

2019年長野県千曲川洪水災害における 家屋被害状況と氾濫流況の関係

Bambang PRIYAMBODOHO¹・八木 隆聖¹・木藤 あや音²
石川 彰真¹・呉 修一³

¹ 学生会員 富山県立大学大学院 工学研究科環境工学専攻 (〒939-3980 富山県射水市黒河 5180)

² 学生会員 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科 (〒939-3980 富山県射水市黒河 5180)

³ 正会員 富山県立大学准教授 工学部環境・社会基盤工学科 (〒939-3980 富山県射水市黒河 5180)

E-mail: kure@pu-toyama.ac.jp (Corresponding Author)

2019年10月の台風19号では長野県千曲川で甚大な洪水氾濫および家屋被害が生じた。本論文は、長野市長沼地区の堤防決壊により生じた家屋被害と洪水氾濫流の関係性を明らかにすることを目的に、数値計算により氾濫流の挙動を再現し、現地調査より得られた家屋被害状況に対して考察を行ったものである。決壊した堤防付近に着目した高解像度の氾濫解析を行うことで、甚大な被害を引き起こした氾濫流の2方向への流れを表現することが出来た。家屋の流失や損壊大は、氾濫流の流速が2 m/s以上、浸水深が2 m以上の個所で生じていることを示した。このような2方向の氾濫流の挙動は広域浸水範囲を対象とした氾濫解析では再現が難しく、事前の水平避難などを議論する際は高解像度情報を用いた検討が必要である。

Key Words: flood inundation simulation, building damage, flood damage function, Chikuma River

1. はじめに

近年毎年のように堤防決壊を伴う甚大な洪水被害が日本の各地で発生している。2019年10月に発生した台風19号は、広域での豪雨災害となり、長野県千曲川では甚大な堤防決壊被害が生じた¹⁾。2015年9月関東・東北豪雨での鬼怒川の堤防決壊以降、河川の堤防決壊は驚くべき事例ではなく、家屋の流失や大規模損壊が生じるような事例が数多く確認されている^{2,3)}。このような洪水氾濫から人命を守るためには事前避難が重要であるが、避難場所への避難時に河川の氾濫などにより被災した事例も多数あるため、自宅に留まり2階などへの垂直避難が有効な場合もある。また2020年の新型コロナウイルスの感染拡大状況下では、避難所への不要な集合は所内感染を誘発しかねず、積極的な避難所への避難は避けることも重要となる。このような水平避難と垂直避難の判断を正確に行うためには洪水氾濫が生じた事例で、家屋の被害状況を十分に調査し、水深、流速、流体力、家屋の種類、築年数等に応じて比較検討することが重要となる。

海岸工学の分野では、従来から水害調査マニュアル⁴⁾の整備や、津波の外力と家屋被害の分類を整理すること

が進められており⁵⁾、2011年の東北地方太平洋沖地震での津波被害を契機に津波被害関数に関する多くのデータ・知見がまとめられている。河川の洪水氾濫では、洪水被害関数に関して佐藤ら⁶⁾、鈴木ら⁷⁾、久松ら⁸⁾の取り組みなどがある。佐藤ら⁶⁾は、洪水氾濫計算結果と実際の家屋被害の関係を整理し、流体力が $1.5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ を越えると家屋に何らかの被害が発生し、更に $2.5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ を越えると居住不可能となる家屋が出現することを示している。鈴木ら⁷⁾は、2004年7月新潟豪雨水害による家屋被害調査を実施し、浸水深から家屋被害を推計できる被害関数を構築している。得られた被害関数を、津波氾濫流による家屋被害関数と比較し、流速の相違や漂流物の衝突などの影響を被害関数に含める重要性を示唆している。久松ら⁸⁾は、2015年9月関東・東北豪雨の茨城県常総市周辺を対象に、洪水被害関数を構築し、建物の損害率は階数と建物の構造に大きく影響を受けることを明らかにしている。

