

空撮・衛星画像と数値解析を用いた東日本台風時の 那珂川流域における浸水状況の把握

Estimation of Inundation Situation of the Naka River during Typhoon Hagibis
based on Aerial and Satellite Images and Numerical Simulations

20WM1338 藤井 希帆
Kiho Fujii

指導教員 丸山 喜久
劉 ウェン

SYNOPSIS

Typhoon Hagibis passed through Japan on October 12, 2019, brought heavy rainfalls over half of Japan, and resulted in flooding in wide areas. This study focuses on a flooded state-managed river, the Naka River, Ibaraki Prefecture, Japan. In this study, we conducted the field survey on October 28, 2019, after the typhoon passed. Additionally, a series of runoff analyses for the entire Naka River basin and detailed inundation analyses for some sections of the Naka River were conducted. Comparing the results of numerical simulation with the inundated areas detected by aerial and satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) images, the accuracy of the numerical simulation was investigated. The maximum F value was 78.65%, and the simulated result broadly coincided with the inundated areas.

1. はじめに

2019年10月6日に発生した令和元年東日本台風（台風19号：Hagibis）は、12日に伊豆半島に上陸し、東日本の広範囲にわたって記録的な大雨をもたらした¹⁾。本研究で対象とする那珂川では、国管理区間では3か所で堤防が決壊し、浸水面積約3341 ha、浸水家屋2025戸の大規模な浸水被害となった²⁾。さらに、県管理区間でも複数の河川で堤防が決壊した²⁾。

本研究では、大中ら³⁾と同様に RRI モデル⁴⁾を用いて流域全体の降雨流出過程を解析後、那珂川本川や各支川の流量を iRIC ソフトウェア⁵⁾の境界条件として与え、流域下流における詳細な洪水氾濫解析を行った。これらの数値解析で推定された浸水域を、衛星 SAR 画像や災害対策用ヘリコプターの空撮画像から抽出された浸水域と比較し、最大浸水深の比較による精度評価だけではなく、解析精度を時空間的に評価することを試みる。最後に、洪水氾濫による被害把握としての数値解析の精度を検証するため、堤防被害などの調査結果を用いて、被害と水理量との対応関係を検討する。大規模水害時の実態に即した複雑な氾濫形態を時空間的に把握することができれば、今後の治水対策の効果を定量化するのに有用と考えられる。

2. 現地調査

那珂川流域は、茨城県、栃木県および福島県にまたがり、その流域面積は約 3270 km²、流路延長は 1485 km（幹川 150 km、支川 1335 km）に及ぶ一級水系である。

東日本台風による浸水状況を把握するために、著者らは台風通過後の 2019 年 10 月 28 日に久慈川および那珂川の現地調査を行った。現地調査のルートを図 1 に示す。破堤箇所では、UAV による空撮から堤防の状況を確認した。

図 1 の調査箇所 a は那珂川の支流である藤井川の破堤箇所である。図 2 に航空写真を示す。破堤箇所付近では広く浸水し、付近の建物の壁面には深さ 2 m 以上の痕跡水深が見られた。また、UAV の空撮画像では応急復旧工事が完了



図 1 現地調査のルート



図 2 調査箇所 a の航空写真



図 3 調査箇所 a の現地写真（左）と UAV 空撮画像（右）

した堤防を確認できた。堤防付近には排水されずにできた水溜まりが存在した（図 3）。

3. 那珂川流域の降雨流出氾濫解析

RRI モデル⁴⁾は、降雨を入力として河川流量から洪水氾濫までを一体的に解析するモデルである。本研究で対象とする那珂川流域では、水位・流量を計測していない支川が多い。そこで、次章の氾濫解析に必要な支川の流量を推定するために、那珂川流域を対象とした降雨流出氾濫解析を行った。

