keerati SRIPRAMAI：災害履歴に対する時間感覚，日本災害情報学会誌「災害情報」，No.16-(2)，pp.223-234，2018.
- 5) 気象庁：気象観測データ(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) (2020年2月16日閲覧)
- 6) 国土交通省：水文水質データベース (<http://www1.river.go.jp/>) (2020年2月16日閲覧)
- 7) 国土交通省：川の防災情報 (<http://www.river.go.jp/kawabou/>) (2020年2月16日閲覧)

台風 15 号における成田国際空港における利用者滞留問題

Problem of Stranded Passengers at Narita International Airport due to Typhoon Faxai (2019)

竹林 幹雄*¹, 大西 正光*², 平田 輝満*³, 轟 朝幸*⁴, 大石 哲*⁵

Mikio TAKEBAYASHI, Masamitsu ONISHI, Tomoyuki TODOROKI, Satoru OISHI

This study reports and investigates the problem that passengers were stranded at Tokyo Narita International Airport (NAA) due to the disruption of access transportation means due to Typhoon Faxai (2019). Although there was an institutional system to launch disaster emergency management headquarter at NAA, it did not work in this case because the function of airport itself worked as usual and the matter of access transportation was recognized as being out of their business scope. Lack of emergency management headquarter caused various coordination problems among different stakeholders.

Keywords : *stranded passengers, airport access transportation, emergency management*

6.1.1 問題の概要

2019 年 9 月 8 日深夜から 9 日にかけて関東地方を縦断した台風 15 号の影響により、成田国際空港（以下、成田空港）へのアクセス交通が途絶したため、一時最大で 1 万 7 千人に及ぶ利用客が空港内で足止めを余儀なくされた。内閣府の公表資料¹⁾によれば、航空網への直接的な影響として、8 日に 132 便（全日空 30 便、日本航空 47 便、その他 55 便）、翌 9 日に 236 便（全日空 73 便、日本航空 70 便、その他 93 便）の欠航が発生した。また、ダイバート便（行き先変更便）は 6 便、離着陸制限時間内運航は 32 便であった。なお、成田空港の 1 日平均発着回数は 706 回（2019 年夏期スケジュール）である¹⁾。空港施設そのものには大きな物理的被害は発生しなかったものの（羽田空港での足場崩壊、成田空港における上屋のシャッター損壊など一部損壊はある）、鉄道輸送は 8 日午後から順次計画運休が実施され、9 日は始発より運転見合わせとなり、また風被害による道路（高速道路および一般道路）が落ち

*1 神戸大学海事科学部 教授・工博

Prof., Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, Dr.Eng.

*2 京都大学防災研究所 准教授・博士（工学）

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Dr.Eng.

*3 茨城大学大学院理工学研究科 准教授・博士（工学）

Assoc. Prof., Graduate School of Science and Engineering, Ibaraki University, Dr.Eng.

*4 日本大学理工学部 教授・博士（工学）

Prof., College of Science and Technology, Nihon University, Dr.Eng.

*5 神戸大学都市安全研究センター 教授・博士（工学）

Prof., Research Center for Urban Safety and Security Kobe University, Dr.Eng.

葉や倒木等により通行不能状態に陥った。このため、空港からの移動が困難になり、空港内で待機するという「空港内滞留者」が多数発生した。また空港および航空関係の従事者が出勤できず、出発便の利用者も空港へ到着できない事態となった。

アクセス交通の全面的な運行再開は10日朝からとなり、9日から10日にかけて空港内で一夜を明かした利用者は1万3千人にも上った¹⁾。鉄道は10日始発より運行を再開し、高速道路利用のバスも臨時便を走らせるなどの対応により、10日午後にはようやく平常状態を取り戻した。空港施設自体は機能を維持しながらも、これほどまでに大規模な利用者の滞留が生じたのは未曾有の事態であり、国内外のメディアの注目も集まった。

6.1.2 空港内における状況の推移

ここでは、空港内滞留者の一人となった筆者（大石）の視点から時系列を述べ、あるべき方法について提言する。

まず、全体的なタイムラインについて述べる。筆者は9月8日(日) 11:30 米国中部時間 (CST) (日本時間9月9日 1:30, 以下全て日本時間) に、ヒューストン・ジョージブッシュインターコンチネンタル空港を出発して、成田空港に9月9日 15:20 に到着した。予定では16:40 発の大阪伊丹空港行きの乗り継ぎ便に乗り換えて神戸に戻る予定であったが、この便が運行できるかどうか未定のままターミナルで待たされた(図 6.1.1)。この便は19:34 の時点で乗務員の確保ができないことを理由に欠航した。すでに成田発大阪行きの便はなく、周辺のホテルも全て満室状態であったので、空港内滞留となり一晩を空港で明かした後、9月10日(火)9:11 のスカイライナーで成田空港を離れた。



注) 18:28 時点で「未定」となっている

図 6.1.1 成田空港発大阪伊丹行き便の運行状況

以下、詳細について述べる。筆者がヒューストンを出る際にすでに台風は伊豆半島沖にあり千葉も暴風雨圏にあったが、予報では到着する時刻にはすでに成田空港上空の風も弱まるとしていたので、筆者自身は成田空港の着陸には不安はほとんどなかった。一方で、JR 東日本は9月9日の未明には通常通りの運行が困難であることが分かっていた。この時点での最初の失敗は、前日に JR 東日本が始発時点での運転再開見通しを9日8時頃と公表した点であった。結局 JR 東日本は13時に終日運休を発表した。また、都心と空港を結ぶ東関東道も早朝から通行止めであったので高速バスは全路線が始発から運休した。したがって、9日13時には成田空港から外に出ることはほとん

ど不可能になっていた。9日13時の時点で成田空港は旅客の受入を止めるか、公共交通機関が動いているところまで輸送する準備できれば、空港内滞留の発生を回避できた可能性がある。結果的に、東京駅行きの無料バスを10日3時まで運行して対応したが不十分であり、空港内滞留が発生することとなった。

筆者が利用した航空会社（A社）は、午前便については乗務員を前泊させるなどの対応を取っていたがJR東日本の運転再開見通しが9日8時頃とされたのを受けて、午後便についてはそのような対応を取らなかった。そのため空港全体で94便が欠航することになり、筆者が利用しようとした便もその一つとなった。しかし結果的に、A社も道路を含むアクセスがすべて不能となると事態や乗務員不足という事態までは見通せていなかった可能性がある。A社では、乗客のことはほとんど考えていなかった、あるいは乗客のことを考えるキャパシティはなかったと考えられる。なぜなら、A社はそれまでの状況から空港内部では行き場を失った人々があふれている状態であることを理解した上で、19:30過ぎまで運航判断を引き延ばし、チェックインしていた荷物を乗客に戻したのが20:19（40分以上かかっている）であったからである。実際には空港内部では図6.1.2のような状況で人があふれており、鉄道は終日運休、バスはなく、タクシーを待つ列は500人以上あってタクシーは1台も来ていない状況であった。そのような中A社は、なぜか列を作らせて、振替便や宿泊先について1対1対応をしていた。当日、空港に来るころまでできない状況であったことを考えると、筆者が乗ろうとした便で空港内滞留者となった人はほとんどが国際便からの乗り継ぎであるから、成田空港に誰かが車で迎えに来ることができる人はごく少ないと考えられる。筆者自身の携帯電話は輻輳でほとんどつながらなかったため、家族にSNSで連絡をして周辺ホテルに連絡をしてもらったがどこも満席であった。多くの人が筆者と同様な状況であったはずなので、大多数は空港内滞留者となるか、運行が開始されていた京成成田駅まで歩くしかなかった。

