

土石流・洪水流複合氾濫時の避難目的地 までの移動安全性に関する検証

和田孝志¹・丸堂真輝²・廣地星大³・三輪浩¹・里深好文⁴

Safety of Evacuation Pass to Refuge Site During Combined Inundation by Simultaneous Multiple Inflow of Sediment and Flood

Takashi WADA¹, Masaki MARUDOU², Seita HIROCHI³,
Hiroshi MIWA¹ and Yoshifumi SATOFUKA⁴

Abstract

We need to establish more effective evacuation measures for combined inundation by simultaneous multiple inflow of sediment and flood in densely populated areas close to mountainous terrain and rivers. In this study, using the numerical model considering combined inundation by simultaneous multiple inflow, we investigate the safeties of evacuation passes to several refuge sites during the combined inundation. The safeties are based on a simple relationship about the required time to move from “evacuation starting points” to “refuge sites” and the difference time of inundation starting between these two points. As a result, since we estimated the distribution of potential for suffering flood damage during the combined inundation, we could identify the more safety evacuation passes and refuge sites. In addition, our investigations could be estimated the magnitude of the influence by each flooding factor on the combined inundation.

キーワード：平面 2 次元数値計算，同時多発的流入，避難時のリードタイム，避難目的地，密集市街地

Key words: planar two-dimensional computation, simultaneous multiple inflows, lead time for evacuation, refuge site, densely populated area

1. はじめに

近年、洪水や土砂災害を引き起こす大雨や短時

間強雨が増加傾向にあり¹⁾、これらの災害の同時発生による複合的な災害も頻発している。平成23

¹ 鳥取大学工学部社会システム土木系学科
Department of Social Systems and Civil Engineering,
Tottori University

² 兵庫県
Hyogo Prefectural Office

³ 東和建設株式会社
TOWA Construction Co., Ltd

⁴ 立命館大学理工学部環境都市工学科
Department of Civil and Environmental Engineering,
Ritsumeikan University

(2011)年9月の和歌山県那智川流域では、台風12号接近に伴う豪雨によって那智川の谷底平野に注ぐ複数の山地溪流から土石流が同時多発的に流入し、那智川本川洪水と合わさって谷底平野全体に甚大な被害をもたらした。その被害は、土石流警戒区域外まで拡大し、避難困難となった住民が多数発生した²⁾。このように、土石流・洪水流の複合的氾濫時には、氾濫範囲の拡大により安全性の高い避難所や避難ルートの確保が困難となる。加えて、椿ら³⁾が指摘するように、我が国に多い谷底平野(中山間地域)では、人や物の重要な輸送経路である道路や鉄道が河川沿いに配置されており、氾濫時には主要な避難ルートが被災して使用できず、避難困難となる事例が多い。土石流・洪水流による複合的氾濫時の避難困難は、平成29(2017)年7月九州北部豪雨の福岡県朝倉市乙石川でも発生している。当災害では、山地斜面の崩壊や土石流による直接的な影響に加えて、河道に流入した流砂や流木が激しい流路変動を引き起こしたことで、避難勧告発令から30分後には避難路を使用できない事態となった⁴⁻⁶⁾。

一方で、都市域の拡大により土石流危険溪流を有する山地に住宅密集地が隣接することが多く、これらの地域でも土石流流入や小河川の氾濫等による複合的氾濫の被災リスクが高まっている。平成26(2014)年8月に広島市安佐南区・安佐北区で発生した土石流災害では、複数の山地溪流を流下した土石流が住宅密集地に同時多発的に流入し、甚大な人的・物的被害を発生させた。本災害では、流入した土石流が建物・水路・道路網等の配置に沿って選択的に流下し、また橋梁や道路狭窄部での大礫・流木閉塞による氾濫範囲変化も伴って、平面的に偏った土石流被災範囲が形成された⁷⁾。同様の事例は、平成30(2018)年7月豪雨による土石流災害でも確認され、土砂災害警戒区域に指定された区域内で被災箇所が偏っており、被災範囲が区域外まで拡大する事例も見られた^{8,9)}。

これらのことから、山地や河川に隣接する建物密集地域において複合的氾濫が発生した場合、現行の土石流警戒区域では実際の被災リスクを厳密に反映できないと考えられる。現行の土石流警戒

区域は、対象とする溪流の出口(扇頂部)を主な基準地点として下流(扇端部)方向に地盤勾配2度までの扇形の範囲を指す場合が多い^{10,11)}。すなわち、現行の土石流警戒区域は、地盤高の平面分布のみから対象区域が決定されており、区域内の人工物配置に伴う土石流氾濫範囲の偏りを考慮できていない。建物密集市街地の人工物配置が土石流・洪水流氾濫範囲に及ぼす影響については、災害調査^{4,7)}、水路実験¹¹⁻¹³⁾、数値解析^{11,12,14-16)}等により知見が蓄積されつつあるが、複数の外力が合わさった複合的氾濫に対する建物密集市街地の被災範囲については十分な知見が得られていない。したがって、多様な氾濫外力が組み合わさった複合的氾濫が建物密集地で発生した場合、より安全な避難行動を実行することが困難となることが想定される。

避難行動においては、まず避難目的地を決定することが重要である。平成23年東日本大震災の津波災害では、切迫した災害に対して避難場所の安全性を考慮する余裕なく最寄りの避難場所に避難した方々が被災するといった事例が見られた。このことを踏まえ、平成25年の災害対策基本法改正では、あらかじめ市町村が「指定緊急避難場所」と「指定避難所」を指定することとなった。「指定緊急避難場所」とは切迫した災害の危険から命を守るために(一次的に)避難する場所を指し、「指定避難所」とは災害により住宅を失った場合等において一定期間避難生活をする場所を指す。さらに、指定緊急避難場所までの移動が困難と判断される場合の避難先として『近隣のより安全な場所や建物(公園、親戚や友人の家、近隣の高い建物、強度の強い建物等)』、それさえも困難な場合は屋内待機(垂直避難)が望ましいとされている¹⁷⁾。岐阜県飛騨地方で行われた令和2年7月豪雨時の避難行動に関するアンケート¹⁸⁾では、避難行動を行った住民の66.3%が「避難所」を避難目的地として選択しているが、「家族・親戚・知人宅」を選択した住民も19.4%存在しており、避難目的地としての『近隣のより安全な場所や建物』の重要性が明らかとなっている。これらの複数の避難目的地の選択を切迫する災害時に素早く行うために

は、様々な外力・氾濫形態に対応した避難目的地を事前に検討しておくこと、特に『近隣のより安全な場所や建物』とはどこかをあらかじめ把握しておくことが重要であると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、山地・河川が隣接する市街地での複合的氾濫に対するより安全な避難対策確立に資するため、本川および支川の洪水氾濫、さらに土石流流入といった多様な外力条件下での避難行動（避難目的地までの移動）の安全性を数値シミュレーション結果に基づいた評価指標により検証した。加えて、二次避難時の避難目的地への移動の安全性も合わせて検証した。なお、本検証では、マルチエージェントモデル^{例えば19,20)}で用いられるような避難対象者の避難行動に関する複雑なアルゴリズムを省き、数値計算により想定される氾濫状況のみに着目し、避難のトリガーも数値計算の算定値にのみ依存するものとして単純化した。なお、数値計算に基づく本評価結果は、数値計算結果と実際に起こりうる災害状況との乖離が発生する可能性を考慮すると、地域住民に直接提示するものではなく、複合的氾濫に対する避難対策を検討する担当者が避難目的地の運用検討等の際に活用するものとして位置付けることが望

ましいと考える。

2. 検討の流れ

2.1 検討対象領域

検討対象領域は、兵庫県出石地区（図1）である。当該地区では、隣接する山地溪流や河川水およびその景観を利用した観光・地場産業が盛んであり、河川と人々との生活が密接に関わっている。当該地区には、複数の土石流危険溪流を有する山地、洪水被害を招く恐れのある河川（出石川）が隣接し、さらに支川（谷山川）が市街地内を貫流している。このような地形条件から、当該地区では図1に示すように洪水氾濫リスクや土石流氾濫リスクが重複しており、豪雨時には洪水流や土石流の同時的な流入によって多様な氾濫被害形態が形成される可能性がある。また、図1を見ると当該地区内のすべての「指定緊急避難場所」、「指定避難所」が洪水もしくは土石流いずれかの氾濫外力による被災リスクを有することがわかる。