(1) 解析条件

a) 入力降雨

入力降雨には、気象庁解析雨量⁶⁾の 1 時間降水量（2019 年 10 月 11 日 9:00～10 月 16 日 8:00）を使用した。データの空間分解能は 1 km である。

b) 地形・土地利用データの構築

本研究では、RRI 全国モデル⁷⁾の地形データおよび土地利用データから那珂川流域を選択して用いた。RRI 全国モデルの地形データは、日本域表面流向マップ⁸⁾の1秒データを5秒メッシュに低分解能化して構築されている。RRI 全国モデルの土地利用データは、国土数値情報の土地利用細分メッシュ⁹⁾をもとに、水田、畑地、山地、都市、水域の5区分が設定されている。なお、土地利用細分メッシュデータは100mメッシュ(3秒×4.5秒)であるため、日本域表面流向マップと同サイズのメッシュにリサンプリングされている。

(2) 解析結果

図4にRRIモデルによる降雨流出氾濫解析で得られた那珂川および支川の流量を実線で示す。2021年4月時点では、野口水位・流量観測所における東日本台風時の水位は公開されているが、流量は公開されていない。そこで、既往最高水位(4.84 m)を記録した平成23年台風15号および豪雨のデータ¹⁰⁾から回帰分析で式[1]の水位流量曲線式(HQ式)を構築した。図4の赤色の破線で示す。

$$Q = 94.9(H + 1.76)^2 \quad [1]$$

ここで、 Q は流量(m^3/s)、 H は水位(m)を示す。また、図4に示した支川である緒川、農業用水路A・B、西田川、藤井川、前沢川、田野川の位置を図5に示す。

那珂川の本流について、降雨流出氾濫解析による計算流量および水位流量曲線式で求めた流量を比較する(図4)。ピーク流量は、RRIモデルの計算流量(赤実線)が $6046 \text{ m}^3/\text{s}$ 、水位流量曲線による流量(赤破線)が $6441 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、概ね良好に再現された。さらに、流量が最大となるピーク時刻(2019年10月13日6:00)は両者で一致した。

4. 那珂川の氾濫解析

前章で用いたRRIモデルでも氾濫解析まで実行することができるが、本研究では詳細な地形データを反映した氾濫解析を実行するため、iRICソフトウェア⁹⁾を使用する。具体的には、甚大な浸水被害が発生した那珂川下流域における氾濫流の挙動を再現するため、iRICソフトウェアのNays2DFloodソルバーを用いて氾濫解析を行った。

(1) 解析条件

解析範囲は、既往研究³⁾を参考に、那珂川の野口水位・流量観測所から水府橋水位・流量観測所より約2km上流までの区間に設定した(図5)。計算格子は約20mメッシュ、格子数は*i*方向に1031、*j*方向に225とした。また、マニングの粗度係数は、堤内地を $0.031 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ 、堤外地を $0.038 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ とした。また、那珂川の詳細な破堤時刻が分かっていることから、本研究では破堤の影響に関しては考慮せず解析を行った。

本研究では、モデルA・Bの2種類を作成した。モデルAの地形データには、国土地理院の数値標高モデル(5mメッシュ)を用いた。上流の境界条件は、RRIモデルで求めた那珂川本流および支川(緒川、農業用水路A・B、西田川、藤井川、前沢川、田野川)の流量を入力した。モデルBは、HQ式から求めた那珂川流量を入力し、その他の支川にはRRI流量を入力した。また、地形データには、2016年に国土交通省の定期横断測量によって得られた断面データを1m間隔に内挿補間した堤外地の地形データと、国土地理院が公開している5m間隔の堤内地の地形データとを結合したデータを使用した。なお、支川流入部・河床標高および

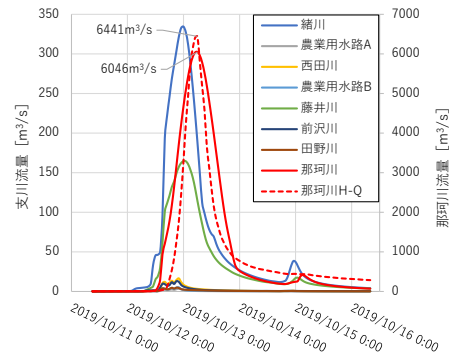


図4 降雨流出氾濫解析で得られた流量(実線)と水位流量曲線で得られた那珂川流量(破線)

