

## 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\*<sup>1</sup>, Md Rezuatul ISLAM\*<sup>2</sup>, Le Tuan ANH\*<sup>2</sup>, 高橋 篤平\*<sup>3</sup>, 杉生 高行\*<sup>3</sup>, 古川 郁貴\*<sup>3</sup>

*Hiroshi TAKAGI, Md Rezuatul 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<sup>1),2)</sup>。

##### 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<sup>3)</sup>、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<sup>3)</sup>、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<sup>3)</sup>、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<sup>3)</sup>、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



図-4.1.2.1 神奈川における調査地点の状況

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



図-4.1.2.2 千葉および茨城における調査地点の状況

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\*<sup>1</sup>, 柴山 知也\*<sup>2</sup>, 高島 知行\*<sup>3</sup>

*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<sup>1)</sup>。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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。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。

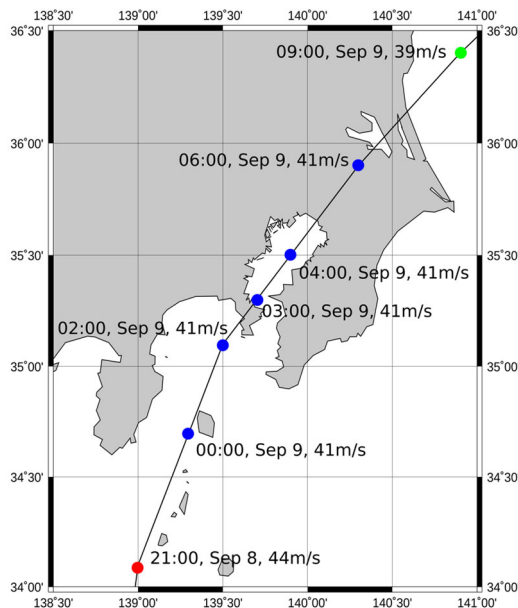


図-4.1.2.1 2019年台風15号Faxaiの中心経路，中心気圧および最大風速．赤，青，緑色は中心気圧を表し，それぞれ955, 960, 970hPaを示す<sup>1), 2)</sup>．

#### 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<sup>3)</sup>、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)

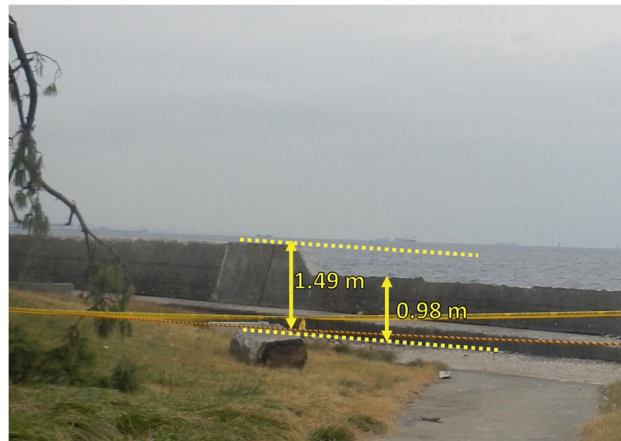


図-4.1.2.3 倒壊したパラペットの様子



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<sup>4),5)</sup>。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<sup>6)</sup>。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。



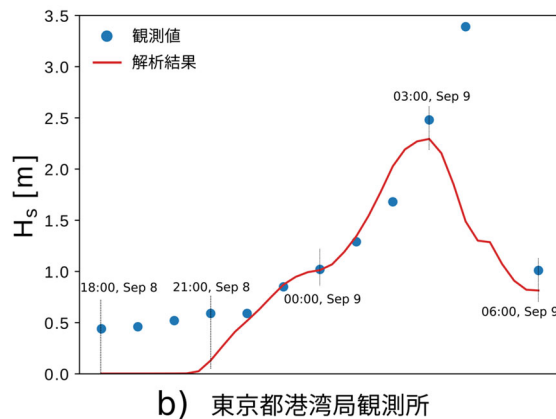
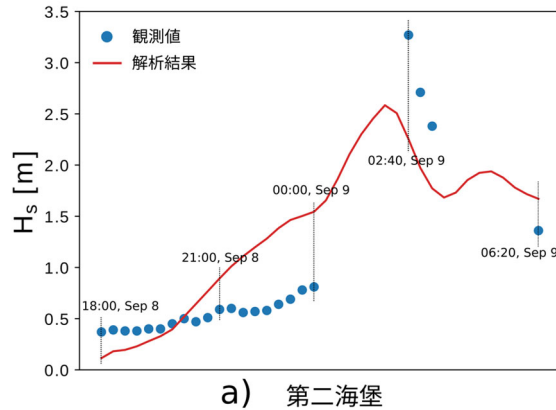


図-4.1.2.6 東京湾内2地点での有義波高の比較. a) 第二海堡, b) 東京港湾局観測所<sup>6),7)</sup>

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<sup>7)</sup>。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。

