

## 2012年8月13, 14日に宇治市周辺に発生した大雨

### 第2部 宇治市志津川の増水・氾濫の実態把握と予測可能性

黒 瀬 陽 平\*1・寶

馨\*2・LUO Pingping\*3・石 原 正 仁\*4

#### 要 旨

2012年8月13日, 14日に京都府宇治市から大阪府枚方市付近に大雨(以後総称して「宇治大雨」と呼ぶ)が発生し, 小河川の増水・氾濫によって住民は大きな被害を受けた。本論文は宇治大雨に関する二部構成論文の第2部である。この第2部では宇治大雨によって浸水被害をもたらした宇治市の小河川である長さ9 km, 流域面積11 km<sup>2</sup>の志津川を対象に, 増水・氾濫の状況を兎島ほか(1998), 立川ほか(2004)による「セル分布型流出モデル」によって再現を試みた。降雨データに気象庁の解析雨量を用いた場合, 観測流量のピーク時には16%以内の誤差で流量値を再現した。志津川で家屋の流出が発生した地点の水深も洪水監視に利用できる程度に再現した。一方, 降水短時間予報を用いた流量予測については, 最良のケースでは1時間先までは良好な流量予想値が得られた。これらのことから, これまで淀川などの大河川に適用されてきた今回のセル分布型流出モデルを流域面積のより小さい河川へ適用することによって, 周辺住民にきめ細かい洪水監視情報を提供できる可能性があることが分かった。

#### 1. はじめに

河川の増水・氾濫に関する情報として, 2つ以上の都府県にわたる河川または流域面積の大きい河川を対象として国土交通省と気象庁が, またそれ以外で洪水によって相当の被害が発生するおそれのある河川を対象として都道府県と気象庁が, それぞれ共同して指定河川洪水予報を発表している。さらに気象庁は長さ約15 km以上の河川を対象として1 kmメッシュのタンクモデルによって「流域雨量指数」を算出し(田中ほか2008), これをもとに個別の河川ではなく市町村を単位として洪水警報・注意報を発表している。

本研究で対象とした降雨は, 2012年8月13日夜から

14日朝にかけて京都府宇治市を中心に発生した大雨(総称して「宇治大雨」という)である。このときアメダスでは大阪府枚方で14日06時20分(以後すべて日本時間)までの1時間に91 mm, 京都府京田辺で同25分までの1時間に78 mmを記録した(大阪管区気象台2012)。これにより京都府南部から大阪府北部では床上・床下浸水などの被害が発生した。

宇治大雨において, 宇治市内を流れる一級河川である宇治川は増水したものの氾濫には至らなかった。その一方, 宇治市の山間部を流れる宇治川支流の志津川が増水・氾濫し, 川沿いの家屋のひとつが流出して2名がそれぞれ死亡・行方不明となった。同川上流の炭山地区では土砂災害により数日間交通が遮断された。市内平野部では同じく宇治川支流の弥陀次郎川で堤防が決壊し, 周辺の住宅地で床上浸水が発生した。市内を通過する京滋バイパスは周辺から土砂が流れ込み通行止めとなった(宇治市2014)。

宇治市は2000年9月に起こった東海豪雨に相当する降雨(1時間95 mm, 48時間425 mm)を想定したハザードマップを公開している。石原・寶(2018)にあるように宇治大雨はこれに相当する大雨であったこと

\*1 (連絡責任著者) 京都大学工学部 (現: 気象庁).  
y\_kurose@met.kishou.go.jp

\*2 京都大学防災研究所。

\*3 京都大学防災研究所 (現: 長安大学)。

\*4 京都大学学際融合教育研究推進センター (現: 気象研究所)。

—2014年8月4日受領—

—2017年12月22日受理—

から、同市内ではほぼ想定通りの浸水が発生した。ただし、今回の事例では、小河川に関する防災情報のあり方とその住民への伝達手段が今後検討すべき課題として残された(宇治市 2014)。

本研究では児島ほか(1998)が開発し、立川ほか(2004)が改良した河川流出モデルのひとつであるセル分布型流出モデル(以後「児島・立川モデル」という)を使い、対象を志津川流域に絞って流量計算を行う。これにより当時の志津川にどれだけの量の水が流れ、氾濫や浸水が発生したのかを把握する。これまで児島・立川モデルは阿武隈川(佐々木 2012)や鴨川・淀川(Luo *et. al* 2014)などの大河川に適用され高い精度の流量計算結果を得てきたが、志津川のような長さ9 km、流域面積11 km<sup>2</sup>程度の狭い流域に適用された例はない。本研究では児島・立川モデルがこのような事例においてどれだけ有用かを検討する。加えて、気象庁が発表している降水短時間予報のデータを用いて流量の予測実験を行い、その結果が警報や避難勧告などに利用できるかについて考察する。

## 2. 対象とする大雨と河川

### 2.1 宇治大雨

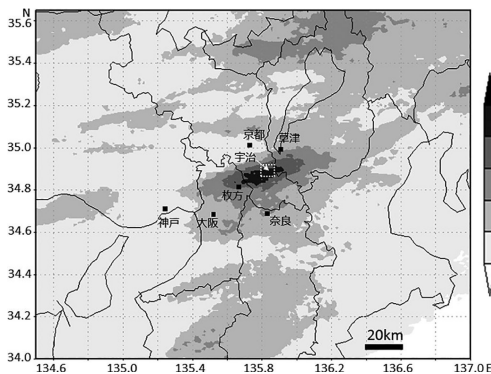
石原・寶(2018)によると、2012年8月13日19時(以後日本時)から14日8時までの13時間に、京都府宇治市から大阪府枚方市の東西40 km 南北15 kmの領域に集中的に大雨が発生した。気象庁の解析雨量によると宇治市志津川地区では総雨量が400 mmに達した(第1図)。この宇治大雨の特徴とそれをもたらした淀川チャンネル型対流システムの振舞いと構造は本論文第

