

2015年9月渋井川洪水氾濫を対象とした 可能最大流体力の算定

EVALUATION OF PROBABLE MAXIMUM HYDRODYNAMIC FORCE
OF FLOOD INUNDATION AT THE SHIBUI RIVER IN SEPTEMBER 2015

呉修一¹・林晃大²・森口周二³・堀合孝博⁴・田中仁⁵

Shuichi KURE, Akihiro HAYASHI, Shuji MORIGUCHI, Takahiro HORIAI and Hitoshi TANAKA

¹正会員 博(工) 富山県立大学准教授 工学部環境工学科 (〒939-0398富山県射水市黒河5180)

²正会員 修(工) 東北大学助手 災害科学国際研究所 (〒980-0845宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

³正会員 博(工) 東北大学准教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉468-1)

⁴正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社 東北支社 国土保全事業部 (〒980-0811
宮城県仙台市青葉区一番町1-9-1)

⁵フェロー会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6)

A heavy rainfall on September 11, 2015 resulted in flooding and landslides in Miyagi Prefecture of Tohoku Region, Japan. Especially, flood inundation damages caused in the Shibui River, one of the tributary of Naruse River, was severe. In this paper a rainfall runoff and flood inundation model was applied to the Shibui River in order to reproduce the flood situation in the river. In addition, probable maximum flood and hydrodynamic force of flood inundation were evaluated based on numerical experiments under the several scenarios.

Numerical simulation results showed that the probable maximum hydrodynamic forces of flood inundation at the target area were not so larger as to result in sever damages of around houses under the considered conditions in the paper. However, maximum inundation depths larger than 2.4 m were computed in some areas, and those areas are need to be considered as high risk zones.

Key Words : Shibui River, PMF, probable maximum hydrodynamic force of flood inundation

1. はじめに

2015年9月関東・東北豪雨では、東北地方でも多くの豪雨被害が生じた。鳴瀬川水系多田川支川の渋井川(流域面積: 18.6 km²)では堤防決壊に伴う洪水氾濫により、住宅の床上・床下浸水や農地の冠水などが生じた¹⁾。しかしながら利根川水系鬼怒川(流域面積: 1760 km²)の洪水氾濫被害²⁾と比較すると流域面積・河道幅等の相違に伴い洪水氾濫流の挙動が大きく異なり、家屋の全壊や流失といった被害は渋井川では生じていない。だが渋井川でも、事前に避難することが出来ずに浸水域に多くの人々が取り残され、176名の方々がヘリコプターやボートで救助された³⁾。ここで一つの疑問は渋井川程度の中小河川でも計画規模を大きく超過する洪水が発生した場合に、家屋流失等の甚大な被害が生じえるかという点である。特に水防法の改正⁴⁾が2015年5月20日に公布、11月

19日に完全施行され、現行の洪水に係る浸水想定区域について、想定し得る最大規模の洪水に係る区域に拡充して公表することとなった。よって、今後中小河川においても、家屋に甚大な被害が生じえる洪水氾濫の可能性を検討することは非常に重要である。

従来から流域に物理的に降りえる可能最大降水量(Probable Maximum Precipitation [PMP])を算定する試みは多くなされている。例えば、Oharaら⁵⁾は、領域気象モデルの気象外部境界条件を緯度・経度方向にシフトすることで、流域のPMPを算定している。荒川・寶⁶⁾は、レーダ雨量データを用いたDAD解析から主要洪水の包絡線を作成する事で、熊野川流域のPMPおよび可能最大洪水流量(Probable Maximum Flood [PMF])を算出している。椿ら⁷⁾は、中山間地域における計画規模を超えた降雨による洪水氾濫を算定し、その際の被害特性を評価している。

このように、PMP, PMF, 可能最大洪水氾濫を求める

取り組みが行われている。しかしながら、洪水氾濫の際に家屋の流失等に寄与する一つの大きな要因として、流体力が挙げられる。よって、PMFおよび浸水深のみではなく流体力も評価することで流失・全壊の恐れのある家屋を事前に把握しておくことは、水平避難・垂直避難を議論する際や事前の早め早めの避難の推進に向けて、極めて有益な情報となりえる。