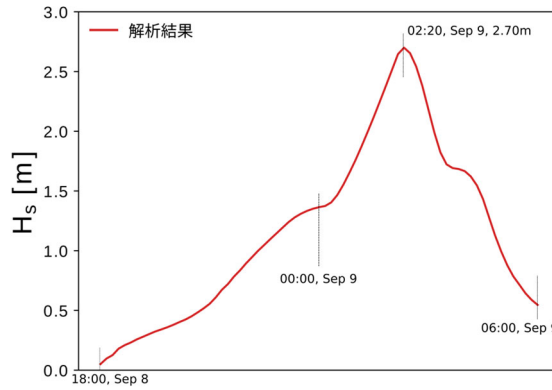
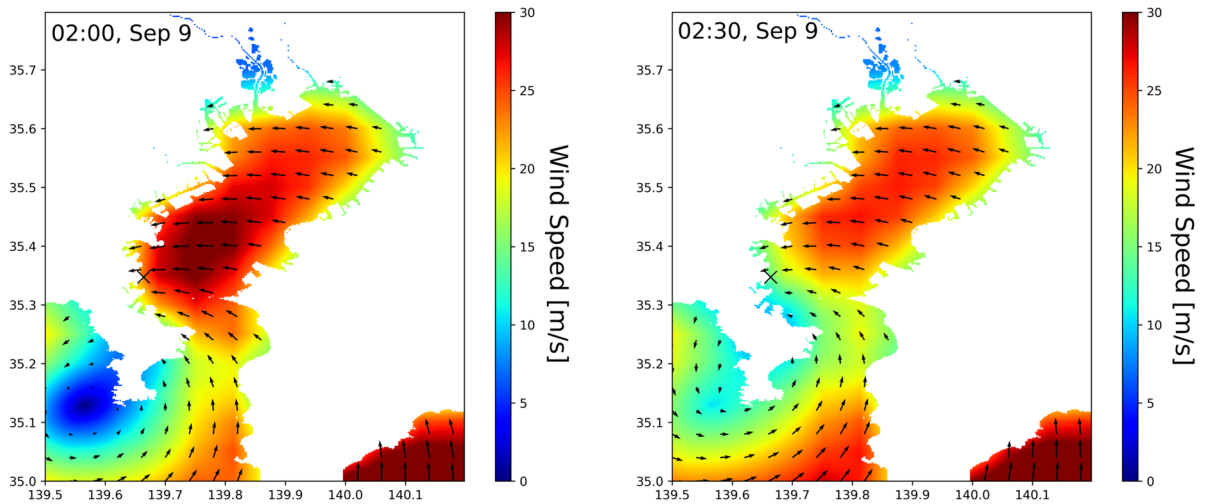


図-4.1.2.7 福浦地区での有義波高の時間変化

## (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よく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。



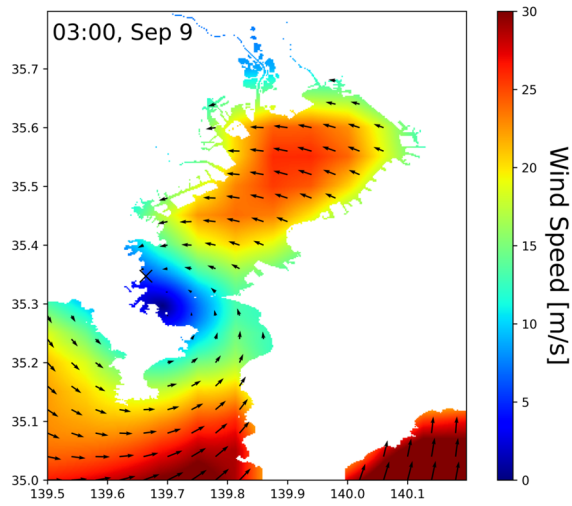


図-4.1.2.8 波浪のピーク時における風の変化 (X印は福浦地区)