2.2 数値シミュレーションと避難の安全性評価

本検討では、本川・支川からの越流氾濫、土石流危険溪流からの土石流流入といった氾濫外力を

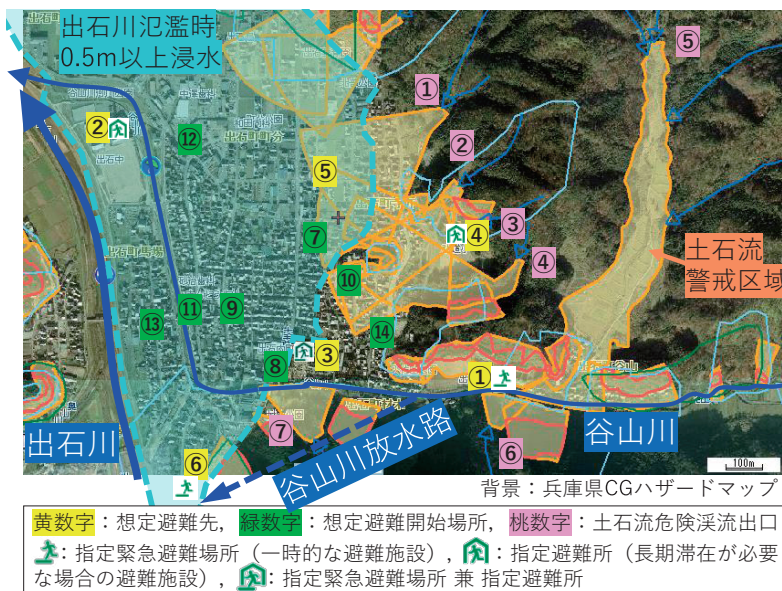


図1 検討対象領域（兵庫県豊岡市出石地区）

組み合わせ、多様な組み合わせから成る複合的氾濫条件下で氾濫シミュレーションを行う。これらのシミュレーション結果に基づき、多様な外力条件下での複合的氾濫に対して避難移動時の被災リスクが相対的に低くなる避難目的地を検討する。本検討では、避難移動時の安全性の指標として、「避難開始点」から「避難目的地」までの避難に必要な時間（リードタイム、本論文では避難開始点～避難目的地間の距離を歩行困難者および乳幼児の歩行速度、夜間発生時の徒歩移動速度（ $=1.8 \text{ km/時}$ ）²¹で移動した場合にかかる時間とし、 T_L と称する）と、シミュレーション結果から得られる避難開始点周辺の浸水開始時刻（ T_1 ）から避難目的地周辺の浸水開始時刻（ T_2 ）までの差（ $=T_2 - T_1$ ）との差分（ $= (T_2 - T_1) - T_L$ ）を用いる。加えて、避難開始点周辺の移動困難が解消される時刻（ T_3 ）から避難目的地周辺が再び移動困難となる（別の移動困難条件が追加された）時刻（ T_4 ）までの差（ $=T_4 - T_3$ ）と T_L との比較から、二次避難時の避難目的地への移動の安全性も合わせて評価する。なお、本検討では避難対象者の行動判断は考慮せず、地形的、物理的に避難可能な目的地かどうかを判定することに注目しているため、避難目的地、避難開始点周辺の浸水状況が最も危険と想定される状況を統一的な避難のトリガーとして設定している。よって、本検証は避難行動の開始を極力遅くすることを推奨するものではなく、より安全な避難行動には時間的な余裕をもって事前に避難することが必要不可欠である。

シミュレーションに用いる計算地形は、兵庫県が公開している DSM (Digital Surface Model)²² により建物位置・道路網等を地盤高として反映させたものとした。したがって、本検討では、計算範囲内の建物は不透過構造物であり、周辺の浸水状況によって破壊されることはない。本検証では最も被災リスクの高い状況下で安全性を評価することとし、本川・支川からの洪水氾濫と土石流流入が同時発生した場合を想定して、浸水状況の時系列変化を求めた。なお、計算メッシュは避難に用いる検討地域内の道路幅（約 4 m）を表現可能な 2 m 正方メッシュとした（図 2 参照）。



図 2 計算メッシュサイズと道路・河道幅との関係（黒線：道路境界、青塗り：河道範囲）

2.3 使用する数値計算モデル

数値シミュレーションでは、和田らが開発した「土石流・洪水流複数流入モデル」²³を用いた。本モデルは、複数の河川や山地溪流を含む範囲を計算対象とし、これらより流出する土石流や洪水流の同時多発的な氾濫や相互干渉を同一時間軸でシミュレートできる。

土石流・洪水流複数流入モデルの概要を図 3 に示す。本モデルは、1つの 2次元計算領域（氾濫場）に複数の 1次元計算領域（山地溪流）を任意地点、任意流入角度で接続可能としたモデルである。2次元計算領域に設定する流入点はそれぞれ別個の 1次元計算領域の下流端と連結する。これ

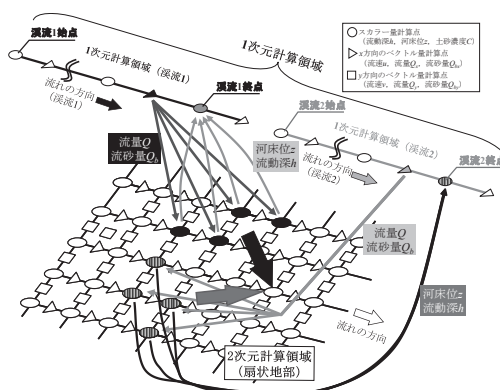


図 3 土石流・洪水流複数流入モデルの概略

らの1次元計算領域は計算上1本の溪流として取り扱い、1次元計算領域の計算点にそれぞれの溪流の始点 $i_{st,n}$ および終点 i_{en} (n は1次元計算領域番号) を設定することにより区別する。本モデルの計算格子配置法は、スタaggerドスキームを用い、 i 番目スカラー量計算点 (図3中の「○」点) の $1/2\Delta x$ または $1/2\Delta y$ だけ下流側 (x または y 軸の正方向) に i 番目ベクトル量計算点 (図3中の「□」もしくは「△」点) が存在するように配置する。なお、モデル内部の1次元・2次元計算領域の結合手法等の詳細については、引用文献²³⁾を参照されたい。

本モデルの2次元計算における基礎方程式を以下に示す。1次元計算では以下の式の y 方向成分について考慮しないものを用いる。なお、侵食・堆積速度および河床せん断力は高橋²⁴⁾を、平衡土砂濃度 C_{∞} は中川ら²⁵⁾を、スタaggerドスキームと計算点の配置は里深・水山²⁶⁾を参考にした。

流動層全体の連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = i_b \quad (1)$$

砂礫の連続式

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial uCh}{\partial x} + \frac{\partial vCh}{\partial y} = i_b C_* \quad (2)$$

x 方向 (流下方向) の運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} \quad (3)$$

y 方向 (横断方向) の運動方程式

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} \quad (4)$$

河床位方程式

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (5)$$

ここに、 h : 流動深、 t : 時間、 (x, y) : 水平面座標、 (M, N) : (x, y) 方向の流量フラックス ($M=uh$, $N=vh$)、 (u, v) : (x, y) 方向の水深平均流速、 i_b :

侵食・堆積速度、 C : 土砂濃度、 C_* : 河床堆積物の容積濃度、 g : 重力加速度、 H : 水位 ($=h+z$)、 z : 河床位、 (τ_x, τ_y) : (x, y) 方向の河床せん断力、 ρ : 間隙流体の密度である。河床せん断力は、 x 方向成分について表すと以下のようである。

$C \geq 0.4C_*$ (土石流) のとき

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{u\sqrt{u^2+v^2}d^2}{8h^2 \left\{ C + (1-C) \frac{\rho}{\sigma} \left[\left(\frac{C_*}{C} \right)^{1/3} - 1 \right]^2 \right\}} \quad (6)$$

$0.01 < C < 0.4C_*$ (掃流状集合流動) のとき

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{1}{0.49} \frac{u\sqrt{u^2+v^2}d^2}{h^2} \quad (7)$$

$C \leq 0.01$ または $h/d \geq 30$ (掃流砂または泥流状乱流土石流) のとき

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn_m^2 u \sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \quad (8)$$

である。ここに、 σ : 砂粒子密度、 d : 砂礫粒径、 n_m : マニングの粗度係数である。 y 方向の河床せん断力も同様の式系にて表される。

侵食・堆積速度 i_b を表す式は、侵食 ($C_{\infty} \geq C$) のとき

$$i_b = \delta_e \frac{C_{\infty} - C}{C_* - C_{\infty}} \frac{q}{h} \quad (9)$$

堆積 ($C_{\infty} < C$) のとき、慣性的運動を無視すると、

$$i_b = \delta_d \frac{C_{\infty} - C}{C_*} \frac{q}{h} \quad (10)$$

である。ここに、 q : 土石流の単位幅流量、 C_{∞} : 平衡土砂濃度、 δ_e : 侵食速度係数、 δ_d : 堆積速度係数である。

平衡土砂濃度 C_{∞} は以下のように表される。

$\tan\theta_w \geq \tan\phi$ のとき

$$C_{\infty} = C_{max} = 0.9C_* \quad (11)$$

$\tan\phi > \tan\theta_w > 0.138$ (土石流) のとき

$$C_{\infty} = \frac{\rho \tan\theta_w}{(\sigma - \rho) (\tan\phi - \tan\theta_w)} \quad (12)$$