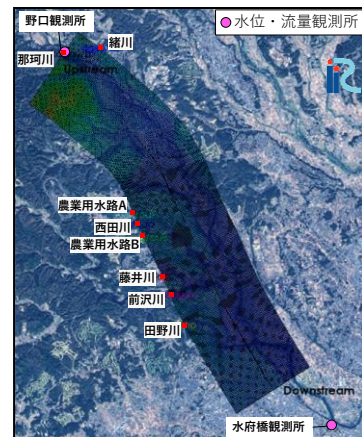


図5 氾濫解析範囲

粗度ポリゴンの微調整を施した。両モデルとも下流端境界条件は自由流出とした。

(2) 解析結果

a) 浸水深の比較

まず、氾濫解析で得られた浸水深の精度を評価する。浸水深の比較には、平野ら¹¹⁾が計測した痕跡水深を用いる(図6)。図7～図9に痕跡水深の計測地域を示す。

モデルAでは、那珂川に近いa地区の氾濫解析の浸水深が実際の痕跡水深よりも過大となった。地点2～4は、氾濫解析結果の水深が痕跡水深よりも大きく、平均誤差が2.9m、二乗平均平方根誤差(RMSE)が2.9mであった。一方、建物が多いb地区では氾濫解析の精度が高く、平均誤差が0.6m、RMSEが1.1mと、a地区よりも誤差が小さくなった。藤井川と那珂川の合流地点(図6(b)の越流地点c)付近に越流の跡が発見されているため、この地域の浸水は越水によるものと推察される。しかし、2019年10月12日21:00における流速ベクトル図(図6(c))を見ると、氾濫解析上では、那珂川から田野川への逆流(図6(c)赤丸)が発生し、田野川左岸の複数地点から越流が生じていることが分かる。氾濫解析では、那珂川と藤井川の合流地点(図6(b)の越流地点c)からの越流に加えて、那珂川から田野川への逆流とそれに伴う越流が発生したことにより、a地区の浸水深が実際よりも過大となったものと考えられる。

一方、モデルBでは、a地区の平均誤差は2.4m、RMSEは2.4m、b地区の平均誤差は0.3m、RMSEは0.9mとなり、地域全体でモデルAよりも誤差が小さくなった。那珂川の堤防が再現され、越水によって堤内地に流入する流量が減少したことが影響していると考えられる。また、モデ

ル B の那珂川に入力した HQ 流量は、RRI 計算流量よりも増加開始が遅く、ピークに至るまでの 1 時間ごとの流量も小さいため、浸水深が小さくなったと考えられる (図 4)。

b) 浸水面積および範囲の比較

氾濫解析で得られた浸水域の精度を評価するために、空撮・衛星画像から浸水域を抽出し比較を行った。浸水域の抽出に用いた画像は、2019 年 10 月 7 日 (事前) および 13 日 (事後) に撮影された 2 時期 (5:42, 17:34) の衛星 SAR 画像¹²⁾と、常陸河川国道事務所に災害対策用ヘリコプターで 10 月 13 日 11 時頃に取得した空撮画像¹³⁾である。これらの画像を用いて、2019 年 10 月 13 日 (a)5:42, (b)11:00, (c)17:34 の浸水面積を氾濫解析範囲に限り算出した結果、(a)10.32 km², (b)14.66 km², (c)11.05 km² となり、11:00 の浸水域が最大となった。氾濫解析結果と比較したところ、モデル A・B とともに、空撮画像と比較した (b)11:00 の精度が高くなった。表 1 に空撮画像の浸水域とモデル A・B の浸水域の比較を行った結果を示す。図 7～図 9 に、それぞれの浸水域の全体図を示す。モデル A の面積が 18.58 km²、モデル B の面積が 14.97 km² となった。モデル A の面積は過大であるが、適合率以外の評価指標でモデル B を上回った。