本論文の目的は、2015年9月の渋井川洪水を降雨流出・洪水氾濫モデルで再現するとともに、可能最大流体力という新しい概念を提案・算定することで、今後渋井川で家屋流失が生じる規模の洪水氾濫の発生可能性を検討することである。

2. 渋井川洪水氾濫被害の概要

渋井川は鳴瀬川水系多田川の支川で、流路延長7.88 km、流域面積約18.6 km²の県管理河川である。図-1に渋井川、多田川、鳴瀬川の位置関係および2015年9月洪水時の堤防決壊箇所を示す。渋井川では、9月10日から11日にかけて線状降水帯に起因する強降雨により、3箇所ですべて堤防決壊が生じた¹⁾。渋井川の決壊に伴い2,100 haの浸水が生じ床上浸水399棟、床下浸水150棟の被害が生じ、176人がヘリコプターやボートで救助された³⁾。

堤防の決壊は現地調査および数値計算より浸透破壊と結論づけられている¹⁾。また、渋井川の水位上昇は合流部背水効果に伴い多田川、さらには鳴瀬川の水位上昇の影響を強く受けていた¹⁾。図-2に渋井川洪水氾濫時の空撮画像（国際航業株式会社提供：9月11日15:18撮影）を示す。現地での聞き込み調査より、堤防決壊は9月11日3:00から4:00程度に生じ、家屋周辺部の浸水は4:00前後に開始していたことが報告されている¹⁾。渋井川の堤防決壊状況等の詳細に関しては文献¹⁾を参照されたい。

3. 降雨流出・洪水氾濫モデルの適用

渋井川の洪水氾濫は、多田川、鳴瀬川からの背水効果に伴う水位上昇により、堤防が浸透破壊で決壊し生じた¹⁾。以下では、降雨流出・洪水氾濫モデルを適用することで、洪水氾濫時の状況を再現する。

(1) モデルの概要

降雨流出モデルは、呉ら¹⁰⁾の土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を適用している¹⁾。本モデルはサブ分布型の降雨流出モデルであり、河道部の洪水追跡には1次元不定流計算が用いられる。入力降雨としては気象庁解析雨量が使用され、河川横断面形状は宮城県河川課および国土交通省東北地方整備局から提供されたものを使用している。



図-1 渋井川、多田川、鳴瀬川の位置
(国土地理院画像⁸⁾ に加筆)

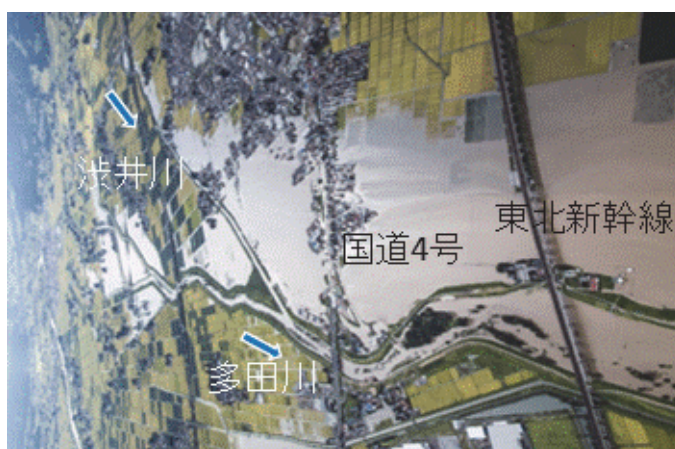


図-2 洪水時の空撮画像(9月11日15:18撮影)
(国際航業株式会社撮影画像に⁹⁾加筆)

渋井川以外にも多田川および多田川上流支川の渋川、名蓋川の流出計算を行っている。1次元不定流計算の下流端境界条件として鳴瀬川下中の目地点および三本木地点の水位ハイドログラフを与えている。

