

千種川流域を対象にした RRI モデルによる降雨流出・洪水氾濫統合型解析

山本 浩大¹・佐山 敬洋²・近者 敦彦³・中村 要介³・三宅 慎太郎¹・寶 馨²

Integrated Analysis of Rainfall-Runoff and Flood Inundation by the RRI Model in the Chikusa River Basin

K. YAMAMOTO¹, T. SAYAMA², A. KONJA³, Y. NAKAMURA³,
S. MIYAKE¹ and K. TAKARA²

Abstract

Flood inundation caused by typhoon No 9 in 2009 is simulated at the Chikusa entire river basin with the Rainfall-Runoff-Inundation model. This study applies the model to simulate the floods at the river basin scale with total 1,632 cross section information from 57 rivers in the basin. The simulated results were compared with observed data at several gauging stations and flood inundation records. The reasonable agreement between observation and simulation suggested the model reproducibility for the floods at the river basin scale. The simulation also shows that the importance for taking into account inundation processes for reasonable water level and discharge simulations during the extreme event.

キーワード：洪水災害，流域規模，降雨流出氾濫，実河川任意断面

Key words： flood disaster, basin scale, rainfall-runoff-inundation, arbitrary cross section

1. はじめに

近年，局所的な豪雨の影響により計画規模に匹敵する，あるいはそれを上回るような洪水が発生し，都道府県管理の中小河川などで深刻な洪水被害が頻発している¹⁾。2009年8月の台風9号に

よって兵庫県佐用町を中心に局所的な豪雨が発生し，千種川水系の上流部で溢水・越水被害が発生した。特に佐用川流域では山地からの流出や支川の氾濫が複合することにより，各地で深刻な被害が生じた²⁾。流域内の各地で発生する氾濫を伴う

¹ 京都大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kyoto University, Kyoto,
Japan

² 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University,
Uji, Japan

³ 三井共同建設コンサルタント株式会社
Mitsui Consultants Co., Ltd.

洪水災害に対し、河川管理者はもとより市町村の防災担当者は、早期に河川水位と氾濫規模の全容を把握することが重要である。また、こうした豪雨災害に対して、治水整備のみで安全を確保することは難しく、洪水予測システムに基づく避難体制を構築することも重要である。

洪水予測のモデルとして、最近では分布型モデル³⁾の実用化も進んでいるが、それらのモデルの多くは雨量から流出量を予測し、河川水位に換算するものが多く、氾濫を予測するものではない。また、洪水氾濫の影響が河川流量に大きく影響する場合は、従来の洪水予測モデルでは、氾濫後の河川流量の再現性に問題がある⁴⁾。一方、既存の氾濫モデル^{5,6)}は、破堤地点からの越流量や河川水位を境界条件とし、特定の氾濫原を対象に適用することが一般的である。

小河川を含む流域全体で考えた場合、流域の複数箇所でも氾濫が発生するため、小河川の水位やその周辺の浸水状況を包括的に把握する必要がある。そのためには、流域全体で降雨を入力として流出過程と氾濫過程を一体的に解く数値モデルの利用が望ましい。流出・氾濫の一体解析モデルは、例えば小林ら⁷⁾、重枝ら⁸⁾、天口ら⁹⁾を含む複数のモデルが提案されており、本研究で適用する降雨流出氾濫 (Rainfall-Runoff-Inundation model: RRI) モデル¹⁰⁾もその一つである。RRI モデルは、これまでタイのチャオプラヤ川流域など、主に低平地を含む大河川流域を対象に適用されてきた¹¹⁾が、最近では国内の中小河川を含む流域への適用も進んでいる。例えば、栗林ら¹²⁾は阿賀野川流域の一部を対象に、上流の河川流量を境界条件として RRI モデルを適用し、阿賀町の浸水リスクを分析している。また佐山ら¹³⁾は、本研究の対象領域内の一支出である兵庫県の佐用川流域を対象に同モデルを適用し、2009年の洪水を解析している。ただし、佐用川への適用事例では河川断面を矩形で仮定しており、任意の断面形状をモデルに反映させた詳細な検討は行っていない。特に中小河川を含めて河川の断面情報を詳細に反映した場合に、流域全体で流量・水位・浸水範囲を整合性の取れた形で再現できるかどうかは明らかになっておら

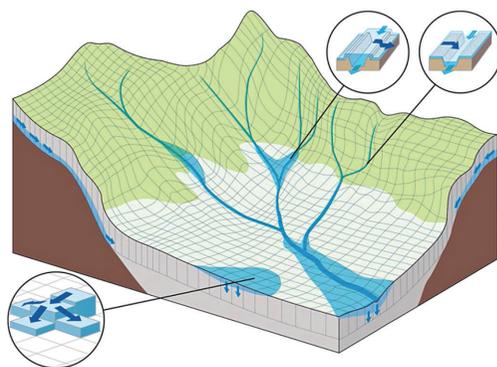


図1 RRI モデルの概

ず、その検証が国内中小河川を含めたモデル適用の可能性を知るうえで重要な課題である。

このような背景のもと、本研究は流域各地で氾濫が発生した千種川流域を対象に、2009年の台風9号による洪水現象の再現を試みた。入力データはレーダーアメダス解析雨量や高解像度 DEM データを用い、流域内57河川、1,632箇所の断面情報をモデルで反映した。また、モデルパラメータを流域一様で設定し、河川流量・水位・氾濫が流域全体で整合性を保った状態で再現できるかを検証した。また氾濫現象を考慮する場合としない場合を比較して、上流域の氾濫が下流側の河川水位の推定に及ぼす影響を定量評価した。

