

日本大学工学部紀要

第 62 卷 第 2 号

令和 3 年 3 月

日本大学工学部
工学研究所

目 次

工 学 編

令和元年東日本台風に伴う河川氾濫による浸水深の簡易推定とその評価

..... 中村 和樹 (1)

工 学 編

令和元年東日本台風に伴う河川氾濫による 浸水深の簡易推定とその評価

中村 和樹*

Feasibility study of simplified estimation for inundation height caused by Typhoon Hagibis 2019

Kazuki NAKAMURA*

Abstract

The Typhoon Hagibis in 2019 with heavy rainfall caused large-scale inundated damage in the College of Engineering, Nihon University and its surrounding areas. We need to understand the inundation mechanism caused by Typhoon Hagibis 2019 since it is concerned about the possibility of heavy rain frequently in Japan in the future. This study proposes a simplified estimation method for inundation height based on the kinematic wave model. The estimation result was validated by the measurement results to conduct field surveys. As a result, the difference between the measured and estimated inundation height was -0.15 ± 0.28 m which was reasonable considering the accuracy of the digital elevation model from the Geospatial Information Authority of Japan.

Key words: Abukuma river, Tokusada river, Furukawa pond, Kinematic wave model

1. はじめに

令和元年台風第19号は風雨の影響範囲が非常に大きく、河川増水による被害の影響範囲は想定を大きく超えると考えられた。そして、この台風により相当数の家屋が浸水したことから、気象庁は顕著な災害を起こした自然現象の名称¹⁾に基づき、令和元年東日本台風と命名した(以降、東日本台風と呼ぶ)。この東日本台風に伴う豪雨は、日本大学工学部(以降、キャンパスと呼ぶ)とその周辺地域において大規模な浸水被害を発生させ、大学の機能が一部停止すると共に多くの学生が居住困難な状況に陥った。

国連気候変動に関する政府間パネル(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)による第5次評価報告書²⁾によれば、気温、海水温、海水面水位、雪氷減少などの観測事実の上で温暖化していることが再確認され、気候システムの温暖化には疑う余地はないと報告されている。今後、地球温暖化による気候システムの変化に伴い、日本において豪雨が多発する可能性があり、将来発生する恐れのある浸水被害に対し、東日本台風による浸水に関する現象を把握すると共に、そのメカニズムを明らかにする必要があると考えられる。

浸水被害域の予測に関しては多くの研究が報告されており、降雨流出モデルにより計算された河川の流量に破堤条件を設定し、モデル計算により求める方法が一般的である^{3) 4)}。浸水のような周期の長い波を扱うようなシミュレーションでは、非線形長波モデルを用いることが一

般的であるが、必要となるパラメータが多くなるため解の安定性や収束までに時間を要する課題がある。このことから、数値標高モデル⁵⁾(Digital Elevation Model: DEM)のみで簡易な洪水氾濫域を推定する方法も検討されているが、浸水深を各地点で示すことは今後の課題となっている⁶⁾。以上から、本研究では計算の支配方程式を非線形長波方程式から非線形項を無視して、1次元の取り扱いにしたKinematic waveモデルに基づく簡易な最大浸水深の推定手法を提案する。本提案手法により、東日本台風によりキャンパスとその周辺地域における洪水氾濫域のみならず最大浸水深(各地点における地面から水面までの高さ)を推定し、現地調査による浸水深の計測結果により評価した結果を示す。

2. 研究対象

本研究では、東日本台風に伴う豪雨により浸水被害を受けたキャンパスとその周辺地域を研究対象とする。図1に研究対象領域を示す。キャンパスは福島県郡山市に位置し、阿武隈川とその支流である徳定川が近くを流れる自然豊かな場所にある。阿武隈川は源流の福島県の白河地方から仙台平野へ流れる東北地方において北上川に次ぐ長さであり、流路延長は239kmの一級河川である。阿武隈川は、段階的に堤防の整備が進められているが、国の堤防建設計画において最後まで未整備の地区がある。この場所は、福島県須賀川市に近い御代田橋の川上から、キャンパス南東に位置する2019年9月に開通した笹川大橋までの阿武隈川右岸の約1kmであり、川の流れによってできた丘や樹木に覆われた景観が続く地区である。

