

# 平成24年7月花月川大洪水に伴う河床変動と 氾濫に関する研究

## STUDY ON BED VARIATIONS AND FLOODING FLOWS OF THE JULY 2012 FLOODS IN THE KAGETSU RIVER

宮崎達文<sup>1</sup>・福岡捷二<sup>2</sup>・上村雅文<sup>3</sup>

Tatsufumi MIYAZAKI, Shoji FUKUOKA and Masafumi UEMURA

<sup>1</sup>学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 都市環境学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

<sup>2</sup>フェロー 工博 Ph.D. 中央大学研究開発機構教授 (同上)

<sup>3</sup>国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所調査課長 (〒830-8567 福岡県久留米市高野1-2-1)

Successive large scale floods which exceeded the designed discharge occurred in the Kagetsu River in July 3 and 14, 2012. The floods caused serious damages such as levee breaches and flood inundations. In this paper, we analyzed both flood behavior in the river and inundations by numerical analysis of quasi-three dimensional flows and bed variations. Causes of levee breaches were investigated by velocity distributions and bed variations during the floods. Numerical simulation showed that the river-crossing structure (Yuta Bridge) caused severe overflows by the drift-woods accumulation and large inundation over dense housing areas.

**Key Words :** *drift-woods, flood flow, bed variation, levee breach, inundation, river-crossing structure, numerical simulation*

### 1. 序論

大分県日田市を流れる筑後川水系花月川は筑後川合流点までの8.6k区間が直轄区間であり、5.2k付近から花月川本川とほぼ同規模の支川有田川が直角合流する一級河川である。花月川は、住宅等の建物が密集している日田市街を流れており急勾配で、河幅が狭く、洪水流下能力に課題を有している。

花月川では平成24年7月3日に最大流量1,280m<sup>3</sup>/s、7月14日に1,350m<sup>3</sup>/sと立て続けに計画規模1,200m<sup>3</sup>/sを上回る流量を観測した。7月3日洪水時には、上流域である6.0～6.2k右岸付近や5.6～5.8k左岸付近で土堤防が決壊し氾濫被害が拡大した(写真-1)。日田市街を流れる中流域で特殊堤から大規模な越水氾濫が生じるなど花月川全域で、浸水面積121ha、被害棟数721棟(全壊:1棟,床上:414棟,床下:306棟)と広い範囲まで浸水し、多くの家屋で浸水被害が発生した(図-1)。7月14日洪水では、7月3日洪水後の応急復旧の影響もあり破堤は免れたものの、浸水面積79ha、被害棟数282棟(床上:101棟,床下:181棟)と再び堤内地の浸水により、多くの被害をもたらしたり。この2度にわたる洪水により、花月川全域で河岸浸食・護岸崩壊等の被害(7月3日洪水時:27箇所、

7月14日洪水時:23箇所)が生じた。

花月川の氾濫は、上流域で生産された流木が河川横断構造物である橋梁に集積し流下阻害を引き起こし、上流側の水位上昇による越流が主たる原因で生じた(写真-2)。7月3日、14日洪水ともに、氾濫に伴い図-1に示す範囲まで浸水し、特に中流域では広範囲に浸水した。近年、橋梁への流木集積による水位堰上げや越水氾濫に着目した研究<sup>2,3</sup>や流木の集積に関する数値解析研究<sup>4</sup>が行われている。流木が災害に直結しないようにするために、今回の流木災害の教訓を生かすことが重要である。

花月川の洪水氾濫は急激であり洪水データ、氾濫データを十分に収集することが困難であったが集められた観測データや氾濫写真等を活用し以下の検討を行う。平成24年7月花月川における洪水時の河道内の洪水・河床変動を表現し、中流域での越水氾濫を表現できる数値解析モデルを構築する。これらを用い、土堤の破堤要因の推定、河川横断構造物の堰上げによるパラペット堤防からの越水氾濫、氾濫水のパラペット堤防から河川への再流入について分析する。