2. 降雨流出氾濫モデル

RRI モデルは、流域全体を格子単位で分割する分布型モデルであり、降雨を入力して降雨流出と洪水氾濫を一体的に解析する。降雨は流域斜面に入力し、河道と斜面で水の流れを計算するとともに、両者の水のやり取りを計算する¹¹⁾。

(1) 流域斜面の基礎式

流域斜面に適用する基礎式は、連続式(1)と二次元の浅水方程式(2)である。以下では、簡単のため x 方向のみの式を記載している。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = r - f \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho_w} \quad (2)$$

ここに、 h ：水深、 u, v ： x, y 方向の流速、 q_x, q_y ： x, y 方向の流量フラックス、 r ：降雨強度、 f ：鉛直浸透強度、 g ：重力加速度、 t ：時間、 H ：基準面からの水位、 τ_x ：境界面摩擦応力、 ρ_w ：水の密度である。RRI モデルは拡散波近似を仮定して、(2) 式左辺の慣性項を無視することによって、流量を(3) 式で計算する。

$$q_x = -\frac{1}{n} h^{\frac{5}{3}} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (3)$$

ここに n ：粗度係数である。

(2) 流域斜面の側方浸透流と鉛直浸透流

流域斜面は山地部と平野部に分けて、前者では側方浸透流を、後者では鉛直浸透流を考慮する。

a) 山地部の側方浸透流

山地部には不飽和・飽和側方流と表面流を一体的に解析する流量流積関係式(4)¹⁴⁾を適用する。簡単のため x 方向のみの式を記載している。

$$q_x = \begin{cases} -k_m d_m \left(\frac{h}{d_m} \right)^\beta \frac{\partial H}{\partial x} & (h \leq d_m) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x} & (d_m < h \leq d_a) \\ -k_a (h - d_m) \frac{\partial H}{\partial x} - k_m d_m \frac{\partial H}{\partial x} & (d_a < h) \\ -\frac{1}{n} (h - d_a)^{\frac{5}{3}} \sqrt{\left| \frac{\partial H}{\partial x} \right|} \operatorname{sgn} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) & \end{cases} \quad (4)$$

ここに k_a ：飽和透水係数、 d_a ：土層厚×空隙率、 d_m ：マトリクス部の層厚、 $k_m = k_a / \beta$ (β ：定数) である。

b) 平野部の鉛直浸透流

斜面勾配が小さい平野部では、降雨の初期損失を考慮するため Green-Ampt モデル¹⁵⁾を用いて(5) 式で鉛直浸透を計算し、その余剰分を表面流として追跡する。

$$f = k_v \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_f}{F} \right] \quad (5)$$

ここに k_v ：鉛直飽和透水係数、 ϕ ：空隙率、 θ_i ：初期体積含水率、 S_f ：湿潤前線の吸引圧、 F ：累積浸透量である。

(3) 河道部の基礎式

河道部は(1)、(2) 式を一次元にした拡散波近似式を適用する。河道のあるグリッドセルでは、河道を線分として表現し、河道と斜面の両方を配置する。河道の一次元計算では任意の河道断面情報を反映できるようにしており、その幅や深さはモデルのグリッドサイズには制限されない。このためモデルの空間解像度によらず、中小河川の洪水追跡やその氾濫も計算できる。

(4) 河道と斜面の水の流出入

斜面と河道の水交換は、以下の a) から d) の場合に分けて、段落ち式または越流式によって計算する。

a) 河道水位が地盤高より低い場合：斜面から河道の流量は段落ち式(6) により計算する。

$$q_{sr} = \mu_1 h_s \sqrt{g h_s} \quad (6)$$

ここに μ_1 は定数、 q_{sr} は斜面部から河道部への流量、 h_s は斜面部の水深である。

b) 河道水位が斜面水位より高い、かつ河道水位と斜面水位の両方が堤防高より低い場合：両水位とも堤防高より低い場合水やり取りをしない。

c) 河道水位が斜面水位と堤防高さより高い場合：河道から斜面への流量は越流公式(7) により計算する。

$$q_{rs} = \begin{cases} \mu_2 h_1 \sqrt{2g h_1} & \frac{h_2}{h_1} \leq \frac{2}{3} \\ \mu_3 h_2 \sqrt{2g (h_1 - h_2)} & \frac{h_2}{h_1} > \frac{2}{3} \end{cases} \quad (7)$$

ここに μ_2 と μ_3 は定数、 q_{rs} は河道部から斜面部への流量、 h_1 は堤防の頂点からの河道水位、

h_2 は堤防の頂点からの斜面水位である。

- d) 斜面水位が河道水位と堤防高さより高い場合：斜面部から河道部への流量は(7)式の越流公式で計算する。

3. 千種川流域の洪水の概要

千種川流域は、兵庫県南西部に位置する流域面積754 km²の県管理河川である。上流域は中山間地域であり、土地利用のほとんどが森林である。本川の千種川は、法定河川延長72.155 kmであり北部の中国山地に源を発し、上流側より志文川、佐用川、鞍居川、安室川などの支川と合流し、赤穂市へと流下する。赤穂平野は低平地デルタであり市街域が広がっている。千種川河口以外は、山間地の狭い場所に谷底平野が広がる。千種川本川は、河口から上流78.33 km地点において、急激に平均河床勾配の変化が大きくなる。それより下流は滑らかな曲線であり、それより上流は指数曲線を描く¹⁶⁾。2009年当時の河川の堤防満杯流量

は、佐用川の円光寺付近(千種川との合流前)で760 m³/s、上郡付近(安室合流点より上流)で2,700 m³/s、木津付近で4,400 m³/sである¹⁷⁾。千種川には安室ダムと長谷ダム(両方1991年運用開始)及び金出地ダム(2016年運用開始：集水面積11.5 km²)がある。2009年時に運用されていた安室ダムと長谷ダムの集水面積は6.4 km²、1.2 km²であり、流域全体の洪水現象に及ぼす影響は限定的と考えられ、本研究のモデル適用ではダムの影響は考慮していない。