渋井川では本出水時に水位観測がされていなかったため、モデルの検証は2011年9月の出水および2015年9月出水後に得られた痕跡水位を用いて検証されている。本モデルを用い基礎的な数値実験を行うことで渋井川の水位が多田川および鳴瀬川水位の上昇に伴い2 m以上上昇していたことが定量的に評価されている。本計算の適用の詳細は文献¹⁾を参照されたい。

洪水氾濫計算は、MIKE FLOOD¹¹⁾(DHI)を使用し2次元不定流計算を行う。上記した降雨流出モデルから算出される流域からの流出量を横流入量として河川・洪水氾濫が計算される。2次元不定流計算は以下の式(1)-(3)を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 - h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 - h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] = 0 \quad (3)$$

ここに、 τ : 底面せん断応力、 p : x 方向流量フラックス、 q : y 方向流量フラックス、 C : 粗度係数、 ρ_w : 水の密度、 ζ : 水位、 h : 水深、 g : 重力加速度である。

堤内地の標高データは、国土地理院の5 mメッシュ標高データを使用するとともに、マンシングの粗度係数は家屋域が0.06、田・その他を0.04として計算している。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。河道部の空間解像度は Δx : 2.5 m、時間分解能 Δt : 0.1 sで、氾濫計算は Δx : 5 m、 Δy : 5 m、 Δt : 0.1 sで計算している。

堤防の決壊状況は浸透破壊であるため、時々刻々と堤防高が低くなるという条件を仮定し計算を行った。つまり1次元不定流計算と氾濫計算を結合する堤防天端高の縦断方向分布を時系列で与え、堤防決壊部のみが変化しその他は従来の堤防高さ一定である。決壊地点・幅は、現地調査¹⁾より得られた左岸側の3地点に40 m、17 m、15 mで設定している。縦断分布の時間変化を表現する決壊速度(堤防高低下速度)は、堤防決壊中心部から5 m間隔で左右対称に40 cm/10 min., 30 cm/10 min., 20 cm/10 min.で堤防高が下がり、堤内地地表面標高に達するとその値で堤防高の変化が停止すると設定し計算を行っている。これにより堤防決壊中心部から徐々に堤防決壊が広がる状況を表現している。堤防決壊開始時刻は、現地調査¹⁾より3:00から4:00程度との情報を得ているため、堤防の漏水開始が2:30程度と仮定し2:30に堤防高の低下を開始している。

洪水氾濫流の流体力は以下の式(4)を用いて算定している。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 h \quad (4)$$

ここに、 F : 単位幅抗力 [kg/s^2]、 C_D : 抗力係数、 ρ : 水の密度 (1000 kg/m^3)、 u : 流速[m/s]、 h : 水深[m]である。抗力係数は可能最大流体力の算定が本論文の目的であるため、1.0の値を用いた。

(2) 適用結果

洪水氾濫計算結果として、図-3に計算最大浸水深、図-4に計算最大流速、図-5に計算最大流体力(x 方向)を

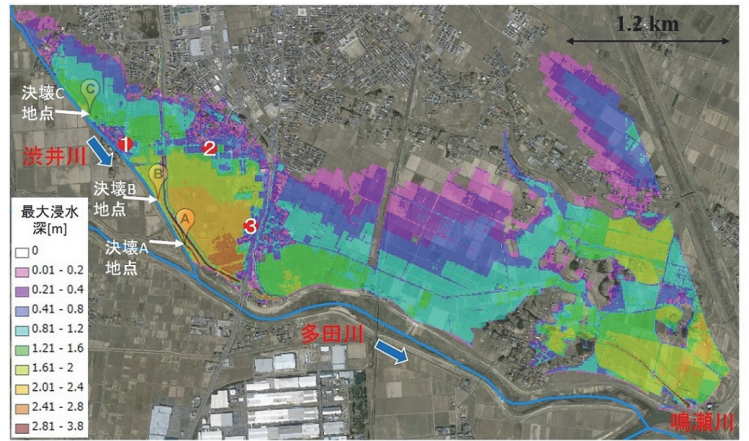


図-3 計算最大浸水深の空間分布(A, B, Cは決壊地点)