筆者がこの執筆時点で考えるには、まずは大阪便を待っていた乗客全員に、空港内滞留か1時間あるかの2つか選択がないことを伝えた上で、空港内滞留者にはその場で寝袋と水とパンを配り、京成成田駅まで歩く人にはチェックインした荷物を希望地まで輸送するサービスを選択させるべきだった。振替便の対応については、インターネットが使える人はインターネットで行わせて数少ない現場の人々が対応するのはインターネットが使えない人に対面で対応すべきだった。A社は9日の宿泊と移動を含めて15000円以内で補償をするとしていた。しかし、宿泊はできず代替便も取れなかった状況で、そのような大枚をはたくよりは公共交通機関が使える場所までのバスを用意の方がよほど適切なサービスであったと考えるし、乗客ではなく乗員用にバスを用意して便を運行した方が当然よかった。



図 6.1.2 成田空港の到着ロビー（9月9日 21:03 大石撮影）

ここまでで JR 東日本が 9 日始発時点で運転再開見通しを 9 日 8 時頃と発表していたことが大きな原因となっている。実際には JR 東日本が運行する成田エクスプレスは 10 日始発時点でも運行できず、筆者は始発の成田エクスプレスの指定席券を払い戻して、京成スカイライナーに乗り換えた。払い戻し時点でも成田空港駅に現金が十分になく、日暮里駅で払い戻す手続きを取らざるを得ない状態だった。JR 東日本は線路への倒木を甘く見積もっていたものと思われる。

空港内滞留者は、開放されたターミナル内に自分の場所を陣取って横になった (図 6.1.3)。空港では寝袋、水、パンを配給したが、図 6.1.4 のように長蛇の列に加わらなければその配給を手にすることができなかった。なんでも未明の 2 時にならないと得られない状態ではどうしようもなかった。空港内滞留者の一部の西洋人のグループは皆を元気づけるためか 23 時頃に 30 分程度のコーラス (ダンス付き) をしていた。元気づけられる人もいるだろうが、ただうるさいだけだと思う人もいたと考える。たとえば図 6.1.3 の人はすでに 22:30 頃には睡眠を取りたい体制に入っているのに、23 時頃のコーラスは迷惑であったのではないだろうか。筆者も 9 日の移動は諦め、列車移動の可能性がある 10 日の早朝から動きたいと考えていたので、コーラスは邪魔だった。しかし、コーラスがうるさいと言って口論にならなかったのは幸いであった。



図 6.1.3 空港内滞留者の様子。この人はバックパッカーなのか、マットレスを敷いていた 9 日 22:32 大石撮影



図 6.1.4 寝袋などを得るために並ぶ空港内滞留者 10 日 1:18 大石撮影



図 6.1.5 使用済みとなって捨てられた寝袋の山 かなりの割合でビニール袋から出していない未使用品がある
10日 6:36 大石撮影

空港内では当初は日本語のアナウンスだけであったが、10日4時頃から日本語、英語、韓国語、中国語のアナウンスがあった。声の質から、1人の男性が9日夜から10日朝にかけてずっとアナウンスを行っていた。アナウンスは鉄道の運行再開に関するものであったが、正確だったのは京成スカイライナーの運行についてであり、成田エクスプレスの運行情報は「目処が立たない」「始発から運行」「運行できない」など、散々迷走していた。最終的に成田エクスプレスは始発からの運行はできなかった。その意味で成田空港自身も正確な情報を入手できていなかったことになる。

本節でははからずも空港内滞留者の一人となった筆者の立場で、正確な作業見積と、情報共有の重要性を伝えた。当日の状況であれば空港に入ってくる人間の数、着陸する飛行機の数から相当正確に見積もることができ、出て行くことができる人間の数もおおよそ把握することができたはずである。さらに空港内滞留者の数も時刻と共に予想でき、空港内で寝ることも含めてその人々の動線を最適化することはできたはずである。しかし、現場ではそのような訓練がなされていなかったために、空席のないホテルの状況を聞くために並び、開かずに捨ててしまうことになる寝袋を得るために並び、運行されなかった始発電車のチケットを払い戻すために並ぶなど、無駄に疲弊する状況を生んで、担当者が謝り、乗客は怒るという無駄なエネルギーが膨大に浪費された。平時の状況で乗客数を稼ごうとするビジネスプランを変更し、様々なシチュエーションを考慮した乗客満足度でリピート率を増やすビジネスにしなければ、観光立国としては成り立っていないと考える。そのためには平時から空港に入る人数と出る人数および空港内にいる人数を推定して、それぞれの人々が快適に空港内で過ごすことができるように人の動きを動的にデザインできなければならない。

6.1.3 成田空港における旅客滞留:各関係機関の状況認識と対応行動

6.1.3.1 航空局

台風15号は9日の午前9時にはすでに太平洋上に抜けていたため、航空局は、9日の朝の時点で、台風15号による航空交通への影響は特段生じなかったと認識していた。また、災害の発生が発生する恐れがある場合に成田国際空港において設置される対策本部も参集されておらず、航空局としては、災害による影響が出ていることを把握する契機となる内部情報もなかった。そのため、成田空港へのアクセス交通の途絶状況にあることは認識できておらず、成田空港内で多くの空港利用者が足止め状態になっていることがメディアを通じて顕在化し始めた時点で、初めて状況が認識されるようになった。

表 6.1.1 成田空港における 9 月 8 日の気象データ（出典：気象庁 HP：過去の気象データ検索）

時	降水量 (mm)	気温 (°C)	風速・風向(m/s)	
			風速	風向
1	2.0	26.7	10.2	東南東
2	15.0	26.1	12.5	東南東
3	13.0	25.6	13.0	東南東
4	30.0	25.1	20.1	東南東
5	35.0	25.0	25.3	南東
6	48.0	25.0	20.9	南
7	4.5	25.1	16.8	南西
8	2.0	24.6	15.0	西南西
9	2.0	24.9	9.2	西南西
10	0.0	27.7	6.3	西南西
11	0.0	30.1	5.6	南西
12	0.0	32.0	4.4	西南西

航空局では、滞留問題が顕在化して以降、成田空港会社に対して、以下のような後方支援を行っていた。

- 道路や鉄道などアクセス交通の状況及び復旧見通しに関する情報提供

航空局は、道路局経由で道路や渋滞情報を、鉄道局経由で鉄道の運行状況や見通しに関する情報を集めた。しかし、復旧見込みの情報は首尾一貫しておらず錯綜していた。また、成田空港会社側でも 9 日の 7 時 36 分には暴風警報解除とともに対策本部が解散となっており、情報が一元化して集約されていなかったことから、各方面から入ってくる情報を整理することができておらず、さらには、空港利用者にまで情報が届いていなかった。

- 成田国際空港へのバス会社、タクシー会社の紹介

実際のバスやタクシーの手配は、成田国際空港より行った。

復旧の見通しが立ったのは、9 日の夜中であり、航空局は、以上の後方支援を継続して行っていた。

6.1.3.2 成田空港株式会社

以下では、関係資料^{2),3)}及び成田空港株式会社（以下、成田空港会社）へのヒアリングに基づく成田空港会社の対応を整理する。台風 15 号は、9 月 8 日の深夜から 9 日の朝にかけて関東地方を縦断することが予報で分かっていた。成田国際空港としては、警戒に当たってはいたが、9 月 8 日の時点では、まだ深刻な滞留問題が発生することを予想していなかった。成田空港には 9 日夜半から明け方にかけて最接近し、午前 3 時 48 分には「飛行場暴風警報」が発令された。明け方の 5 時頃が強風のピークを迎えている（表 6.1.1）。9 日午前 6 時の時点での平均風速が 20.9m/s であり、離発着を行うための施設には特に損傷被害がなかったため、9 日の朝から基本的には離着陸できた状態であった。通常は、午前 6 時から運用が開始される滑走路は 2 本とも閉鎖となった。しかし、成田国際空港 BCP に基づく総合対策本部は、暴風警報の発令が未明で関係人員の招集が事実上困難であり、午前 7 時 36 分には暴風警報が解除され強風警報に切り替わったことから、本部は立ち上がったもののメンバーが参集しなかった。その後、