このように河川洪水氾濫と家屋被害の関係を明らかにするための研究は存在するが、いまだにデータの蓄積が少ないのが現状である。現在、洪水氾濫時の建物被害調査のガイドラインの取りまとめが進められており^{9,10)}、今後は洪水被害関数の蓄積が促進され、水平・垂直避難

の判断に資する情報の高精度化が可能になると考えられる。実際に、洪水浸水想定区域図では、家屋倒壊等氾濫想定区域が明示されているが、これら対象区域・家屋をより正確、詳細に推定し、事前の水平避難へとつなげる事が今後極めて重要となる。

本論文では、2019年10月の台風19号で生じた長野県千曲川の洪水氾濫を対象とし、長野市長沼地区の堤防決壊により生じた家屋被害と洪水氾濫流の関係を定量的に評価する事を目的とする。これにより、今次災害の洪水氾濫現象のメカニズムを解明するとともに、洪水被害関数のデータを収集し今後の水平避難の適切な実施を促進することへの展開が期待される。

2. 対象地域の概要

台風19号により2019年10月11日から13日にかけて長野県の千曲川上流域で200~400mmの降雨があり、千曲川で多くの堤防決壊・欠損などの被害が生じた¹⁾。千曲川は、信濃川水系で新潟・長野県境より上流が千曲川、下流が信濃川となる。千曲川の流域面積は、7,163km²であり、直轄区間の流路延長は134.9kmである。千曲川および長沼地区の位置関係を図-1に示す。千曲川は、山間狭窄部のせき上げによる洪水リスクが従来から指摘されており、実際に多くの洪水が発生している。平成のみでも、平成7年、10年、11年、16年、18年に洪水氾濫が生じている。甚大な堤防決壊が生じた長沼地区の下流には、立ヶ花狭窄部があり、1000mを超える川幅が120~450m程度にまで減少する²⁾。

この長沼地区で台風19号により甚大な洪水氾濫が生じ、多くの家屋で浸水被害が生じた。長野県内で生じた全壊920棟の9割以上に当たる872棟は長野市で発生している。上述したように長沼地区は洪水リスクが高く、家屋の流失・大規模損壊などが生じた堤防決壊周辺区域は、家屋倒壊等氾濫想定区域に指定されていた¹¹⁾。著者らのグループ¹¹⁾は、長沼地区を対象とした家屋被害調査を行っており、損壊大や流失などの顕著な家屋被害は、堤防決壊箇所から主に2方向に沿って生じていることを明らかにしている。2方向とは後述する図-6に示されるような南西、北西方向の顕著な氾濫流が、微地形・家屋群に沿って生じたものである。また、堤防決壊箇所から約350m離れた家屋でも損壊大の被害を確認している。本洪水氾濫により長野市で2名の死者が生じているが、死因は1階での溺死と水平避難時の溺死と推定されており¹²⁾、2階に垂直避難したが家屋の流失・大規模損壊などにより死亡した事例は現状では確認されていない。

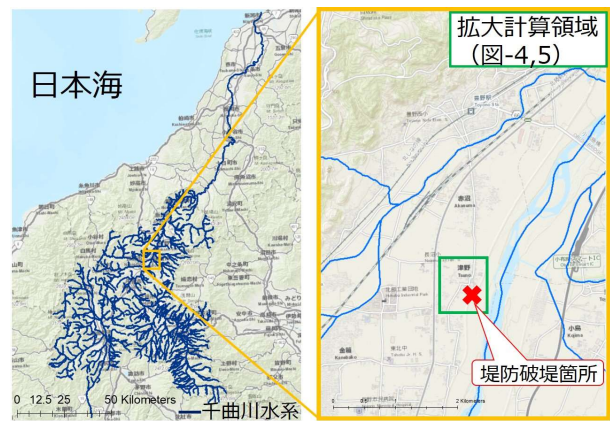


図-1 千曲川および計算対象領域（長沼地区）の位置関係

3. 洪水氾濫解析手法とデータの概要

千曲川の長沼地区における堤防決壊に伴う洪水氾濫を再現するため、以下、二つの洪水氾濫解析を行った。一つは、浸水範囲全体を表現するためのある程度広域の洪水氾濫で、他方は、堤防決壊付近の氾濫流を表現するための高解像度情報を用いた計算である。高解像度の計算結果を用いて家屋被害状況との関係を評価する。以下、各手法とデータの詳細を記す。

