

平成 27 年 9 月鬼怒川流域における洪水流・氾濫流の 一体解析に基づく水害リスク軽減策に関する研究

田端 幸輔¹・福岡 捷二²・吉井 拓也³

¹正会員 中央大学研究開発機構准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

E-mail: k-tabata @tamacc.chuo-u.ac.jp

²フェロー 中央大学研究開発機構教授 (同上)

E-mail: sfuku@tamacc.chuo-u.ac.jp

³正会員 国土交通省関東地方整備局河川計画課長 (〒330-9724 埼玉県さいたま市中央区新都心 2-1)

E-mail: yoshii-t22aa@mlit.go.jp

水害リスク軽減に向けた危機管理対策を検討するためには、河川からの氾濫流量ハイドログラフを適切に見積もること、実際に生じた大規模氾濫の実測データに基づく氾濫水の挙動が氾濫計算によってどの程度再現可能であるのかを明らかにすることが求められる。本論文では、鬼怒川平成 27 年 9 月洪水を対象に、観測水面形情報に基づいた洪水流と氾濫流の一体解析により得られた溢水及び堤防決壊による氾濫流量ハイドログラフを用いて氾濫計算を実施し、痕跡調査結果、防犯カメラ映像から得られた浸水到達時間情報を基に氾濫計算の有効性を検証した。更に、決壊箇所付近の家屋被害、内水河川や道路盛土と氾濫流挙動の関係、安全避難のためのリードタイムを検討し、今後の水害リスク軽減策に必要な課題を提示した。

Key Words: Kinu River, 2015 flood, inundation, flood flow and inundation analysis, flood risk

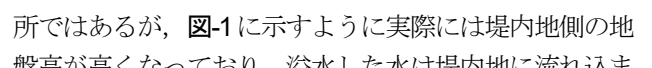
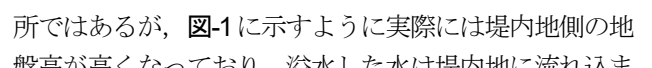
1. 序論

鬼怒川平成 27 年 9 月洪水では、25.35k 左岸付近等の若宮戸地点と 21.0k 左岸三坂地点からの氾濫により、常総市が広範囲に亘って被害を受けた。今後、流域の水害リスクを軽減していくためには、今次水害での氾濫流量ハイドログラフを適切に見積もり、実際に生じた大規模氾濫の実測データを基本に、氾濫水の挙動を解析によってどの程度再現可能であるのかを調べ、採るべき危機管理対策等を明らかにすることが重要である。福岡ら¹⁾は、溢水や堤防決壊による影響が観測水面形情報に現れていると考え、鬼怒川平成 27 年 9 月洪水で観測された水面形の時間変化を再現する解析を行うことで、河道内貯留、溢水及び堤防決壊箇所の氾濫流量ハイドログラフが推定可能となることを示した。また、関東地方整備局は、氾濫被害を受けた常総市の家屋に残された痕跡水深の調査を広範囲に亘って行い、更に、常総市内の 6 箇所の民間事業所の協力を得て各店舗に設置されている防犯カメラ映像から、浸水開始時刻に関する情報を得ている。これらの大変貴重な現地観測データは、これまで困難であった氾濫解析手法の有効性の検証を可能とするものである。

本論文では、鬼怒川洪水水面形の観測情報に基づいた洪水氾濫の一体解析により得られた溢水及び堤防決壊に

よる氾濫流量ハイドログラフを用いて氾濫流解析を行い、現地観測データに基づいて解析結果の妥当性を検証する。また、構築したモデルを用いて、家屋被害の評価、内水小河川及び主要幹線道路と氾濫水挙動との関係、避難に必要なリードタイム等について検討し、水害リスク軽減策に必要な課題を提示する。

2. 観測水面形情報に基づいた洪水流・氾濫流一体解析による氾濫流量ハイドログラフの推定

著者ら¹⁾は、鬼怒川 46k 地点より下流区間を対象に、観測水面形情報に基づいた洪水流と氾濫流の一体解析を行った。本文では、著者らの検討から得られた解析結果を用いて溢水、決壊に伴う氾濫量を見積もる。先の検討では、45.9k 左岸付近の伊佐山地区は、溢水が生じた箇所ではあるが、に示すように実際には堤内地側の地盤高が高くなっており、溢水した水は堤内地に流れ込まず河道へ戻っていた。著者らは先の検討時にこの事実気付かず解析を行ったため、やや大きな氾濫流量(約 4000 万 m³)が算出されていた。本論文では先の論文と同じ解析モデルを用い、に示す赤破線部分も洪水流下断面として伊佐山付近の平面形、横断面形状を修正した。