$0.138 \geq \tan\theta_w > 0.03$ (掃流状集合流動) のとき

$$C_\infty = 6.7 \left\{ \frac{\rho \tan\theta_w}{(\sigma - \rho)(\tan\phi - \tan\theta_w)} \right\}^2 \quad (13)$$

$\tan\theta_w \leq 0.03$ (掃流砂) のとき

$$C_\infty = \frac{(1 + 5 \tan\theta_w) \tan\theta_w}{\sigma / \rho - 1} \left(1 - \alpha_c^2 \frac{\tau_{sc}}{\tau_*} \right) \left(1 - \alpha_c \sqrt{\frac{\tau_{sc}}{\tau_*}} \right) \quad (14)$$

$$\text{なお, } \tau_{sc} = 0.04 \times 10^{1.72 \tan\theta_w}, \quad \alpha_c^2 = \frac{2 \left(0.425 - \frac{\sigma \tan\theta_w}{\sigma - \rho} \right)}{1 - \frac{\sigma \tan\theta_w}{\sigma - \rho}}$$

である。ただし $\tau_* = \frac{\rho}{\sigma - \rho} \frac{h \tan\theta_w}{d}$ であり、 $\tau_* \leq \tau_{sc}$

のとき $C_\infty = 0$ である。ここに、 θ_w : 流れ方向の水面勾配、 ϕ : 内部摩擦角、 τ_* : 無次元掃流力、 τ_{sc} : 無次元限界掃流力である。

支配方程式の離散化手法は差分法を用い、時間の差分には前進差分、空間差分のうち移流項の差分には風上差分、それ以外には中央差分を用いる。

2.4 計算条件

数値シミュレーションの計算条件を表1に示す。計算条件は、複数の氾濫外力、すなわち、「i 出石川の越流氾濫」、「ii 谷山川の越流氾濫」、「iii 土石流危険渓流からの土石流入」を組み合わせて設定した。本検討では、避難目的地をより安全側の条件下(最も危険な状況下)で評価するため、最大規模の氾濫被害を想定し、対象とする土石流は出石市街地に隣接する7つの土石流危険渓流(図1に示す桃色番号)全てからの同時流入とし、

表1 計算 CASE (CASE 別氾濫外力条件)

計算 CASE 番号	出石川の越流氾濫	谷山川の越流氾濫	土石流危険渓流からの土石流入
1	○	○	○
2	×	○	○
3	×	○	×
4	×	×	○

※「○」は外力として考慮する、「×」は外力として考慮しない(河川では既往最大流量の1/2規模、土石流危険渓流では土石流入なしとする)

谷山川放水路の機能(出石川への排水機能)を考慮しない条件で計算を行った。また、土石流危険渓流にはいくつかの既設砂防堰堤が存在するが、現地を確認したところ堰堤の堆砂ポケットがやや埋まっている状況であったことから、本検討では最大規模の氾濫被害を想定するため堆砂ポケットを満砂状態として設定した。

想定する外力規模について、『洪水・高潮氾濫からの大規模・広域避難に関する基本的な考え方』²⁷⁾によると、地域にとって過去最も被害をもたらした災害(既往最大災害)の規模を対象とすることが推奨されている。既往最大災害規模を検討対象にすると、周辺河川の状況や風雨の状況等による避難行動の制約条件が明確となり、対象地区の関係者にとってイメージしやすいためである。よって本検討では、出石地区を含む円山川水系の既往最大出水である平成16年10月台風23号豪雨規模を対象規模とした。なお、「i 出石川からの氾濫」・「ii 谷山川からの氾濫」では、上記豪雨においても破堤が起らなかったことを踏まえ、越流氾濫のみとしている。

図4に出石川、谷山川および土石流危険渓流の氾濫発生規模におけるハイドログラフを示す。出石川の計算対象流量は、平成16(2004)年10月20日18時~21日5時の弘原水位流量観測所の実績流量を用いた。谷山川の計算対象流量は、上記の出石川実績流量を面積按分することで算出した(出石川、谷山川の流域面積は地形図で読み取り、それぞれ251 km²、3.94 km²)。なお、氾濫が発生しない程度の供給流量(表1に示す供給条件「×」

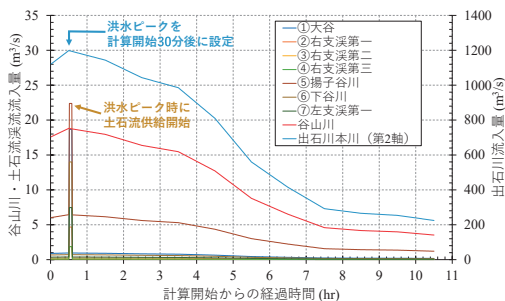


図4 出石川・谷山川・土石流危険渓流の氾濫発生規模のハイドログラフ

の場合)はそれぞれの流入量の1/2の量を与えるものとした。

土石流危険渓流を対象とする1次元計算領域(7つ)の上流端に与える土石流流入ピーク流量は、砂防基本計画策定指針²⁸⁾による以下の式を用いた。

$$Q_{sp} = \frac{C_s}{C_s - C_d} \times Q_p \quad (15)$$

ここに、 Q_{sp} : 土石流ピーク流量 (m³/s)、 C_s : 渓床堆積土砂の容積濃度、 C_d : 土石流濃度、 Q_p : 計画規模の年超過確率の降雨量に対する清水の対象流量 (m³/s)である。土石流濃度 C_d は同指針²⁸⁾による以下の式を用いた。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (16)$$

C_s 、 ρ 、 σ 、 $\tan \phi$ は表2で示した設定値を用いた。 $\tan \theta$ は領域上流端から下流100 m区間の平均河床勾配とする。

計画規模の年超過確率の降雨量に対する清水の対象流量 Q_p は同指針²⁸⁾による以下の式のように

合理式を用いる。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} \times f \times r \times A \quad (17)$$

ここに、 f : 流出係数、 r : 洪水到達時間内における平均雨量強度 (mm/h)、 A : 流域面積 (km²)である。なお、本研究では f を既往研究¹⁴⁾に倣い0.7とし、 r を平成16(2004)年10月台風23号豪雨における最大雨量強度である48 (mm/h) (豊岡市但東久畑雨量観測所)³⁰⁾とした。 A は7つの土石流危険渓流の流域面積を地形図で読み取ったものを用いた。土石流部分の流入ハイドログラフは既往研究¹⁴⁾に倣い土石流流入時間を360秒、ピーク流量継続時間を240秒とする台形ハイドログラフとし、計算開始から1,800秒後にピーク流量 Q_{sp} となるように設定した。土石流部分以外のハイドログラフは図5に示す豊岡市但東久畑雨量観測所の雨量ピーク後の実績時間雨量と(17)式の合理式から1時間ごとの流量を算出し、内挿補間することで作成した。なお、表2に示すように、本検討では、各土石流危険渓流における初期侵食可能土砂

表2 計算に用いるパラメータ

計算パラメータ	Value	Unit	
総計算時間 (T_{max})	10	hr	
計算タイムステップ (Δt)	0.01	s	
流速発生閾水深 (h_{min})	0.05	m	
水深最小値 (h_{min})	0.01	m	
マンニングの粗度係数 (n_m) [*]	0.04	m ^{-1/3} s	
重力加速度 (g)	9.8	m/s ²	
間隙流体の質量密度 (ρ) [*]	1000	kg/m ³	
粒径 (d)	0.01	m	
土砂の質量密度 (σ) [*]	2650	kg/m ³	
土石流に関する パラメータ	河床堆積土砂濃度 (C_s) [*]	0.56	-
	内部摩擦角 ($\tan \phi$) [*]	0.75	-
	侵食速度係数 (δ_e) [*]	0.0007	-
	堆積速度係数 (δ_d) [*]	0.05	-
1次元計算に関する パラメータ	一次元計算点数 (i_{e1})	460	-
	一次元計算渓流数	9	-
	一次元計算点間隔 (Δx_1)	10	m
	初期侵食可能土砂厚 (D_1)	10	m
2次元計算に関する パラメータ	二次元計算点数 ($i_{e2} \times j_{e2}$)	547 × 1150	-
	二次元計算点間隔 ($\Delta x_2 \times \Delta y_2$)	2 × 2	m
	初期侵食可能土砂厚 (D_2)	0	m