### 2. 検討方法

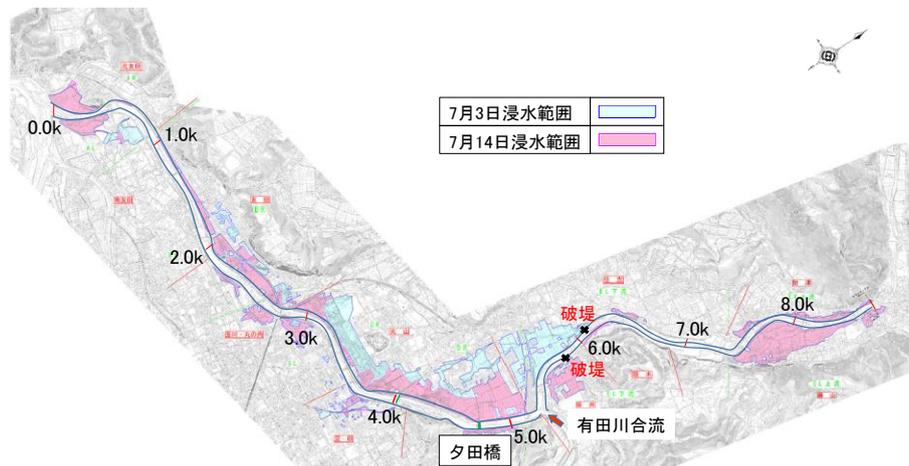


図-1 平成24年7月洪水に伴う氾濫範囲



(a) 6.0k 右岸 (b) 5.8k 右岸

写真-1 花月川上流域における破堤状況



(a) 欄干部への流木の集積 (b) 夕田橋付近での越流

写真-2 夕田橋の流木集積と越流氾濫

### (1) 解析手法及び解析条件

氾濫解析モデルには、河道での洪水流と氾濫源での氾濫流を区別せずに一体的に平面二次元モデルとして取り扱う方法<sup>5)</sup>や、越流解析などを用いて個別に解く方法がある。本研究では、花月川の洪水流・河床変動と、橋脚への流木集積に伴う氾濫を一体的に表現出来るモデルを構築している。流れ場の解析には、内田・福岡による底面流速解法<sup>6)</sup>を、氾濫域の計算には平面二次元解析法を用いた。二次元河床変動解析では混合粒径の掃流砂のみを考慮し、掃流砂量は芦田・道上の式を用いた。花月川の上流端境界条件と有田川からの合流流量は流出計算より得られた流量ハイドログラフを与えた。0.0kの下流端境界条件には花月水位・流量観測所(3.3k)での実測水位ハイドログラフ(図-2)を用いて、0.0kの痕跡水位がピーク水位となるように大きさを決め水位ハイドログラフは3.3kの水位ハイドログラフと相似形とした。粗度係数は、平成24年7月3日洪水の痕跡水位を再現するように決定した。本川の解析メッシュは、平成22年に測られた200m間隔の横断測量データを用い作成し、氾濫域の解析メッシュは、実測の浸水域が含まれる範囲で作成した。

### (2) 堤内地の建物構造、河川横断物の評価法について

氾濫解析において建物群を適切に考慮することは重要である。一般に氾濫解析を行う際には、デカルト座標系では等価粗度係数を用い各メッシュの平均的な抵抗を与え、建物や道路などの地物情報を評価している<sup>7)</sup>。一方、一般座標系モデル<sup>8)</sup>、非構造格子モデル<sup>9)</sup>、街路ネットワークモデル<sup>10)</sup>などでは、建物や道路網の線形に合わせ

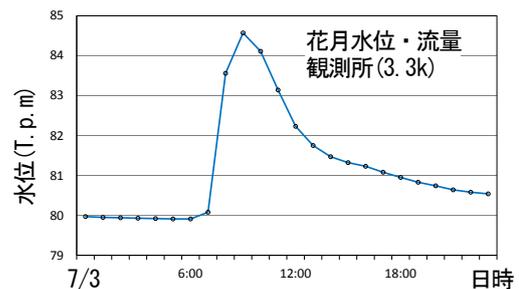


図-2 観測水位ハイドログラフ(7月3日洪水)