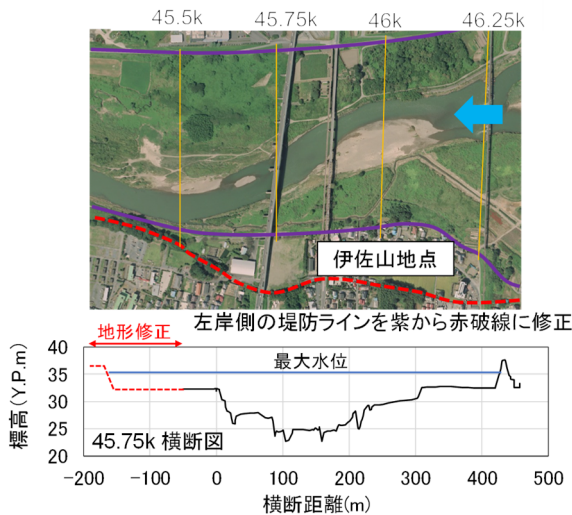


図-1 伊佐山地点の地形状況

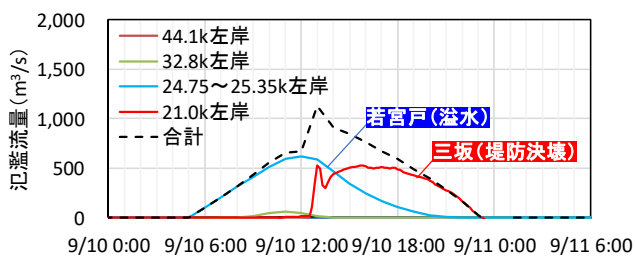


図-2 氾濫流量ヒドログラフ

46k より下流区間では、概ね 1~8km 間隔で計 16 地点において縦断的に水位が観測されている⁹⁾。ここでは、溢水及び決壊箇所付近も含めた 46k 下流区間の水面形時間変化の解析値が観測値を再現するように、洪水流及び氾濫流の再計算を行った。図-2 に、鬼怒川左岸堤防からの溢水及び堤防決壊箇所からの氾濫流量ヒドログラフを示す。常総市街地の大規模浸水氾濫を引き起こした若宮戸と三坂地点における 2 つの氾濫流量の規模は最大で 500m³/s 以上に達した。第一波目は、9/10 6:00 頃から始まった若宮戸地点からの溢水によるもので、第二波は 9/10 12:50 における三坂地点の堤防決壊によるものである。氾濫ボリュームは、若宮戸地点で 1705 万 m³、三坂地点で 1456 万 m³ の合計 3161 万 m³ となる。なお、国土交通省の試算²⁾では約 3400 万 m³、佐山ら³⁾による痕跡調査結果と空中写真による分析結果は約 3800 万 m³、大槻ら⁴⁾が氾濫解析を行うために鎌庭観測所水位を決壊地点の痕跡水位に適合するよう引き伸ばして推算した結果は約 4400 万 m³ と試算されている。本検討は、堤防断面形状を取り込んで河道地形をモデル化し、河道内の溢水、堤防決壊による氾濫区間も含めて縦断的に多点で計測された水面形時間変化を再現するように、河道の洪水流と溢水・堤防決壊による流出流を一体的に解析したものである。これより得られた流出流量ヒドログラフは、算定手法から見て最も信頼性の高い解析結果であると考えられる。本論文では、この流出流量ヒドログラフを用いて氾濫計算を行った。

3. 常総市街地の氾濫流解析の再現性検証

(1) 鬼怒川の浸水氾濫に関する調査・研究

これまで、大槻ら⁴⁾、坂本ら⁵⁾によって鬼怒川平成 27 年 9 月洪水の浸水氾濫に関する調査研究が行われている。この内、浸水地点と時刻が特定可能であった主な情報を抽出し整理すると、氾濫水の挙動は概ね次のとおりである。まず、若宮戸地点から溢水氾濫した水が、東方向に広がり、水海道付近で鬼怒川に合流する八間堀川(図-3(a)参照)をはじめとした内水小河川群に流入した。しかし、小河川群の鬼怒川や小貝川に連結された樋門は閉じられていた。このため、八間堀川等を流下した水は行き場を失い、旧八間堀川等下流河川の水位を上昇させた。その結果、9/10 15:00 頃に旧八間堀川周辺で小規模な氾濫を引き起こした。国土地理院によって空中写真が撮影された 9/10 18:00 頃には、氾濫水は県道 123 号線あたりまで到達していた。その後、三坂地点の堤防決壊による氾濫水が南下し、9/11 の未明にかけて常総市役所付近で大規模な浸水が生じた。