^{*}既往土石流シミュレーション²⁹⁾の設定値を参考に設定

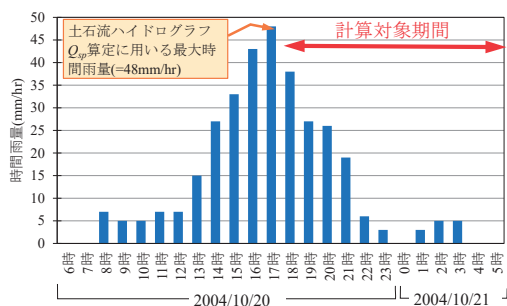


図5 豊岡市但東久畑雨量観測所の実績時間雨量³⁰⁾

厚は便宜的に一律10mとして与えた。一方、2次元計算領域では土石流危険渓流からの外力のみの影響を考慮するため、初期侵食可能土砂厚は設定していない。

2.5 想定する避難目的地と避難開始点

数値シミュレーション結果をもとに、検討対象領域内に「避難目的地」および「避難開始点」(図1および表3に示す)を設定した。これらの図表に示す地点①～⑥はハザードマップ等に記載される「指定緊急避難場所」または「指定避難所」である。地点①～⑥の中には風水害時に避難場所として対応できない場所も含まれているが、本検討では災害切迫時に避難者が選択する可能性がある一時的な避難先(「近隣のより安全な場所や建物」)として避難目的地の候補にあげている。地点⑦～

⑭は出石地区の観光関連施設であり、観光客や従業員が比較的多く避難時に考慮すべき場所として筆者らで選定した箇所である。2.2で述べたように、これらの地点周辺の移動困難状況発生時刻の差(一次避難では $T_2 - T_1$ 、二次避難では $T_4 - T_3$)を求め、これらを避難目的地別に T_L と比較することで避難安全性を評価した。以上より、一次避難および二次避難時の避難目的地までの移動安全性の指標 T_{a1} 、 T_{a2} は、それぞれ以下のように表される。

$$T_{a1} = (T_2 - T_1) - T_L \quad (16)$$

$$T_{a2} = (T_4 - T_3) - T_L \quad (17)$$

移動困難状況発生時刻は、「水害ハザードマップ作成の手引き」³¹⁾に示される実験データや既往水害時の避難実績から「浸水深0.5m以上」, 「算定流速0.5m/s以上」, 火山灰堆積上における自動車通行試験成果³²⁾から「土砂堆積厚10cm以上」とし、これらのいずれかを地点周辺メッシュのうち一つが満たした時刻とした。なお、避難目的地または避難開始点における「周辺メッシュ」とは、各点の座標が含まれるメッシュとそれに隣り合う8つのメッシュを指すものとする。

表3 想定する避難目的地と避難開始点

No.	地点	指定避難所	緊急指定避難場所	風水害対応避難所	地震対応避難所
①	出石高等学校	-	○	○	○
②	出石中学校	○	-	-	○
③	弘道地区コミュニティセンター	○	○	○	○
④	弘道小学校	○	-	-	○
⑤	出石幼稚園	-	○	-	○
⑥	I本店	-	○	○	○
⑦	豊岡市営鉄砲町パーキング	-	-	-	-
⑧	土産街中(但馬國出石観光協会)	-	-	-	-
⑨	土産街西(T銀行出石支店)	-	-	-	-
⑩	土産街東(S酒造)	-	-	-	-
⑪	緊急輸送道路(県道2号柳交差点)	-	-	-	-
⑫	市街地北(県道2号川原交差点)	-	-	-	-
⑬	市街地西(県道10号料亭W付近)	-	-	-	-
⑭	市街地東(出石明治館)	-	-	-	-

※地点⑦～⑭は筆者らにより設定

3. 結果と考察

3.1 複合的氾濫時の氾濫被害時系列変化

全ての氾濫外力（出石川の越流氾濫，谷山川の越流氾濫，全土石流危険渓流からの土石流流入）を考慮した Case 1 におけるピーク流量時刻から 10 分後，30 分後，1 時間後，3 時間後，5 時間後，

10 時間後における計算期間内最大浸水深平面分布を図 6 に，計算流速平面分布を図 7 に示す。出石地区中心部（避難目的地⑧⑨周辺）の街路では，ピーク流量時刻から 30 分後には既に浸水深が 0.50 m を超過しており，出石地区中心部の住民・観光客の避難行動が困難となること示唆される。

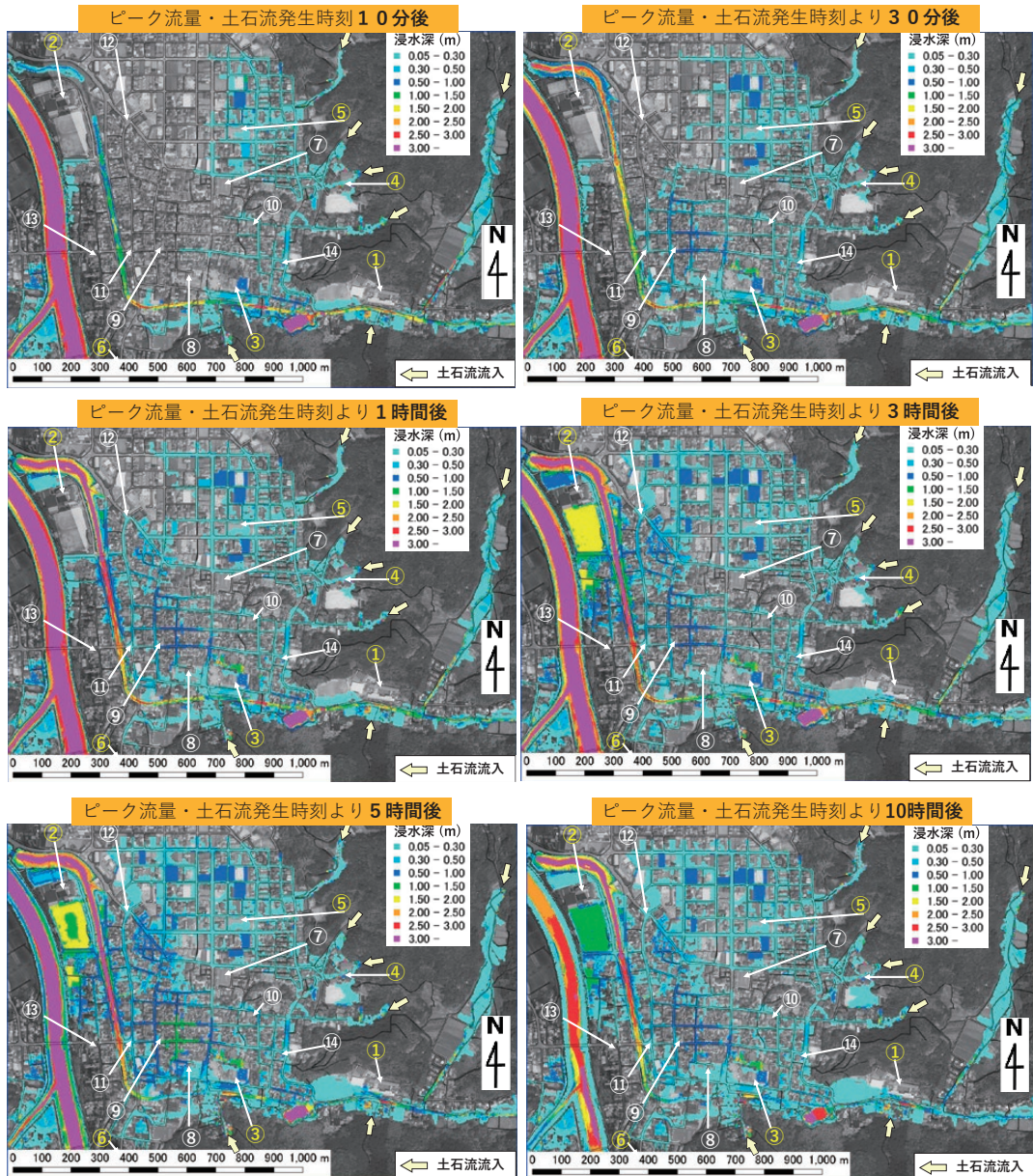


図 6 Case 1 における計算浸水深平面分布の時系列変化（図中の番号は「避難目的地」「避難開始点」を示す）

図7より、谷山川や土石流危険渓流の流向と同じ方向となる東西方向の街路の上の流速が大きいことから、これらの街路が導水路の役割を果たし洪水流がすばやく中心部に供給される可能性があることも示唆される。さらに、谷山川下流端（出石川合流点）に設けられている水門により、谷山川放

水路が機能しない場合は谷山川下流（②⑪⑬周辺）で流れが停滞し、沿川での氾濫が拡大する可能性も示唆される。加えて、10時間後の結果から、ポンプ排水などの対策が講じられない場合は、ピーク流量時刻から10時間後も出石地区中心部の浸水深は低下しないことも示唆される。一方で、出石