計算メッシュを作成している。しかし、これらの手法は、計算格子形成に相当の時間と労力を要する。そこで本解析では、河道内の計算メッシュは河道の線形を取るよう一般座標系で作成し、氾濫域での計算メッシュは河川横断線が重ならないように滑らかに延長し、河道線形に沿うように作成している。氾濫域での標高値としてはレーザープロファイラーによる標高データを用いる。通常、氾濫解析の標高データとしては構造物等の標高情報を取り除いた地表面を示すDEMデータが用いられる<sup>11)</sup>。秋山ら<sup>12)</sup>は、構造物や樹木等の標高情報までも含んだDSMデータを街区に用い市街地での建物群の影響を考慮している。住宅等が密集する市街地における氾濫解析の精度を向上させるためには、堤内地の地物情報を適切に表現することが重要である。そこで、DSMデータを用いることにより、花月川周辺の建物の影響などを詳細にモデル化した。図-3にこの方法でモデル化した堤内地の解析地形とDSMデータの比較を示す。氾濫域での解析メッシュは4mを目安として作成し、住宅密集箇所では道路網を再現するようにさらに細かく作成している。

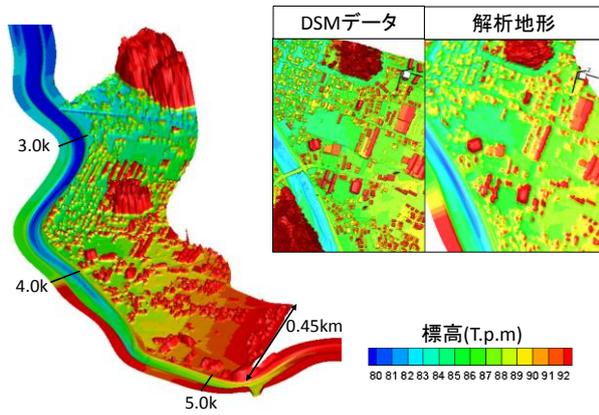


図-3 DSM データとそれより作成した解析地形

この図から解析地形は構造物等を良く捉え、表現していることが分かる。

花月川洪水では、上流から流送されて来た流木が橋脚や橋の欄干に集積することで流れが阻害され、夕田橋上流側からの大規模な越流を引き起こした。このため、流れ場の解析では夕田橋による流下阻害を考慮する必要がある。流木の集積に関する数値計算法としては様々なものがある<sup>4)</sup>。花月川においては上流からの流木生産量などが明らかではないが、欄干や橋脚での流木集積による阻害を次のように評価する。

本研究では、橋梁と橋脚が含まれる解析メッシュにおいて欄干や橋脚の存在割合及びこれらから受ける抵抗を考慮して、式(1)、式(2)に示す水深積分連続式と運動方程式を導き、これらを一般座標系に変換することで計算を行っている。

$$\frac{\partial fh}{\partial t} + \frac{\partial fU_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \\ = -g \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho h \Delta x \Delta y} (D_i + P_i) + \frac{\partial T_{ij}}{\rho h \partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho h} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 $ij=1,2(x,y)$ 方向、 $U_i$ :  $i$ 方向水深平均流速、 $h$ : 水深、 $D_i$ : 橋脚から受ける $i$ 方向の抗力、 $P_i$ : 欄干から受ける $i$ 方向の力、 $T_{ij}$ : せん断応力テンソル、 $\rho$ : 水の密度、 $\tau_{bi}$ : 底面せん断応力の $i$ 方向成分、 $f$ : コントロールボリューム内の欄干や橋脚存在を考慮した流体占有率である。ここで $T_{ij}$ は乱流拡散及び水深平均流速からの偏差成分による運動量変換の水深積分値である<sup>9)</sup>。

本研究では、夕田橋付近はほぼ直線河道であることから、一般座標系の $\xi$ 方向を主流方向とし、式(3)、式(4)に示すように欄干と橋脚から受ける抵抗を評価している。橋脚から受ける $i$ 方向の抗力 $D_i$ は、主流方向に作用する抗力を $x, y$ 方向にそれぞれ成分分解して式(3)で与える<sup>13)</sup>。