(1) 浸水域全体を対象とした洪水氾濫解析

洪水氾濫計算については、著者らのグループが従来から使用している降雨流出計算および2次元不定流計算モデル¹³⁾を用いて行った。しかしながら、本論文では流出計算を省き河道部の1次元不定流計算の上下流端境界条件に観測流量・水位データを使用して計算を行っている。堤内地の標高データとしては、国土地理院の30mメッシュ標高データを使用し、マンニングの粗度係数は0.06とした。河川の1次元不定流計算と氾濫計算の結合部は、両計算の水位、河道兩岸の天端高の関係から本間の越流公式に従い流入出計算が行われる。氾濫計算の空間解像度は30mの構造格子で時間刻み Δt を0.5sとした。

長沼地区の堤防の決壊状況であるが、調査報告書¹⁾によれば、2019年10月13日の2:30に越水開始、4:00に堤防決壊となっている。決壊幅は同報告より70mとなっているが、30mメッシュとの結合を良好に行うため、90mの堤防決壊幅を使用して計算結果の調整を行っている。堤防決壊時の流況は本間の越流公式に従い計算され、90mの決壊区間にわたり堤防高さが1時間で線形的に0になるよう設定した。計算を10月13日0:00に開始し4:00に破堤し、破堤後24時間まで行った。

(2) 堤防決壊付近の高解像度氾濫解析

次に堤防決壊付近の氾濫流の挙動を詳細に表現するため、高解像度情報を用いた洪水氾濫計算を行った。洪水

氾濫計算には iRIC・Nays2D Flood を用いた。本モデルの基礎方程式や計算方法の詳細に関しては参考文献¹⁴⁾を参照されたい。上記した浸水域全体を対象とした洪水氾濫解析手法と同様の不定流計算であり、基礎方程式などに大きな差異は存在しないが、高解像度かつ家屋被害の議論では Nays2D Flood が適してくる可能性を考慮し、本モデルを使用した。これは、Nays2D Flood では氾濫域の家屋の抗力・粗度の表現方法に選択肢が多く、家屋での氾濫水の透過率を考慮した計算の実施なども今後は可能と考えたためである。

地形データは、被災後に国土交通省が計測した空間解像度 2 m の LP データを用い、空間解像度は 2 m で Δt を 0.05 s で計算している。被災後の LP データを用いることは、流出土砂の堆積の影響が及ぶ可能性があるが、利用可能な最も高解像度な地形データであり氾濫流の滞筋に沿った流れの表現など、氾濫流の流速、流向の検討には適していると考え、本研究では被災後の LP データを使用した。また、流失家屋は LP 地形データに含まれず、計算水深への影響は懸念されるが、流失家屋および、その後方家屋群への流速を検討する際には氾濫時の家屋の流失プロセスや流失家屋自体の抗力・透過率などを考慮しなくても、流失家屋周辺の流速の再現は可能と考える。また、流失していない既存家屋は、LP 地形標高データに含まれており、抗力、透過率などの設定を行わずに、LP データそのままを用いて計算を実施している。つまり、家屋が不透水の地形として計算されることになるが、この点の影響は今後検討する必要がある点は注意されたい。

マンシングの粗度係数を 0.03, 0.04, 0.05 とした 3 ケースの計算を行った。計算領域への流入境界条件として、赤堀¹⁵⁾を参考にした。赤堀¹⁵⁾は、氾濫水の総量と氾濫継続時間の関係から、堤防決壊後から氾濫終了までにコンスタントに流出があれば流入量 400 m³/s という値を推測している。本研究では、ピーク時付近はこれを上回る氾濫流が生じたものと考え、堤防決壊箇所から 500, 600 m³/s の 2 ケースの流入量を一定で与えた。その理由は氾濫流の挙動を、定常に近い状態のスナップショットととらえているためである。このようなスナップショットの状態では、堤防決壊の時間変化を堤防高さが 1 時間で線形的に 0 になるよう設定するなど曖昧な状況があるためである。この (1) の流入境界条件でも 400~700 m³/s 程度の流入が生じていたことを確認している。また、越流公式を用いた堤防決壊付近の河川水位と浸水深の関係から、最大で 600 m³/s 程度の流出は十分に生じると算定されたため、最大を 600 m³/s としている。氾濫域の下流端は自由流出条件としており、下流端の湛水状況は考慮していない。計算期間は 10 月 13 日 3:00 から 6:00 までの 3 時