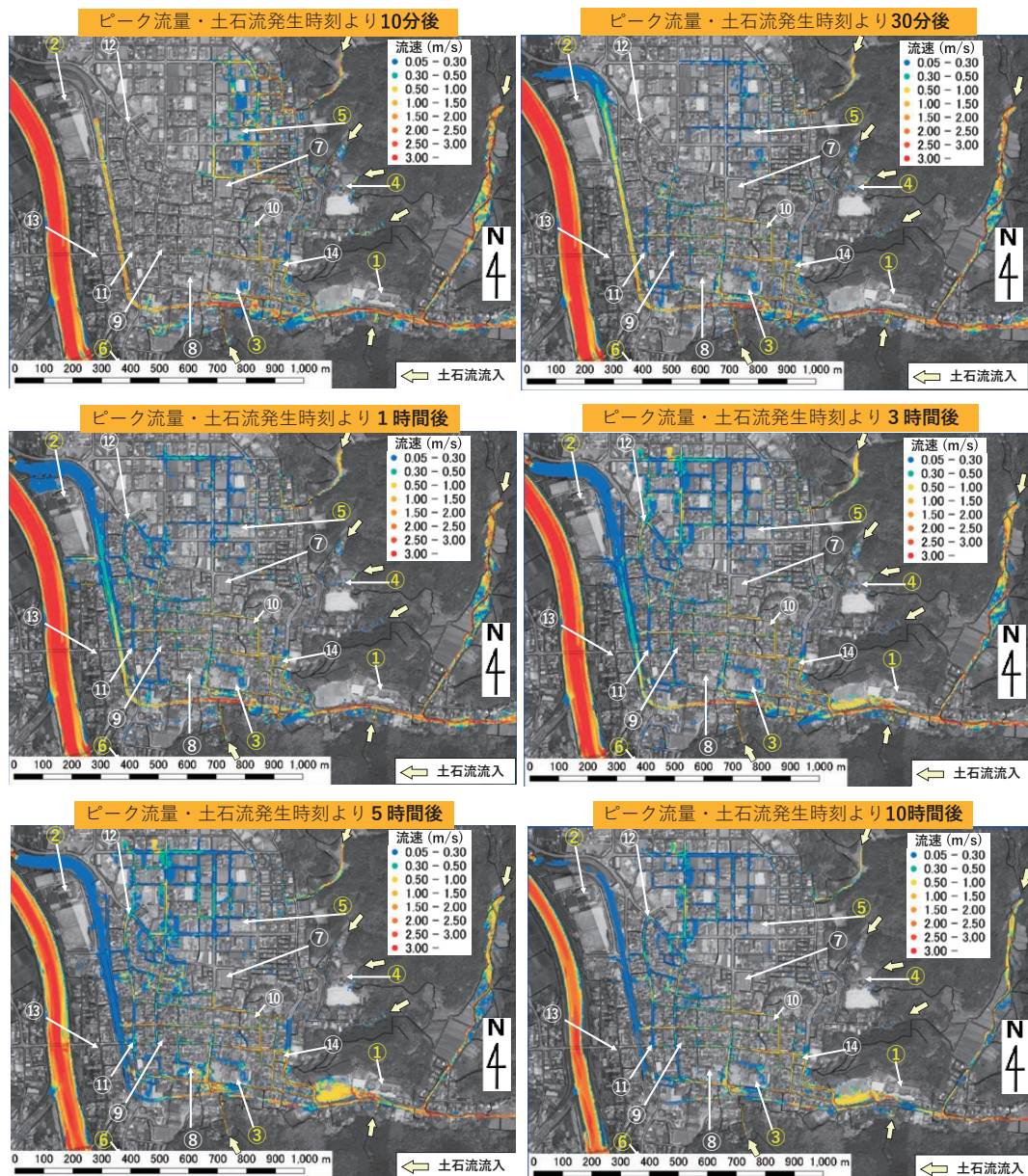


図7 Case 1における計算流速平面分布の時系列変化（図中の番号は「避難目的地」「避難開始点」を示す）

地区の大規模駐車場⑦の周辺は、いずれの氾濫外力の影響も受けにくい場所であることも示唆された。このように、本研究の複合的氾濫および人工物配置を考慮した数値シミュレーションにより、対象地区内の浸水被害リスクの偏在性が明らかとなった。これらの情報は、各氾濫外力による最大被害リスクを包絡・併記した従来のハザードマップからは得られない情報であり、市街地内の避難行動時の被災リスク軽減において有用な情報とな

り得ると考えられる。

3.2 複数の氾濫外力の組み合わせ別の氾濫被害特性

図8は全Caseの計算期間内での最大浸水深の平面分布を示している。なお、各Caseの出石地区中心部の浸水深分布を拡大したものを拡大図A、Bとして合わせて示している。Case1およびCase2を比較すると、Case1では出石川左岸側

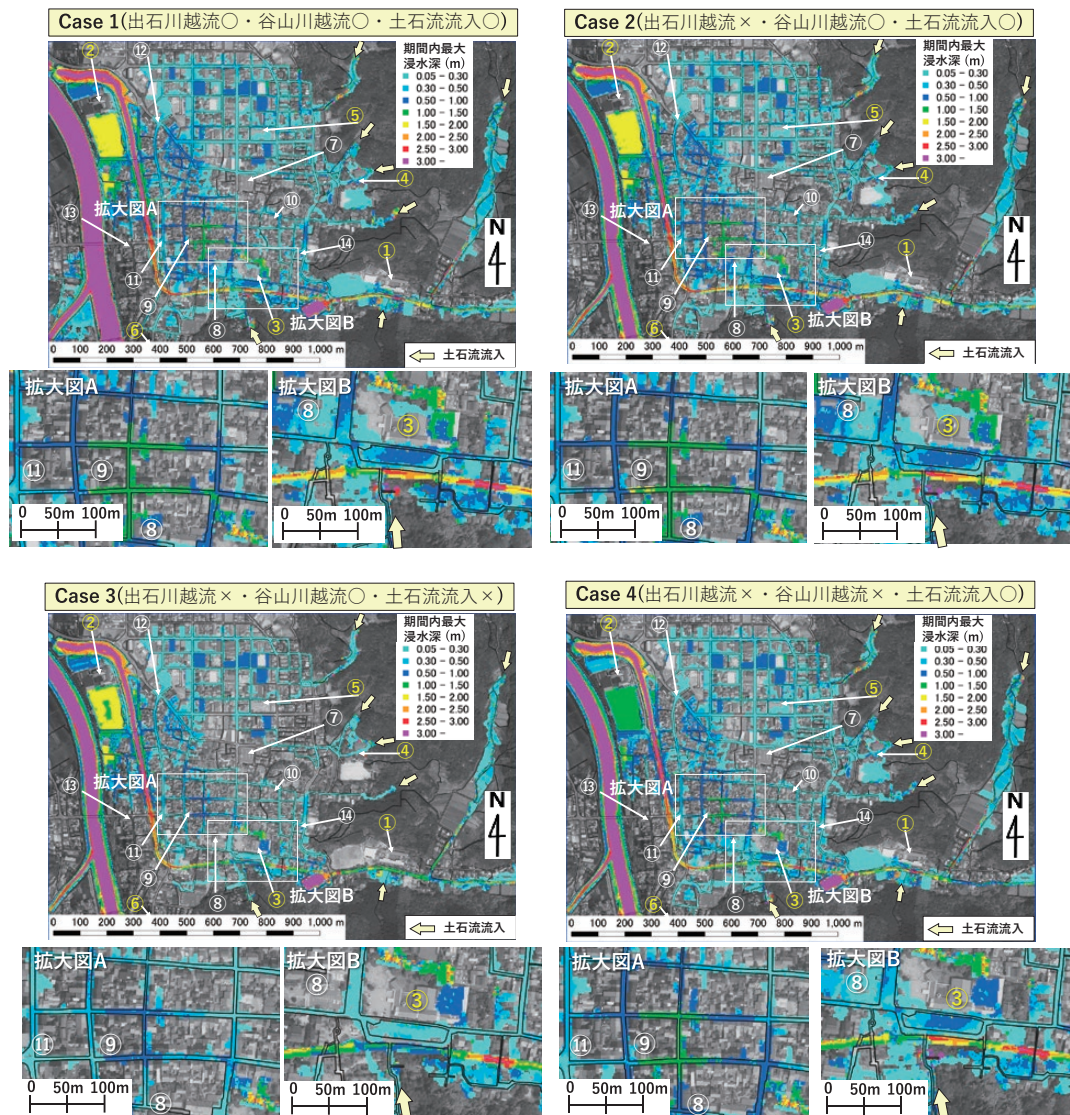


図8 Case別の計算期間内の最大浸水深平面分布 (図中の番号は「避難目的地」「避難開始点」を示す)