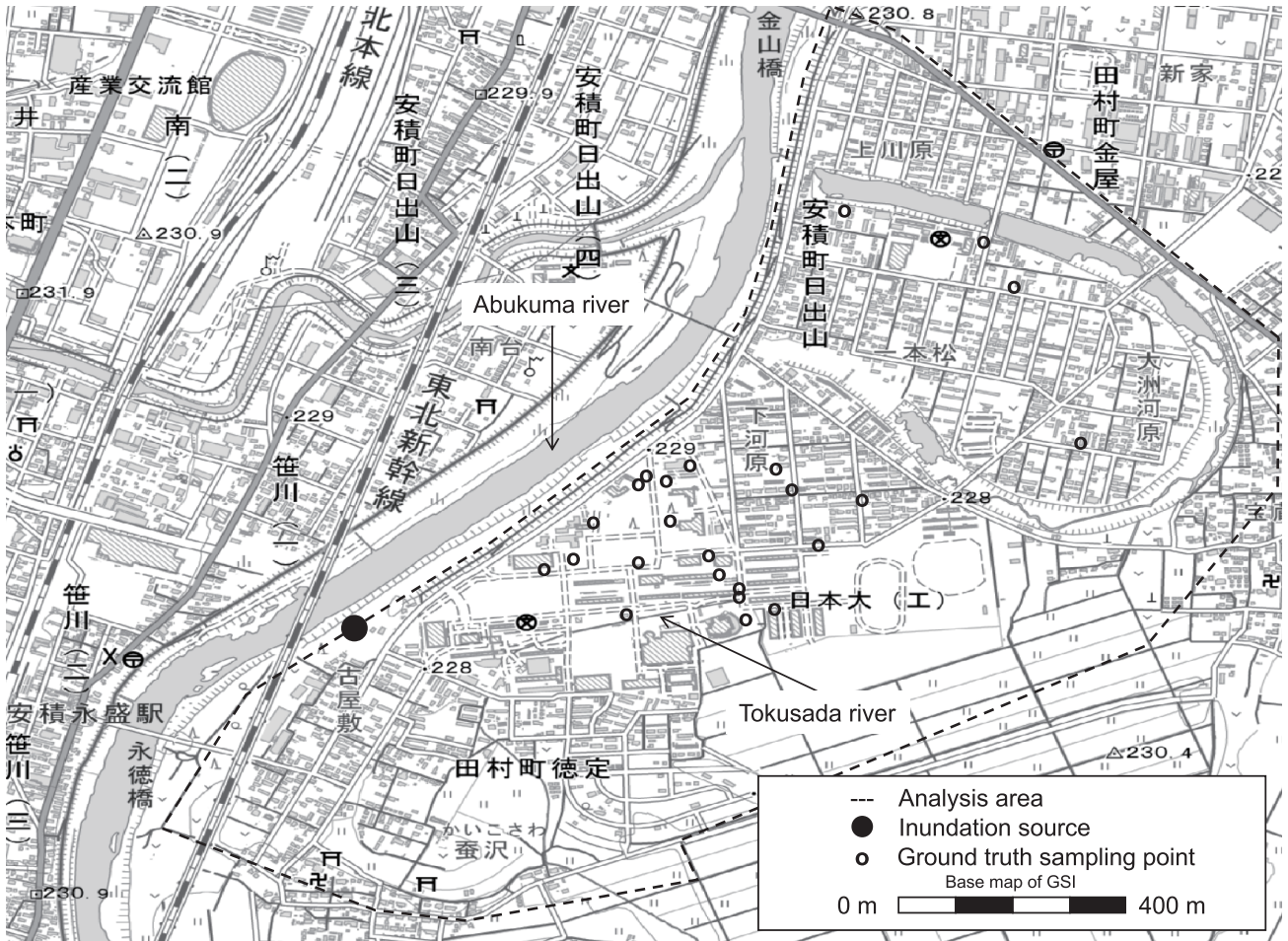


図1 テストエリア

3. 研究対象

3.1 使用データ

浸水高（河川の氾濫により上昇した標高0m（ジオイド）から水面までの高さ）および浸水深の推定に必要な標高データは、国土地理院の基盤地図情報であるDEM⁵⁾を使用した。国土地理院のDEMは、航空レーザ測量により基本測量として作成された標高のメッシュデータである。本研究では5mメッシュ（DEM5A）を取得し、3.2節で後述するアルゴリズムに使用した。このメッシュデータはJGD2000測地系の経緯度座標となっており、標高の精度は標準偏差で0.3m以内、水平位置精度は1.0m以内であることが公表されている。

本研究により推定される浸水深は、現地調査による最大浸水深の計測結果により評価する。これは、キャンパス内における水準測量の成果とその周辺地域において地面から浸水の痕跡までの高さを計測した結果であり、キャンパス内では18地点、その周辺地域で8地点の計26地点の計測結果を得ることができた。最大浸水深の平均および標準偏差はそれぞれ1.01m、0.66mであった。現地調査により取得した最大浸水深の計測結果からヒストグラムを求めた結果を図2に示す。

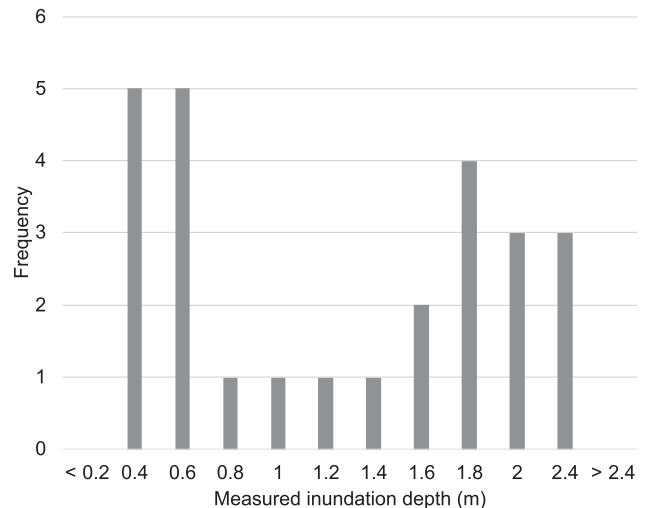


図2 計測された浸水深のヒストグラム

3.2 浸水深推定アルゴリズム

本研究で提案する簡易な最大浸水深推定手法は、3.1節で述べた数値標高モデルを用いて、越水箇所とその地点における浸水高を設定することにより、越水箇所と周囲との浸水高が平衡になるように計算を実施し、浸水高から標高を差し引くことにより各地点における浸水深を求めるアルゴリズムである。具体的に、本研究で提案する簡易な浸