間を対象とした。

(3) 家屋被害の調査結果

家屋被害の調査結果は、著者らのグループの調査結果¹¹⁾を用いる。水害後に長沼地区を対象とした調査より、流失、損壊大、損壊中、損壊小の建物被害の空間分布を報告している。家屋被害調査・分類は水害調査マニュアルに基づいて行われている。流失および損壊大の被害が、事前の水平避難が必要不可欠であった状況としている。また浸水深も同時に計測されており、それらの値も使用する。

4. 数値計算結果と考察

上記したように、長沼地区における家屋被害の中でも甚大な家屋被害は 2 方向に沿って生じており、2 方向に顕著な氾濫流が生じたことが容易に推測され、複数メディアの氾濫状況の空撮動画からもこの流況が実際に確認されている。以下、洪水氾濫解析により上記の流れの再現が可能かを検証する。

(1) 浸水域全体を対象とした洪水氾濫解析

浸水域全体を対象とした洪水氾濫計算結果を図-2 に示す。これは破堤後 24 時間までの最大深水深を示している。浸水範囲は調査報告書などの浸水調査結果の浸水範囲を良好に再現できていると考える。図-3 に観測と計算より得られた浸水深の比較を示す。この観測結果は二瓶らの調査結果¹¹⁾を用いている。比較より計算結果はある程度良好な一致を示しているが、RMSE が 1.2 m と大きいため今後更なる改善が必要となる。計算値が 6 m を越え過大評価の箇所が 3 地点ほどあるが、これは支川の影響を受けているためである。更に良好な結果を得るためには広域での氾濫解析でも 5 m 程度の地形・空間解像度を用いた計算が必要になると考える。また、破堤プロセスの詳細な組み込みや、排水過程の組み込み¹¹⁾なども、計算結果の改善のためには必要と考えられる。

ここで破堤点付近の流況を確認するため、図-4 に長沼地区の堤防決壊付近を拡大した計算結果を示す。このように解像度 30 m の地形データを用いた解析では、2 方向の氾濫流などの詳細な流況は再現できていないことは明らかである。また確認のため図-5 に 5 m DEM を使用した計算結果の拡大図も示す。こちらの計算では浸水深でのチェックなどの、チューニングは行っていない点に注意されたい。5 m のほうが詳細な流速分布を表現可能ではあるが、2 方向の流況などが確認できるほどではない。よって、これら堤防決壊付近では更に高解像度の計算を実施する必要がある。