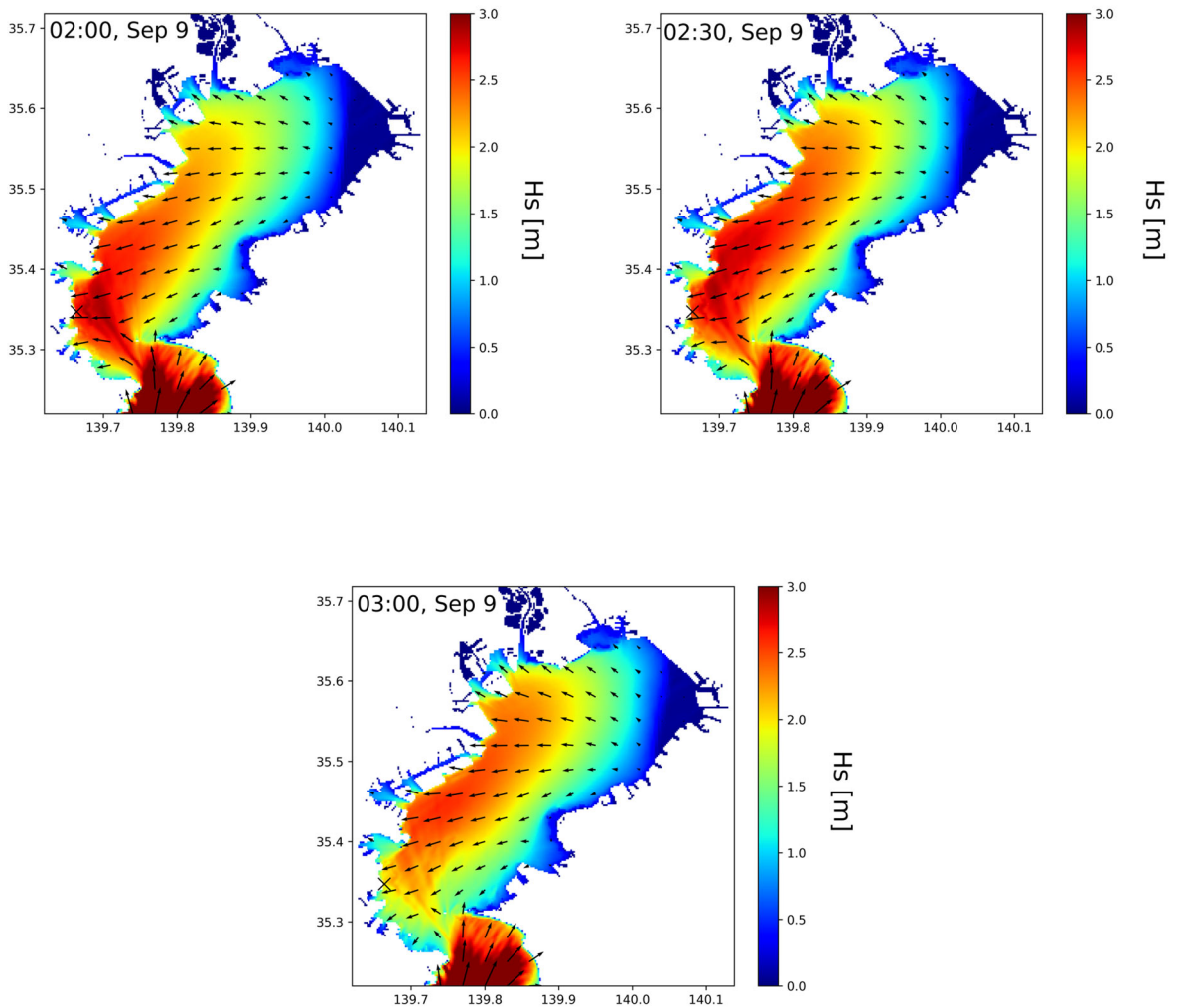


図-4.1.2.9 波浪のピーク時における波浪場の変化 (X印は福浦地区)

### (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<sup>8)</sup>。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。

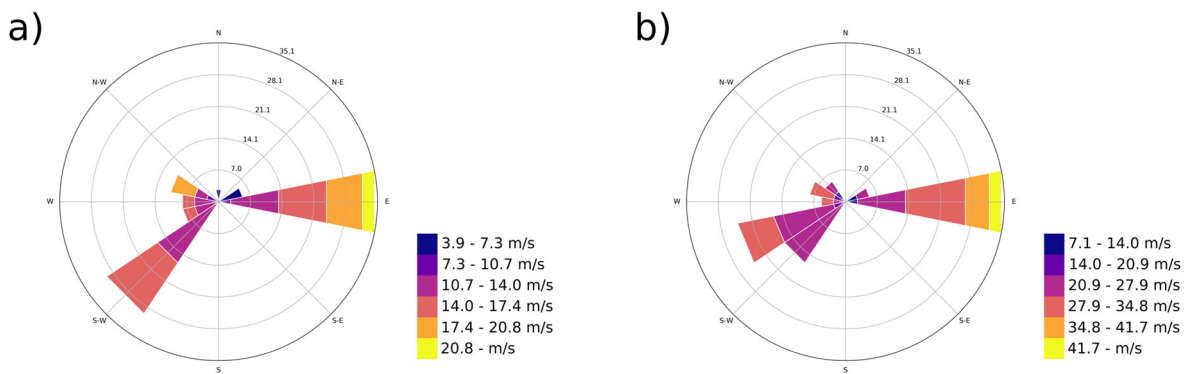


図-4.1.2.10 AMEDAS三浦観測所における風配図 a) 10分間平均風速とその風向, b) 10分間最大瞬間風速とその風向<sup>8)</sup>

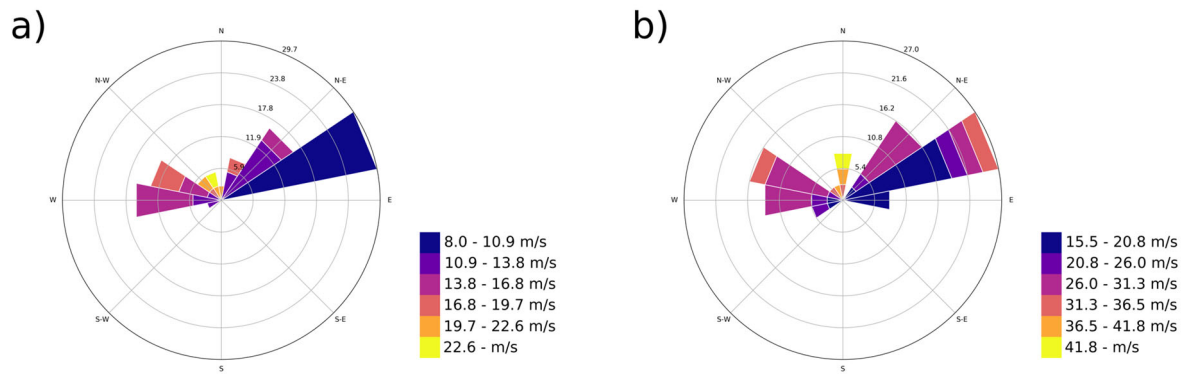


図-4.1.2.11 AMEDAS横浜観測所における風配図 a) 10分間平均風速とその風向, b) 10分間最大瞬間風速とその風向<sup>8)</sup>

### (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<sup>9)</sup>はパラメトリック台風モデルを用いた風場を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場では最大風速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．

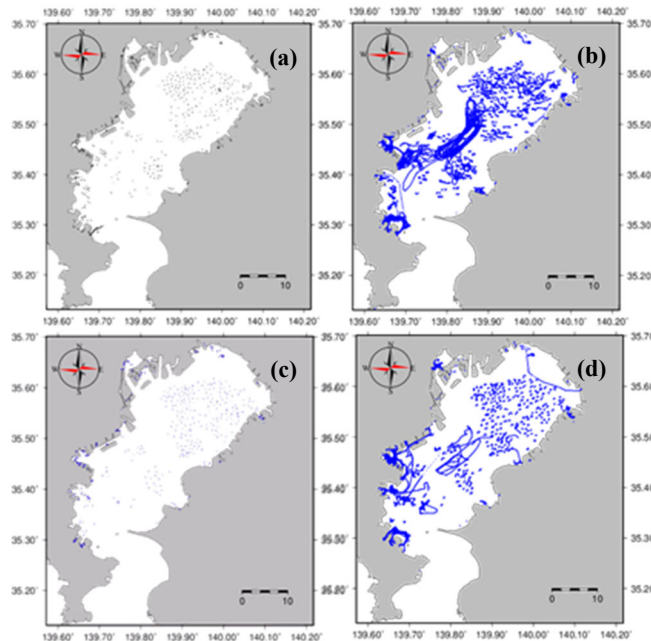


図-4.2.1.1 (a)台風15号時の初期位置，(b) 台風15号時の船舶動向図  
(c)台風19号時の初期位置，(d) 台風19号時の船舶動向図

#### 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/m<sup>3</sup>）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が、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。