水深アルゴリズムを導出する。浸水のような周期の長い波を扱うようなシミュレーションは、非線形長波方程式を用いることが一般的であるが、非線形項を無視して空間座標 x が正の方向に位相が進む次元の取り扱いにより、式(1)に示すKinematic waveモデルとして表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

ここで、 η は浸水深、 t は時間、 g は重力加速度、 h は浸水深を示す。式(1)において、空間勾配の算定に風上差分を採用して変形することにより、式(2)が得られる。

$$\eta_{i+1}^{n+1} = \eta_{i+1}^n + \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} (\eta_i^n - \eta_{i+1}^n) \quad (2)$$

ここで、 i は空間格子番号、 n は浸水時間（イテレーション回数）、 Δx は空間格子間隔を、 Δt は浸水時間間隔を示す。

図3に示すような隣接する空間格子において、越水箇所またはそれに近い浸水深よりも浸水末端部における浸水深が低い場合に、両空間格子の浸水深を按分して浸水末端部における浸水深を更新することにより浸水の広がり表現することを考える。これにより、式(2)に式(3)を代入する結果、式(2)は単純化され式(4)のように表される。

$$\sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{1}{2} \quad (3)$$

$$\eta_{i+1}^{n+1} = \eta_{i+1}^n + \frac{1}{2} (\eta_i^n - \eta_{i+1}^n) \quad (4)$$