大槻ら⁴⁾は、八間堀川に流入した氾濫水が高速で流下し、旧八間堀川から氾濫が生じたことに着目し、八間堀川を一次元不定流モデル、氾濫域を平面二次元モデルとし、両者を組み合わせた氾濫流解析モデルを構築している。これによって、旧八間堀川から先に氾濫したことを説明できること、八間堀川が氾濫水の挙動に大きな影響を及ぼしたことを示している。しかし、洪水氾濫の情報が少ない時の報告の重要性を重視したためか、鬼怒川本川の洪水と氾濫流とを一体的に捉えたものではなく、氾濫流量には鎌庭の観測水位から算出された概算値が用いられている。また、100m×50m と大きいサイズのメッシュが採用されており、道路網の存在や微地形、家屋群の配置等を取り込めず、これら周辺の流れを適切に表現することは困難であったと考えられる。

(2) 検討方法及び検討条件

本検討では、常総市街地を対象に八間堀川や道路網も含めた氾濫計算モデルを構築し、氾濫水の到達時間、浸水深等氾濫流の再現性を検証した。構築した氾濫解析モデルを図-3 に示す。解析メッシュはデカルト座標系の直交構造格子で構築し、八間堀川や主要幹線道路、個々の家屋を概ね表現できるように計算メッシュサイズを 5m × 5m とした。計算メッシュの平均地盤高は、平成 27 年 9 月洪水氾濫の後の航空レーザー計測によって得られた DTM (Digital Terrain Model) データ(以下、LP データ)を基に設定した。また、国土地理院が公表している家屋、水域、道路網の GIS データに基づいて土地利用区分を設定し、各メッシュにこれらの情報を与えた。なお、家屋、水域、道路以外の領域はすべて農地とした。氾濫流解析には平

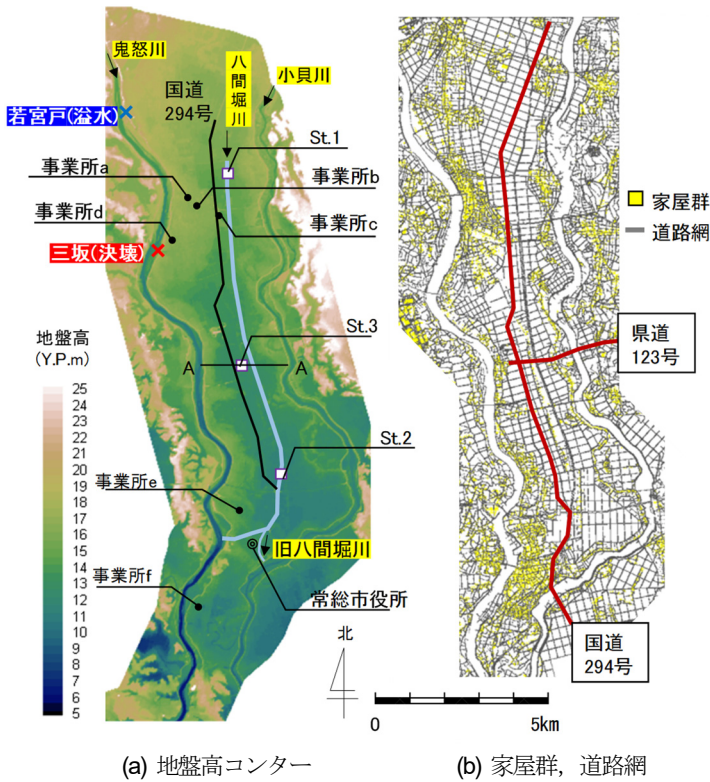


図-3 構築した氾濫解析モデル

表-1 各 Case で設定した粗度係数

Case	農地	道路	水域	Dry時 (水深 $\leq 1\text{m}$)
1	0.040	0.030	0.025	—
2	0.070	0.025	0.020	—
3	0.070	0.025	0.020	0.100

面二次元解析手法を用いた。ただし、家屋の透過率は考慮せず、家屋メッシュは不透過条件として扱った。また、家屋流失を表現するため、佐藤らの研究⁹⁾を参考に家屋近傍の流速 v の二乗と水深 h の積で表される v^2h を指標とし、この値が 2.5 を超えると家屋が流失するものとして解析した。計算の安定化のため、最小水深 $h_c (=0.1\text{m})$ を考慮し、これより水深が小さい場合は運動量フラックスをゼロとした。