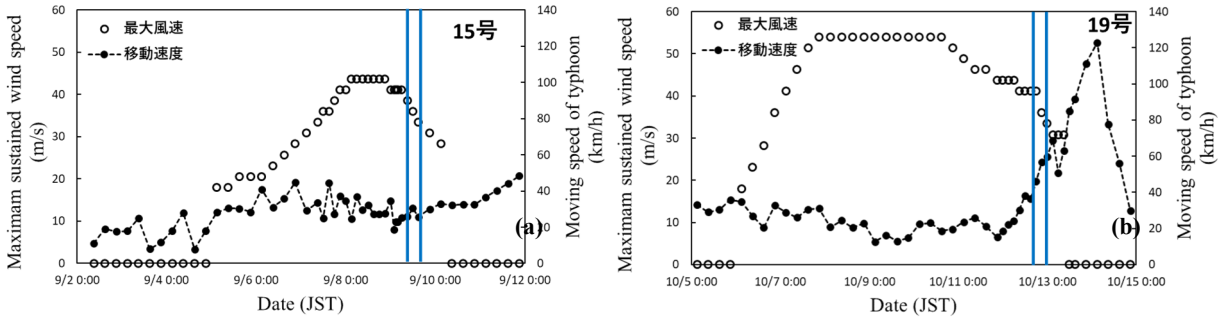


図-4. 2. 1. 2 (a)台風15号と(b)19号の最大風速と移動速度  
(青線：上陸時の時間帯)