2009年の台風9号により、8月9日から10日にかけて千種川流域で豪雨が発生した。特に上流の佐用町では24時間で327 mmの雨量を記録し、観測史上最大の雨量となった。この豪雨によって、上郡水位観測所より上流側の千種川本川沿いや、佐用川及び支川沿いにおいて、複数の場所で浸水被害が生じた。上郡地点のピーク流量は2,700 m³/sに達し、堤防ぎりぎりまで河川の水位が上昇した。特に豪雨が集中した佐用川流域では、洪水流量が流下能力を上回り、深刻な洪水被害となった。佐用川の下流に位置する円光寺地点では推定流量が1,400 m³/sに達し、当時の流下能力を上回っていたと考えられている。その結果、佐用町などで床上浸水が発生し、町役場も約1 m浸水した。さらに佐用川支川の幕山川沿いでは水路から溢れた水によって避難中の住民が9名流される被害が発生した。また佐用川と千種川の合流点にある久崎地区においては、佐用川左岸で破堤が生じ、久崎地区内に氾濫水が流れ込んで、高い浸水深が確認された。



図2 千種川流域概要図

4. RRI モデルの千種川水系への適用

(1) 入力降雨

入力降雨は気象庁のレーダー解析雨量(2009年：解像度約1 km)を使用した。図3は8月9日0時~10日0時までの48時間の積算雨量を示しており、同期間の流域平均雨量は286 mmである。この図から佐用町など千種川の流域北部を中心に豪雨が発生していることがわかる。

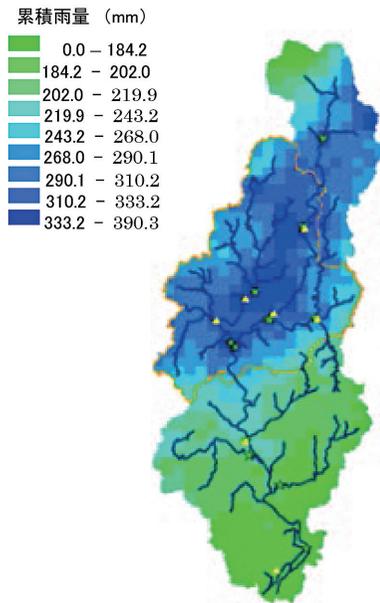


図3 総雨量の空間分布 (8月9日～10日)

(2) 地盤データの構築

モデルの地盤データは、国土地理院が公開している基盤地図情報(数値標高モデル) 5 m メッシュ(標高)を基本に100 m に低分解能化して使用した。ただし、山間部では5 m 解像度の情報が整備されていないため、10 m 解像度の情報を使用した。また、河道があるセルの標高は、数値標高モデルから河道及び堤防の箇所を除いたうえで、100 m 分解能の堤内地盤高を推定した。

(3) 河道モデルの構築

流域内の57河川について兵庫県から提供された河道断面情報をもとに、任意の河道断面を設定した。本研究で反映した断面の数は、支川も含めて計1,632箇所であり、上流の急な山間部を除き、本川と佐用川では100~200 m 毎に、その他の河川では200 m ~ 1 km 毎に断面情報をモデルで反映した。断面情報のない小河川については矩形斜面を仮定して、その幅と深さを集水面積の関数として推定した。

表1 計算条件

入力降水データ	レーダー解析雨量	
下流端境界条件	河床勾配=動水勾配を仮定	
河道断面	県管理河川は任意断面	
	断面情報の無い小河川は流域面積の関数として設定	
蒸発散量	考慮なし	
ダム	考慮なし	
パラメータ	山地	平野
n ($m^{-1/3}s$)	0.3	0.3
d_a (m)	0.4	-
k_a (m/s)	0.4	-
k_m (m/s)	0.1	-
k_p (m/s)	-	8.33×10^{-7}
ϕ	-	0.398
S_f (m)	-	0.2185
n_{river} ($m^{-1/3}s$)	0.03	0.03

(4) 計算条件

千種川流域は図2のオレンジ線で囲まれた部分である。ただし、過去の洪水で低平デルタ地帯も千種川の洪水によって氾濫しているため、図中緑線で示すようなモデルの解析範囲を設定した。

各グリッドセルの落水方向は、前述の100 m 分解能の地盤高をもとに最急勾配法で推定した。RRI モデルは二次元の拡散波近似を基礎式とするため、落水方向の情報は、河道の位置を推定する目的のみに利用している。またそのようにして定めた河道位置が実際と異なる場合は、その場所を修正している。土地利用は、国土数値情報の土地利用細分メッシュデータ(2009年)を用いた。流域の主要な部分を占める森林と平地の二種類に分けて、上述の通り森林では飽和・不飽和層を考慮し、平地では降雨の初期損失を計算するため Green-Ampt モデルを適用した。パラメータは、砂質粘土壤土の値を参考にした¹⁵⁾。初期水位は、洪水前の約1ヶ月間の計算によって推定した。なお本研究では短期間の洪水を対象にしているため、蒸発散の影響を無視できると仮定した。パラメータは流域一様で設定し、以下に示す6(1)の検討を除いて特定の部分流域を対象にしたパラメータ調整は行っていない。

5. 再現結果

(1) 河川流量・水位

2009年洪水を RRI モデルで再現し計算結果と観測結果を比較する。

図4は各観測点で計算水位と観測水位を比較している。本川の上郡地点では、上昇部において、モデルが過大評価している部分もあるが、ピーク値及び波形は概ね良好に対応している。また逶減部では、計算の逶減が遅くなっている。次に、上郡地点より上流部の観測点に着目する。洪水の立ち上がり部分は、計算結果が実績に対して全体的に過大評価をする傾向がみられる。また図5の計算流量においても同様の傾向がみられる。河川ごとに比較すると、千種川本川では、計算のピーク流量及びピーク水位がやや過大評価になる傾向がある。佐用地点では流量・水位ともに再現精度が高いことがわかる。