マニングの粗度係数は、表-1 に示す 3 つの Case で設定し、後に示す浸水痕跡分布、防犯カメラ映像に基づいた浸水到達時間を概ね説明できる結果を採用するものとした。Case1 では一般的な氾濫解析で用いられる値を与えた。また、Case2 では農地に高めの粗度係数値を設定するとともに、福岡らの研究⁷⁾を参考に幹線道路における高流速の発生が氾濫流に影響を及ぼすことを踏まえて道路の粗度係数をやや小さめに設定した。また、今次水害では、若宮戸の溢水氾濫から約 7 時間後に三坂地点の堤防が決壊したことから、2 地点から 2 つの氾濫流量ハイドログラフが常総市街地に流入した。そこで、Dry 領域に流れ込む氾濫フロント部分には大きな抵抗が働き、一度 Wet 状態となった箇所では抵抗は軽減すると考え、Case3 では粗度係数に関する Dry/Wet 判定水深 $h_0 (=1.0\text{m})$

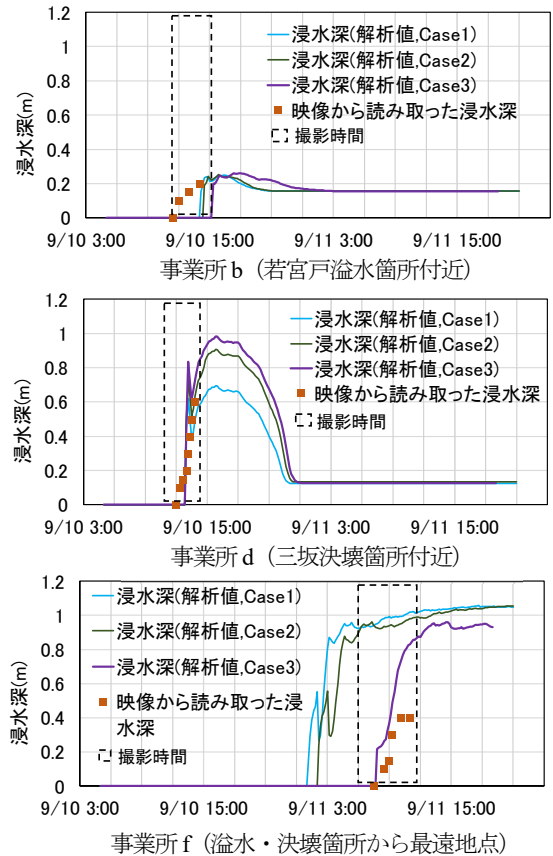


図-4 カメラ映像から判断した浸水深と解析結果の比較

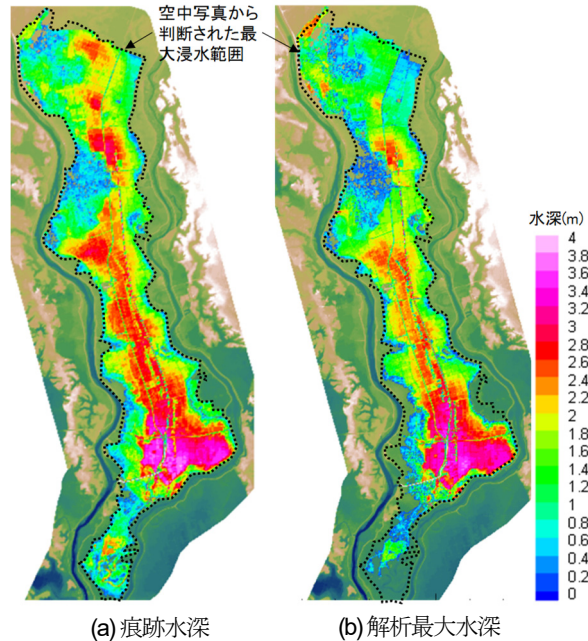


図-5 痕跡水深と解析最大水深の差のコンター

を導入し、水深が h_0 以下の箇所では粗度係数を 0.10、 h_0 以上または一度 Wet 判定となった箇所では土地利用毎に設定した粗度係数を与えた。決壊が生じた直後の 9/10 13:00 頃にポンプ排水機場の運転が停止し、9/10 22:30 頃に再び排水機場の運転が開始された。ただし、総排水量は 90 万 m^3 程度²⁾と総氾濫量に比べて小さく、氾濫水挙動に大きな影響を及ぼさないものと考え、本検討ではポンプ排水量を考慮せずに解析を行った。