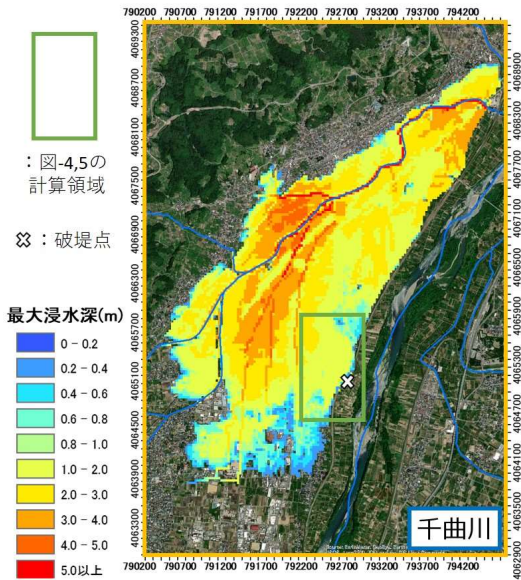


図-2 広域での洪水氾濫解析結果

(2) 堤防決壊付近の高解像度氾濫解析

次に高解像度の洪水氾濫計算を行った結果を示す。図-6 は、計算より得られた最大流速の空間分布に家屋の被害状況¹⁾を追記して示している。流入量は $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、地表面の粗度係数は 0.04 で計算したケースを示している。結果より、南西・北西の2方向に顕著な流れが生じていることがわかる。この早い流れに伴い、流失、損壊大の家屋被害が生じていたことが図より確認される。また、2方向のみならず、北向きの流れも存在し家屋被害も生じていることから、実際には3方向に顕著な流れが発生していたことが確認された。このように詳細な LP 地形データを用いた計算を行うことが破堤点付近の流況を表現するためには必要なことがわかる。図-7 に、最大流速と浸水深および家屋被害の状況をまとめたものを示す。最大流速は6ケースの平均値を用い、浸水深は計算値ではなく現地で計測した実測の値を用いている。流速の値は家屋近傍の代表的な数地点を流況に応じて選定し、それらの平均値を使用している。6ケースの計算の違いでは、流入量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ と $600 \text{ m}^3/\text{s}$ の相違よりも、粗度係数の違いが流速に与える影響が大きかった。このように粗度係数の設定が流速に影響を与えるため、図-7では6ケースの計算結果の平均を使用している。本来であれば最も妥当なケースの値を示したいが、妥当なケースの検証が氾濫流の流速では粗度係数の影響などを受け難いため平均値を使用している。図より、流速が 2 m/s 程度、浸水深が 2 m 程度を越える場合に、家屋の損壊大や流失が生じていることがわかる。また、浸水深が 2 m を超える箇所でも被害が大きくない箇所は流速が小さいことがわかる。