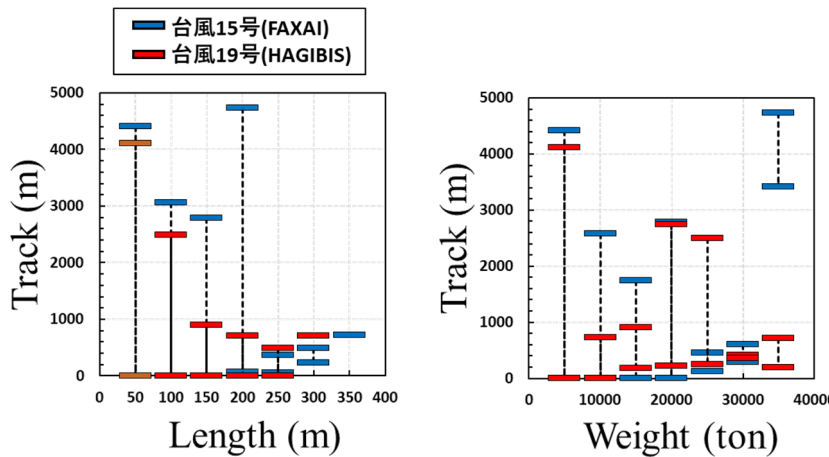


図-4. 2. 1. 3 (a)船舶の全長と移動距離、(b)重量と移動距離の関係

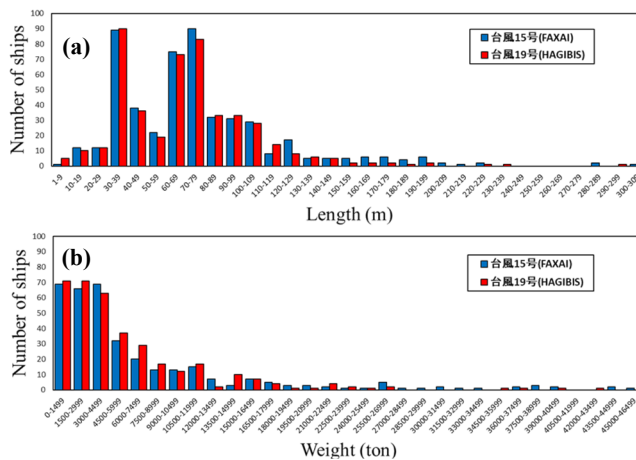


図-4. 2. 1. 4 (a)船舶の全長と船舶数、(b)重量と船舶数



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

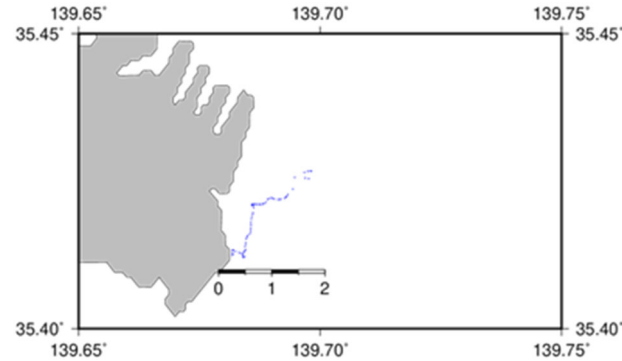


図-4.2.1.5 南本牧のはま道路に衝突した船舶の漂流経路

### (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。

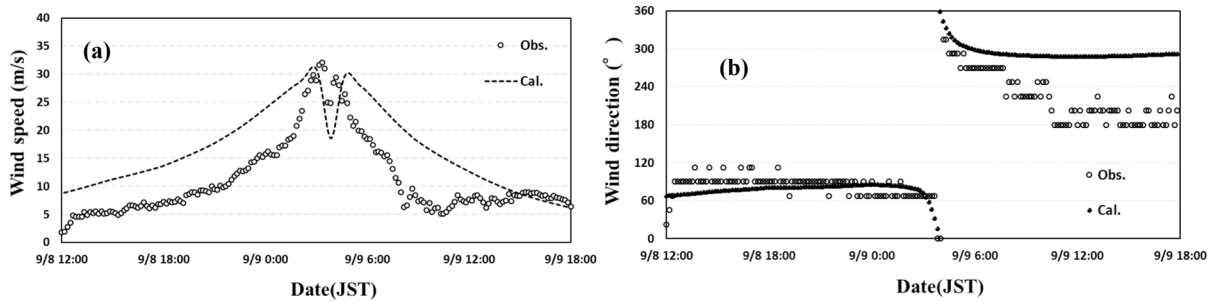


図-4.2.1.6 東京港における(a)海面更正気圧、(b)海上平均風速、海上平均風向の観測値と計算値の比較

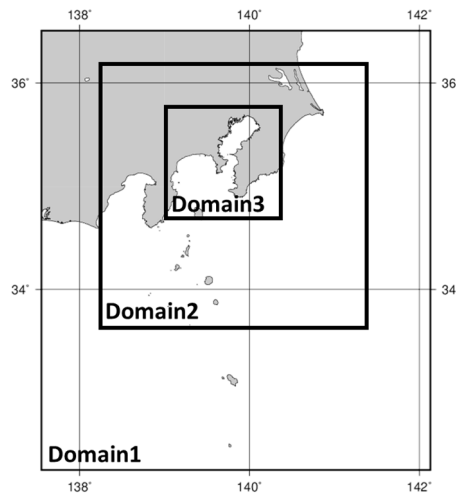


図-4.2.1.7 高潮推算領域と台風15号の台風経路

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 Malkin<sup>8)</sup>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 Fujii<sup>9)</sup>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<sup>10)</sup>)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。)

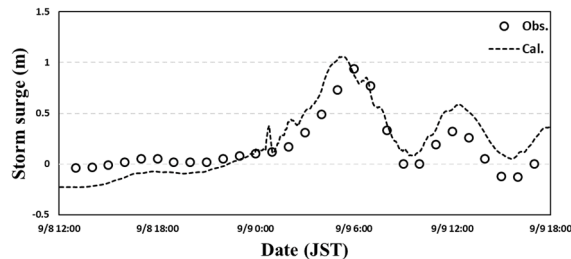


図-4.2.1.8 東京港における観測潮位と計算値の比較

##### (2) 高潮推算モデル

本検討では、高潮推算を富田ら<sup>11)</sup>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<sup>12)</sup>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-DM<sup>14)</sup>を用いた。このモデルは池谷ら<sup>15)</sup>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<sup>16)</sup>．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， $\rho_\alpha$ 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．

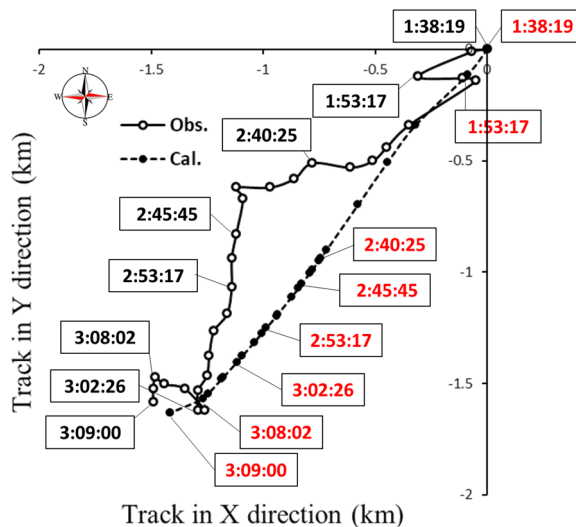


図-4.2.1.9 台風15号時における衝突船舶の軌跡と再現計算の比較

#### (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：水面に及ぼす風的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 5<sup>th</sup>. 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の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

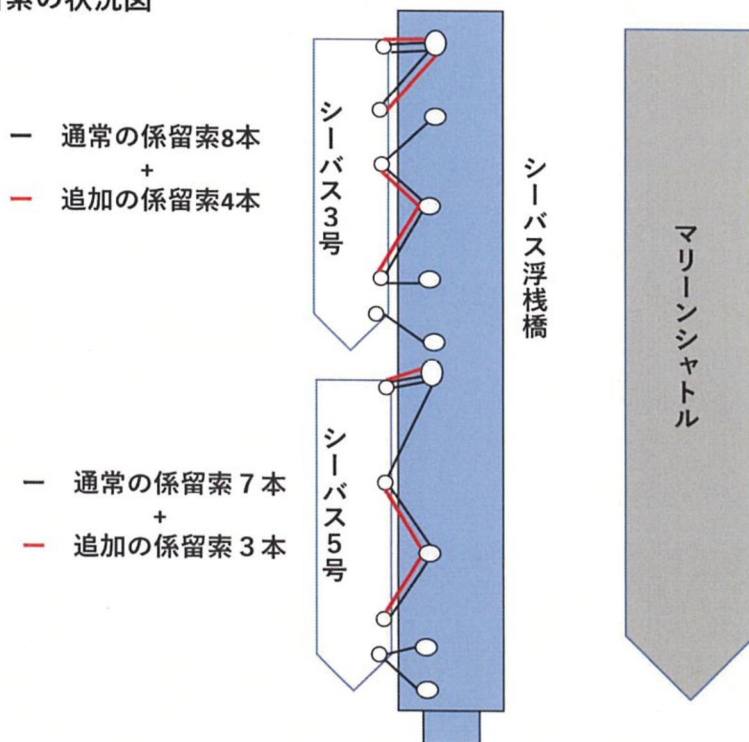


図-4.2.2.5 シーバスの係留索取付位置の模式図

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、 $\rho$  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  $\phi$  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が分かる。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