風が収まり到着便の受け入れが始まった。

このため、到着便の旅客を移動させる必要があったが、問題は交通機関が全く麻痺していたことであった。台風 15 号の際に首都圏の鉄道各線は前日から計画運休を行ったものの、9 日午前 8 時ごろからは運転が再開できるとの見通しを示していた。しかし、暴風による倒木や架線等の設備被害等の影響で成田空港と都心とを結ぶ交通アクセスは完全に麻痺した。具体的には、

- JR と京成 2 路線（京成アクセス線と京成本線）が始発から運休
- 道路網は東関東道をはじめ、新空港道・圏央道も未明から通行止めとなったため、高速バスは全路線で始発から運休
- タクシーも運転台数が限られたため限定的

といった状況となり、成田空港は事実上、孤立状態となった。

さらに、着陸便の受け入れを続けたことと、交通アクセスの不通により出発便のためのクルーが到着できず、多数の遅延が生じたことが重なり、到着機から降りた旅客はターミナル内に留め置く必要が生じ、一時 1 万 3000 人を超える滞留者の発生につながった（単純計算で 50 便程度の旅客が滞留していたことになる）。その後、夕方になり、京成アクセス線は 17 時 37 分に運転を再開。道路網も新空港道・圏央道が 16 時 45 分に、東関東道も 22 時 10 分に通行止めが解除されて高速バスも少しずつ動き出したが混乱は続いた。9 日には約 1 万 3300 人が空港内で一夜を明かすことを余儀なくされた。

成田空港会社としては、「滞留問題が顕在化した後も、鉄道や道路がどの時点で再開するのか、見通し情報が全く伝わってこなかったため、独自ルートで集める必要があった」と認識している。一方で、上述の通り、航空局としては鉄道局から運行情報などを収集して成田空港会社に提供していたとしており、対策本部が設置されていなかったことが原因で、提供された情報が一元化されず活用、利用者への情報提供に活かされていなかった可能性がある。

滞留者に対しては、空港側から食料、飲料水、毛布などの提供を行ったが、全く十分ではなかった。滞留者への情報提供も十分できたとはいえない。成田空港会社の職員が、鉄道の運行情報など、交通に関する情報を発信していたものの、あまりに多くの乗客がいたため、情報が行き渡らなかった可能性がある。また、多言語での情報発信も、うまくいっていなかった。

翌日、臨時バスの運行し、JR は成田～成田空港間を 10 日 6 時に再開、成田～我孫子間も 7 時に再開し、ようやく事態が収拾に向かった。ただし、この正常化にかけても運行再開などの情報提供は JR からなされたものではなかった。今回の反省として、情報の共有が全く機能していなかったことが挙げられる。事態の深刻化に備えて、もっと前の段階で安全側に対応することを考えておく必要があった。また、対策本部の設置においては、空港の状況に基づいたものではなく、アクセス交通の状況も含めた判断を行う必要があることが今回の教訓となった。

6.1.3.3 航空会社

ここでは、本邦大手航空会社 2 社に対するインタビュー調査をもとに、台風 15 号が航空便の運航に与えた影響と対応について整理する。

まず、航空会社としては、台風 15 号の際には災害対策本部のようなものは立ち上げておらず、平時の体制のままであった。台風は日常で発生し、平時のオペレーションの範囲内と考えられている。

次に、気象予報により台風の接近が事前に予測される場合、強風による航空機材へのダメージを防ぐために、航空機材を台風接近前に台風の影響がない安全な他空港へ退避させることが、通常行われている。なお、格納庫にスペースがあればそこに退避させたり、搭載燃料を増やして重量で航空機が動くことを防いだり、風向をみながら航空機の機首方向を調整したりして対応することもある。この判断は、航空機メーカーや各航空会社の規定で設定さ

れている航空機材ごとの耐風速と、予測されている風速から、航空会社ごとに判断を行う。台風 15 号の際にも、台風通過の前日 8 日中に、羽田空港に駐機予定の小型機材を中心に地方空港への避難回送（羽田空港への定期便を運休にして、そのまま地方に留め置くケースも含む）が行われた。数十機程度の退避が行われたことにより、台風通過後の初便等に運休が発生したり、台風通過の影響を加味した遅延が発生したり、また、退避しなかった航空機の一部の機材に損傷があり、それによる運休発生もあったが、より大きな影響は、台風通過後のアクセス交通機関の復旧遅れにより発生することとなったが、これについては後述する。

台風により航空会社保有の施設にも若干の被害が発生している。特に、特に成田空港のケータリング施設（機内食関連の工場）が浸水、停電したことにより、レトルトなどの代替品や他工場からの供給となったが、運航自体には大きな影響はなかった。なお、成田空港周辺の柴山地区は一帯が停電となり、工場自体が浸水被害はなくとも停電の影響で操業が停止する工場もあった。

台風は 9 日未明から早朝にかけて関東地方を通過し、早朝には暴風警報も解除されたこともあり、NAA の災害対策本部も解散された。航空会社からも NAA 対策本部にメンバーとして参加していたが、本部が解散となったこともあり、その後の情報収集も航空会社として積極的に行わず、地上アクセス交通の復旧情報についても、情報待ちのような受け身の体制となっていた。台風 19 号の際には NAA の BCP も改訂され、対策本部の立ち上げ基準も変更されたこともあり、関係組織間の情報共有や情報収集を積極的に行うようになっているが、台風 15 号の際には、結果として、航空会社としても、マスコミの報道や成田空港に移動中の従業員（乗務員など）から、アクセス交通の運行障害について情報が入ってきて、NAA からの入手情報などからもアクセス交通の情報を得る努力を続けたが、鉄道の復旧見込みに関する具体的な情報が一切入ってこなかった。成田空港へのアクセス交通が麻痺していたため、航空会社の乗務員などのスタッフも空港にたどり着けず、航空機の運航ができなかった。この状況を受け、航空会社では羽田空港から成田空港へ航空機で乗務員の輸送を行うといった特殊な対応も実施したが、航空会社スタッフの成田空港への出社困難な状況は 9 日終日続き、その間、アクセス交通の復旧見込みに関する具体的な情報も得られなかったことから、定期便の遅延や欠航についても判断が困難で、ズルズルと便の出発遅延方針を引っ張ることとなり、旅客への運航見込みの案内も十分にできなかった。成田空港の運用時間も深夜 1:00 まで延長調整を行ったが、結局、多くの欠航便も発生することとなった。旅客への運航見込み情報としては、運航見込みが未定の便については、次の情報更新時期を案内することが通常である。

成田空港ではほぼ全てのアクセス交通が不通となる一方で、その間も到着便の受け入れを継続したことにより、大量の旅客が空港内に滞留することとなった。滞留者への食糧や水、毛布等の提供については、基本的に空港ビル会社（NAA）が行うことであると航空会社では考えており、航空会社としては自社スタッフ用の備蓄品のみ用意しているが、台風 15 号の際は、成田空港会社からの要請や航空会社の現場スタッフの判断により、滞留旅客に対しても一部提供を行った。滞留旅客への備蓄品の提供についての役割分担は明確になっていない現状もある。なお、アクセス交通不通時の到着機の着陸継続については、台風 15 号の際の大量の旅客滞留問題を受けて、同年の台風 19 号の際には、鉄道会社が計画運休を事前に発表したこともあり、事前に NAA や国土交通省航空局の判断により、NOTAM により成田・羽田空港で一定期間の着陸制限を行った。これにより空港内の旅客滞留は当然ながら大きく抑制できたが、一方で、大量の欠航便の発生、海外空港における旅客滞留の発生が生じた。台風によるアクセス交通への被害の程度の正確な予測は困難であるが、着陸制限の NOTAM 発出の期間設定や、台風 19 号時に試験的に実施したような滞留者数の事前シミュレーションによる影響予測、許容可能な滞留者数の検討などを含め、今後の着陸制限のあり方については検討の余地があると考えられる。