以上、被災後に計測された LP 地形データを用い、空間解像度 2 m の計算を行うことで、破堤点付近の氾濫流

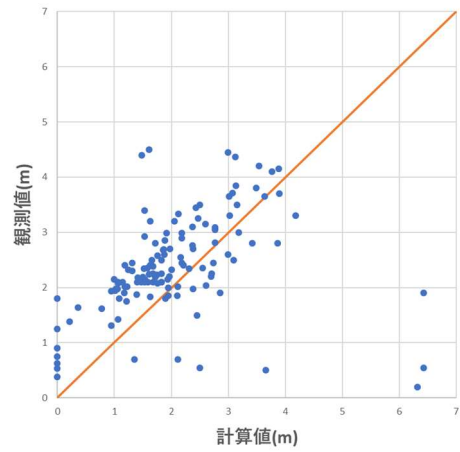


図-3 計算と実測浸水深の比較

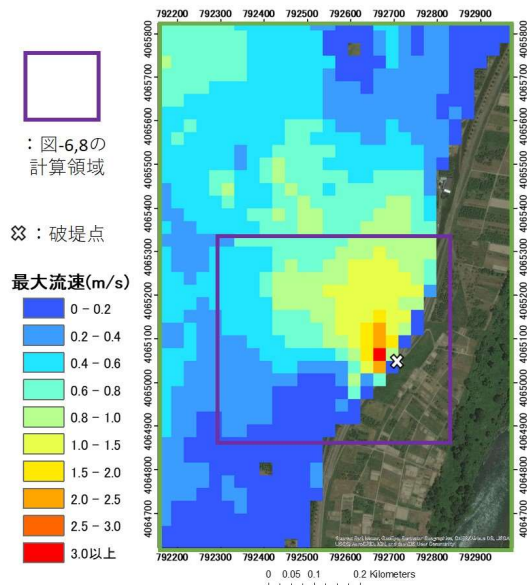


図-4 破堤点付近の最大流速の空間分布

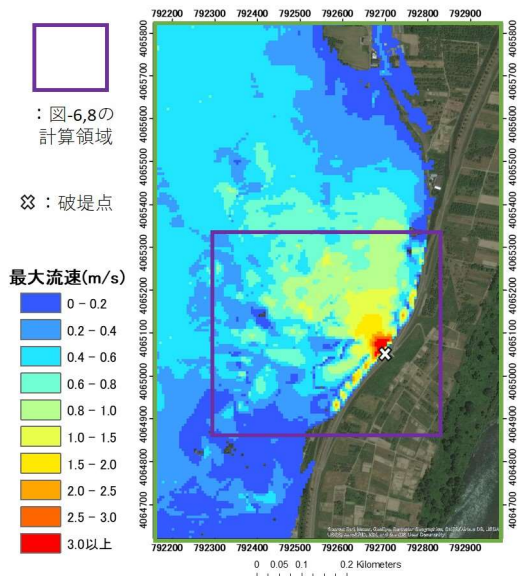


図-5 破堤点付近の最大流速の空間分布(5mDEMを使用)

の挙動を表現することが出来た。これにより、家屋の流

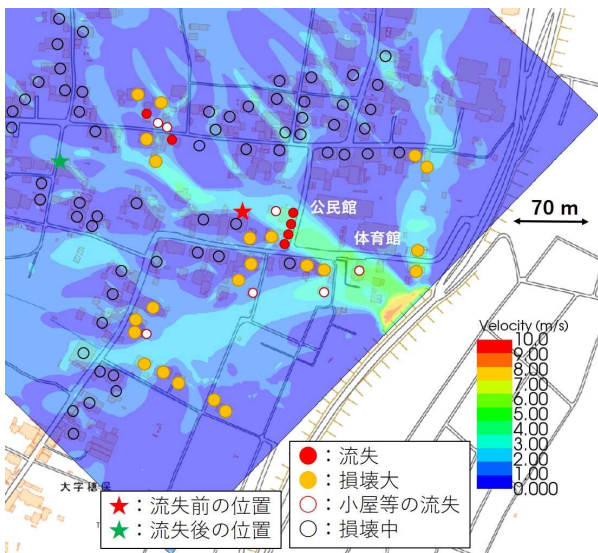


図-6 最大流速の空間分布と家屋被害の関係

失や損壊大は流速が大きい個所で生じていることを確認することが出来た。

(3) 既往研究との比較

浸水深が2mを超えると甚大な家屋被害が生じるといふ結論は、鈴木ら⁷⁾の2004年新潟豪雨での事例でも確認されており、本論文と同様の結論と考えられる。東北地方太平洋沖地震津波では家屋被害と津波外力の関係が整理されており¹⁶⁾、やはり浸水深2mが一つの目安として示されている。本論文では流速も考慮しており、浸水深2m程度でも流速が極めて大きい場合には流失が生じる点は注意が必要である。また流体力に関して、佐藤⁹⁾らの流体力換算では $2.5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 以上で甚大な被害が生じるとしていた。また、河田・中川¹⁷⁾の研究では、流体力が $10 \text{ m}^3/\text{s}^2$ が程度を超えると大破が多くなり、 $20 \text{ m}^3/\text{s}^2$ を超えると流失との明確な関係が見られることが報告されている。本論の結果を用いて流体力(水深×流速の二乗)を算定した結果を図-8に示す。計算より求めたピーク時の水深と流速より算出している。4棟の家屋流失が生じた個所では $20 \text{ m}^3/\text{s}^2$ 程度を越えており、その他、 $2.5, 10 \text{ m}^3/\text{s}^2$ の境界と家屋の被害状況にも、ある程度の相関がみられる。