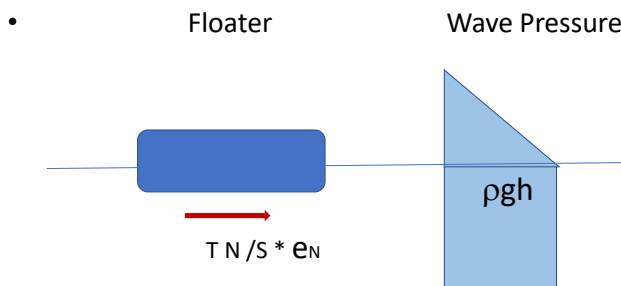


図-4.2.2.6 小型係留船舶に作用する波の力の模式図



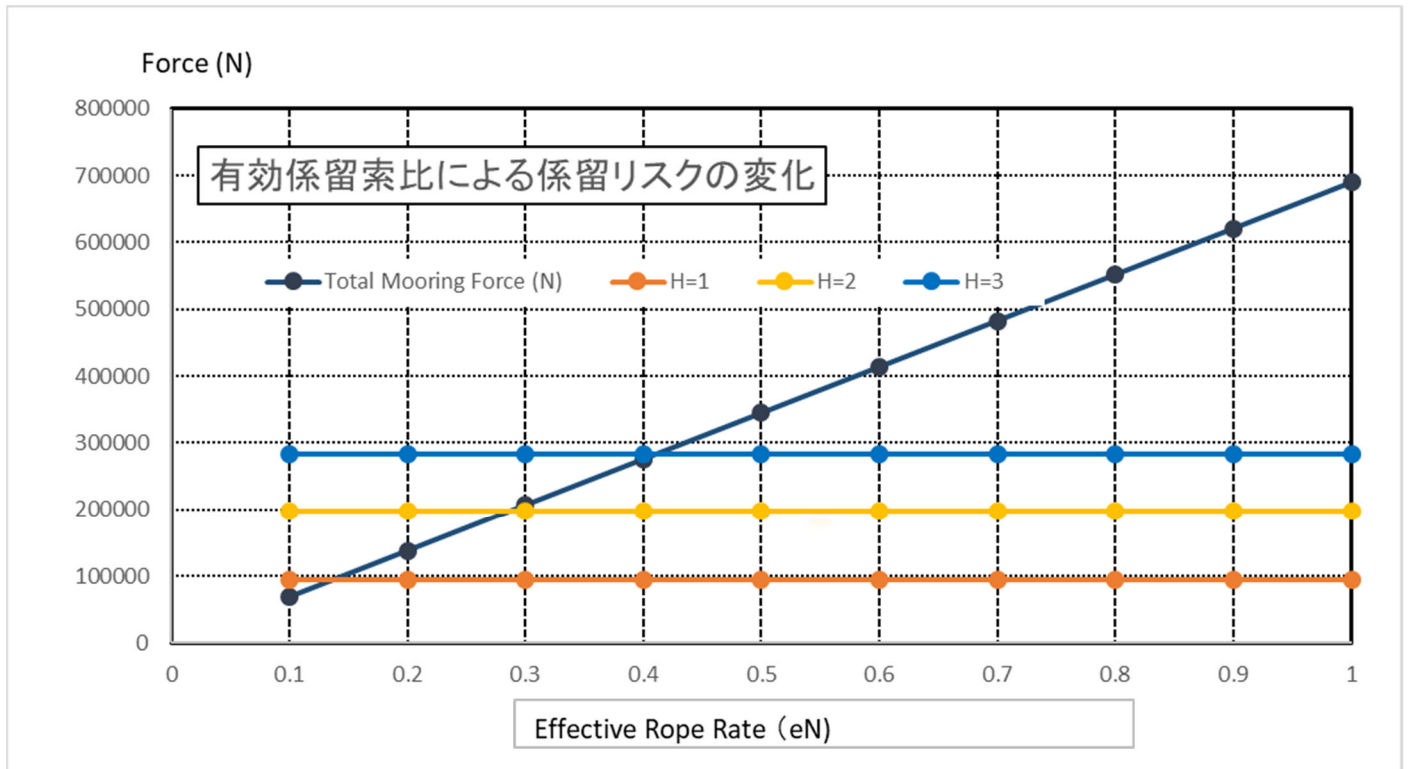
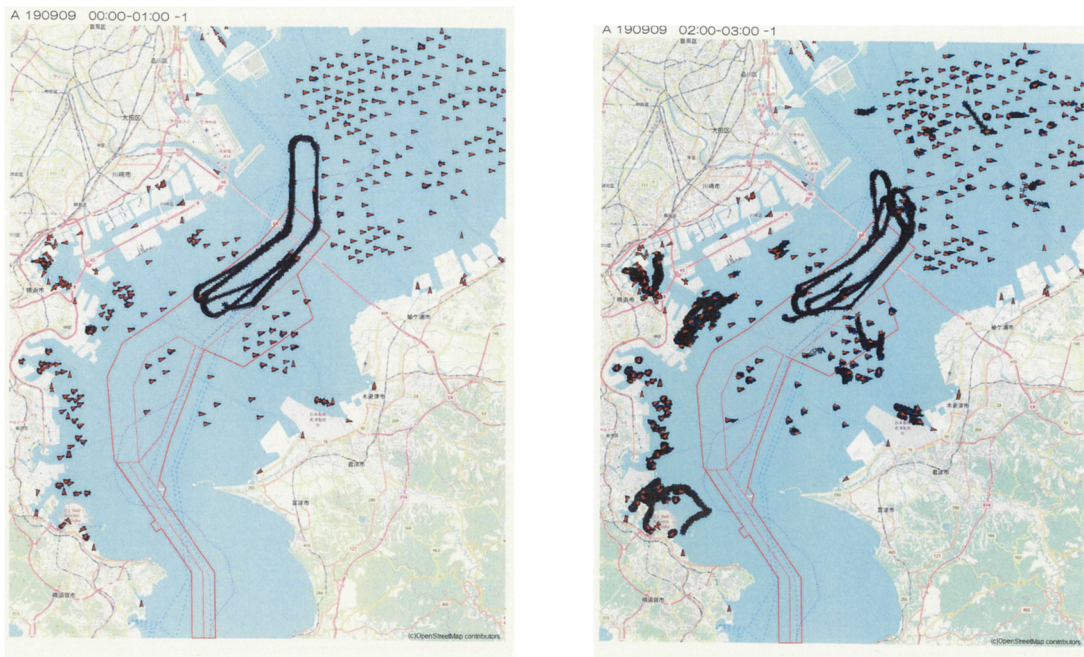