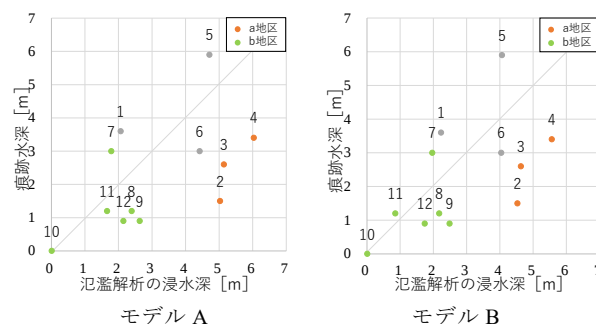
氾濫解析では、両モデルとも実際の記録よりも早い段階で越流が発生し、7:00 に浸水域が最大となった。その後、浸水が徐々に解消され、浸水域が減少していく挙動を示した。図 8 と図 9 を比較すると、モデル B では、上流側の浸水域が狭いことが分かる。越流に伴って堤内地に流入する水量が小さく、早期に浸水解消されたことがモデル B の精度低下の原因と推測される。

3 時期の空撮・衛星画像すべてで浸水域が検出されなかった地域 (図 8, 図 9 の赤色破線) で、解析結果では浸水が生じている。これは、△で示す位置にある境川水門およびポンプ操作による那珂川への排水が反映されていないことが原因として考えられる。

5. 堤防被害と水量の対応関係

台風 19 号による決壊の主要因は越水が 86% で被災要因の多くを占める¹⁴⁾。本研究の氾濫解析範囲では、12 箇所の堤防に被害 (堤防洗堀等を含む) が発生していた (図 10)^{3),15),16)}。越水による外力と決壊の関係を評価するために、越水により決壊した箇所のセルと決壊しなかった箇所のセルにおける越流時間と越流水深・最大流速の関係を整理した (図 11)。

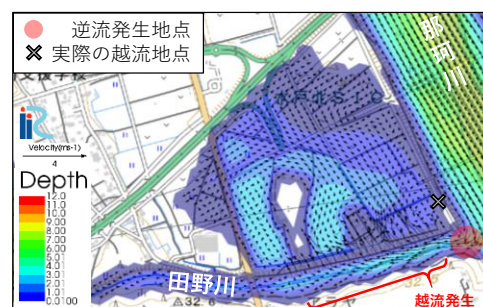
その結果、モデル A・B とともに、決壊箇所 (図 11 赤丸)



(a) 痕跡水深と氾濫解析の浸水深の関係



(b) 痕跡水深計測位置図



(c) モデル A の流速ベクトル図 (2019/10/12 21:00)

図 6 氾濫解析の浸水深と痕跡水深の比較

表 1 各モデルの評価指標

	再現率(%)	適合率(%)	正解率(%)	F値(%)	κ 係数
モデルA	89.17	70.35	92.38	78.65	0.74
モデルB	73.92	72.39	91.46	73.15	0.68



図 7 空撮画像の浸水域

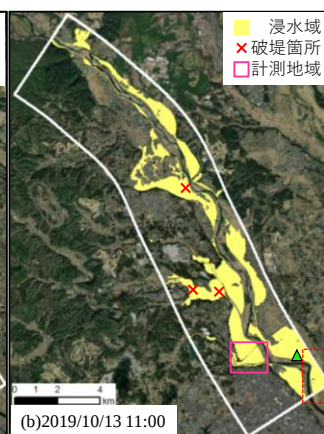


図 8 モデル A の浸水域
(閾値 0.3m)

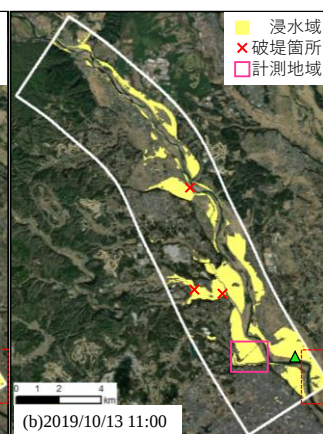


図 9 モデル B の浸水域
(閾値 0.3m)