以上、本論文での家屋被害と流体力の関係は、既往研究の報告と整合性を確認することが出来た。しかしながら、建物の構造や築年数での分類なども、今後は検討が必要である。

5. まとめ

本論文は、2019年台風19号による千曲川での洪水氾濫の状況を数値計算より再現し、長野市長沼地区での家

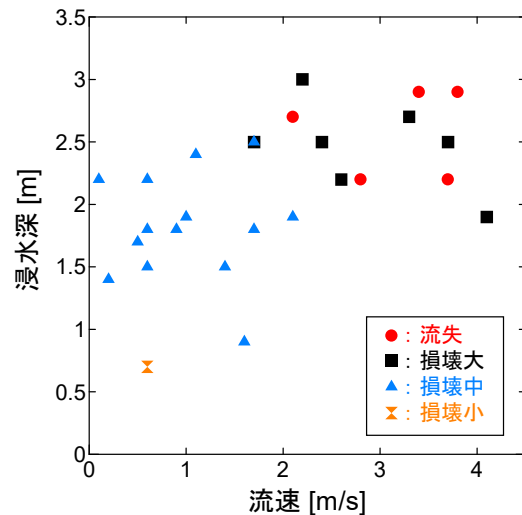


図-7 最大流速、浸水深と家屋被害の関係

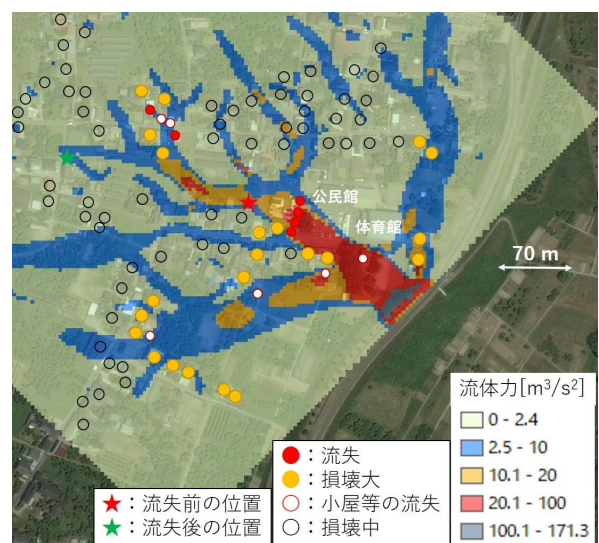


図-8 最大流体力の空間分布と家屋被害の関係

屋被害と氾濫流況の関係を解析したものである。以下に本論文の解析結果より得られた知見を列挙する。

- 1) 30 m DEMデータを用いた浸水範囲全体を表現するための洪水氾濫解析では、堤防決壊付近の流況は表現できず、当然ながら高解像度情報を用いた計算が必要であることを再確認した。
- 2) 被災後のLPデータを用いた高解像度の氾濫解析を行うことで、破堤点付近の流況、特に2方向に沿って流速の大きい流れを表現することが出来た。このような流れは、5 m DEMなどを用いた計算でも確認できていない。
- 3) 甚大な家屋被害として、家屋の流失、大規模損壊が生じていた個所は、上記2方向の顕著な流況が見られた個所であることが確認された。また、最大流速が2 m/s、浸水深が2 mを越えると家屋の流失、大規模損壊が生じることが今次災害の事例でも確認することが出来た。

以上、本論文では家屋被害と洪水氾濫流の関係を高解像度情報を用いた氾濫解析より整理することが出来た。しかしながら、洪水被害関数のデータの蓄積は、本論文のみでは不十分であり、今後の更なる蓄積が重要となってくる。また、解析手法でも氾濫解析の下流端境界条件を自由流失と取り扱う点、堤防破堤、家屋流失の時間的変化が取り込めていない点など、今後も手法の改善は必要である。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP18K04372 および国土交通省河川砂防技術研究開発地域課題分野（河川）「急流河川流域における水害版 BCP の河川計画・管理への実装可能性に関する研究」の助成を受け実施したものである。また、本研究の一部は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20S11813）により実施した。ここに記して謝意を表す次第です。