ここで、式(2)および(4)は共に、平衡解 ($\partial \eta / \partial t = 0$) が $\partial \eta / \partial x = 0$ となり、つまり水面は水平という解となり矛盾しないことが分かる。また、式(2)において $\sqrt{gh}(\Delta t / \Delta x) > 1$ になると計算が不安定になるため Δt の設定に制約があるが、式(3)において両空間格子の浸水深を按分するため右辺を1/2としていることから、式(4)は計算の安定性に依存するパラメータは無く、計算に必要なパラメータが浸水深のみであることから、式(2)と比較して解の収束性が良い特徴がある。以上から、本研究における浸水深の推定はパラメータを減らすことができ、解の収束性が良い特徴を持つ式(4)を採用する。

以上のアルゴリズムによる計算手順は、図3を例として説明する。

- ① 越水箇所を $i=0$ とし、その場所における浸水前の標高 H をDEMから求める。図3では、計算の初期条件として $H_{i=0}$ が228.0mとして浸水後の標高が $\eta_{i=0}$ が229.0mであった場合、つまり浸水深 $h_{i=0}$ は1.0mと設定している。
- ② 越水箇所に隣接する空間格子について、実際には2次

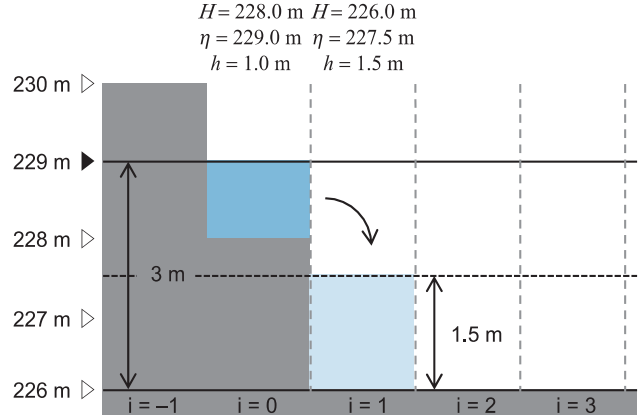


図3 浸水深推定の模式図

元空間の取り扱いであるが、説明の便宜上1次元の説明とする。ここで、越水箇所 $i=0$ に隣接する空間格子は $i=-1$ および $i=1$ である。

- ③ $i=-1$ については、 $H_{i=-1}$ が230.0mであることから、この地点の標高が浸水末端部（ここでは $i=0$ ）における浸水深 ($\eta_{i=0}=229.0\text{m}$) よりも高く $H_{i=-1} > \eta_{i=0}$ であるため、これ以降の空間格子 ($i=-1, -2, -3, \dots$) への浸水の伝播は無いものとする。
- ④ 一方、 $i=1$ についてはまだ浸水していない地点で $H_{i=1}$ が226.0mであり、この地点の標高または既に浸水している場合は浸水深が、浸水末端部（ここでは $i=0$ ）における浸水深 ($\eta=229.0\text{m}$) よりも低く $H_{i=1} < \eta_{i=0}$ であるため、両空間格子である $i=0$ と $i=1$ の浸水深または標高（それぞれ $\eta_{i=0}=229.0\text{m}$, $\eta_{i=1}=226.0\text{m}$ ）を按分（平均）して、 $i=1$ における浸水深を更新する結果 $\eta_{i=1}=227.5\text{m}$ すなわち浸水深 $h_{i=1}=1.5\text{m}$ を得る。
- ⑤ 引き続き、 $i=2$ 以降について④と同様に手続きにより浸水深および浸水深を求めて更新する。なお、隣接格子の計算回数である i は越水箇所から十分な距離を確保するものとする。
- ⑥ i が計算回数の上限に到達した後は、イテレーション回数を1つ増やして再度 $i=0$ から計算する。これをイテレーションの設定上限に到達するまで繰り返す。