$$D_i = \frac{1}{2} \rho C_D U_i U A_1 \quad (3)$$

ここに、 $U$ : 水深平均流速の大きさ、 $C_D$ : 抗力係数、

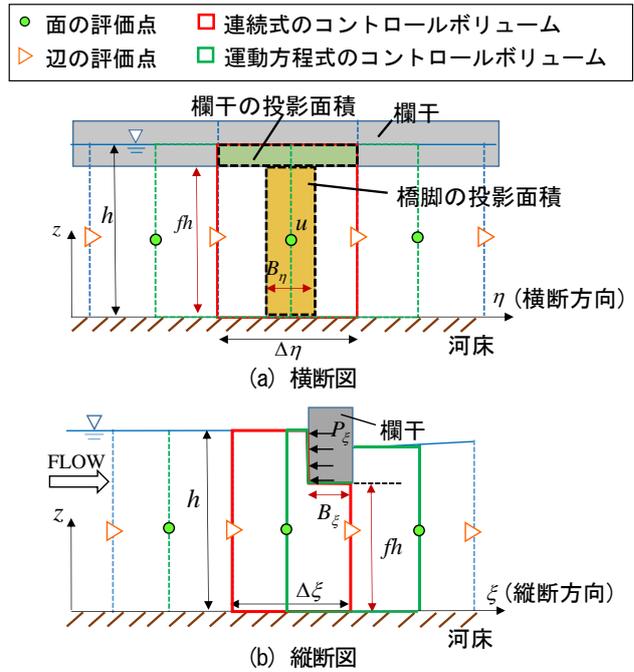


図-4 夕田橋欄干での流木集積考慮方法

$A_1$ : 橋脚の主流方向に対する投影面積である。洪水時の流木集積量や時間が明らかでないため、抗力係数には一般的な橋脚の値として1.0を与え、投影面積は橋脚部のみを考慮している。

一方で、洪水時の写真などから欄干部での流木集積が流れの大きな抵抗となっていることが確認できたので、欄干部での流木集積の影響については、図-4に示すように仮想的に欄干部より上に不透過な壁が存在するとし洪水流が欄干の下のみを流れるとしている。欄干から受ける力 $P_i$ は、接近流速(水表面流速)から評価した主流方向に作用する力を、式(3)と同様に式(4)で与える。

$$P_i = \frac{1}{2} \rho C_D u_s u_s A_2 \quad (4)$$

ここに、 $u_s$ : 水表面流速の大きさ、 $A_2$ : 欄干の主流方向に対する投影面積である。欄干部での抗力係数は痕跡水位の再現性が高かった1.0を与えた。また、洪水流が欄干の下を流れるように、図-4(a)、(b)に示すように、欄干部より上に不透過な壁が存在するとして流体占有率を考慮した水深 $fh$  ( $f=0\sim 1$ )を用いて、連続式を解いている。

### 3. 解析結果

#### (1) 解析値と実測値の比較

図-5(a)、(b)に、花月川平成24年7月3日洪水時の解析水面形と痕跡水位の比較、河床高縦断分布の解析値と観測値の比較を示す。粗度係数は、解析水面形が痕跡水位を捉えるように、河道内には $0.035s/m^{1/3}$ を、氾濫域では $0.025s/m^{1/3}$ を一律で与えている。7月3日ピーク水位時の解析水面形は痕跡水位より低く計算されている箇所もあ