で0.30～0.50 m程度の越流浸水が発生し両者に違いがあるが、右岸の出石地区では両者の氾濫状況にほとんど違いは見られなかった。このことから、「i 出石川からの越流氾濫」が出石地区の氾濫被害へ及ぼす影響は小さいと考えられる。Case 2～4を比較すると、Case 2の最大浸水深分布に近いのはCase 4であることから、出石地区中心部の浸水被害は、「ii 谷山川からの越流氾濫」よりも「iii 土石流危険渓流からの土石流流入」のほうが氾濫への影響がより大きいと考えられる。このよ



図9 平成26年広島市土石流災害後の浸水状況（八木三丁目，筆者により2014/8/21撮影）

うな土石流発生による市街地内の浸水被害は平成26年8月広島市安佐南区でも確認されており（図9参照），本モデルを用いたシミュレーションによって市街地内の複合的氾濫が有する特性を表現可能であることがわかる。

図10はCase 3およびCase 4の計算終了時の土砂堆積厚平面分布を示している。これらの図より、土石流流入を考慮したCase 4では、出石庁舎前（③周辺，拡大図A参照）や放水路上流域（①周辺，拡大図B参照）の谷山川との合流点で土砂堆積が顕著となっており，これらの土砂堆積により谷山川の洪水流下が抑制されて合流点周辺の氾濫範囲が拡大する可能性が示されている。これは，図7拡大図Bに示すCase 4の最大浸水深分布において，これらの合流点周辺で氾濫範囲が拡大していることから明らかである。なお，土石流流入を考慮しないCase 3でも1 m未満の浅い河床上昇（土砂堆積）が合流点付近で発生している。これは一次元計算の渓流部に設けた初期侵食可能土砂厚を流水が侵食して合流点まで流下したためであるが，これらの土砂堆積による合流点付近での氾濫範囲拡大は見られない（図8拡大図B参照）。このことから，土石流流入と河川氾濫が同時に発

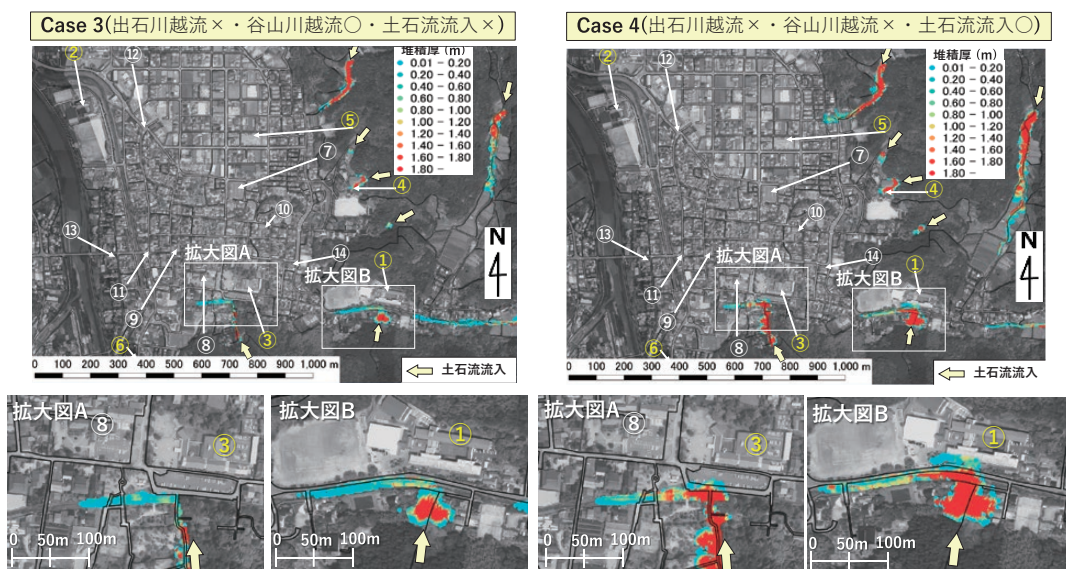


図10 計算終了時の土砂堆積厚平面分布（Case 3およびCase 4，図中の番号は「避難目的地」「避難開始点」を示す）

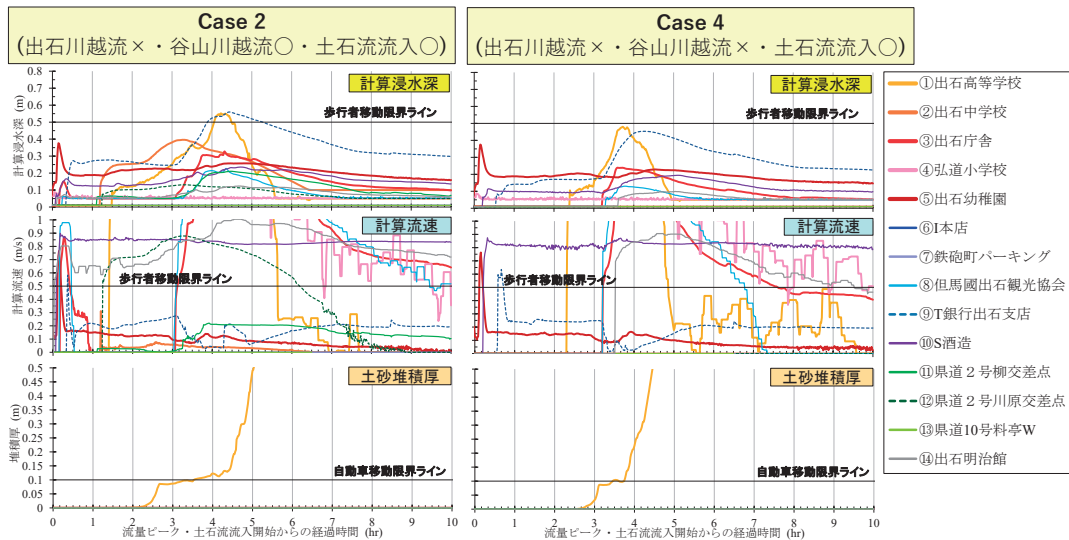


図11 計算期間内の地点①～⑭周辺の計算値時間変化 (Case 2 および Case 4)

生ずる複合的氾濫では、それぞれの外力に対する氾濫からは想定できない被災リスクが発生する可能性があることがわかる。

図11は Case 2 および Case 4 の計算期間における地点①～⑭周辺の計算浸水深、計算流速および計算土砂堆積厚の時間変化を示している。なお、本検討では「水害ハザードマップ作成の手引き」の実験データ³¹⁾を踏まえて、10 cm 未満の計算浸水深で算定された場合の流速値は避難に影響ないものとし、検討には用いていない。この図より、各地点の計算浸水深および計算流速については Case 4 よりも Case 2 のほうが概ね大きくなり、さらに Case 2 のほうが計算値が高い状態がより長くなることがわかる。これは、Case 2 では②谷山川の越流氾濫が追加され、より氾濫外力が大きい条件となっているためである。しかしながら、計算値の時間変化の傾向は似ており、ピーク流量時刻から2～3時間後に浸水深が増加して5時間後以降に低減する傾向や、移動困難状況の発生は流速値の超過によるものが多い傾向等が同じであった。これは、前述したように、出石地区の浸水被害に対して、ii 谷山川の越流氾濫よりも iii 土石流流入のほうが影響が大きいことを示していると考えられる。このように、両者の計算値の差分

を考察することで、それぞれの外力の影響の程度を見積もることができる。

以上より、本研究で実施したシミュレーション結果は、複合的氾濫特有の氾濫特性を表現可能とし、河川越流や土石流流入等などの氾濫外力が被害に強く影響するかを見積もることが可能となった。

3.3 複数的氾濫時の避難目的地までの移動安全性評価

数値シミュレーション結果に基づく複合氾濫時の避難目的地別の避難安全性評価の一例を表4に示す。この表では Case 2 のシミュレーション結果より地点①～③を「避難目的地」、地点①～⑭を「避難目的地」とした場合のそれぞれの T_{a1} 、 T_{a2} と「避難行動時に懸念される被災リスク」の有無により、避難目的地までの避難安全性を「○」、「△」および「×」で評価している。ここで、「避難行動時に懸念される被災リスク」とは、避難所周辺および避難ルート上のいずれかの計算メッシュの浸水深、流速、堆積土砂厚が歩行困難または自動車移動困難と判断される場合としている。本検討では、「避難行動時に懸念される被災リスク」の有無は数値計算結果の平面分布から確認す

表4 複合氾濫時の避難目的地までの移動安全性評価の一例 (Case 2 の地点①～③)