円光寺地点は、計算と観測の流量はよく対応しているものの、図4に示す計算水位は観測に比べて過小評価となっている。ただし、図4の円光寺地点に示す通り、計算水位は左岸にある道路を越え、その周囲に浸水が広がっており、このモデルの設定では河川水位がそれよりも大幅に上昇することは考えにくい。なお、周辺にある国道の計算浸水深はピーク時で約1.1 mであり、この場所ですべて実際に浸水が報告されている¹⁸⁾。

流域内の他の河川をみると、志文川にある二つの観測点でモデルは流量・水位ともに過大評価している(図4、図5)。三日月では、ピーク流量の差は92.4 m³/s、相対誤差は37.9%である。また米田地点では、ピーク流量の差は125.9 m³/s、相対誤差は32.7%であった。また、ピーク生起時刻については、三日月で0.7時間、米田地点で1.8時間、モデルの方が観測よりも早く推定している。また、米田地点では計算値が両岸の高さを越え、上流部で氾濫範囲が実績に比べて過大評価である。上郡地点より下流にある有年・竹万では、モデルは流量・水位ともに全体的に過小評価しているが、波形は概ね一致している。流域の最下点の木津地点では、モデルは逶減部を遅く評価している。

(2) 浸水域の空間分布

2009年の最大浸水域と洪水痕跡の比較を図6に示す。モデルは主に上郡地点より上流域で浸水分布を示しており、実績浸水域と比較すると概ね一致している。特に、被害が深刻であった佐用川沿いの円光寺地点から平福地点に向け、佐用町役場のある周辺も含めてある程度妥当に浸水範囲を再現している。ただし、局所的にみると一部の区域や志文川などで、浸水域の再現性が不十分な箇所もある。

図7に各時刻の計算浸水深の空間分布を示す。8月9日21時から各地で浸水がみられ、22時には千種川本川沿い久崎南側や佐用川沿いの円光寺、上月、佐用、平福周辺で浸水が1 m以上となっている。その後の10日0時以降は、佐用川の浸水ピークは過ぎて本川の下流側で浸水深が増加している。

(3) 検証

a) 河川水位及び流量

図8は外水氾濫がある場合とない場合の計算水位を上郡地点と木津地点において比較している。外水氾濫がない場合は、河道を全体的に10 m深く掘り下げた条件で検証した。外水氾濫を考慮しない場合は、上郡地点と木津地点でピーク水位がそれぞれ約0.53 m、約0.70 m増加した。また図は省略しているが、ピーク流量は、約579 m³/s(増加率：22%)、約636 m³/s(増加率：23%)増加した。さらにピーク生起時刻は両地点とも約2時間早くなった。このように本研究で示した RRI モデルを用いることで、上流の洪水氾濫が下流の河川水位や流量に及ぼす影響を定量的に分析することができる。

b) 浸水深の空間分布

図7に示した各時刻の浸水深分布を当時の証言と比較する。シミュレーションの時刻毎の浸水分布の変化をみると、上述のように佐用川沿いは、22時以降に浸水深が上昇し0時以降にピークとなった。2009年当時は、21時20分に佐用町役場で浸水が始まり、21時50分に佐用水位観測所でピー