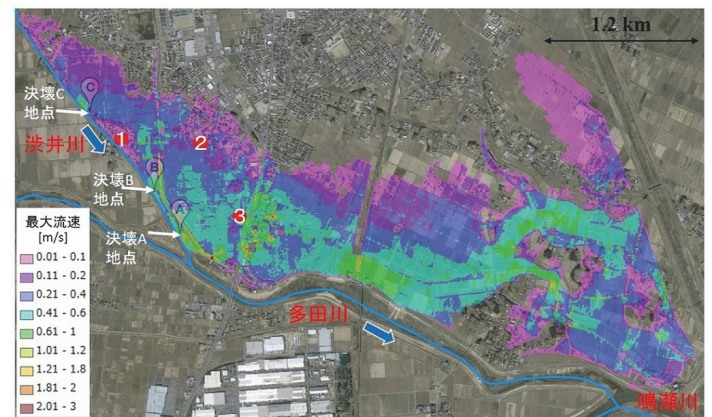


図-4 計算最大流速の空間分布(A, B, Cは決壊地点)

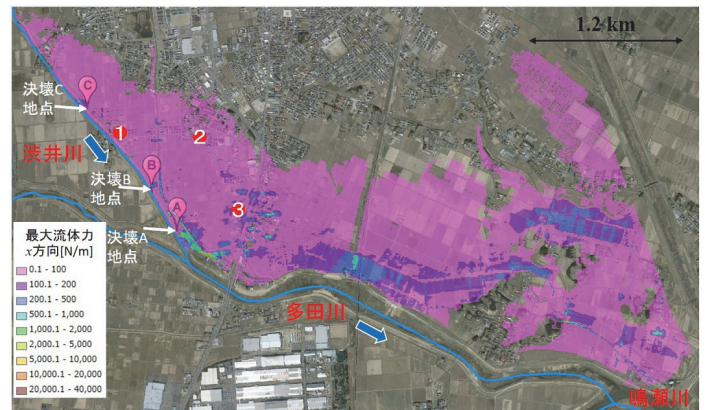


図-5 計算最大流体力(x 方向)の空間分布(A, B, Cは決壊地点)

示す。図-3の最大浸水深マップと図-2の浸水域の空撮画像を比較すると、浸水域を良好に再現出来ていることがわかる。また、国道4号線を境に浸水深の低下が見られる。図-4、図-5に示すように、流速と流体力が全体的に小さいことがわかる。これは、洪井川河川流量が少ない点と氾濫域の極めて平坦な地形に伴うものである。しかしながら、利根川水系鬼怒川の洪水氾濫で家屋の流失が生じた箇所は、堤防決壊部周辺であったことを考慮すると、今後河川堤防決壊部周辺流れをより詳細に計算する必要がある。

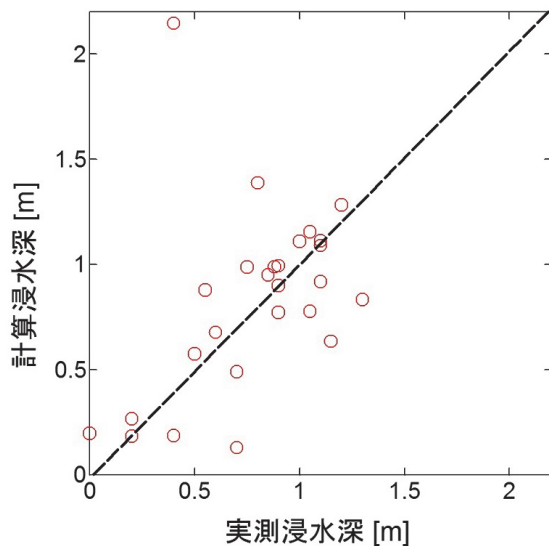


図-6 計算浸水深と実測浸水深の比較

図-6に、痕跡浸水深と計算最大浸水深の比較を示す。痕跡浸水深は著者らの洪水氾濫後の調査¹⁾より得ている。実測値との差異がある点はあるが、大まかな傾向は捉えており、現地痕跡水深の精度、5 mメッシュ標高の解像度を考慮した場合、ある程度の再現性は確保できたものと考えている。