また、前述の台風による航空機材保全のための航空機退避については、台風 19 号の際にはより大規模に実施され、航空局で準備していた航空機退避調整のための情報共有システムを試験的に運用して対応した。航空機の退避

には、退避を受け入れる空港の容量や体制を考慮して、多数の航空会社や航空関連の組織が同時多発的に調整・決定を行う必要があり、その調整に上記の情報共有システムが一定程度効果を発揮したとのことであったが、調整に時間を要したことや、各現場との調整に頼るところが多かったことなど、未だ課題が残っており、今回の台風対応での課題と教訓を生かしたシステム改善が望まれる。

6.1.3.4 道路管理者（関東地方整備局）

成田空港のアクセスに利用される道路は、高速道路と国道がある。国道では、国道 51 号線の千葉県成田市桜田において、沿道建物からの飛来物落下により延長 0.1km にわたって、9 日の午前 6 時 30 分から通行止となっていた。本箇所は、成田空港の北東に位置するため、首都圏を結ぶ区間ではなかったことと、翌朝には開通していたことから、当該箇所の不通は、それほど大きな影響を与えていなかったと推測される。

なお、通行止となった高速道路の調査も予定しているが、新型コロナウイルスの影響により、令和 2 年度に調査が延期となったため、最終版において追加報告を行う。

6.1.3.5 鉄道会社

東京と成田国際空港とのアクセス鉄道としては、JR 東日本総武線などの NEX ルート、京成電鉄の京成本線および成田アクセス線の 3 路線がある。ここでは、JR 東日本と京成電鉄を対象としたインタビュー調査をもとに、鉄道会社の被害状況とその対応について整理する。

台風 15 号の襲来に備え、鉄道各社は事前に対策本部を立ちあげ、点検復旧作業のための準備を進めていた。9 日未明に台風が通過した直後に線路などの点検を開始した。点検は台風などの強風後においては、原則、地上区間は作業員が徒歩あるいは小型点検車で、高架区間は車両走行により行う。成田方面の線区は地上区間が多いため、点検に時間を要したが、夜明け前には被害の全容が明らかとなってきた。

JR の NEX ルートでは、東千葉駅の上屋が損壊して架線を覆って周辺での架線停電が発生した。このほか、多数の倒木被害が確認された。それらのほとんどが地上区間（千葉以東）の被害であった。



図 6.1.@ 東千葉駅上屋の損壊（JR 東日本提供）

これらの状況を踏まえ、NEX ルートにおいては千葉で東西区間を分離しての運転再開を目指した。総武快速線は津田沼～東京区間が 9 日 13 時過ぎに運転再開したが、一方で千葉～成田空港は終日運休となった。JR では、台風被害の想定としては主に豪雨による土砂災害としていたため、今回のような風台風（暴風）による多数の倒木被害

への備えおよび復旧体制が不十分であったのは否めない。暴風被害のほとんどが、沿線の線路敷地外からの倒木や飛来物であり、これらの対策は今後の大きな課題であろう。多数地点での被害であったが故、復旧見通しを立てるのが極めて困難であった。また、線区ごとに線路等の復旧が終わっても、列車を連続した区間で運用することは極めて難しく、運転再開しても輸送力はかなり落ちているのが実態であった。なお、JRは広域にわたって多くの路線を保持していることから、NEXルートを優先して復旧にあたるという方針は明確ではなかったとのことである。ただし、空港アクセスの重要性は認識しており、現場においては優先して復旧にあたる意識は働いていたようである（注：台風15号後は、広域被害の際はNEXルートの優先復旧方針が明確にされた）。また、JRにおいては、運転再開は優等列車より普通列車を優先させる運用としている。

一方、京成電鉄の京成本線および成田アクセス線においても倒木やトタン板などの線路上への飛散など、復旧作業が必要な被害が23箇所確認された。特に成田駅付近で倒木による高圧線切断という大きな被害など京成本線は全線にわたって被害が大きかったことから、空港アクセス線を優先して復旧させる方針をとった。空港アクセス線は17時30分過ぎに運転を再開した。京成本線は終日運休となった。JRと同様、広域被害であったために復旧見通しを的確に立てるのは困難であった。また、点検や復旧作業に必要な軌陸車が、一般道の通行不能や渋滞により到着できない事態も発生したことが復旧に時間を要した一因であった。京成においては、運転再開後は可能な限り通常ダイヤに早く戻すことを基本としており、優等列車を含めての運用を行っている。

このように、鉄道インフラはネットワークであることから、被害が広範囲に及んだ場合には復旧に多大な時間がかかり、さらにその復旧見通しを的確にたてるのが困難である。社内においては復旧の目安はたてているが、ある程度の正確さが求められる公表情報にはほど遠いものである。今回の台風で大きな課題となった運行情報の発信であるが、その大きな一因はこの復旧時間の不確かさであろう。

運行情報の公表の仕方にも課題が残った。JRでは、台風襲来前の8日の午後からは順次運転を見合わせる計画運休とし、通過後は始発から8時頃まで運転を見合わせることを自社ホームページやメディアなどにアナウンスしていた。ただし、そのアナウンスには、被害の程度によって運転再開が遅れる可能性があることも付記されていたが、その情報はほとんど利用者などに伝わることがなかった。一方で、京成電鉄は、計画運休は実施しない方針であり、気象に関する運転規制にもとづいて運休の可能性のあることを前日よりアナウンスしていた。台風通過後の朝においては、両社ともに運転見合わせ、復旧の見通し立たないという情報が発信されていたが、長時間に及ぶ（ほぼ終日の運休）との認識を伝えられなかった。また、現場としては、可能な限り早い復旧を目指す使命感意識が強く、終日運休の判断がしにくかったことが推察される。なお、空港駅においては、被害現場の写真を掲示して、復旧に時間がかかることを伝える工夫をした。首都圏全域において鉄道ネットワーク全体に被害が及んだため、空港アクセス鉄道を特定した情報を的確に伝える難しさもあった。SNS等による不正確な情報拡散も利用者を混乱させるものであった。

さらに、鉄道会社と空港会社（NAA）との情報共有にも課題があった。通常、運転見合わせなどの情報は空港駅から空港会社へ連絡しているが、当日の混乱のなかでは確実な情報伝達が滞ってしまっていた（どこで滞ったかまでは今回の調査では断定できていない）。そのため、夕方に京成が運転再開した初便において、乗客をほとんど乗せずに空港を出発する事態もおきてしまった。以上のとおり、鉄道の運転再開における情報発信のあり方については大きな課題が残った。

運休が長引く場合には、振替輸送を実施することが考えられる。今回は空港アクセス関連の2社ともに運休となったため鉄道間での振替輸送は実施されなかった。路線が長距離であることから、バスによる代替輸送は輸送力不足がきらかである。そのため、両社ともに振替輸送の予定はないとのことであった。ただし、一部区間での運休の場合はバスによる振替輸送を検討する場合もある。

6.1.3.6 空港アクセスバス

空港アクセスバスの運行会社の対応状況についても調査対象として予定していたが、新型コロナウイルスの影響により、令和2年度に調査が延期となったため、最終版において追加報告を行う。

謝辞

本報告書の作成にあたり、国土交通省航空局、関東地方整備局、成田国際空港株式会社、全日本空輸株式会社、日本航空株式会社、東日本旅客鉄道株式会社、京成電鉄株式会社には、ヒアリング調査及び資料提供を通じて、貴重な情報提供にご協力いただきました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 内閣府 HP：令和元年台風第15号に係る被害状況等について，
<http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon15/pdf/r1typhoon15_30.pdf> (2020年3月6日アクセス)
- 2) 成田国際空港株式会社広報部：成田空港～その役割と現状～，2019.
- 3) 成田国際空港株式会社広報部：Green Port Report, 2019.
<https://www.naa.jp/jp/issue/greenport/2019_12/pdf/all.pdf> (2020年3月16日アクセス)
- 4) 国土交通省 HP：令和元年台風第15号による被害状況等について（第2報），2019.
<<https://www.mlit.go.jp/common/001307360.pdf>> (2020年3月16日アクセス)

台風 15 号における成田国際空港における航空貨物輸送への影響

Impact of Typhoon Faxai (2019) on Air Cargo at Tokyo Narita International Airport

竹林 幹雄*¹, 大西 正光*², 平田 輝満*³

Mikio TAKEBAYASHI, Masamitsu ONISHI, Terumitsu HIRATA

This study investigated the impact of Typhoon Faxai (2019) on air cargo logistics at Tokyo Narita International Airport. Although serious damages on airport facilities due to the typhoon did not occur, the blackout caused dysfunction of air cargo logistic facilities in and nearby the airport. The study revealed how major stakeholders of air cargo logistics, i.e., the airport authority company (NAA) and forwarders made their operational decisions through interactions during the period of blackout. In addition, some challenges to improve the coordination of stakeholders are described.