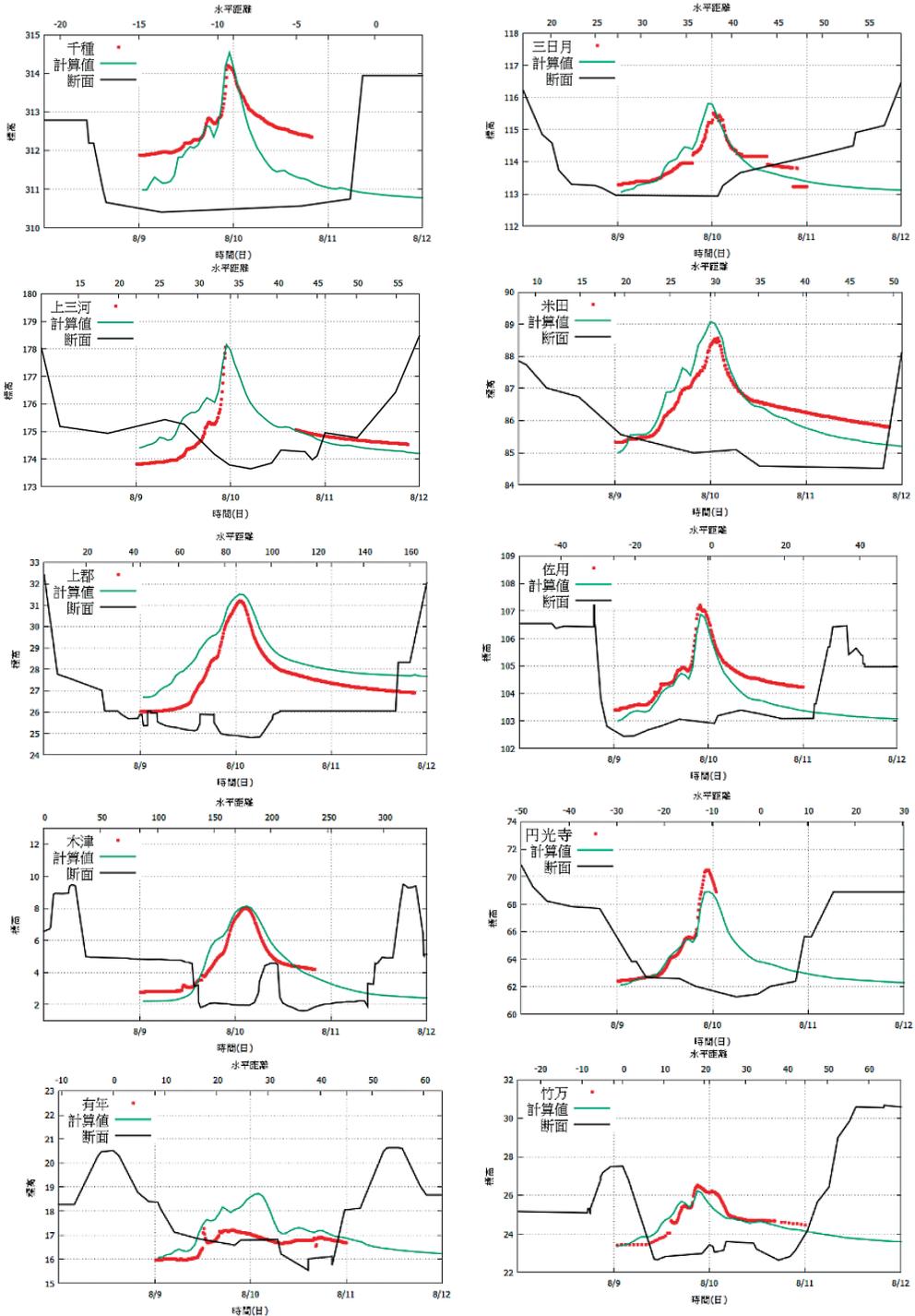


図 4 計算水位と観測水位の比較 (左上より千種川本川沿い上流から下流における観測地点 (有年地点は支川), 右上より支川沿いの観測地点)

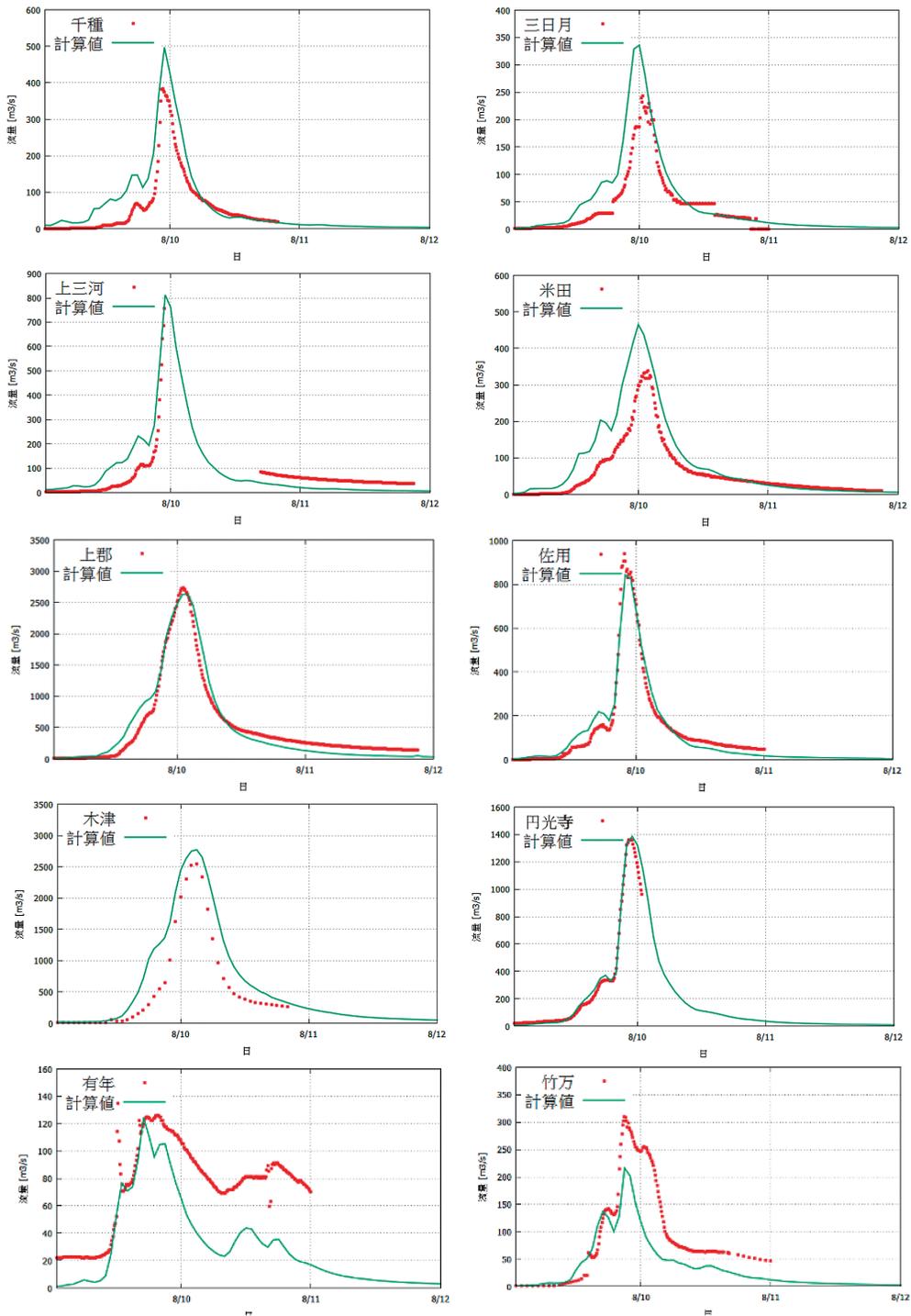


図5 計算流量と観測流量の比較 (左上より千種川本川沿い上流から下流における観測地点 (有年地点は支川), 右上より支川沿いの観測地点)