図-7に、浸水域中3地点（家屋周辺）での浸水深の時系列を示す。3地点の位置に関しては図-3～5を参照されたい。浸水開始時刻はそれぞれ、3:48（地点1）、4:24（地点2）、4:43（地点3）となっている。著者らの発災後の周辺住民への聞き込み調査では、家屋の浸水開始は4時前後との回答を多く得ている。よって、洪水氾濫水の到達時間は良好に再現されているものとする。

4. 可能最大洪水・流体力の算定

可能最大降水量(PMP)とは、対象地域に物理的に生じえる最大の降水量である⁵⁾。本論文では、対象流域に物理的に生じ得る洪水を可能最大洪水(PMF)と定義するとともに、可能最大流体力(Probable Maximum Hydrodynamic Force of Flood Inundation [PMHF])という新しい概念を提案する。以下、PMFおよびPMHFの算定を行う。

(1) 可能最大洪水(PMF)の算定

本論文ではPMFを椿ら⁷⁾にならい、角屋・永井¹²⁾の最大洪水比流量包絡式(5)を用いて算定する。

$$q = KA^{-0.06} \exp(-0.04A^{0.45}) \quad (5)$$

ここに、 q ：洪水比流量[m³/sec/km²]、 A ：流域面積[km²]、 K ：地域係数である。対象流域（東北地方）における地域係数は26.0である。

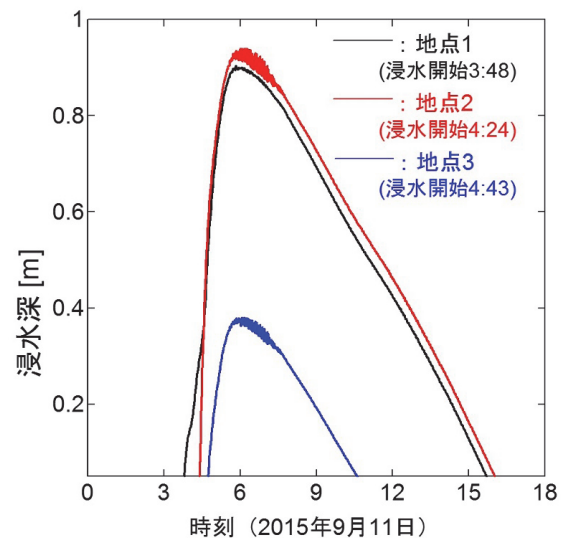


図-7 地点1, 2, 3における浸水深の時系列

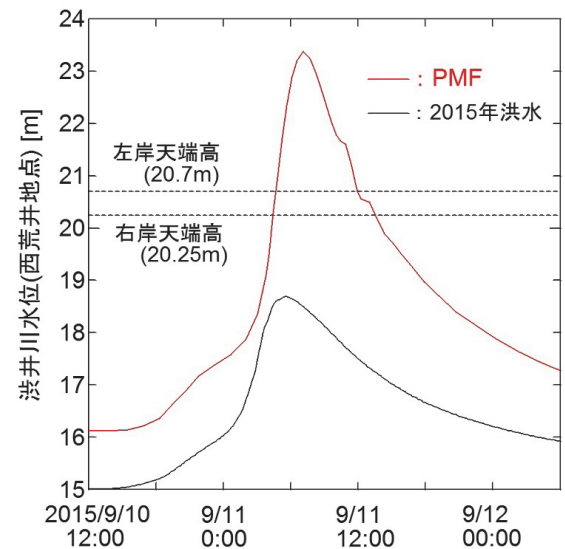


図-8 渋井川西新井地点におけるPMFおよび2015年洪水時の水位時系列

式(5)は、複数流域のDD式やDAD式を整理し、その包絡線と合理式を関係付けることでピーク流量の式形が導出されている。係数は過去の多くの出水情報から決定されている。本式を用いることで東北地方河川の流域面積から最大クラスの洪水流量を算定することが出来る。本手法を用いることは、PMPクラスの雨量では流域の土壌・地形特性や降雨の時空間分布等の影響は少なく、流域面積のみで最大洪水を議論できるという仮定に基づいている点に注意されたい。また、本手法は過去の実測の大規模出水データに基づいており、将来の地球温暖化等に伴う降水強度の変化等は考慮できない。