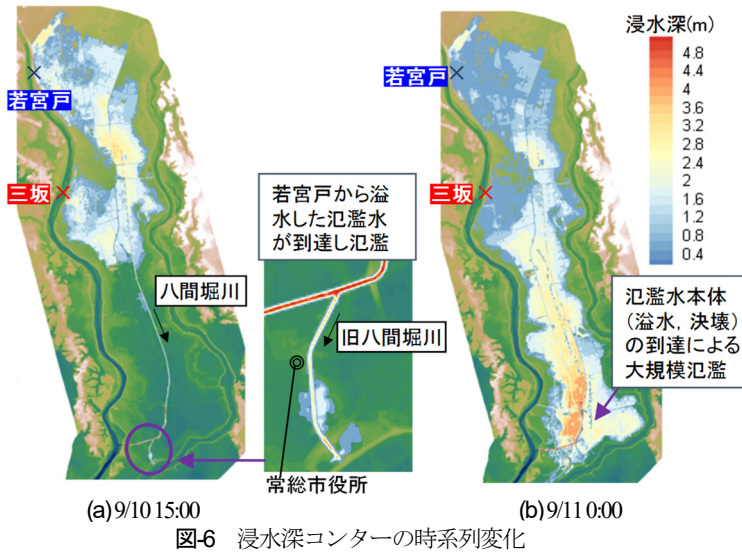


図-6 浸水深コンターの時系列変化

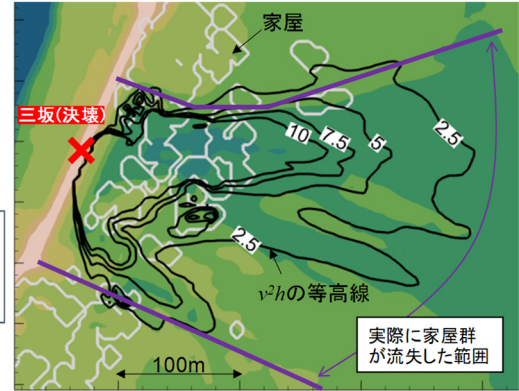


図-7 堤防決壊箇所周辺の v^2h (最大値)の等高線と実際の家屋流失範囲

(3) 実測データに基づいた氾濫流計算の再現性検証

ここではa~fの地点のうち、若宮戸溢水箇所付近(事業所 b)、三坂決壊点付近(事業所 d)、決壊地点から最も離れた地点(事業所 f)に着目し、防犯カメラ映像から判断した浸水深と、解析結果の比較を行った。図-4に事業所 b, d, fの浸水深の時間変化を示す。事業所 bは家屋群が密集したエリア内に位置しているため、浸水開始時刻を十分再現することが困難であったが、若宮戸からの氾濫水によって、実績浸水開始時刻付近で浸水が開始することが表現できた。事業所 dでは、実績と同様、堤防決壊直後に急激に浸水が開始することが確認できる。氾濫箇所から離れた事業所 fについては、一般的な粗度係数を与えた Case1 では、実績よりもかなり早めに浸水が開始している。粗度係数を調整した Case2 では Case1 よりもやや遅れて浸水が開始する様子が確認できるが、Dry/Wet状態の粗度を考慮した Case3 が最も観測データを説明できている。以上より、事業所 bのような市街地密集エリアでは、浸水到達時間が3時間程度遅れる結果となったが、その他の箇所では Case3 の考え方で粗度係数を調整することで、防犯カメラ映像から判断した浸水開始時刻を概ね1時間以内の誤差で捉えることが出来た。このことから、若宮戸及び三坂地点からの2波形の氾濫水の拡がりの特徴をある程度表現できたものと考えられる。以降は Case3 の結果に基づいて考察を行う。

図-5に、痕跡水深調査結果と本解析で得られた最大浸水深コンターの比較を示す。本解析の最大浸水面積は約33km²、最大浸水深は約3.8mとなり、佐山ら⁹⁾の調査検討結果(最大浸水面積約40km²、最大浸水深3.8m)に対し浸水面積が小さめの値となった。また、浸水範囲の北端や常総市役所より南側のエリアでは痕跡水深よりも1m程度小さくなる箇所も見られたが、全体的には概ね0.3m以内の誤差で痕跡水深結果を説明している。