図-4.2.2.7 有効係留索比に対する波力と係船張力の変化

#### 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)

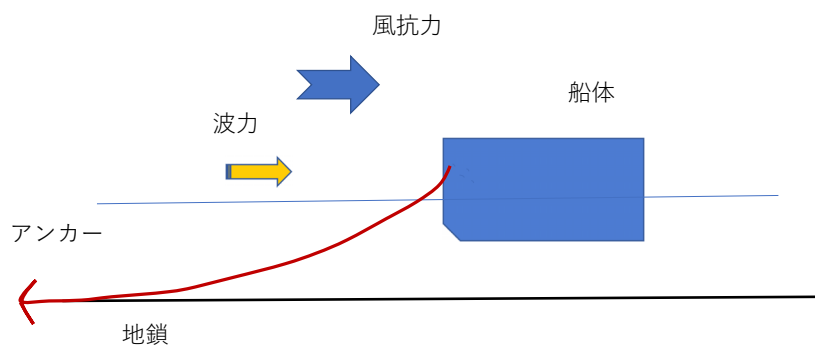


図-4.2.2.10 船舶係留の模式図

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\*<sup>1</sup>, 清野 聡子\*<sup>2</sup>, 岩崎 由美子\*<sup>3</sup>, 有川 太郎\*<sup>4</sup>