避難目的地 No.	避難開始点 No.	距離 (m)	リードタイム T_L (min)		T_1		T_2		T_{a1} (min)	避難目的地 (一次) としての評価	T_3		T_4		T_{a2} (min)	避難目的地 (二次) としての評価	避難行動時に懸念される被災リスク
			時刻 (min)	原因	時刻 (min)	原因	時刻 (min)	原因			時刻 (min)	原因					
①	①	0	0	97	流速	97	流速	0	—	334	流速	212	堆積	-122	×	「ii 谷山川からの越流氾濫」による谷山川沿いで浸水による被災リスクあり 「iii 土石流流入」による入口付近での土砂堆積による被災リスクあり	
	②	1700	57	非発生	—	97	流速	—	避難無	334	流速	212	堆積	-179	×		
	③	650	22	11	流速	97	流速	64	△	334	流速	212	堆積	-144	×		
	④	850	28	0	堆積	97	流速	62	△	334	流速	212	堆積	-150	×		
	⑤	1100	37	13	流速	97	流速	48	△	334	流速	212	堆積	-159	×		
	⑥	1400	47	非発生	—	97	流速	—	避難無	334	流速	212	堆積	-169	×		
	⑦	700	23	非発生	—	97	流速	—	避難無	334	流速	212	堆積	-145	×		
	⑧	500	17	30	流速	97	流速	58	△	334	流速	212	堆積	-139	×		
	⑨	700	23	22	流速	97	流速	47	△	334	流速	212	堆積	-145	×		
	⑩	450	15	5	流速	97	流速	70	△	334	流速	212	堆積	-137	×		
	⑪	800	27	非発生	—	97	流速	—	避難無	334	流速	212	堆積	-149	×		
	⑫	1200	40	75	流速	97	流速	-25	×	334	流速	212	堆積	-162	×		
	⑬	900	30	非発生	—	97	流速	—	避難無	334	流速	212	堆積	-152	×		
	⑭	260	9	5	流速	97	流速	70	△	334	流速	212	堆積	-131	×		
②	①	1700	57	97	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△	「ii 谷山川からの越流氾濫」による谷山川沿いで浸水による被災リスクあり	
	②	0	0	非発生	—	非発生	—	—	—	非発生	—	∞	—	∞	△		
	③	1100	37	11	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	④	1300	43	0	堆積	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑤	1000	33	13	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑥	1300	43	非発生	—	非発生	—	—	避難無	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑦	750	25	非発生	—	非発生	—	—	避難無	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑧	850	28	30	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑨	650	22	22	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑩	950	32	5	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑪	550	18	非発生	—	非発生	—	—	避難無	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑫	400	13	75	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑬	550	18	非発生	—	非発生	—	—	避難無	非発生	—	∞	—	∞	△		
	⑭	1100	37	5	流速	非発生	—	∞	△	非発生	—	∞	—	∞	△		
③	①	650	22	97	流速	10	流速	-108	×	26	流速	188	流速	140	△	「iii 土石流流入」による建物入口付近での浸水による被災リスクあり	
	②	1100	37	非発生	—	10	流速	—	避難無	26	流速	188	流速	125	△		
	③	0	0	11	流速	10	流速	0	—	26	流速	188	流速	162	△		
	④	800	27	0	堆積	10	流速	-16	×	26	流速	188	流速	135	△		
	⑤	600	20	13	流速	10	流速	-16	×	26	流速	188	流速	142	△		
	⑥	750	25	非発生	—	10	流速	—	避難無	26	流速	188	流速	137	△		
	⑦	300	10	非発生	—	10	流速	—	避難無	26	流速	188	流速	152	△		
	⑧	150	5	30	流速	10	流速	-24	×	26	流速	188	流速	157	△		
	⑨	260	9	22	流速	10	流速	-20	×	26	流速	188	流速	153	△		
	⑩	350	12	5	流速	10	流速	-6	×	26	流速	188	流速	150	△		
	⑪	350	12	非発生	—	10	流速	—	避難無	26	流速	188	流速	150	△		
	⑫	750	25	75	流速	10	流速	-89	×	26	流速	188	流速	137	△		
	⑬	450	15	非発生	—	10	流速	—	避難無	26	流速	188	流速	147	△		
	⑭	350	12	5	流速	10	流速	-6	×	26	流速	188	流速	150	△		

表5 複合氾濫時の避難目的地までの移動安全性評価 (Case 2)

		避難目的地 (一次)														避難目的地 (二次)													
		① ※1	② ※1	③ ※3	④	⑤	⑥ ※2	⑦	⑧ ※3	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬ ※2	⑭	① ※1	② ※1	③ ※3	④	⑤	⑥ ※2	⑦	⑧ ※3	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬ ※2	⑭
避難開始点	①	△	×	×	×	△	○	×	×	×	○	×	△	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×		
	②	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	×	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×		
	③	△	△	×	×	△	○	△	○	×	○	○	△	×	×	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×		
	④	△	△	×	×	△	○	△	×	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑤	△	△	×	×	△	○	△	×	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑥	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑦	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑧	△	△	×	×	△	○	△	×	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑨	△	△	×	×	△	○	△	×	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑩	△	△	×	×	△	○	△	○	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑪	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑫	×	△	×	×	△	○	×	×	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑬	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	無	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	
	⑭	△	△	×	×	△	○	△	○	×	○	○	△	×	×	△	△	×	○	△	○	△	○	×	○	○	△	×	

「○」は T_{a1}, T_{a2} が > 0 、かつ、避難所周辺および避難ルート上に被災の懸念がない場合、
 「無」は $T_{a1} = \infty$ (洪水非発生) となり、避難の必要性が無い場合、
 「△」は T_{a1}, T_{a2} が > 0 、避難所周辺および避難ルート上に被災の懸念がある場合、
 「×」は T_{a1}, T_{a2} が < 0 で避難目的地までの移動においてリードタイムを確保できない場合
 ※1: 「ii 谷山川からの越流氾濫」の外力による谷山川沿いでの浸水による被災リスクがあるため「△」とした。
 ※2: 「ii 谷山川からの越流氾濫」による谷山川横断時の浸水による被災リスクがあるため「△」とした。
 ※3: 「iii 土石流流入」による建物入口付近での浸水による被災リスクがあるため「△」とした。

る方法で簡易的に評価している。以上より、表中の「○」は T_{a1}, T_{a2} が > 0 となり、かつ、「避難行動時に懸念される被災リスク」がない場合、「△」は T_{a1}, T_{a2} が > 0 となるが、「避難行動時に懸念される被災リスク」がある場合、「×」は T_{a1}, T_{a2} が < 0 となり、避難目的地までの移動においてリードタイムを確保できない場合を示す。そもそも避難開始地点が安全と評価される場合は T_1 を「非発生」と記載し、避難目的地の評価欄に「避難無」と明記している。

この表より、一次的避難目的地として有用であっても、その後の流速超過や堆積厚超過により二次的避難には適さない箇所が存在する一方、一次的避難よりも二次避難場所として有用と考えられる箇所も存在することがわかる。本評価方法では、避難行動を単純化して、想定した「避難目的地」と「避難開始点」での移動困難時刻の差から評価しているが、流れの上流側に向かって移動する場合や避難ルート上に移動困難箇所が発生する場面があることを考慮していない。これらの点については、避難時の地域住民の行動原理や避難困

難性に関する十分な検討を踏まえた条件設定が必要であり、本手法の妥当性を高めるためには必要不可欠な課題である。

表5は、表4の整理により得られた、Case 2における地点①～⑭に対する複合氾濫時の避難目的地までの避難安全性を一覧で示している。地点①～⑥が市町村が指定する「指定緊急避難場所」または「指定避難所」であるが、既往最大規模の複合的氾濫時にはこれらを避難目的地として設定した場合の避難安全性が低くなる可能性がある。これらの地点が河川や土石流危険渓流に隣接しており、被災リスクが比較的高い地域に立地していることが原因である。一方で、避難開始点として設定した地点⑦や地点⑩～⑫では、一次・二次避難目的地としての避難が安全であることが示唆される。これらの地点は駐車場や道路交差点であるため、避難施設は設置されていないが、今後当該地区における安全な避難施設の配置を検討する際には有用な情報となると考えられる。

4. まとめと今後の課題

本研究では、山地や河川が隣接する建物密集地域において、本川洪水氾濫、支川洪水氾濫、土石流入といった多様な外力による複合的氾濫時の避難経路（避難目的地までの移動）の安全性について、数値シミュレーション結果に基づいて検証した。本検証では、対象地区内に「避難開始点」および「避難目的地」を設定し、これら2地点間の避難移動に必要な時間（リードタイム）と、シミュレーション結果による避難開始点周辺の浸水開始時刻から避難目的地周辺の浸水開始時刻までの差分値を検証の指標として用いた。