Keywords : typhoon disaster, freight logistics hub, blackout, coordination

6.2.1 問題の概要

航空貨物に関しては、先年平成 30 年台風 21 号により長期の空港閉鎖を余儀なくされた関西国際空港の被災の時とは異なり、令和元年台風 15 号では、成田空港、羽田空港ともに、上屋のシャッター破損といった損害は発生しているものの、空港内施設に運航に障害が出るほどの大きな被害がなかった。成田空港周辺では、大規模な停電が発生してはいたが、空港は基本的に独立した電源を持っているため、大きな機能損失は発生していなかった。しかし、成田空港では空港周辺に物流施設が大規模に展開されているため、停電により空港外施設では台風による停電が長期化したため、運営に大きな支障が出た。これらの実態を把握するべく、行政、空港管理者、物流事業者へそれぞれヒアリングを実施した。

6.2.2 わが国の航空貨物拠点としての成田空港

成田空港は、わが国の航空貨物拠点として主要な役割を果たしており、その重要性はさらに高まっている。2018 年の統計に基づけば、全国の輸出額に占める成田空港のシェアは 14.1%、全国の輸入額に占める成田空港のシェアは 16.6%である。また、近年の傾向をみても、輸出額については前年比 2.6%増、輸入額では前年比 11.9%増と急速

*1 神戸大学海事科学部 教授・工博

Prof., Graduate School of Maritime Sciences,
Kobe University, Dr.Eng.

*2 京都大学防災研究所 准教授・博士（工学）

Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Dr.Eng.

*3 茨城大学大学院理工学研究科 准教授・博士
（工学）

Assoc. Prof., Graduate School of Science and Engineering,
Ibaraki University, Dr.Eng.

表 6.2.1 成田空港における輸出入動向

主要輸出品目	品目	輸出額(億円)	伸び率(%)	シェア(%)	主要輸入品目	品目	輸入額(億円)	伸び率(%)	シェア(%)
主要品目1	半導体等製造装置	7,971	10.9	7.0	主要品目1	通信機	19,129	-0.5	14.0
主要品目2	科学光学機器	7,056	5.9	6.2	主要品目2	医薬品	15,860	25.0	11.6
主要品目3	IC	5,046	12.3	4.4	主要品目3	IC	12,968	10.3	9.5

主要増減品目	主な品目	輸出額(億円)	伸び率(%)	シェア(%)	主な増減国	主要増減品目	主な品目	輸入額(億円)	伸び率(%)	シェア(%)	主な増減国
増加1位	半導体等製造装置	7,971	10.9	7.0	中国	増加1位	医薬品	15,860	25.0	11.6	スイス
増加2位	IC	5,046	12.3	4.4	シンガポール	増加2位	原動機	6,066	41.0	4.4	米国
増加3位	電子回路等の機器	4,902	9.6	4.3	米国	増加3位	電算機類	10,402	14.7	7.6	中国
減少1位	映像記録・再生機器	829	-38.1	0.7	中国	減少1位	通信機	19,129	-0.5	14.0	中国

資料「成田空港～その役割と現状～」より転載

に伸びている。輸入品目で最も大きいのは通信機であり輸入全体の14.0%のシェアであり、それに続き、医薬品が11.6%、ICが9.5%となっている。中でも医薬品の増加率は顕著であり、輸入額では前年比25.0%増となっており、主にスイスとの取引が増している。一方、輸出品目をみると、輸出全体に占めるシェアが7.0%の半導体等製造装置がトップであり、それに続き科学光学機器が6.2%、ICが4.4%と続いている。増減傾向では、伸び率で言えばICが前年比12.3%とトップであり、半導体等製造装置も前年比10.9%と伸びている。このように、航空貨物は、高付加価値貨物が扱われている。特に、医薬品は品質維持のために温度管理が極めて重要である。航空貨物を担う物流業者(フォワーダー)は、一時的保管のために温度管理を可能にするための冷蔵庫が必要となる。空港は航空貨物の拠点であり、図6.2.1に示すように、空港敷地内だけではなく、敷地外にも民間フォワーダーの物流施設が立地しており、荷さばきや一時保管を行っている。台風15号では、これらの物流施設及び航空貨物のための空港施設に大きな損壊は生じなかったが、南エリアが属する芝山町において倒木による大規模な停電が発生し、荷物を管理するコンピューターシステム、荷さばき施設、冷凍冷蔵保管などの機能が失われ、一時的に大きな影響が出た。

6.2.3 台風15号による航空貨物への影響

台風15号による影響が出た2019年9月の港別輸出入額(表6.2.2参照)を見ると、成田空港の輸出額は前年同月比77.1%となっている。表6.2.3に占める2019年全体の輸出額の前年比を見ると成田空港の輸出額は91.9%であり、9月のみ成田空港での輸出額が落ち込んでいることが分かる。一方、成田空港の輸入額の方を見ると前年同月比98.1%となっており、2019年前年比では94.5%であることから、輸入貨物に関しては、台風15号の影響が顕著にあったとは判断できない。後述するように、成田空港の離発着は可能であり、輸入貨物は成田空港での受け入れが継続していたことがその理由と考えられる。しかし、成田空港に下ろされた荷物が荷さばきされるまでの作業は、通常通りには進んでおらず、配送の遅延や品質劣化など、統計上の金額ベースでは現れない損失が出ていた可能性がある。

また、表6.2.2によれば、関西空港の輸入額が前年同月比214.9%、新潟空港では前年同月比170.4%となっており、2019年全体の傾向と比較しても、2019年9月のみが異例の増加となっていることが分かる。成田空港で扱うはずであった輸入航空貨物の一部が、関西空港や新潟空港へと流れていったと推測される。成田空港の主な輸入サイドで取り扱う主な品目に医薬品がある。医薬品は、特に温度管理が重要となり、温度管理が可能な倉庫が必要となる。



図 6.2.1 成田空港周辺の物流施設 (資料「成田空港～その役割と現状～」より転載)

温度管理可能な倉庫施設を装備している空港は、関西空港のみであり、また医薬品の供給が途絶えさせることは難しいことから、関西空港に流れた主な品目は医薬品であると推測できる。

表 6.2.2 2019 年 9 月における港別輸出入額

(単位：百万円、%)

港名	輸 出			輸 入		
	価 額	前 年 同月比	構成比	価 額	前 年 同月比	構成比
全国空港総額	1,503,024	95.9	100.0	1,778,062	110.6	100.0
成田空港	865,400	77.1	57.6	1,203,248	98.1	67.7
羽田空港	29,556	78.6	2.0	97,656	100.5	5.5
新潟空港	15	170.4	0.0	20	59.4	0.0
関西空港	502,423	214.9	33.4	348,313	327.7	19.6
中部空港	73,455	61.6	4.9	87,651	76.3	4.9
福岡空港	20,849	52.7	1.4	36,708	75.9	2.1

出典：東京税関貿易統計

表 6.2.3 2019 年（年間）における港別輸出入額

(単位：百万円、%)