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。

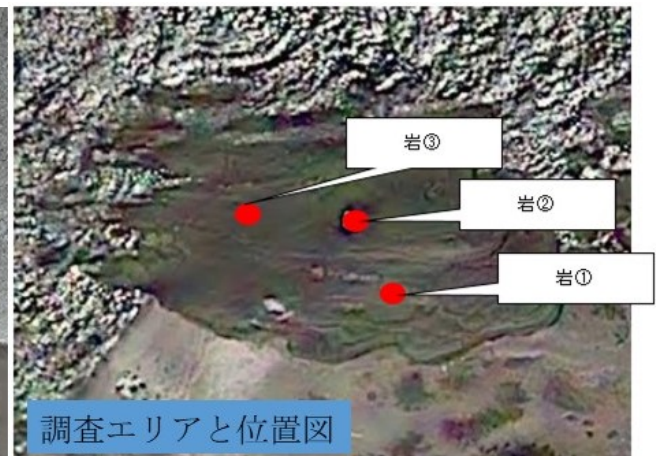


図-4.3.1.2. 3つの巨礫のロケーション。

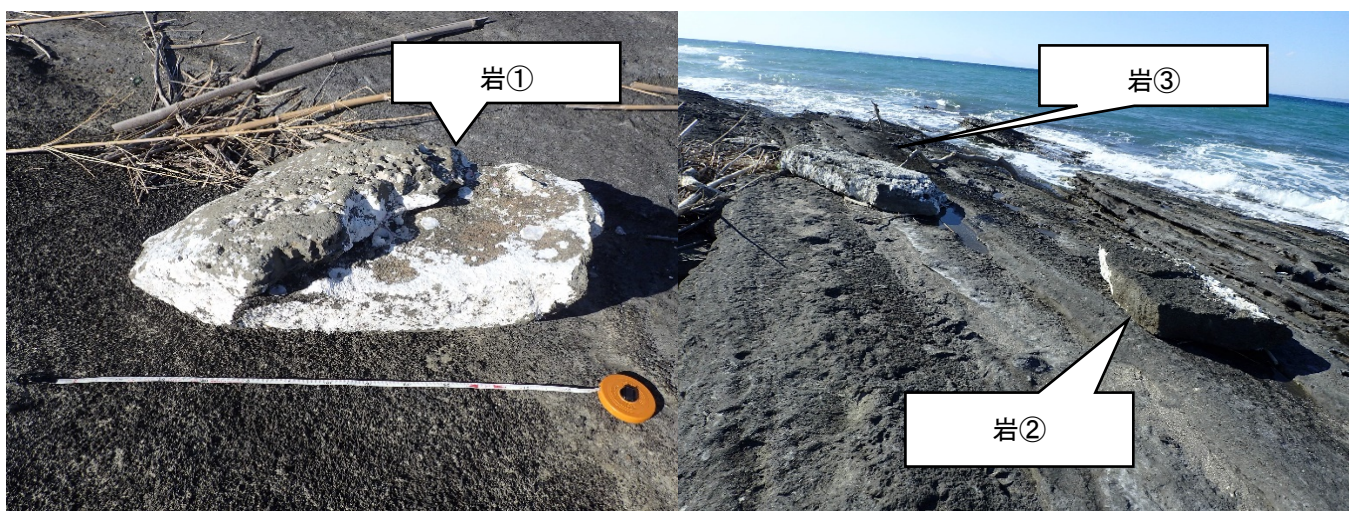


図-4.3.1.3. 3つの巨礫の写真

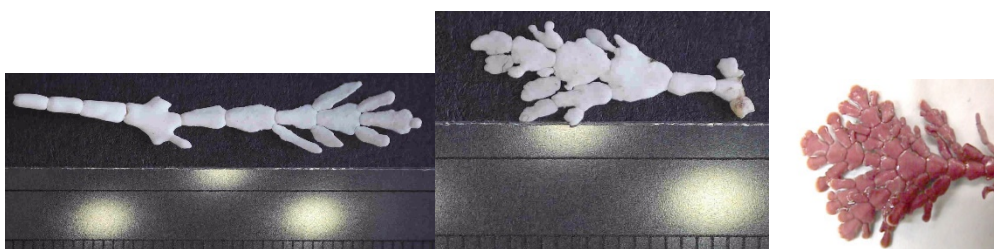


図-4.3.1.4. 左・中央は現場の岩②および③から取ったヘリトリカニノテのサンプル。スケールバーは1mm単位。右はウェブサイト ([http://soruipc2.bio.mie-u.ac.jp/sourui\\_photo/rhodo/heritorikaninote.html](http://soruipc2.bio.mie-u.ac.jp/sourui_photo/rhodo/heritorikaninote.html)) より。色の違いから、サンプルは長い間日差しにさらされ白化したと思われる。

#### 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。

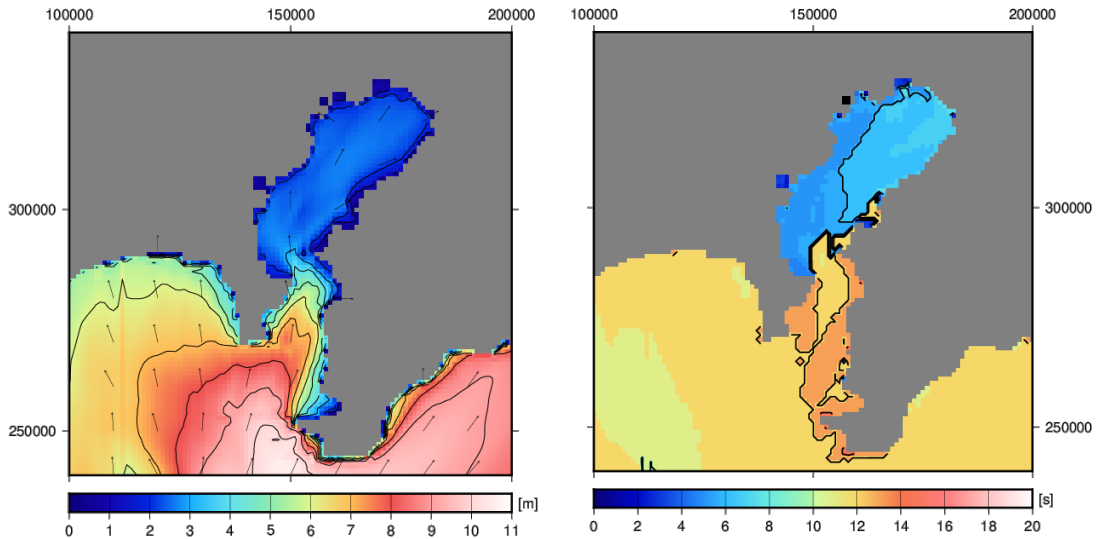


図-4.3.1.4. SWAN による 2019 年台風 15 号の波浪推算結果。左図が有義波高、右図が卓越周期の分布を示す

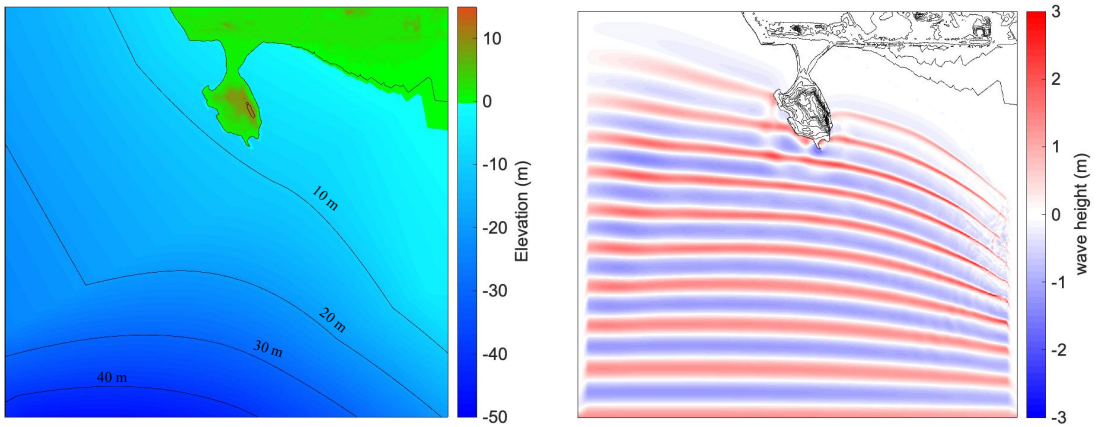


図-4.3.1.5. 2019 年台風 15 号で生じた波浪を入力条件とした時の波浪計算結果。左から、計算領域の地形、波浪が沖の島の陸上部を遡上している時(計算開始から 128 秒後)の波高分布。

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.