土石流・洪水流による複合的外力および氾濫場の人工物配置を考慮した氾濫シミュレーションによって、対象地区内の浸水被害リスクの偏在性や外力別の氾濫被害への影響の程度を見積もることが可能となった。次に、対象地区の「避難目的地」および「避難開始点」を設定し、これらの2地点間の避難安全性を簡易的に評価したところ、河川や土石流危険渓流に隣接する一部の「指定緊急避難場所」や「指定避難所」の安全性が、既往最大規模の複合的氾濫時には低くなる可能性が示唆された。一方で、避難開始点として設定したいくつかの地点で、一次・二次避難目的地としての十分な安全性が確保されていることも示された。これらの地点は駐車場や道路交差点であり、避難施設は設置されていないが、今後当該地区のより安全な避難施設を検討するにあたっては有用な情報となると考えられる。これらの情報は、各氾濫外力による最大被害リスクを包絡・併記した従来のハザードマップからは得られない情報であり、今後の複合的氾濫に対する避難対策に活用可能な指標となり得ると考えられた。

ただし、本研究では、避難行動を単純化して、想定した「避難目的地」と「避難開始点」での移動困難時刻の差のみから安全性を評価しており、流れの上流側に向かって移動する場合や避難ルート上に移動困難箇所が発生する場合などを氾濫時の移動困難さを十分に表現できていない。これらの点については、避難時の地域住民の行動原理や避難困難性に関する十分な検討を踏まえた条件設定

が必要である。また、本研究では避難が最も困難な状況を想定するため、避難のトリガーを対象地点の浸水確認時としたが、タイムラインなどを活用した事前避難の検討は必要不可欠である。事前避難の検討では、避難判断の基準となる水位計や監視カメラ等による現地情報の把握手段なども合わせて検討する必要がある。

本稿の内容の一部は「自然災害研究協議会中国地区部会 令和3年度研究発表会」で発表した内容を更新したものである。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 22K14454 の助成を受けたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：令和2年度版国土交通白書，p.50, 2020.
- 2) 筒井和男・西岡恒志・福田和寿・坂口武弘・木下篤彦・今森直紀・田中健貴・島田徹：ヒアリング調査を基にした平成23年那智川災害の避難行動に関する研究，第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集，pp.37-42, 2016.
- 3) 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.
- 4) 清水収・川西志歩：2017年九州北部豪雨による赤谷川支川乙石川の氾濫実態と家屋残存地の地形に基づく安全な場所の地形条件，砂防学会誌，Vol.71, No.5, pp.32-37, 2019.
- 5) 南雲直子・江頭進治：2017年九州北部豪雨による赤谷川流域の氾濫の実態と地形分類に基づく被災家屋の立地分析，地学雑誌，Vol.128, No.6, pp.835-854, 2019.
- 6) 内閣府防災担当：平成29年7月九州北部豪雨を踏まえた避難に関する検討会，資料3，2017. http://www.bousai.go.jp/fusuigai/kyusyu_hinan/pdf/dailkai/siryo3.pdf, 2023年4月5日.
- 7) 内山庄一郎・須貝俊彦：平成26年8月豪雨による広島市土石流災害の被害の特徴，自然災害科学，Vol.38, 特別号，pp.57-79, 2019.
- 8) 長谷川祐治・中谷加奈・海堀正博・里深好文：土砂災害警戒区域内の住宅地における土石流の

- 危険度分布の検討, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.75, No.2, pp.I_181-I_186, 2019.
- 9) 一般社団法人全国治水砂防協会: 改訂版土砂災害防止法令の解説, 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律, 第2版, pp.73-93, 大成出版社, 2016.
 - 10) 中筋章人: なぜ「土砂災害ハザードマップ」はできないのか, 応用地質, Vol.46, No.5, pp.250-255, 2005.
 - 11) 福岡捷二・川島幹雄・横山洋・水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集, No.600, pp.23-36, 1998.
 - 12) 中谷加奈・奥山悠木・長谷川祐治・里深好文・水山高久: 扇状地における家屋が土石流の氾濫・堆積に与える影響, 砂防学会誌, Vol.65, No.4, pp.15-23, 2012.
 - 13) 速見智・和田孝志・柳崎剛・長井斎・岸上直之・向井信之・中谷加奈・里深好文・水山高久: 急勾配に存在する建物および道路の影響を考慮した土石流氾濫実験, 平成29年度砂防学会研究発表会概要集, pp.124-125, 2017.
 - 14) 糸教哲・中谷加奈・山野井一輝・長谷川祐治・藤田正治: 土石流シミュレータを用いた土石流発生時の避難経路の検討, 京都大学防災研究所年報, Vol.59, B, pp.420-425, 2016.
 - 15) 中本英利・竹林洋史・宮田英樹・藤田正治: 家屋の破壊過程を考慮した土石流の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I_919-I_924, 2018.
 - 16) 中谷加奈・小杉恵・里深好文・水山高久: 家屋や道路が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響, 2014年8月に発生した広島土砂災害を対象として, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I_919-I_924, 2018.
 - 17) 内閣府 (防災担当): 避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン, 2015.
 - 18) 高木朗義・小山真紀・井草正人・藤井孝文・岩垣津信太郎: 洪水・土砂災害リスクの認知と住民避難行動の実態, 令和2年7月豪雨災害における岐阜県を事例に, 自然災害科学, Vol.40, 特別号, pp.93-110, 2021.
 - 19) 竹下史朗・小林一郎・山田文彦・上野幹夫: マルチエージェントモデルを用いた洪水・避難シミュレータの開発, 土木情報利用技術論文集, Vol.16, pp.203-212, 2007.
 - 20) 大上俊之・山本祐輔・豊田政史・小山茂: マルチエージェントモデルを用いた河川氾濫時の避難行動シミュレーション, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol.70, No.2, pp.I_123-I_128, 2014.
 - 21) 兵庫県: 市町津波避難計画策定の手引き, p.23, 2018.
 - 22) G 空間情報センター: 兵庫県_全域 DSM (2010年度~2018年度), <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/2010-2018-hyogo-geo-dsm>, 2023年1月28日.
 - 23) Wada T., K. Nakatani, Y. Satofuka, T. Mizuyama, K. Kosugi, H. Miwa: Development of a Numerical Model for Deposition and Flood Propagation by Multiple Inflows of Debris Flows and River Floods, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol.14, No.2, pp.20-30, 2021.
 - 24) 高橋保: 土砂流出現象と土砂害対策, 近未来社, pp.178-184, 2006.
 - 25) 中川一・高橋保・里深好文・川池健司: 1999年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について, 数値シミュレーションによる再現計算と砂防施設配置効果の評価, 京都大学防災研究所年報, Vol.44, B-2, pp.207-228, 2001.
 - 26) 里深好文・水山高久: 砂防ダムが設置された領域における土石流の流動・堆積に関する数値計算, 砂防学会誌, Vol.58, No.1, pp.14-19, 2005.
 - 27) 中央防災会議 防災対策実行会議「洪水・高潮氾濫からの大規模・広域避難検討ワーキンググループ」: 洪水・高潮氾濫からの大規模・広域避難に関する基本的な考え方 (報告), p.10, 2018.
 - 28) 国土交通省 国土技術政策総合研究所: 砂防基本計画策定指針 (土石流・流木対策編) 解説, 国土技術政策総合研究所資料第904号, pp.16-32, 2016.
 - 29) 中川一・高橋保・澤田豊明・里深好文: 計画土石流の設定と避難計画, 京大防災研究所年報, Vol.39, B-2, pp.347-371, 1996.
 - 30) 兵庫県土木局河川整備課: 事後評価調書【河川事業】一級河川出石川.
 - 31) 国土交通省水管理・国土保全局 河川環境課水防企画室: 水害ハザードマップ作成の手引き, p.80, 2016.
 - 32) 坂井佑介・永吉修平・國友優: 火山灰堆積地での現地調査における自動車走行上の留意点, 土砂災害防止法に基づく緊急調査の実施を想定した現地試験結果より, 土木技術資料, Vol.58,

No.9, pp.8-13, 2016.

(投稿受理：2023年4月7日
訂正稿受理：2023年7月20日)

要 旨

山地や河川に近接した人口密集地では、土石流や洪水の同時流入による複合氾濫に対して、より効果的な避難対策を確立する必要がある。本研究では、土石流や洪水流の同時流入による複合的氾濫を考慮した数値計算モデルを用いて、複合的氾濫時の避難経路（避難目的地までの移動）の安全性を検証した。避難経路の安全性は、「避難開始地点」から「避難目的地」までの移動所要時間と、これら2地点間の浸水開始時間（計算値）の差との関係から求めた。その結果、複合氾濫時に対象地区の浸水被害リスク分布が推定され、より安全な避難経路や避難目的地を特定することが可能となった。また、土石流や洪水流等の氾濫外力が複合的氾濫に与える影響の大きさを推定することも可能となった。