4. 解析結果

研究対象領域における最大浸水深は、阿武隈川の無堤防地区である中河原地区における図1の黒色丸印で示す場所を越水箇所として設定して推定した。最大浸水深の推定に3.2節のアルゴリズムを適用する場合は、計算機を用いてイテレーションにより求めることになる。イテレーションの初期条件として、越水箇所における浸水深を228.98mと設定した。これは、本学土木工学科知野泰明准教授により計測された、キャンパス内で最も浸水深の被害が大きい45号館における浸水深である2.03mを採用した結果である。3.1節で述べた通り、使用するDEMは5mメッシュであることから $\Delta x = 5\text{m}$ となり、1回のイテレーションにおけ

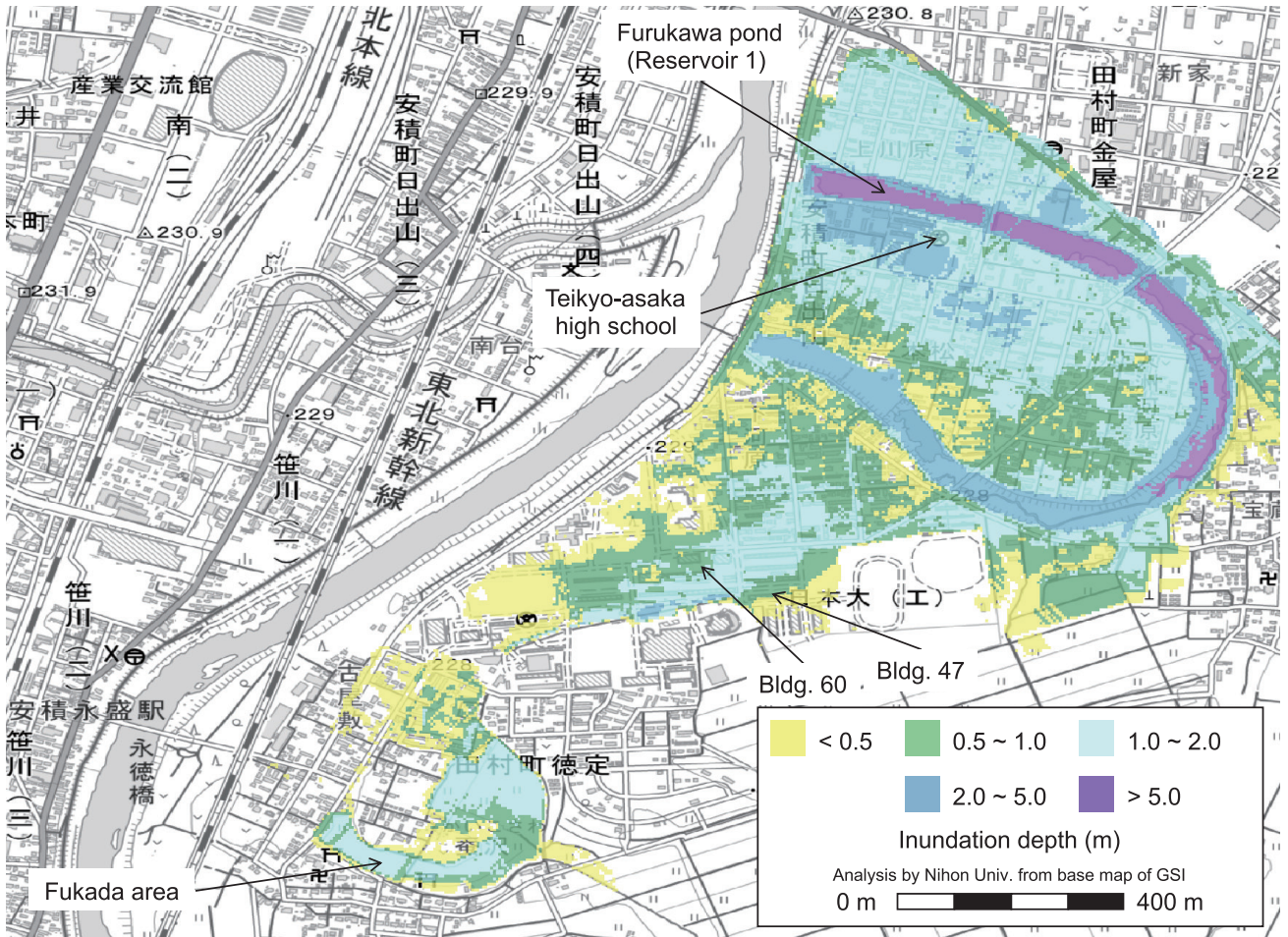


図4 階級別の浸水深推定結果

る境界条件として、隣接格子の計算回数は浸水高の計算領域 ($N \times \Delta x$) に対応しており、研究対象領域が十分に含まれるように400 (越水箇所を中心とした2kmの矩形領域) とした。また、イテレーション回数は浸水深の推定が十分に収束することを考慮して300とした。

これらの計算に必要なパラメータの設定に基づいて、研究対象領域における最大浸水深を推定した結果を図4に示す。この図から、キャンパス内において開渠となっている徳定川周辺の浸水深が大きく、そこから北西の古川池へと浸水が広がっていることが分かる。さらに、古川池の第1池周辺ではキャンパスよりも浸水深が大きく、帝京安積高校の西側では最大浸水深が2mを超える地区を確認できる。最大浸水深の推定結果は、3.1節で述べた現地調査により取得した最大浸水深の計測結果と比較することにより評価した。最大浸水深の計測結果と推定結果の比較を図5に示す。計測結果と推定結果との差は $-0.15 \pm 0.28m$ であり、最大浸水深の推定結果は過小評価となったが、使用したDEMの標高の精度を考慮すると最大浸水深の推定結果と測定結果と調和的である。