図-6に、9/10 15:00と9/11 0:00時点の浸水深コンターを

示す。三坂決壊より前に、若宮戸からの氾濫水の一部が八間堀川に流入し、八間堀川を経由して旧八間堀川付近に先に到達しており、9/10 15:00頃(図-6(a))から常総市役所付近で小規模な浸水が生じる。このとき、三坂の堤防決壊による氾濫水が若宮戸から溢水した氾濫水と合わさる様子が確認できた。また、9/11 0:00(図-6(b))には、氾濫水本体が常総市役所付近に到達し、旧八間堀川で先に浸水が生じていた箇所ですべて再び大規模な浸水が生じる結果が得られた。これらの結果は、3.(1)で示した既往の調査結果⁴⁵⁾と概ね合致する。以上の検討より、本解析が浸水開始時刻、浸水深及び範囲の実測データを概略説明できることが示された。

4. 水害リスク軽減策に向けた検討

(1) 三坂の堤防決壊箇所付近の家屋被害の評価

氾濫による水害リスク軽減策を考える上で、堤防決壊による家屋流出被害を予測することは重要である。一般に、佐藤らの研究⁹⁾を参考に v^2h が閾値2.5を超えると家屋が流失するとして家屋流失の危険性が評価される。ここでは家屋流失被害が生じた三坂の堤防決壊箇所周辺において、 v^2h を指標として用いることの妥当性を確認した。図-7に堤防決壊箇所周辺における v^2h の最大値の等高線と実際の家屋流失範囲を示す。図中の白色枠は家屋群、紫色線は実際の家屋流失範囲である。決壊箇所付近では、 v^2h は10を超える大きな値をとるが、決壊箇所から離れるに連れて値が低減し、東に300m離れると2.5を下回っている。 v^2h が2.5を超える領域は、実際に家屋が流失した範囲と概ね合致する結果が得られた。以上より、佐藤らの主張する $v^2h=2.5$ を家屋流失判定の目安とすることは概ね妥当で、決壊箇所から約300m以内の範囲で特に家屋流失の危険性が高まることが示された。

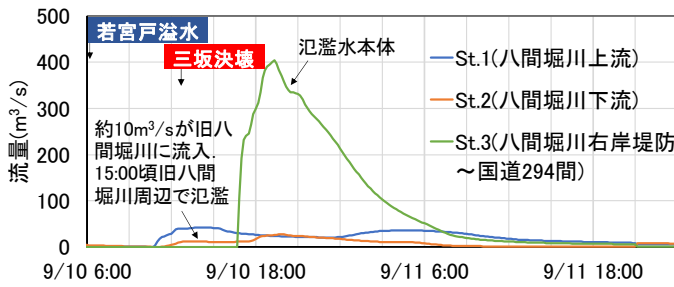


図-8 St.1~3における流量ハイドログラフ

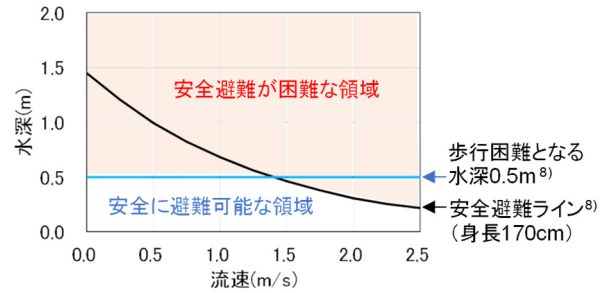
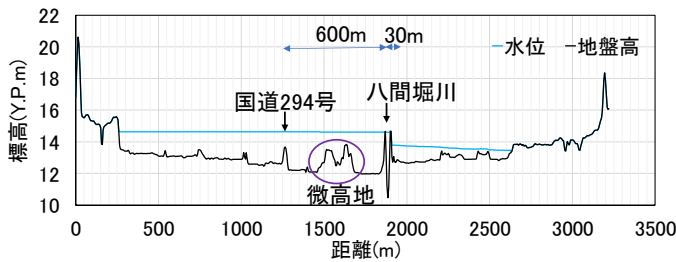
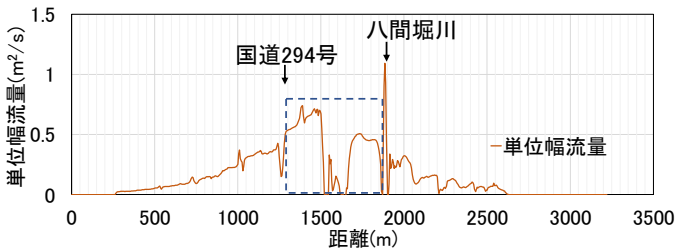