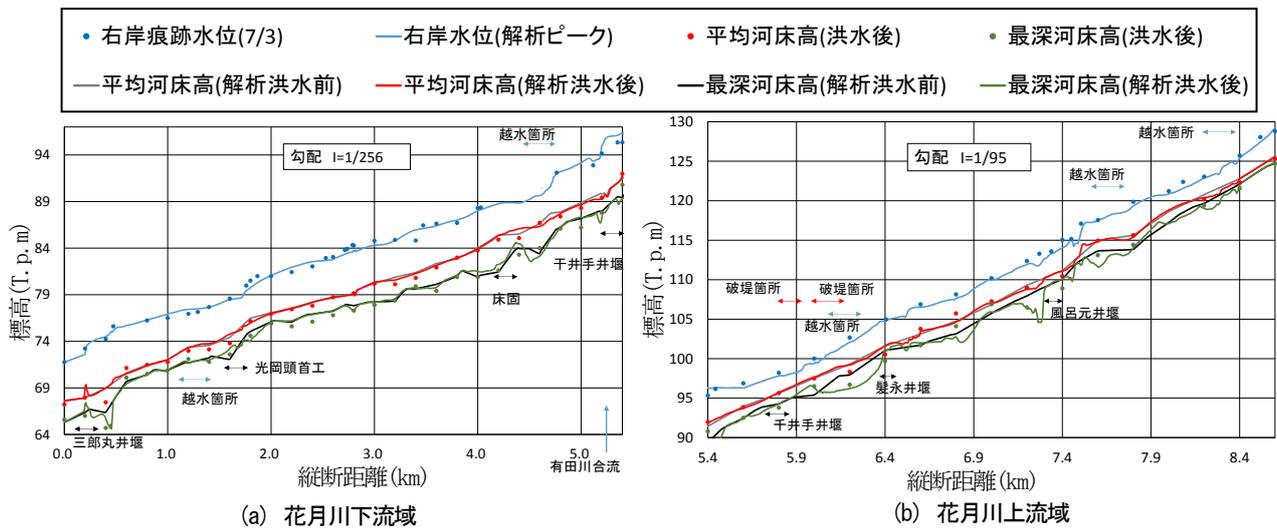


図-5 7月3日洪水の解析水面形と痕跡水位及び解析河床高と観測値の比較

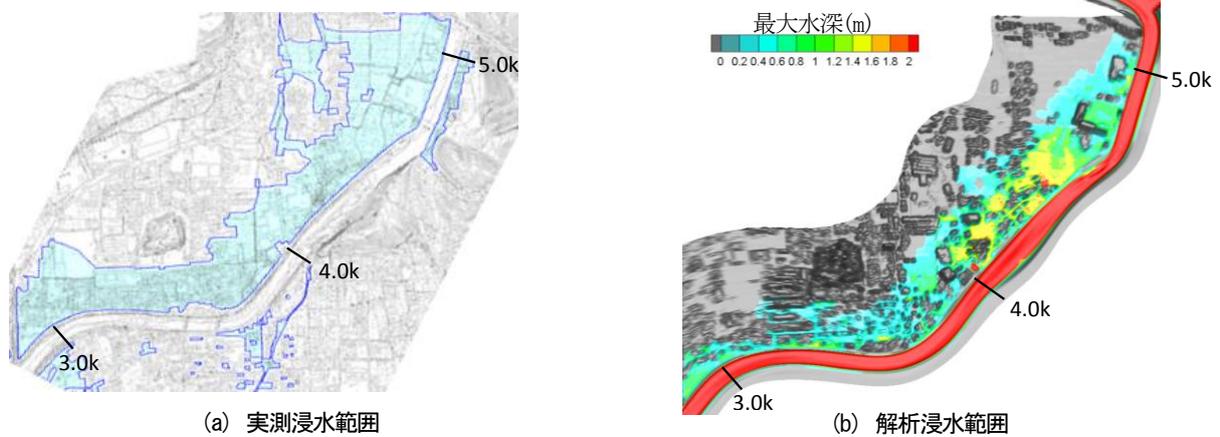


図-6 7月3日洪水時の実測と解析浸水範囲比較

るが、全体的に見て解析結果は痕跡水位を捉えている。また、赤色の実線で示す洪水後の解析平均河床高は洪水後の実測値を概ね捉えている。緑色の実線で示す洪水後の最深河床高と実測値の比較は、上流域で局所的な深掘れが見られるものの、概ね再現することが出来ている。さらにこの図の河床高から河床勾配は上流で1/95、下流で1/256であり、洪水により上流域では大きな深掘れが発生していたことが分かる。特に7.3k付近は大きく深掘れしており、この付近の外岸側では7月3日洪水時に河岸崩壊が生じていた。

図-6(a)、(b)は花月川中流域における実測浸水範囲と解析浸水範囲の比較を示す。図-6(a)の青で囲われた範囲が7月3日洪水時の浸水範囲を示している。さらに図-6(b)のコンター図は解析での7月3日洪水時の全時間における最大氾濫水深を示す。氾濫域最上流と最下流で実測値よりも狭い範囲に浸水域が出ているが、全体としては解析での浸水箇所が実測浸水箇所をよく表現できている。氾濫域下流側で再現性が低い理由は、2.8k付近で合流する支川からの氾濫が考慮されていないためと考えられる。以上より、花月川の洪水流・河床変動や氾濫について、再現できるモデルが構築されたと判断できる。