港名	輸 出			輸 入		
	価 額	前年比	構成比	価 額	前年比	構成比
全国空港総額	17,380,622	93.0	100.0	19,805,990	96.9	100.0
成田空港	10,525,596	91.9	60.6	12,956,021	94.5	65.4
羽田空港	345,267	95.1	2.0	1,216,341	123.8	6.1
新潟空港	221	93.0	0.0	347	92.2	0.0
関西空港	5,187,196	98.5	29.8	3,969,490	100.6	20.0
中部空港	934,185	87.5	5.4	1,116,886	100.7	5.6
福岡空港	251,317	67.5	1.4	453,317	90.8	2.3

出典：東京税関貿易統計

6.2.4 関係各機関の対応

6.2.4.1 物流業者の対応

令和 2 年 2 月上旬、都内において大手物流業者に成田貨物地区での被災状況及び対応行動についてヒアリングを行った。なお、業者を特定される恐れがあるため、匿名を条件でのヒアリングとなった。実際の停電の影響は 9 月 10 日～12 日までの 3 日間であった。以下、時系列で状況を整理する。

9 月 8 日時点：まだ台風 15 号の影響が深刻になると予想していなかった。日のあるうちにできるオペレーションを行い、その日は終了。成田には人はほとんど残していない。

9 月 9 日：午前中に状況が深刻であることがわかってきた。交通機関が全く利用できなかったため、東京の事務所にも成田の事務所にも出社が困難な状況となった。空港のオペレーションは完全にクローズこの時点で停電発生を把握。一部従業員は、タクシーや自家用車を使って成田拠点に出社していたため、電話会議を開催し、停電・断

水等全ての状況を把握した。

9月10日：ヒアリング対象企業の復旧チームが現地に入る。大規模な停電のため、PCはおろか水道も使用不可（ポンプのモーターが機能しないため）。上水はおろかトイレも使えず、衛生上よくない環境で復旧作業に当たる。ポータブル電源を20機ほど調達したが、PCを数機つなぐ、扇風機を回すなど小出力しか利用できなかった。また、NTTの通信基地が被災していたため携帯電話の他、緊急時用に確保していた一般回線も不通のため、電話の使用が大幅に制限された（これは全くの想定外）。ネットワーク利用も大幅に制限された。作業は停電のため完全にクローズのまま。付近の協力企業も被災しているため、人が集まらなかった。特に車両の確保に苦慮した。通関等の事務作業は、都内事務所に移動して実施した。（他地から持ってきたPCを現地で使用する場合、セキュリティ上の設定を当該地用に大幅に変更する必要があった）。

9月11日：空港内に立地する協力企業に業務委託したことで、ようやく事態の収拾に向かうことができるようになった。夕方になり、一部拠点の電力が回復したので（ただし、電話は不通のまま）、明日には事態が好転するかと思ひ、様子を見ることにした。この日はポータブル電源により復旧した小規模インフラで作業を実施。

9月12日：通電復旧。

以上の時系列は、ヒアリング調査に協力いただいた物流業者が直面した事態の時系列である。しかし、NAAへのヒアリング調査によれば、長いところでは9日間停電が継続し、その間はまさに開店休業状態となっていた物流業者もあったとの情報もあった。

6.2.4.2 成田国際空港株式会社（NAA）の対応

成田空港では、台風の接近により、航空機の安全な発着を行うため、航空会社の判断により離着陸の取りやめ（キャンセル）が旅客便には生じていたが、基本的に貨物便に関しては航空会社が求めれば離着陸は制限しなかった。同時に、空港内施設への物理的な被害は上屋のシャッター破損破損といった部分的な機能損失にとどまったので、空港内での貨物の停滞や、受け入れ先空港の変更による貨物受け入れ先の容量超過、といった障害はほとんど発生していなかったと把握している。

成田空港周辺では大規模な停電が発生してはいたが、空港は基本的に独立した電源を持っているため、大きな機能損失は発生していなかった。台風15号による空港施設への物理的被害が限定的であり、空港の独立電源も確保されていることから、台風通過時は、NAAが航空貨物に大きな影響が出る可能性があることを想定しづらかった。しかし、台風通過直後は、鉄道、道路を含むすべての空港へのアクセス交通が機能不全に陥ったため、物流業者の人員が空港に集まることができず、空港に到着した荷物を取りに来ない状況となった。空港外に施設を有する物流業者の中には自家発電を装備しているものもあったが、そうでない場合には、空港内で荷さばきするケースもあった。また、空港周辺の冷凍冷蔵施設が停電のために使えなかったため、空港内に冷凍冷蔵対象で滞留したが、それでもパンク状態には至らず、空港外の物流業者の自家発電も機能していたと考えられる。

NAAは、空港施設内ではクリティカルな状況に達しておらず、当初は、周辺の物流施設が困難な状況に陥っているという状況を把握できていなかった。このように、NAAと周辺物流業者の間での情報共有が当初はうまく機能していなかった。2018年の台風21号で関西空港が被害を受けた際に、成田空港に突然膨大な荷物が流れてくるといった事態に直面したことを経験として、空港間の情報共有態勢は構築されている。しかし、時間を経て、次第に停電による影響はかなりあったことがNAAにも情報として入るようになり、NAA側からヒアリングを通じた情報収集を行い、NAAと物流業者の協力が可能になっていった。

6.2.5 台風 15 号を踏まえた対策と今後の課題

台風の規模が予想外に大きく成長したこと自体、まず想定外であった。また、停電についてもまさか 3 日も続くというのも想定外であった。BCP については勤務するものの飲食の最低限の供給しか賄うことを考えていなかったもので、機能していないと言ってよい状態だった。一昨年の関西空港被災の教訓から具体的な BCP を策定する最中の被災であり、全く十分な準備ができていなかったことがわかった。また、BCP だけではなく OCP についても課題が多く、どのようにオペレーションを復旧していくか、といったことに関してもかなり見込みが甘かった。

最も重要なものは電力供給であることが身にしみてわかった。現代物流は巨大な電力を必要とするものであり、このため十分な電力復旧さえ可能であれば、水道やトイレなど生活環境が維持できるので、業務はなんとか行うことができる。今回の台風 15 号の経験を経て、大規模 2 次電源の導入など、自家発電設備の増強が進んでいる。また、BCP (Business Continuity Plan : 事業継続計画) もそうだが、OCP (Operation Continuity Plan : 業務継続計画) についても大きく改善する必要がある、現在検討中である。

また、フォワーダー側で空港のオペレーションを止める、という判断は相当に難しい。これは顧客とのビジネスという観点から、空港が動いている状況下でオペレーションをやめるという判断は荷主の理解を得にくいと考えられる。このため空港管理者や行政側に先んじてオペレーションを止める、という決断は事実上不可能と言ってよい。事前にかなり前広にオペレーション停止の判断などを出してくれると現場での判断もしやすく、例えば他地への振り分けなども荷主サイドで検討できるようになる。

台風 15 号では、NAA が物流業者の間の情報共有が十分でなかったことが反省され、その後、10 月 12、13 日に東日本を中心に大きな被害を出した東日本台風 (台風 19 号) に直面した際には、災害対策本部を立ち上げた NAA がプッシュ型の情報発信を BCP 貨物分科会のメーリングリストを通じて行った。プッシュ型の情報発信により、前広に情報提供がなされれば、事前に貨物の振り分け、空港施設への人員の臨時配置など対応も前倒しでできるなどの効果が期待できる。しかし、こうしたプッシュ型の情報発信を通じた情報共有を行う中で、物流業者は競争関係にあるため、ある物流業者に関する情報を他の物流業者と共有することを嫌がるケースや、航空会社がどのタイミングで貨物の受け入れをストップするか、といった見込みの情報についても、こうした情報を持つ物流業者は相対であれば情報共有することがあっても、メーリングリストを通じたプッシュ型の情報発信を目的として共有すると嫌うケースがあり、課題が浮かび上がっている。

謝辞

本調査研究の遂行にあたり、成田国際空港株式会社並びに物流業者の皆様 (匿名) にヒアリング及び現地調査を実施するあたり、多大なご協力を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 成田国際空港株式会社広報部 : 成田空港～その役割と現状～, 2019.