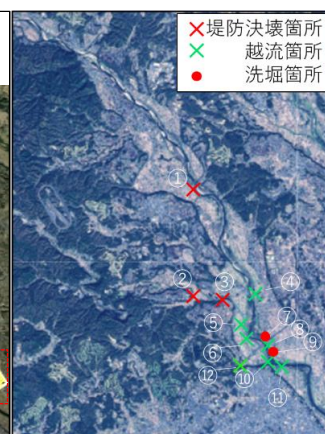


図 10 堤防の被害位置

では越流時間が 75 時間を超えるという傾向が見られた。一方、越流水深・最大流速に相関関係は見られなかった。本研究では、堤体土質、堤体表面の植生、維持管理状態等について詳細な分析はできていないため、引き続き調査を行う必要がある。

6. 結論

本研究では、令和元年東日本台風における那珂川の氾濫挙動特性の解明を目的に、数値解析によって推定した浸水深、浸水域を、現地調査による痕跡水深や空撮・衛星画像から抽出した浸水域と時空間的に比較し、解析結果の精度を評価した。2019 年 10 月 28 日に行った現地調査では、堤防決壊箇所周辺の浸水および復旧状況を把握した。さらに、RRI モデルを用いた那珂川流域の降雨流出氾濫解析を行った。精度検証のために、水位流量曲線式を用いて推定した那珂川本流の流量と比較したところ、ピーク流量とピーク時刻が概ね一致した。そして、降雨流出氾濫解析から得られた流量を iRIC ソフトウェアによる氾濫解析の入力とし、2 つのモデルの氾濫解析を行った。

まず、浸水深の推定結果を評価した。水戸市渡里町の痕跡水深と数値解析の浸水深を比較した。浸水深の計算値が過大となった地域では、那珂川から田野川への逆流およびそれに伴う越流が発生し、相乗的に推定水深が過大になったことが確認された。

さらに本研究では、衛星 SAR 画像とヘリコプターの空撮画像から検出した 3 時期の浸水域と氾濫解析で計算した浸水域の面積を比較し、時空間的な精度の検証を行った。3 時期のうちヘリコプターの空撮画像 (2019/10/13 11:00 頃) を用いたモデル A の検証時には、再現率 89.17 %、適合率 70.35 %、正解率 92.38 %、F 値 78.65 %と最も良い精度の結果を得た。しかし、モデル A・B はともに実際の現象よりも越流開始が早く、浸水域の拡大および解消が早期に発生したことが示唆された。

また、氾濫解析結果を用いて、堤防被害と水理量の対応関係を調査したところ、決壊が発生した地点では越流時間が 75 時間を超える傾向があることがわかった。

RRI モデルは、任意の河川断面形状を反映させることができるため、より詳細な断面形状の設定を行うことで流量の再現精度の改善が見込める。また氾濫解析では、水門やポンプの設定を加えることで、精度の向上が見込める。今後は、リモートセンシング画像などを用いた時空間的な浸水実績や現地報告と組み合わせ、破堤の発生時刻を想定した氾濫解析を実行し、浸水状況の再現精度を高める。

参考文献

- 1) 内閣府：令和元年台風第 19 号等に係る被害状況等について、http://www.bousai.go.jp/updates/r1typhoon19/pdf/r1typhoon19_45.pdf, 2021.
- 2) 水戸市、ひたちなか市、常陸大宮市、那珂市、茨城町、大洗町、城里町、大田原市、那須烏山市、茂木町、市貝町、那珂川町、茨城県、栃木県、気象庁、水戸地方気象台、宇都宮地方気象台、常陸河川国道事務所：令和元年台風第 19 号を踏まえた「那珂川緊急治水対策プロジェクト」～地域が連携し、多重防御治水により、社会経済被害の最小化を目指す～、<https://www.ktr.mlit.go.jp/hitachi/hitachi00814.html>, 2020.
- 3) 大中臨、赤松良久、平田真二、佐山敬洋：令和元年台風第 19 号による那珂川流域の流出氾濫再現シミュレーション、土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 76, No.1, pp. 304-314, 2020.