(5)式を用い渋井川および周辺河川のPMFを算定した結果、ピーク流量は渋井川308 m³/s、名蓋川380 m³/s、渋川564 m³/s、多田川1722 m³/sと算定された。このピーク流量を2015年洪水時の各河川流量の時系列と関連づけ

表-1 設定したシナリオの概要

破堤シナリオ	変化項目	備考
Case 1	基準	再現計算で使用した条件
Case 2	破堤幅：2倍	3地点の決壊幅を中心から対象に増加
Case 3	破堤幅：3倍	3地点の決壊幅を中心から対象に増加
Case 4	破堤幅：4倍	3地点の決壊幅を中心から対象に増加
Case 5	破堤速度：2倍	堤防高低下速度を増加
Case 6	破堤速度：3倍	堤防高低下速度を増加
Case 7	破堤速度：4倍	堤防高低下速度を増加
Case 8	破堤箇所：+1	決壊地点AとBの中心に追加（破堤幅15m）
Case 9	破堤箇所：+2	更に決壊地点Bから上流200mに追加（破堤幅15m）
Case 10	破堤箇所：+3	更に決壊地点Bから上流400mに追加（破堤幅15m）
Case 11	粗度係数×0.5	家屋域：0.03、田・その他：0.02
Case 12	粗度係数×1.5	家屋域：0.09、田・その他：0.06

ることで、PMFの時系列を作成した。本ハイドログラフ群を用い河道部における洪水追跡計算を行った結果を図-8に示す。洪水氾濫計算は行っていない点に注意されたい。図-8はPMF時および2015年9月洪水時の渋井川若木橋地点（多田川合流部から1 km上流地点）における水位の時系列である。計算水位が堤防高を越えていることから、2015年9月洪水では堤防越流が生じなかったが、PMF時には水位が堤防高を超過するという結果となった。

(2) 可能最大流体力(PMHF)の算定

PMF時に起こりえるPMHFを算定することで家屋の大破・流失等が生じる可能性を検討する。これにより、事前の水平避難が必要か、事前避難できなかった場合は垂直避難で対応可能かの検討において有益な知見が提供可能となる。

本論文ではPMHFを算定するため、12 Caseのシナリオを用意し各シナリオの最大値を各計算グリッドで抽出した。12 Caseの概要を表-1に示す。本論文は渋井川を対象としているため、水位上昇時に浸透破壊が生じ堤防決壊が逐次拡大していくという状況を想定している。よって、上流側での溢水や右岸側での堤防決壊は想定していない。左岸側の浸透破壊が生じた堤防決壊箇所には可能最大洪水流量が集中して洪水氾濫を増大させるという状況を想定している。

表-1に示すよう、再現計算で使用した堤防決壊条件を基準(Case 1)とし、3決壊地点の決壊幅を2倍、3倍、4倍としたCase (Case 2 - 4)、堤防決壊速度を2倍、3倍、4倍としたCase (Case 5 - 7)、決壊箇所の数を1 - 3箇所追加したCase (Case 8 - 10)および基準Case (Case 1) の氾濫域のマニングの粗度係数を0.5倍および1.5倍したCase (Case 11, 12)でシナリオは構成されている。全12 Caseの計算を行い最大の流体力を抽出した。