## (2) 破堤箇所付近における洪水流・河床変動解析結果

図-7は7月3日ピーク水位時の花月川上流部での流速ベクトルと初期河床からの河床変動コンター図を示している。破堤箇所付近は河幅の縦断変化が著しく、さらには花月川でも特に大きな湾曲部である。そのため、流速が外岸側で大きくなっており、堤防決壊箇所である6.0～6.2k右岸、5.8k左岸では河床洗掘が見られる。

図-8、図-9は堤防決壊が生じた6.0k右岸、5.8k左岸におけるピーク水位時の河床変動ならびに流速分布の解析結果を示す。6.0k右岸では最大流速6.9m/sと大変大きな流速が発生し、少なく見積もっても1.0m程度の洗掘が生じたと推定される。5.8k左岸でも高流速が発生しており、破堤箇所では洗掘が生じていることが分かる。これらの河床変動に加え実際には、護岸下部から横方向へと河床洗掘が広がり堤体の破堤が生じたと推定される。さらに図-8、図-9から破堤箇所付近ではピーク水位が天端高を超えていないことから河床洗掘が有力な破堤要因であったと考えられる。

## (3) 中流域における氾濫解析結果

図-10(a)、(b)は洪水時の花月川中流域右岸側の氾濫開始時とピーク水位時の水深コンター図を示している。

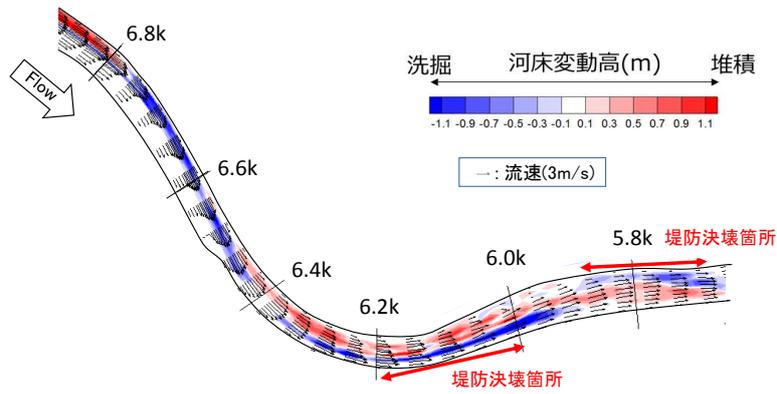


図-7 流速ベクトル・河床変動カウンター（ピーク水位時）

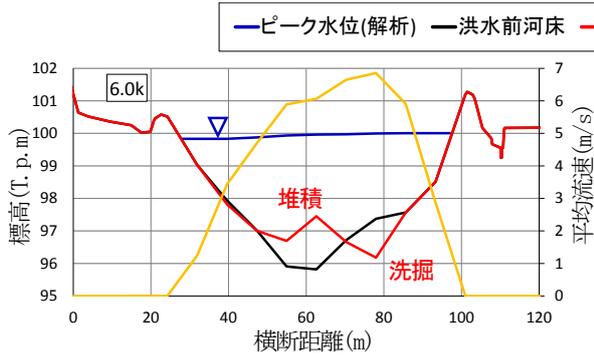


図-8 6.0k 地点の河床変動と流速分布（ピーク水位時）

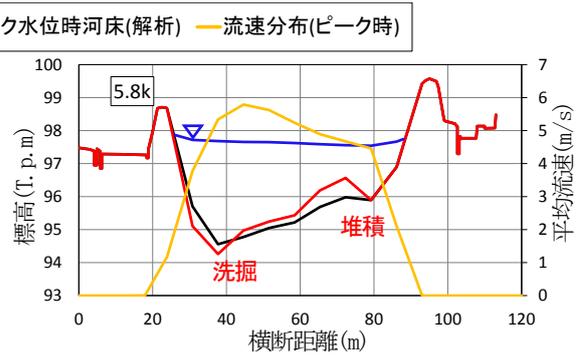
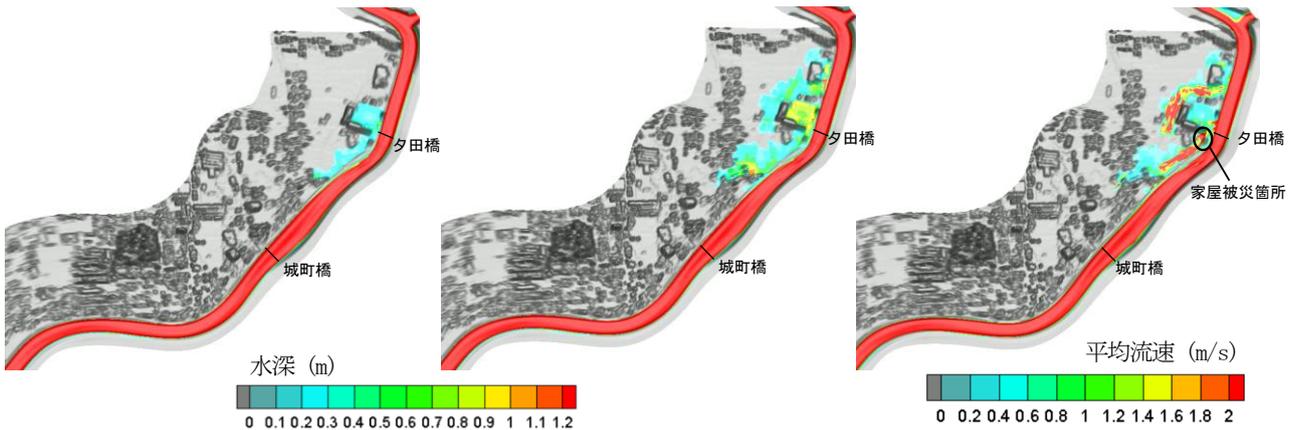