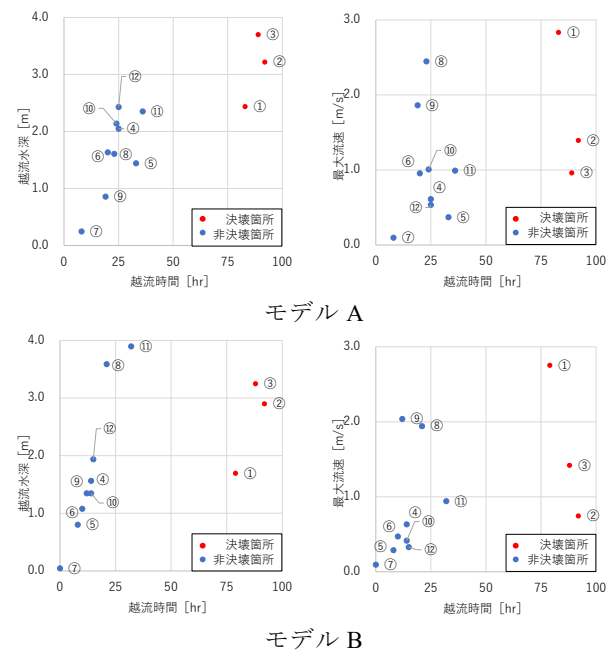


図 11 各モデルの水理量の関係

- 4) 土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター：降雨流出氾濫モデル、https://www.pwri.go.jp/icharm/research/rri/index_j.html
- 5) Nelson, J. M., Shimizu, Y., Abe, T., Asahi, K., Gamou, M., Inoue, T., Iwasaki, T., Kakinuma, T., Kawamura, S., Kimura, I., Kyuka, T., McDonald, R. R., Nabi, M., Nakatsugawa, M., Simões, F. R., Takebayashi, H. and Watanabe, Y.: The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications, *Advances in Water Resources*, Vol. 93, pp. 62-74, 2016.
- 6) 気象庁：解析雨量、<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kurashi/kaiseki.html>
- 7) 三井共同建設コンサルタント株式会社：全国ダム・降雨・土地利用データ整理業務報告書より 5 秒全国モデル, 2019.
- 8) 日本域表面流向マップ：<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/JapanDir/>
- 9) 国土交通省：国土数値情報土地利用細分メッシュ、<https://nlftp.mlit.go.jp/index.html>
- 10) 国土交通省：水文水質データベース：<http://www1.river.go.jp/>
- 11) 平野洪資, P.C.Shakti, 飯塚聡：令和元年東日本台風における水戸市および常陸太田市の浸水推定と調査報告、防災科学技術研究所主要災害調査, 6p, 2021.
- 12) Liu, W. Fujii, K. Maruyama, Y. and Yamazaki, F.: Inundation Assessment of the 2019 Typhoon Hagibis in Japan Using Multi-Temporal Sentinel-1 Intensity Images, *Remote Sensing*, Vol. 13, No. 4, Paper No. 639, 2021.
- 13) 常陸河川国道事務所：那珂川緊急治水対策プロジェクト～多重防御治水の推進～【令和 2 年度版】プロジェクト概要図、https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000773140.pdf, 2020.
- 14) 国土交通省：令和元年台風第 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会 第 3 回 資料-2「河川堤防の被災状況の調査・分析について」, 2020.
- 15) 国土交通省：令和元年台風第 19 号等による被害状況等について (第 54 報) (2020 年 4 月 10 日現在)
- 16) 国土交通省：統合災害情報システム (DiMAPS), <https://dimaps.mlit.go.jp/dimaps/index.html>