台風 15 号における離島交通への影響

Impact of Typhoon Faxai (2019) on the transport for remote islands

竹林 幹雄*1, 大西 正光*2

Mikio TAKEBAYASHI, Masamitsu ONISHI

In this part, we focus on the impact of Typhoon Faxai (2019) on the transport for the remote islands. Especially, we gather information about the damage of transport infrastructures between islands and mainland. We surveyed Hachijo-jima Island which is the part of Tokyo Pref. and found no serious damage due to Typhoon Faxai (2019). However, we also found that the typhoon strike is supposed to give potential damages to the dikes because some dikes were broken when the next typhoon stroke.

Keywords : transport, remote island

6.1.1 台風 15 号による影響調査の目的

今回の台風 15 号は、東京湾のはるか南から太平洋を北上するというパターンで来襲した。東京都は太平洋上に伊豆七島や小笠原諸島といった離島・島嶼地域を持つ。このようなエリアでは巨大台風によって本土との重要な交通が遮断され、空港、港湾といった重要施設に損害が生じている可能性が考えられる。また、施設の損害が生じた場合、離島特有の復旧工事の制約が存在する可能性もある。離島における台風被害の特徴を明らかにすべく、ここでは伊豆七島の中でも最も南に位置する八丈島を対象として、台風 15 号による影響調査を行った。

6.1.2 八丈島の地勢及び交通とインフラ

八丈島は、東京南方海上 287km に位置し、面積が 69.11km²・周囲 58.91km のマユ形をした島である。八丈島は、東側にある三原山と西側にある八丈富士が接合して形成されている (図 6.3.1 参照)。経済の中心は、八丈富士と三原山の間にある大賀郷・三根で形成される坂下地区であり、島の人口の大部分は、坂下地区及び三原山のある島の南東部に集中している。

島と島外を結ぶ交通には海路と空路がある。海路は、「橘丸 (5,681t 定員 596 名)」が、東京 (竹芝栈橋) との間に三宅島・御蔵島を経由して毎日就航している。東京 (竹芝栈橋) からの所要時間は約 10 時間であり、コンテナによる貨物も運搬している。空路は、ジェット機が就航しており、東京羽田空港との間を 1 日 3 便が運航している。所要時間は 55 分である。また、伊豆諸島 6 島を定期的に結ぶヘリコプター「東京愛らんどシャトル (定員 9 名)」が

*1 神戸大学大学院海事科学研究科 教授・工博 Prof., Graduate School of Maritime Sciences
Kobe University, Dr.Eng.

*2 京都大学防災研究所 准教授・博士 (工学) Assoc. Prof., Disaster Prevention Research Institute,
Kyoto University, Dr.Eng.

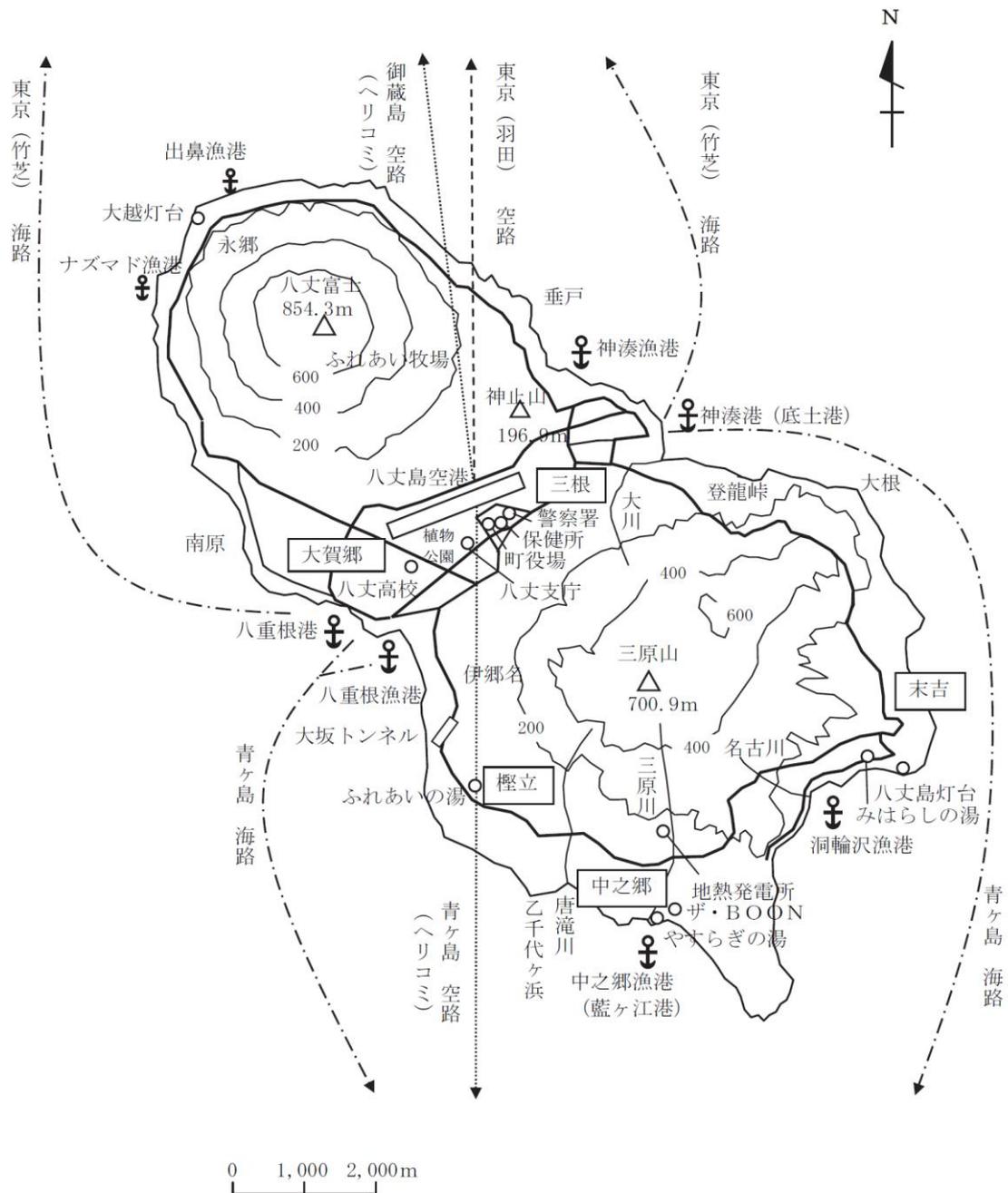


図 6.3.1 八丈島の位置と港湾空港施設の位置
 (東京都八丈支庁事業概要¹⁾より転載)

就航している。島内交通の主たる交通手段は自家用車であり、八丈町営による乗合バスが3路線、計17便が運航されている²⁾。

主たる港湾は、島の北東部に位置する神湊港（底土港）であり、大型定期船の橘丸が接岸する岸壁の他に、小型船のための船揚場が整備されている。島の西部に位置するもう1つの港湾が八重根港であり、大型定期船等が接岸できる就航する岸壁が整備されている。北風により神湊港が高波のため接岸できないとき、島の反対側に位置する八重根港では逆に波の影響を受けにくいいため、神湊港を補完する役割を果たしている。神湊港（底土港）は外郭を有するものの、度重なる台風・高潮による被害から現在かさ上げ工事を行っている。