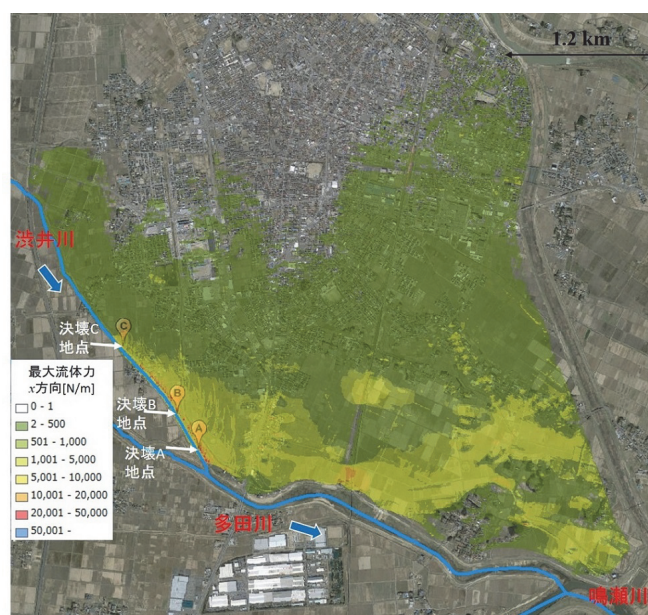


図-9 可能最大流体力(x方向)の空間分布(A, B, Cは決壊地点)

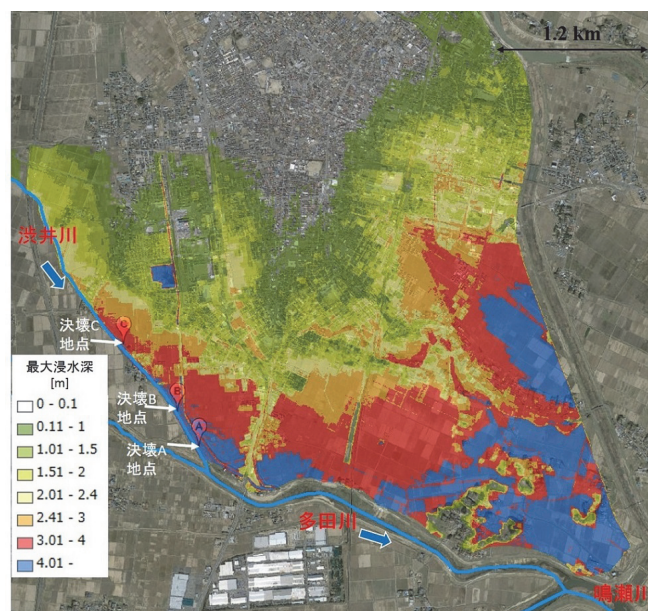


図-10 可能最大浸水深の空間分布(A, B, Cは決壊地点)

図-9にPMHFの分布を示す。越村・萱場¹³⁾によると、家屋流失の基準となる流体力は20 kN/mである。図-9に示すよう20 kN/mの流体力は堤防決壊付近でしか生じていないことがわかる。これは渋井川の流域面積が小さく流量が小さいことと、平坦な地形に伴い大きい流速が出にくい状況に起因する。よって、渋井川を対象とした場合、計画規模を大きく超過する可能最大洪水クラスの洪水が生じて家屋流失・大破が生じるような可能性は小さいといえる。しかしながら、図-10に最大浸水深の分布を示す。佐藤ら¹⁴⁾によると、浸水深2.4 m以上から家屋に浮力の作用が生じ流失しやすくなること、平屋建てでは2.4 mで水没してしまう可能性が高いことが指摘され

ている。よって、図-10中で水深2.4 m以上の浸水が見込まれる家屋周辺は危険度の高い地域と考えられる。

5. まとめ

本論文は、2015年9月に発生した渋井川洪水氾濫を降雨流出・洪水氾濫モデルを用い再現するとともに、可能最大洪水・流体力を算定したものである。以下に得られた知見を列挙する。

- 1) 渋井川洪水氾濫の再現計算を行うことで、堤防決壊が9月11日3時から4時程度、浸水開始が4時前後という現地調査より得られた情報を再現することが出来、当時の洪水氾濫状況をより明確にすることが出来た。
- 2) 渋井川の今回の洪水では堤防越流は生じなかったが、可能最大クラスの洪水が発生した場合、堤防を越流する可能性が高いことが明らかとなった。
- 3) 本論文で設定した条件の範囲では、可能最大洪水氾濫が生じた場合でも可能最大流体力は堤防決壊付近以外では低い値を示し、家屋の全壊・流失が生じる可能性は小さい。しかしながら、家屋周辺で浸水深2.4 mを超える箇所は浮力の作用等も考えられ事前の水平避難が必要不可欠であることが確認された。