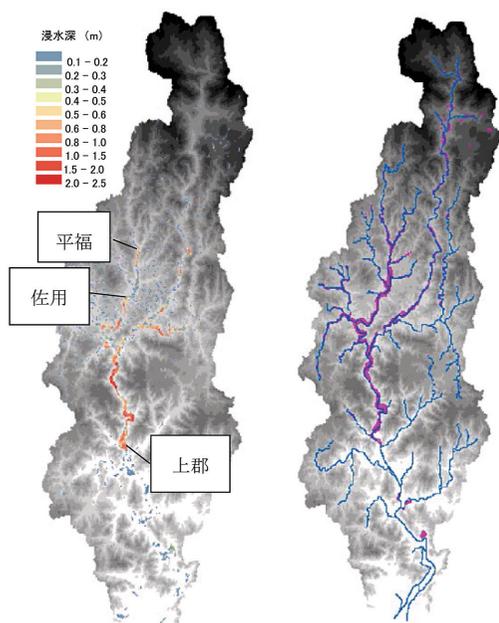


図6 最大浸水深分布 (左) と実績浸水範囲 (右)

ク水位が確認されている¹⁹⁾。すなわち22時以降には浸水範囲及び浸水深がピークであったと推定される。シミュレーションで得た結果はこの浸水深分布の変化を再現できている。また、佐用町役場では、計算された浸水深が約1m(相対誤差:2.8%)となり、高い再現性が示された。

6. 考察

(1) パラメータについて

本研究では流域全体で流量・水位・浸水範囲を妥当に再現できるかどうかに着目していたため、特定の部分流域を対象にしたモデルのチューニングは行っていない。しかし、図9の三日月地点と米田地点(いずれも志文川)に示すように、特定の部分流域でモデルパラメータをより詳細にチューニングすることによって、予測精度の改善が見込まれる部分流域もある。ここでは、その効果を確認するため、志文川流域のみパラメータを変えた場合の結果を比較する。なお、部分流域のパラメータは、斜面の粗度係数(=0.6^{-1/3}s)、河道の粗度係数(=0.03m^{-1/3}s)、土層厚×有効空隙率(=0.4m)、飽和透水係数(=0.06m/s)とした。

その結果、図9に示すように三日月地点と米田地点で流量・水位が観測値に近くなった。またピーク生起時刻については変化が小さいことが分かった。この検討を通じて、部分流域毎にパラメータ値を変えることによって特定の部分流域の再現性が向上することが分かった。

(2) 山地域におけるモデルの地盤高と計算浸水深について

図10に佐用町中心部における浸水深の計算結果を示す。実績の浸水範囲と比較すると、特に下流側の平野部で良好な対応を示している。一方、本川から離れた山際部では、計算の浸水範囲が実績に比べると小さくなっている箇所がある。この原因としては、特に急峻な山地域の狭い平野部において、モデル上のメッシュ地盤高が周囲の山地も含んだ平均地盤高となり、実際の平野地盤高よりも高く設定されている可能性が考えられる。その結果、浸水がその部分まで広がらず浸水域をやや過小評価した可能性がある。このように、モデルの解像度に比べて狭い平野部については結果の解釈や地盤高の設定に留意が必要である。

7. 結論

千種川流域における2009年の洪水を対象に、RRIモデルを用いて降雨流出と洪水氾濫を一体的に解析した。パラメータや河川断面の影響を考慮し、河川水位、流量と最大浸水範囲の再現性を検証した。また、氾濫の広がり进行时系列的に確認した。以下に結論を述べる。

2009年洪水の計算流量と水位は、特にピーク時点に関して、千種川本川と佐用川流域で再現性が高く、その他の地点でも妥当もしくはやや過大という結果であった。ただし、洪水の立ち上がりはやや過大評価傾向があった。また志文川の二つの観測点では流量・水位ともに過大評価であり、部分流域において異なるパラメータを用いることによって再現性が向上することを確認した。流域全体を対象にした100m分解能の浸水計算結果は、浸水深が大きくなった佐用町周辺を含めて浸水実績とよい対応を示していた。