図-10 歩行避難困難となる水深、流速の組み合わせ



(a) 地盤高の分布



(b) 単位幅流量の分布

図-9 八間堀川、国道294号を含むA-A断面における地盤高と単位幅流量

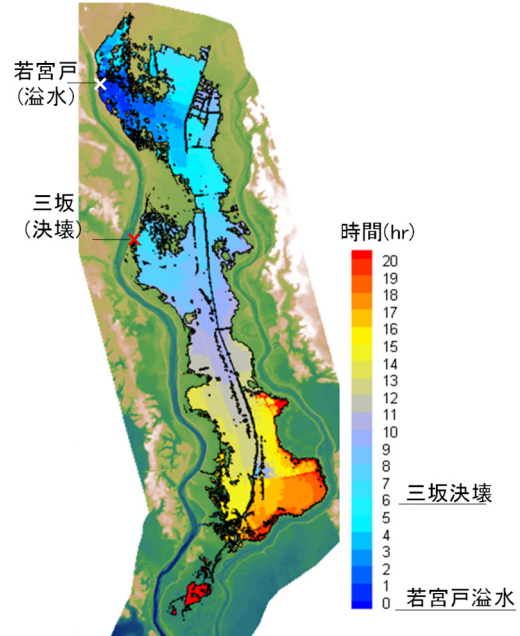


図-11 若宮戸の溢水開始から歩行避難困難となるまでの時間の空間分布

(2) 八間堀川、幹線道路が氾濫水の挙動に及ぼした影響

図-8,9 に本解析によって得られた八間堀川及び八間堀川右岸堤防と国道294号の道路盛土の間の流量ハイドログラフと、A-A断面(図-3(a))における地盤高と単位幅流量を示す。若宮戸の溢水によって氾濫した水は、八間堀川に9/10 10:00頃流入した。これにより、八間堀川の流量は短時間で $50\text{m}^3/\text{s}$ 近くにまで急増している。流入した水は、越水を伴いながら八間堀川を流下したため、St.2では流量ハイドログラフが大きく変形しているが、三坂決壊時点では既に $10\text{m}^3/\text{s}$ 以上の水が流下し、このほとんどが旧八間堀川に流入したことで15:00頃に旧八間堀川周辺部の氾濫を引き起こした(図-6(a))。一方、常総市を南北方向に走り、八間堀川の西側を並走する国道294号は、道路盛土によって周囲の農地よりも1.3m程度比高が高いことから、八間堀川より早く道路上に氾濫水が伝わることはなかった。しかし、若宮戸の溢水と三坂の堤防決壊による氾濫水が合わさり八間堀川右岸堤防と国道294号との間に流れ込んだ大量の水は、これら二つの線構造物によって流下方向に規定され、南に向かって素早く流下した。単位幅流量としては八間堀川の方が大き

いが、線構造物によって幅600mで規定されており、流量としてはSt.3で最大 $400\text{m}^3/\text{s}$ にも及んでいたことが分かった。既往検討⁴⁾でも指摘されていたように八間堀川の水が旧八間堀川周辺の第一波の氾濫に影響を及ぼしたが、本検討により八間堀川右岸堤防と国道294号の道路盛土の間に氾濫水本体が大量に流れたことが、常総市役所付近の大規模な第二波の浸水の大きな原因であることが定量的に明らかとなった。

(3) 氾濫発生から歩行避難困難となるまでの時間

水害リスクには様々な指標を取ることが考えられるが、ここでは歩行避難の観点から検討を行う。これまでに、洪水氾濫時における浸水深/身長と流速を指標とした歩行避難困難領域図や、水深0.5m以上では歩行避難が困難となった事例が示されている⁸⁾。本検討では、これらの知見から歩行避難困難となる水深、流速の組み合わせ(身長170cmとした場合)を図-10のように設定した。そして、氾濫流解析結果から得られた浸水深、流速の時空間分布を用いて、若宮戸地点で溢水が生じてから歩行避難困難となるまでの時間を全てのメッシュで算出した。

図-11 に、若宮戸の溢水が生じた後に安全に歩行避難するために必要なリードタイムの空間分布を示す。若宮戸付近では溢水から5時間後、三坂付近では堤防決壊から3時間後には安全避難困難と評価される。また、八間堀川の東側(赤色の領域)ではリードタイムが約18時間であるのに対し、西側(黄色の領域)は13時間程度と、東側に比べ約5時間短い。これは、八間堀川の西側の領域では若宮戸の溢水と三坂の決壊による氾濫水が合わさったことで大量の水が素早く流下したためである。以上より、八間堀川西側では、最大浸水深は小さいがリードタイムは短く、避難活動が困難な状況にあったことが分かった。