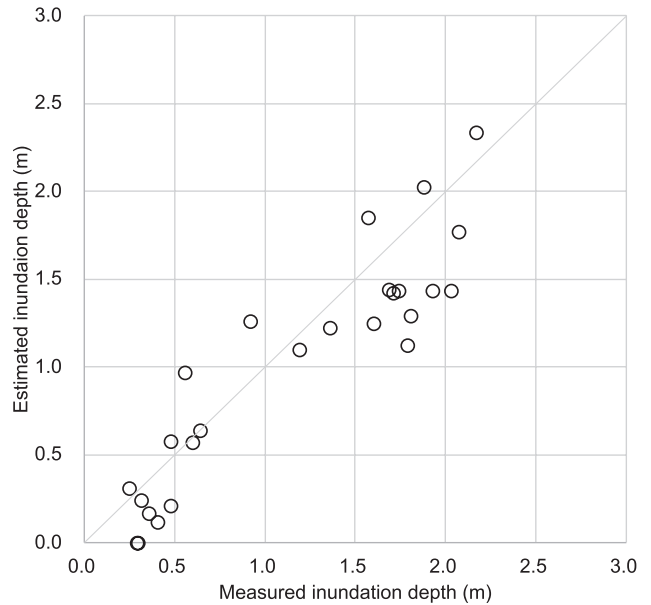


図5 浸水深の計測結果と推定結果の関係

5. 考 察

本研究における浸水深の推定に採用した式(4)を使用する場合、解が収束するまでの時間経過の解釈について考える。

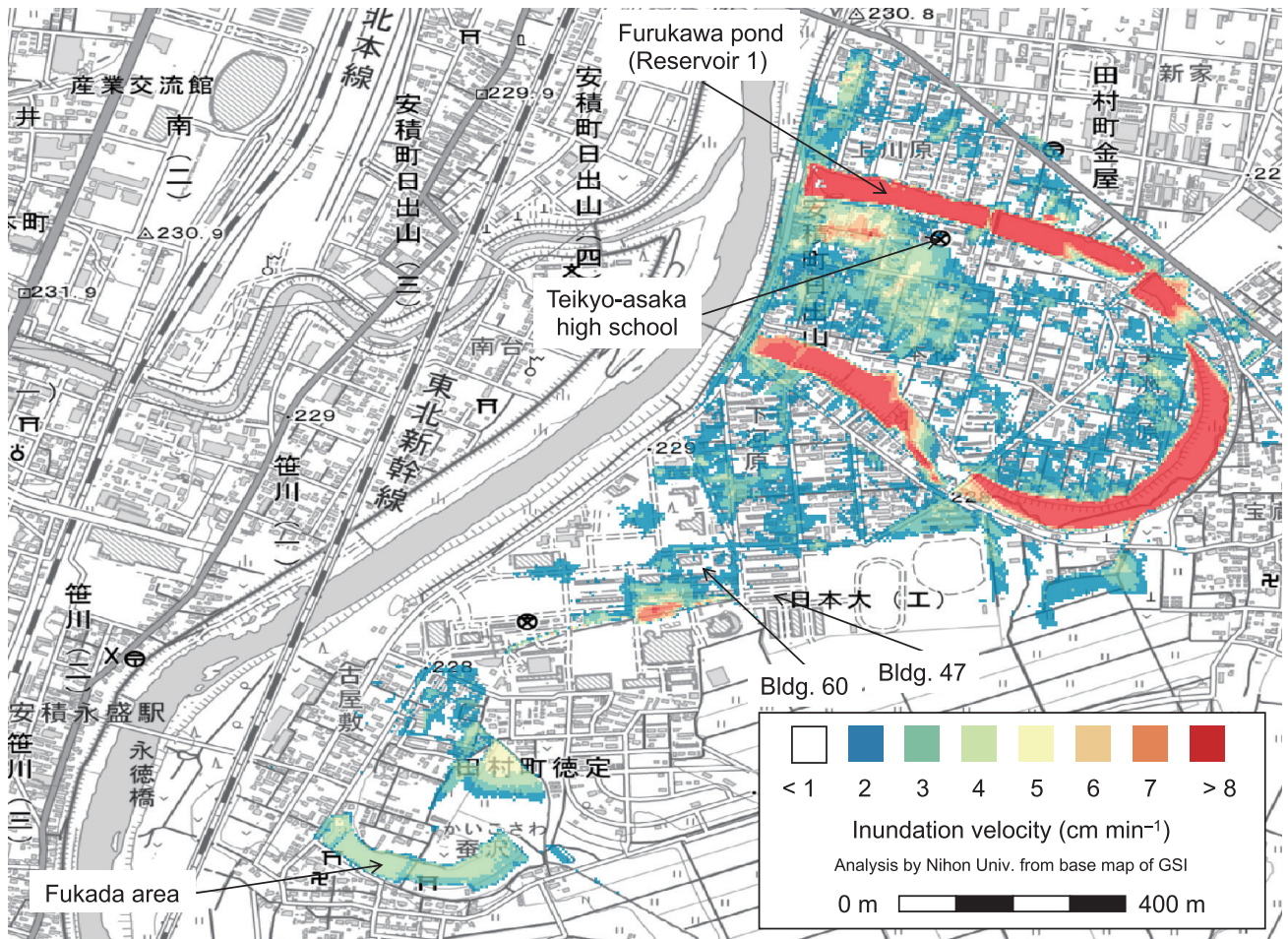


図6 見かけの浸水速度

式(3)から h の大きな地点では時間経過が遅く、 h の小さい場所では時間経過が早くなることから、1回のイテレーションで経過する実時間は h の大小で異なる。式(4)における n は水が空間格子を通過する時間に対応するが実時間に対応しないため、 n を浸水時間に対応させるためには、浸水の開始および最大の浸水深に到達した時間で割り当てる必要がある。このことから、4章で求めた最大浸水深について、キャンパスの周辺地域における浸水開始時刻と最大浸水深の到達時刻の調査結果を基にして、イテレーション数と時間の対応付けを実施することにより、浸水速度を求めることができる。ただし、前述の通り1回のイテレーションで経過する実時間は h の大小で異なるから、本論文で推定される浸水速度は見かけの浸水速度と呼ぶことにする。なお、浸水速度は式(3)の左辺から分かるように、氾濫流の伝搬速度が各地点における浸水開始時刻や浸水速度に影響することから見かけの浸水速度とは線形関係には無く、本論文で推定される見かけの浸水速度は、最大浸水深へ到達するまでの浸水の速さの程度であることに解釈の注意が必要である。