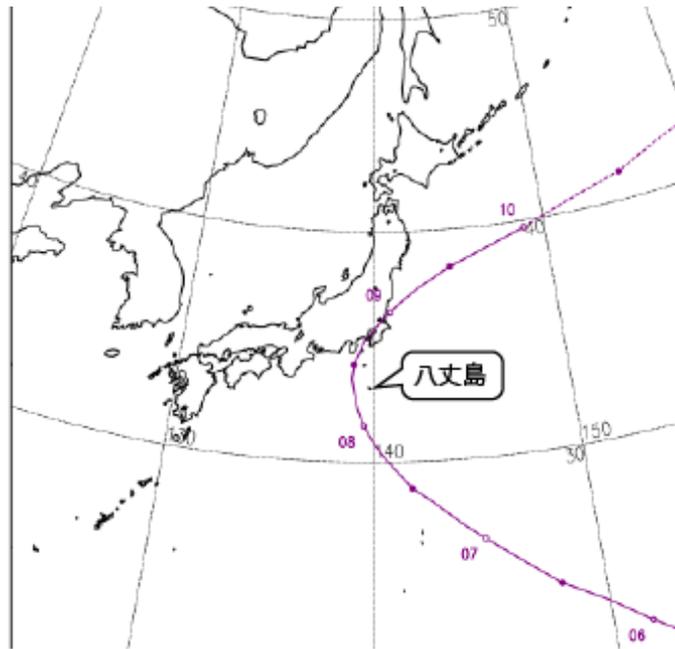


図 6.3.2 台風 15 号の進路と八丈島の位置（気象庁 HP の図に加筆）

漁港では、地元漁船の拠点漁港及び他府県の寄港や避難に利用されている神湊漁港が島の北東部に、八重根漁港が西部にある。神湊漁港は、伊豆・小笠原諸島最大の漁獲高を誇る代表的な漁港がある。その他、第 1 種漁港として地元漁船の拠点となる洞輪沢漁港が南東部に、中之郷漁港が島の南部がある。

6.1.3 台風 15 号通過時の気象状況

今回の台風 15 号は、東京湾のはるか南東から次第に北向きに方向を変えながら太平洋を北上するというパターンで来襲した（図 6.3.2 参照）。台風の本心は、9 月 8 日の午前から午後にかけて八丈島を含む伊豆諸島に最接近している。最大瞬間風速は 9 月 8 日の 14 : 41 に 33.8m/s を記録しているが³⁾、表 6.3.1 を見れば、1 日を通じて継続的に強風が続いていたことが分かる。しかし、風自体による被害が生じるほどの強風ではなかった。また、降雨についても、洪水や土砂災害をもたらすほどの降雨強度ではなかった。

6.1.4 ヒアリング調査及び現地調査の内容

現地調査は令和 2 年 2 月 27 日～28 日の 2 日間実施した。それに先立ち、事前に東京都において離島交通の被害状況についてヒアリングを行った。まず、東京都でのヒアリングを通じて、台風 15 号により、東京都管内の離島・島嶼地域での交通インフラには、大きな損害はほとんど発生していない、ということがわかった。輸送に関しては、東京（竹芝桟橋）と小笠原諸島を結ぶ小笠原丸が出航前日時点で欠航が決まる（翌週に臨時便の運航を行っている）などの影響はあったものの、目立ったものではなかったことがわかった。これはインフラの管理でも同じことがいえるとのことであったが、伊豆七島、小笠原諸島では毎年のように台風の影響が出でおり、それ以外にも冬期の天候不順による欠航などもあるため、事前の備えが住民も含めかなり行き渡っているということである。そのため、ある程度危険に対しては備えができていないのではないか、という東京都側の指摘があった。

現地調査では上記の東京都の指摘を確認することに加え、実際の被害の程度を把握することに努めた。まず空港の被害に関しては、ほとんど被害というものは、今回はなかった。VORDME 上部の屋根に大量の雨が降ったことによ

表 6.3.1 9月8日の八丈島の気象状況（気象庁 HP の表を加筆修正）

時	気圧(hPa)		降水量 (mm)	風向・風速(m/s)	
	現地	海面		風速	風向
1	994.5	1011.7	--	6.2	東北東
2	993.7	1010.9	0.0	7.5	東北東
3	993.0	1010.2	--	8.2	東北東
4	992.8	1010.0	0.5	8.3	東北東
5	992.4	1009.6	0.0	8.4	東北東
6	992.3	1009.5	0.5	9.9	東北東
7	992.0	1009.1	0.0	10.0	東北東
8	991.3	1008.4	0.0	11.1	東北東
9	990.3	1007.4	1.0	11.9	東北東
10	990.2	1007.3	0.0	13.2	東北東
11	988.6	1005.7	1.0	12.9	北東
12	986.9	1004.0	0.5	9.7	東北東

時	気圧(hPa)		降水量 (mm)	風向・風速(m/s)	
	現地	海面		風速	風向
13	984.4	1001.5	6.5	8.9	東北東
14	983.2	1000.3	2.5	6.9	東
15	982.8	999.9	7.5	9.6	東北東
16	983.0	1000.1	14.0	8.2	南西
17	982.8	999.9	15.5	15.0	南南西
18	983.5	1000.6	1.0	12.7	南
19	984.8	1001.9	0.0	13.5	南
20	986.3	1003.4	0.0	13.2	南
21	988.0	1005.1	1.0	9.4	南南西
22	988.3	1005.4	0.0	8.9	南南西
23	989.7	1006.9	12.5	9.5	南西
24	990.5	1007.7	0.0	7.3	南西



図 6.3.3 八重根港の堤防損壊



図 6.3.4 洞輪沢漁港における被災箇所

る一部損壊はあったものの、ターミナルその他の施設部にはほぼ影響はなかった。八丈島空港では、今回に限らず、台風などの強風が予想される際には事前に機材を縛る、カバーを掛けるなどの作業を行い、被害が最小限になるように日頃から対策が行われていたためであると考えられる。また、八丈島空港は島の中央部に位置し、水害などの影響も比較的受けにくい位置に立地していることも一因であると考えられる。

次に、港湾施設に関しては、外郭を持つ底土港では高波の越波が激しく、そのためにターミナルエリアの手すりなどは破壊された部分があるものの、大きな損壊については今回観測されなかった。八重根港においてもほぼ同じ状態であった。しかし、この1ヶ月後に来襲した台風19号によって、図6.3.3や図6.3.4に示すように、外殻をなす堤防の一部が損壊する、という被害がいくつか見られた。また、図6.3.5のように、高波による防護柵の損傷も見られた。現地でのヒアリングから、台風15号の高波によってかなりのダメージを受けていた可能性があることが推察された。すなわち、堤防底部での支持力がかなり奪われていて、その補修が十分にされないうちに次の台風の来襲を受け、損壊が発生したものと考えられる。これは今回の台風だけではなく、過去にも同様のことがらを経験しているとのことであった。現在、損壊を受けた堤防も含めて、補修・改良工事が進んでいる。



図 6.3.5 洞輪沢漁港における被災箇所

今回の調査では、幸いにも甚大な被害は生じていないことがわかった。しかし、これは離島・島嶼地域の交通の脆弱性が改善された、ということの例証はならない。当該地域では船が3日欠航すれば生鮮食品に大きな影響が出、島内での生活に支障が生じる、とのことであった。航空機はCAT-3未対応の空港のため、霧などが発生すれば欠航となる。本土との交通が脆弱なことは変わりなく、また今回損壊を受けたインフラの復旧にも、本土での工事と比べてもかなりの費用が必要となり、期間も長くなる。こういった点の改善が必要となることが改めて認識された。

謝辞

東京都港湾局並びに東京都総務局八丈支庁港湾課にヒアリング及び現地調査を実施するあたり、多大なご協力を賜りました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東京都八丈支庁：事業概要令和元年度版，2019.
<<https://www.soumu.metro.tokyo.lg.jp/09hatijou/g/kankoubutu/01jigyougaiyou.pdf>> (2020年3月19日アクセス)
- 2) 東京都八丈支庁：八丈支庁管内概要<平成30年度版>，2018.
- 3) 東京管区气象台：令和元年台風第15号に関する東京都気象速報，2019.
<https://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub_index/bosai/disaster/ty1915/ty1915_tokyo.pdf> (2020年3月19日アクセス)