参考文献

- 1) 土木学会水工学委員会令和元年度台風19号豪雨災害調査団（中部・北陸地区）：報告書，p.222，2020.
- 2) 呉修一，林晃大，森口周二，堀合孝博，田中仁：2015年9月洪井川洪水氾濫を対象とした可能最大流体力の算定，河川技術論文集，Vol.22，pp. 297-302，2016.
- 3) 森口周二，大河原正文，呉修一：2016年台風10号による岩手県内の被害の分析-地盤工学と河川工学の観点から-，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No.2，pp. 149-158，2018.
- 4) 今村文彦：津波被害調査のマニュアル，津波工学研究報告，第15号，1998.
- 5) 越村俊一，行谷佑一，柳澤英明：津波被害関数の構築，土木学会論文集B，Vol.65，No.4，pp. 320-331，2009.
- 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-8610号台風による吉田川の場合-，水理講演会論文集，Vol.33，pp.331-336，1989.
- 7) 鈴木進吾，越村俊一，原田賢治，岡本学，福留邦洋，菅磨志保，河田恵昭：2004年7月新潟豪雨水害の災害調査による家屋被害関数の構築，水工学論文集，Vol.49，pp.439-444，2005.
- 8) 久松力人，河辺賢，水野佑亮，篠塚義庸，堀江 啓：平成27年9月関東・東北豪雨の保険損失に基づく洪水被害関数の構築，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.73，No.4，pp. I_1279-I_1284，2017.
- 9) 土木学会水工学委員会水害対策小委員会水害調査法WG：水害調査ガイドライン，
<http://www.rs.noda.tus.ac.jp/hydrolab/guideline/>（2020/6/30閲覧）
- 10) 呉修一，大槻順朗，八木澤順治，永野博之，二瓶泰雄：水害時における調査方法の標準化および共通データベース構築に向けたガイドラインの提案，河川技術論文集，Vol.23，pp. 67-72，2017.
- 11) 八木隆聖，呉修一，石川彰真：2019年長野県千曲川洪水氾濫を対象とした家屋被害の調査報告と水害調査ガイドライン(案)の改善の提案，河川技術論文集，Vol.26，印刷中，2020.
- 12) 令和元年台風第19号等による災害からの避難に関するワーキンググループ：現地調査・ヒアリング結果，2019.12.18，
<https://www.bousai.go.jp/fusuigai/typhoonworking/pdf/dai1kai/siryou4.pdf>（2020/6/30閲覧）
- 13) 尾島由利香，呉修一，石川彰真，B. A. Priyambodoho，丸谷靖幸：庄川における降雨流出・洪水氾濫解析と可能最大洪水時の利賀ダムの影響評価，土木学会論文集G（環境），Vol.75，No.5，pp.I_281-I_287，2019.
- 14) iRIC Software Nays2D Flood：
<https://i-ric.org/solvers/nays2dflood/>（2020/6/30閲覧）
- 15) 赤堀良介：破堤箇所近傍の流木シミュレーション，土木学会水工学委員会令和元年度台風19号豪雨災害調査団（中部・北陸地区）：報告書，pp.113-120，2020.
- 16) 気象庁：津波の高さと被害との関係（平成23年東北地方太平洋沖地震の事例より），
https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami-kaizen/08tsunami_keihou_kaizen_siryou3.pdf（2020/6/30閲覧）
- 17) 河田恵昭，中川一：三隅川の洪水災害-洪水氾濫と家屋の被害-，京都大学防災研究所年報，第27号，B-2，pp.179-196，1983.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

RELATIONSHIP BETWEEN FLOOD INUNDATION FLOW AND BUILDING DAMAGE DUE TO FLOOD DISASTER AT CHIKUMA RIVER IN NAGANO PREFECTURE IN 2019

Bambang PRIYAMBODOHO, Ryusei YAGI, Shouma ISHIKAWA, Ayane KIDOU and Shuichi KURE

A heavy rainfall caused by Typhoon No. 19 resulted in flood inundation at the Chikuma River in Nagano Prefecture Japan on October 13, 2019. In particular, severe flood inundation damages at Naganuma district along the Chikuma river were observed. In this paper, flood inundation situations and building damages in the district were focused and reported based on an on-site field survey and numerical simulations.

From the results of analysis, it was found that highly damaged houses were concentrated along the two flow pathways in the inundation areas because of the local bathymetry and land surface roughness. Also, highly damaged houses were found in the zone where the maximum flood flow velocities are more than 2 m/s and inundation heights are more than 2 m. We concluded that the high resolution information would be required to represent the flow behavior and building damages near the river bank failor point.