図-9 5.8k 地点の河床変動と流速分布（ピーク水位時）



(a) 7月3日 8:50

(b) 7月3日 9:00

図-10 花月川中流域氾濫状況（水深カウンター図）

図-11 花月川中流域平均流速カウンター図



写真-3 7月3日洪水時城町橋(4.0k)付近での再流入状況 (9:40頃)

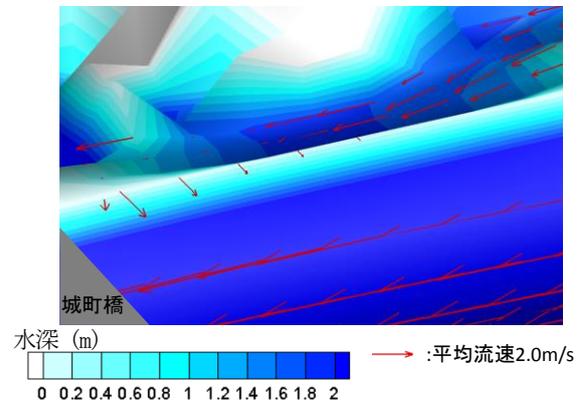


図-12 城町橋(4.0k)付近の解析結果

7月3日洪水ハイドログラフ(図-2)からピーク水位の発生20分前の8:40には夕田橋の欄干部まで水位が達していたものの、越水はしていなかった。しかし、8:50には夕田

橋のある4.7kよりわずかに上流の右岸側から越水氾濫をしていることが分かる。さらに10分後のピーク水位時には図-10(b)の範囲まで浸水し、ピーク水位時から1時間後

には、図-6(b)に示す広い範囲まで浸水した。このことから、夕田橋は十分な桁下高さが確保されていなかったため、流木が欄干に引っかかり、大規模な越水氾濫が起きていたことが分かる。さらに、堤内地が急勾配であるため、短時間で氾濫範囲が急激に広がったことが分かる。

図-11はピーク水位時の平均流速コンターと堤内地の氾濫水による代表的な家屋被災箇所を示す。この図から洪水時には氾濫域を高流速で流れていたことが分かる。特に被災箇所では、流速が2m/s以上と速く、図-10(b)に示すように水深も大きいことから、大きな流体力が作用していたと考えられる。他の被災箇所でも他の時間帯では、同様の現象が生じていた。堤内地の地盤勾配は河床勾配と同程度のため氾濫流による大きな流体力が家屋等に作用したことにより甚大な災害を引き起こしたと判断される。