以上、本論文では可能最大流体力(PMHF)という新しい観点を導入することで、事前の水平避難・垂直避難の判断に有益な知見を与えるための一連の流れを示した。しかしながら、本論文では周辺の鳴瀬川や多田川といった大きい河川の堤防決壊は想定していない。これらの河川の堤防決壊が生じた場合は更に甚大な被害が想定されるため、注意が必要である。また、本論文の計算では河道部の1次元不定流計算と氾濫域の2次元不定流計算を統合して氾濫解析を行っているため、堤防決壊部の2次元、3次元的な流れの詳細な挙動は計算出来ていない。今後、堤防決壊部の流れをより詳細に計算する必要がある。他にも想定シナリオは多く考えられるなど、多数の不確定要素が存在する点に注意されたい。

謝辞：本研究は、JSPS科研費15K18120の助成を受けたものです。本論文の計算を行うにあたり、河道横断面形状は宮城県河川課および国土交通省東北地方整備局に、鳴瀬川痕跡水位は国土交通省東北地方整備局に提供頂きました。また、国際航業株式会社より浸水域の空撮画像を提供頂きました。末尾ながらここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 呉 修一，森口周二，堀合孝博，小森大輔，風間 聡，田中

仁：2015年9月東北豪雨による渋井川洪水氾濫の特徴，自然災害科学，印刷中。

- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人建築研究所：平成27年9月10日に茨城県常総市で発生した鬼怒川氾濫による建築物の被害調査報告，2015。
<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2015/151026.pdf> (2016年5月8日アクセス)
- 3) 大崎市：渋井川決壊に伴う救助者数，平成27年9月関東・東北豪雨情報
<http://www.city.osaki.miyagi.jp/index.cfm/38,11484,179,html> (2016年5月8日アクセス)
- 4) 国土交通省HP：「水防法等の一部を改正する法律」が施工されました，<http://www.mlit.go.jp/river/suibou/suibouhou.html> (2016年5月8日アクセス)
- 5) Ohara, N., Kavvas, M.L., Kure, S., Chen, Z.Q., Jang, S. and Tan, E.: Physically Based Estimation of Maximum Precipitation over American River Watershed, California, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol.16, No.4, pp.351-361, 2011.
- 6) 荒川英誠，寶 馨：レーダー・アメダス解析雨量を用いた地域別最大雨量の評価，河川技術論文集，Vol. 14, pp.181-186, 2008.
- 7) 椿 涼太，河原能久，塚井誠人：中山間地域における計画規模を越えた降雨による洪水氾濫被害特性，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.72, No.1, pp.11-25, 2016.
- 8) 国土地理院：平成27年9月関東・東北豪雨の情報，(渋井川)9月12日に撮影した空中写真の概要
<http://www.gsi.go.jp/common/000107326.pdf> (2016年5月8日アクセス)
- 9) 国際航業株式会社：平成27年関東・東北豪雨，災害調査活動への取り組み
http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201509_typhoon18 (2016年5月8日アクセス)
- 10) 呉 修一，山田 正，吉川秀夫：表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究，土木学会水工学論文集，Vol.49, pp.169-174, 2005.
- 11) MIKE Powered by DHI: MIKE FLOOD,
<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-flood> (2016年5月8日アクセス)
- 12) 角屋 睦，永井明博：洪水比流量曲線へのアプローチ，京都大学防災研究所年報，Vol. 22B-2, pp. 1-14, 1979.
- 13) 越村俊一，萱場真太郎：1993年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考—津波被害関数の構築に向けて—，日本地震工学会論文集，Vol. 10, No.3, pp.87-101, 2010.
- 14) 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.

(2016. 4. 4受付)