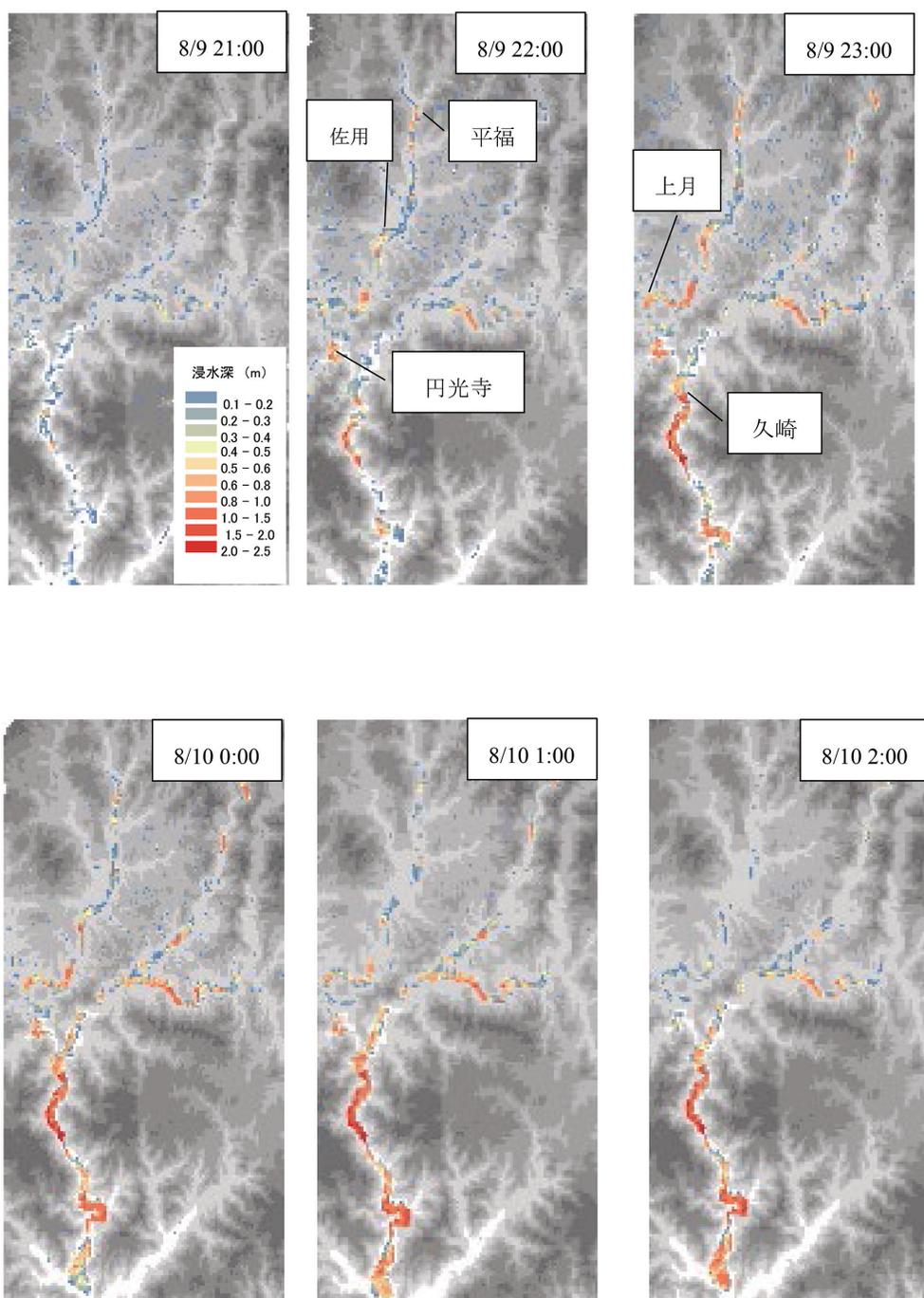


図7 浸水深の時間変化

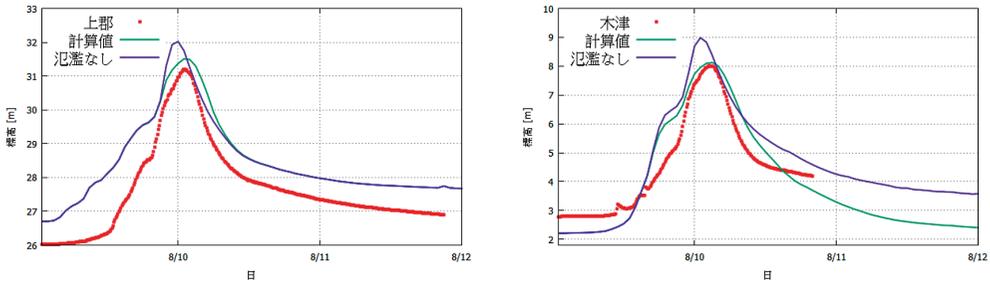


図8 氾濫なしと氾濫ありの計算水位の比較

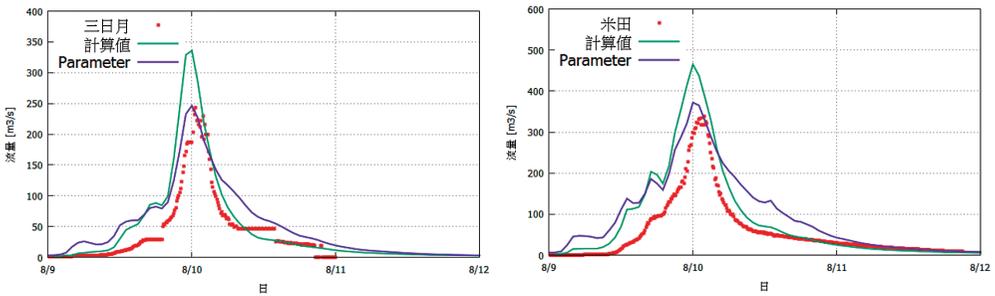


図9 パラメータ値による比較

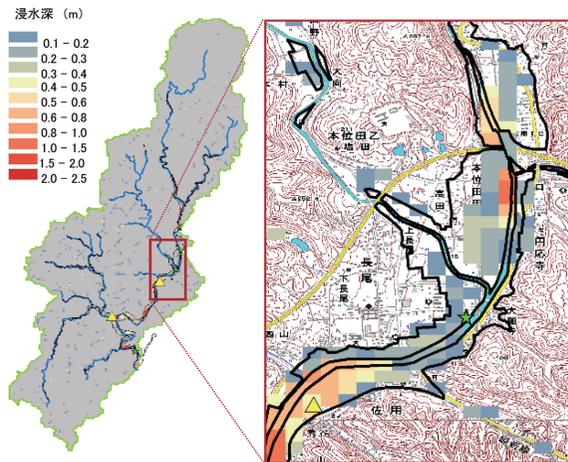


図10 佐用町周辺の計算最大浸水深と実績浸水範囲(黒線)

流域の上流部で発生する浸水の影響を分析するため、河道を深く掘り下げて外水氾濫が発生しない状況を想定した。その結果、外水氾濫する場合に比べて、しない場合は上郡地点や木津地点においてピーク時の河川水位が約0.53 mと約