写真-3は7月3日9:40には氾濫流は、4.0k城町橋付近に達していたことを示す。この写真から、越水氾濫が生じた4.7kから0.7kほど下流地点で、堤内地から河道内に再流入していることが分かる。図-12は7月3日9:30における4.0k付近の水深コンターと水深平均流速ベクトルを示す。この図は河道内から堤内地を見た図であり、7月3日ピーク水位を過ぎた9:30の時点では4.0k城町橋より少し上流部から氾濫水が河道に再流入していることが分かる。写真-3で見られる再流入範囲に比べると図-12に示す解析の再流入範囲はやや狭く計算されているが、実測と同様の結果になっており、解析における氾濫流れは実際流れをほぼ再現出来ていると考えられる。このような再流入は、堤内地での構造物の影響を十分考慮できていない解析（DEMデータを用いた解析）においては見られなかった。再流入が生じた付近は、建物が密集している箇所であり、建物群を避けるように氾濫水が河道付近に向かって流れている。さらに図-12から、4.0k付近には城町橋があり、その付近は地盤高が高くなっている。これらのことから、氾濫水が河道付近に集中し、地盤高が高くなっている城町橋下流側には流れず、再び河道に戻る流れが生じたと考えられる。これらは河道と氾濫域を一体的に解析することの必要性、堤内地の地物情報を詳細に再現することにより得られた結果であり、氾濫解析においてはそれらを適切に考慮することが重要であることが示された。

#### 4. 結論

花月川の氾濫解析では、地物を含むDSMデータを用いることにより、花月川周辺の建物配置の詳細をモデルに取り込み、解析精度を高めた。また、夕田橋に流木が集積し流下阻害が生じた現象を運動方程式や連続式で考慮する等、花月川の洪水流・河床変動と、中流域での氾

濫を一体的に表現出来るモデルを構築した。流木集積時の欄干や橋脚の抗力係数値については不明な点が多く、本文では単純な取扱いを行ったが、実現象の理解と解析法の精度向上は今後の検討課題である。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) 破堤箇所付近の花月川は、特に大きな湾曲部で河幅の変化が大きい。そのため外岸側で高流速が発生しており、破堤箇所では大きな河床洗掘が生じたものと考えられ、河床洗掘が破堤の有力な要因である。
- 2) 氾濫域での地物や地盤高の影響により、氾濫水の河道への再流入が生じた。
- 3) 本川と氾濫域を一体的に解析することにより河道からの堤内地への氾濫や、堤内地から河道内への再流入を再現した。
- 4) 氾濫域の地形は急勾配であるため、氾濫水が高流速で市街地を流下した。大きな浸水深と高流速が発生したことにより家屋被災が生じた。氾濫解析結果は、実際に起きた現象をかなりの程度説明している。

#### 参考文献

- 1) 土木学会九州北部豪雨災害調査団：平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書，2013。
- 2) 藤森祥文，越智有生，速水祥子，白石央，渡辺政広：急勾配中小河川における流木に起因する洪水氾濫軽減対策，水工学論文集，Vol.52，pp.679-684，2008。
- 3) 坂野章：橋梁への流木集積と水位せきあげに関する水理的考察，国土技術政策総合研究所資料，第78号，pp.1-87，2003
- 4) 例えば前野詩朗，吉田圭介，田中龍二：洪水時の急勾配中小河川の橋梁に作用する流体力の評価，水工学論文集，Vol.70，pp.883-888，2014。
- 5) 秋山壽一郎，重枝未玲，津崎周平：氾濫流量の評価と堤内物体群の影響，水工学論文集，Vol.51，pp.511-516，2007。
- 6) 内田龍彦，福岡捷二：底面流速解法による連続する水没水制群を有する流れと河床変動の解析，土木学会論文集B1，Vol.67，No.1，pp.16-29，2011。
- 7) 建設省土木研究所 河川部都市河川研究室：氾濫シミュレーション・マニュアル
- 8) 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。
- 9) 重枝未玲，秋山壽一郎，浦勝，有田由高：非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水流数値モデル，水工学論文集，Vol.45，pp.895-900，2001。
- 10) 川池健司，井上和也，林秀樹，戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発，土木学会論文集，No.698/II-58，pp.1-10，2002。
- 11) 例えばP.D. Bates, A.P.J. De Roo：A simple raster-based model for flood inundation simulation, Journal of Hydrology Vol.236, pp.54-77, 2000。
- 12) 秋山壽一郎，重枝未玲，田邊武司：下水道網を考慮した飯塚市街地の氾濫解析，水工学論文集，Vol.53，pp.829-834，2009。
- 13) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。

(2014. 9. 30受付)