今後は、様々な破堤箇所を想定し、決壊箇所付近での家屋被害や、内水河川・幹線道路網が氾濫流下特性、氾濫被害規模に及ぼす影響を分析することが必要である。これを基に避難計画ああを含めた危機管理ソフト対策を考え、常総市のハザードマップをより実のあるものにしていくことが課題となる。このためには洪水外力、堤防の土質・構造を考慮して堤防脆弱性指標⁹⁾等を用いて堤防破壊危険性を推定し、水害リスク軽減策の信頼性を高めていくことが重要である。

5. 結論

鬼怒川平成27年9月洪水を対象とし、観測水面形の時間変化に基づいた洪水流と氾濫流の一体解析によって算出された若宮戸と三坂地点からの氾濫流量ハイドログラフを用いて氾濫流解析を実施した。これにより、痕跡水深や防犯カメラ映像から得られた浸水深時間変化の特徴を概略説明できることを示した。

一般的に用いられる流速の二乗と水深の積で表される指標 v^2h によって三坂決壊箇所周辺部の家屋流失範囲を概ね説明でき、決壊箇所から300m以内の範囲で特に被害危険性が高まることを示した。また、八間堀川が旧八間堀川周辺の第一波の氾濫に影響を及ぼしたことに加えて、八間堀川右岸堤防と国道294号の道路盛土の間を氾

濫水本体が大量に流れたことが、常総市役所付近の大規模な第二波の浸水の大きな原因であることを定量的に明らかにした。更に、安全歩行避難のためのリードタイムの空間分布を算出し、若宮戸付近では溢水から5時間後、三坂付近では堤防決壊から3時間後には安全避難が困難であったこと、八間堀川の東側と西側においてリードタイムに5時間程度の差があったことを定量的に示した。

謝辞：本研究は、国土交通省河川砂防技術研究開発制度(流域計画・流域管理課題分野)の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 田端幸輔, 出口桂輔: 平成27年9月洪水における鬼怒川下流区間の流下能力, 河道貯留及び河道安定性の検討, 河川技術論文集, 第22巻, pp.373-378, 2016.
- 2) 国土交通省関東地方整備局: 『平成27年9月関東・東北豪雨』の鬼怒川における洪水被害等について, 資料1, 2015.
- 3) 佐山敬洋, 大槻順朗, 永野博之, 二瓶泰雄: 浸水深の空間分布, 2015年関東・東北豪雨災害土木学会・地盤工学会合同調査団: 平成27年9月関東・東北豪雨関東地方災害調査報告書, pp.59-62, 2016.
- 4) 大槻順朗, 二瓶泰雄, M.A.C.Niroshinie: 2015年関東・東北豪雨における鬼怒川氾濫による常総市の洪水氾濫状況, 河川技術論文集, 第22巻, pp.315-320, 2016.
- 5) 坂本貴啓, 佐藤裕和, 白川直樹: 2015年鬼怒川水害における被災地初動応答の調査・分析, 自然災害科学, 36-1, pp.51-72, 2017.
- 6) 佐藤 智, 今村文彦, 首藤伸夫: 洪水氾濫の数値計算および家屋被害について. 第33回水理講演会論文集, pp.331-336, 1989.
- 7) 福岡捷二, 川嶋幹雄, 松永宜夫, 前内永敏: 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.51-60, 1994.
- 8) 国土交通省: 地下空間における浸水対策ガイドライン同解説<技術資料>, 2002.
- 9) 田端幸輔, 福岡捷二, 内堀寿美男, 上村勇太: 堤防脆弱性指標に基づいた堤防破壊危険性評価に関する研究—鬼怒川中下流部平成27年9月大洪水を例として—, 河川技術論文集, 第23巻, pp.387-392, 2017.

(2017.9.29 受付)

ON FLOOD RISK REDUCTION BY INTEGRATING ANALYSIS OF FLOOD FLOW AND INUNDATION IN THE KINU RIVER DURING 2015 LARGE FLOOD

Kosuke TABATA, Shoji FUKUOKA and Takuya YOSHII

It is important to estimate inundation discharges due to overtopping and levee failure and clarify how flood flow simulation method can elucidate flood flows based on observed data. In this paper, integrating analysis model of flood flow and inundation using observed water surface profiles is developed in the Kinu River during 2015 flood. It is clarified that the model can explain the observed flood marks and the time when the inundation flow reached. Also, evaluation of the collapsed buildings around the levee failure point, characteristics of the inundation flows and the lead time for safety evacuation are investigated using by the developed model. Furthermore, major issues of the flood risk reduction are discussed.