研究対象領域における見かけの浸水速度を推定した結果を図6に示す。図4から、帝京安積高校の西側地区の浸水深が2.0~5.0mを除くと、古川池の第1池を挟んで北側および南側の地区について浸水深は1.0~2.0mであるが、図

6における同じ地区の見かけの浸水速度は北側と比較して南側で速くなる顕著な差が見られた。また、研究対象領域の南西部にある深田地区においても、同様な浸水深となる他地区と比較して見かけの浸水速度が速くなる傾向が見られた。これは、対象となる地点における標高が他の地点よりも低いということのみならず、周囲の標高の違いによる浸水高を算定するための勾配が変化することから、最大浸水深へ到達するまでのイテレーション数、つまり浸水速度の推定へ寄与するためであると考えられた。

6. まとめ

本研究ではKinematic waveモデルに基づく簡易な最大浸水深の推定手法を提案し、東日本台風によるキャンパスとその周辺地域における最大浸水深を推定した。推定結果を現地調査により評価した結果は $-0.15 \pm 0.28\text{m}$ であり、使用したDEMの精度を考慮すると最大浸水深の推定結果は測定結果と調和的であった。

浸水開始時刻と最大浸水深の到達時刻の調査結果を基にして、イテレーション数と時間を対応付けて見かけの浸水速度を求めた結果、古川池の第1池を挟んで南北の各地区について同じ浸水深の地区であっても、北側と比較して南側で速くなる顕著な差が見られた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、日本大学工学部土木工学科の高橋迪夫名誉教授、長林久夫名誉教授、金山進教授には有益な議論とご助言を頂いた。本研究の浸水深の計測結果は、キャンパス内の水準測量の成果を日本大学工学部土木工学科の知野泰明准教授にご提供頂き、キャンパス周辺地域については日本大学大学院工学研究科情報工学専攻（現所属、アルプスアルパイン株式会社）の佐藤直人氏に取りまとめて頂いた。また、本研究は郡山市および「キャンパス強靱化プロジェクト」の一環として日本大学工学部長指定研究（特別研究）の助成を受けた。ここに記し、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 気象庁: 顕著な災害を起こした自然現象の名称について, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/meishou/meishou.html>. (Accessed 2020.9.15)
- 2) Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 3) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬 賢, 市川 温, 横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, 663/II-53, pp.1-10, 2000.
- 4) 山口悟史, 岩村一昭: Dynamic DDMによる氾濫シミュレーションの高速化, 情報処理学会論文誌, 48 (SIG 6), pp.92-103, 2007.
- 5) 国土地理院: 数値標高モデル, <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>. (Accessed 2020.9.15)
- 6) 舩谷敬一, 馬籠 純: 数値標高モデルのみによる簡易な洪水氾濫域予測法, GIS -理論と応用, 22(1), pp.15-22, 2014.

日本大学工学部紀要

第62巻第2号

令和3年3月23日 印刷

令和3年3月25日 発行

非 売 品

編集兼
発行者

日本大学工学部工学研究所

〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1

Tel. (024) 956-8648

〈e-mail address〉 ceb.kenkyu@nihon-u.ac.jp

印刷者

共栄印刷株式会社

〒963-0724 福島県郡山市田村町上行合字西川原7-5

Tel. (024) 943-0001(代)



JOURNAL OF THE COLLEGE OF ENGINEERING
NIHON UNIVERSITY
Vol. LX II, No. 2, 2021
CONTENTS

ENGINEERING

Feasibility study of simplified estimation for inundation height caused by Typhoon Hagibis 2019

..... Kazuki NAKAMURA (1)