0.70 m 上昇し、ピーク流量も約579 m³/s (増加率: 22%), 約636 m³/s (増加率: 23%) 増加するという結果を得た。また、外水氾濫を考慮しない場合は、流量のピーク生起時刻が約2時間早まり、河川流量の逓減も早くなることが分かった。このよ

うに上流域の氾濫は下流の河川水位や流量に影響を及ぼし、特に流域の各地で氾濫が発生するような状況下においては、洪水予測でも氾濫の効果を反映することが重要であると示唆された。

本適用の特徴は、千種川流域に存在する57の県管理河川において、1,632の河川断面データを反映させている点にあり、本川と佐用川では100～200 m 毎に、その他の河川では200 m～1 km 毎に断面情報をモデルで反映した。このように詳細な河川断面情報をモデルで反映することによって、河川の任意の場所で越水・溢水が発生している状況を再現できることが分かった。現在、更なるモデル精度向上に向けて複数の洪水を再現するようなパラメータの設定や詳細なダム操作の反映について検討を重ねている。また同モデルのリアルタイム運用についても試験的に検討を進めている。

謝辞

本研究にあたり、兵庫県西播磨県民局光都土木事務所から水文データや氾濫に関する資料を提供いただいた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会：中小河川等における水防災意識社会の再構築のありかたについて 答申, 2017.
- 2) 佐山敬洋：平成21年佐用町河川災害を対象とした降雨流出氾濫解析, 河川整備基金助成事業「2009年8月佐用町豪雨災害に関する調査研究」, pp 19-23, 2010.
- 3) 立川康人・佐山敬洋・宝 馨・松浦秀起・山崎友也・山路昭彦・道広有理：広域分布型物理水文モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用, 自然災害科学 JJSNDS 26-2, pp 189-201, 2007.
- 4) 佐山敬洋・立川康人・宝 馨・市川 温：広域分布型流出予測システムの開発とダム群治水効果の評価, 土木学会論文集 No.803/II 73, pp 13-27, 2005.
- 5) 川池健司・井上和也・戸田圭一・野口正人：低平地河川流域での豪雨による都市氾濫解析, 土木学会論文集 No.761/II-67, pp 13-27, 2005.
- 6) 秋山壽一郎・重枝未玲：河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション, 水工学論文集, 第50巻, 2006.
- 7) 小林健一郎・寶 馨・竹内裕希子・藤田一郎：分布型流出・氾濫追跡モデルによる2009年8月佐用町豪雨災害分析, 河川整備基金助成事業「2009年8月佐用町豪雨災害に関する調査研究」, pp 24-33, 2009.
- 8) 重枝未玲・秋山壽一郎・大久保剛貴・中木翔也・松本拓磨：レーダー雨量を外力とした山国川流域の分布型流出・洪水氾濫解析と洪水・氾濫プロセスの検討～平成24年7月豪雨を対象にして～, 河川技術論文集, 第22巻, 2016.
- 9) 天口英雄・河村 明・高崎忠勝・中川直子：家屋の雨水排水経路を考慮した洪水流出解析モデルの提案と都市小流域への適用, 土木学会論文集 B1 (水工学), 71 (4), I_313-I_318, 2015.
- 10) 佐山敬洋・岩見洋一：降雨流出氾濫 (RRI) モデルの開発と応用, 土木技術資料56-6, 2014.
- 11) 佐山敬洋・建部祐哉・藤岡 奨・牛山朋来・萬矢敦啓・田中茂信：2011年タイ洪水を対象にした緊急対応の降雨流出氾濫予測, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.1, 14-29, 2013.
- 12) 栗林大輔・佐山敬洋・近者敦彦・中村要介・工藤 俊・澤野久弥：阿賀野川における降雨流出氾濫モデルの適用について, 水文・水資源学会2015年度研究発表会, pp 101-102, 2015.
- 13) 佐山敬洋・深見和彦・田中茂信・竹内邦良：広域降雨流出浸水予測モデルの開発, 水文・水資源学会総会・研究発表会, 2010.
- 14) 立川康人・永谷 言・寶 馨：飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係の開発, 水工学論文集, 48, 7-12, 2004.
- 15) Raws, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. and Shir-mohammadi, A.: Infiltration and soil water movement, Handbook of Hydrology, MacGraw-Hill Inc., New York, 5.1-5.51, 1992.
- 16) 加藤茂弘：兵庫県千種川の河床勾配の縦断変化から区分された流路区間における流路の平面形状と河床堆積物の粒径分布, 人と自然 Humans and Nature, No.8, pp 1-17, 1997.
- 17) 藤田一郎：2009年8月佐用町豪雨災害に関する調査研究, 河川整備基金助成事業「2009年8月佐用町豪雨災害に関する調査研究」, pp 1-18, 2009.
- 18) 兵庫県：8月9日の局地豪雨による千種川水系被害状況等について, 2009.

- 19) 特定非営利活動法人 環境防災総合研究機構：平成21年台風第9号災害 佐用町久崎地区住民の防災対応行動の調査研究報告書，2010.

(投稿受理：平成29年4月7日
訂正稿受理：平成29年7月13日)

要 旨

兵庫県千種川流域を対象に，2009年台風9号による降雨流出・洪水氾濫を RRI モデルによって再現した。氾濫を精度よく再現するために，本研究では流域内57河川から抽出した1,632個の任意断面情報をモデルに反映した。複数の観測水文データや浸水痕跡と比較することにより，流域規模の洪水を RRI モデルで良好に再現できることを示した。さらに，氾濫しない条件を設定した仮想的なシミュレーションにより，豪雨時の河川水位と流量を再現するうえでも，浸水過程を考慮することの重要性を示した。