1部(石原・寶 2018)で報告されている。宇治市には13日19時10分に大雨・洪水注意報が、また同日22時16分に大雨・洪水警報が出された。14日05時過ぎに志津川沿いで家屋が流出した。宇治市から志津川地区の住民に対して避難勧告が出されたのは14日14時10分であった。

### 2.2 志津川と対象流域

宇治川は滋賀・京都・三重・奈良・大阪・兵庫の各府県にまたがる流域を持つ淀川水系に属し、琵琶湖を源とし天ヶ瀬ダム上流部から木津川・桂川との合流部までを指し、その流域面積は506 km<sup>2</sup>である。第2図に示すように、今回の対象河川である志津川は京都市伏見区醍醐山に源を発して南下し、宇治市天ヶ瀬ダムの直下流で宇治川に合流する総延長9 km、流域面積11 km<sup>2</sup>の河川である。川沿いには上流部に炭山地区の集落が、下流部に志津川地区の集落が位置し、その中間を京滋バイパスのトンネルが東西に通過している。

数値モデルによって得られた流量の精度を検証するためには、水位・流量などの水文観測データが必要である。志津川に水文観測所があれば対象流域を志津川のみ限定できるが、志津川にはこうした観測所はない。このため、第2図のように志津川が宇治川に流入する地点(志津川合流点)の下流2.2 kmに位置する国土交通省宇治観測所のデータを使用し、ここで観測された宇治川の流量を「観測流量」と呼ぶことにする。流量計算を行う流域は、志津川全流域及び宇治川の日ヶ瀬ダム放流地点から宇治観測所までの区間において雨水が宇治川に流れ込む流域の合計18 km<sup>2</sup>の地域であり、これを「対象流域」と呼ぶ。



第1図 解析雨量による2012年8月13日19時~14日8時の総雨量。中央の白破線の四角形は第2図の位置を示す。



第2図 対象流域全体図(Googleマップ)。四角形は第3図の位置を示す。

本研究では対象流域において観測された雨量をもとに、児島・立川モデルにより対象流域内の宇治川及び志津川の各地点における流量を計算する。宇治大雨当時、第2図にある天ヶ瀬ダムからは宇治川に放流があった。また、天ヶ瀬ダムから宇治観測所までの間には志津川合流点の他に関西電力宇治発電所から宇治川への流入点がある(第2図)。したがって宇治観測所で測定される流量は、①志津川流域からの流量、②天ヶ瀬ダム放流点から同観測所までの間の宇治川流域からの流量、③天ヶ瀬ダムからの放流量、④宇治発電所からの放流量、の4つで構成される。①と②は児島・立川モデルによって計算される。③と④は対象流域に降った雨には関係しない量であり、これらの値は国土交通省から入手した。したがって宇治観測所での観測流量から③と④を差引いた値を、対象流域に降った雨に起因する流量とみなす。

第3節では児島・立川モデルの概要とパラメータ・データについて述べ、第4節では流量計算の結果を示す。第5節では得られた流量の計算結果の精度を宇治観測所における流量観測値によって検証し、次に家屋の流失と床上浸水の被害が発生した志津川流域の2地点(第3図)に注目して、大雨当時の志津川における流量の状況を把握する。最後に気象庁の降水短時間予

測データを用いて流量予測を試みる。

### 3. 数値モデルと降雨データ

#### 3.1 数値モデルの概要

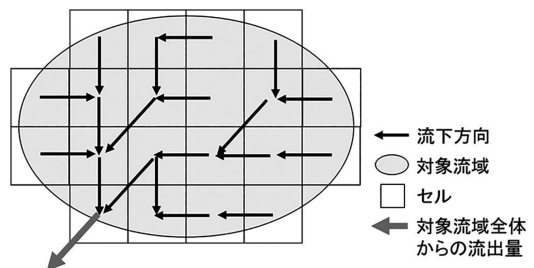
これまで降雨による流量の変化や河道における土砂の浸食量・堆積量の計算、及び流域環境や気候の変化に伴う土砂流出量の変化を評価することを目的として河川流出モデルが構築されてきた。今回使用する児島・立川モデルは児島ほか(1998)が開発したセル分布型土砂流出モデルを立川ほか(2004)が飽和・不飽和浸透流を考慮して改良した斜面流出モデルである。この児島・立川モデルは第1節で述べたように大河川における流出量の再現性の点で優れた成果が得られている。このモデルの基本構造は以下の通りである。

- ・最初に対象流域を今回使用する数値標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)の空間分解能に合わせて分割し、分割された各正方形領域を「セル」と考える。DEMの標高値をもとに周囲8方向のうち最急勾配方向を求め、その方向に落水線を描く。最急勾配方向が複数ある場合は、各方向の先の領域の標高値が最も低い方向へ落水線を描く。
- ・あるセルからの流出は落水線の流下方向にある隣接セルにのみ起こるとする。各セルでは雨量を入力とし、上流側のセルからそのセルへの流入を「上流端流入量」として、kinematic waveモデル(児島ほか1998)によってそのセルから流出する水量(流出量)を計算する。概念図を第4図に示す。
- ・流域全体は斜面を表すセルと河道を表すセルから成る。河道を表すセルについては河道の流れを式(1)と式(2)で示すkinematic wave法を用いて計算する。また斜面を示すセルでは同法と式(3)の流量流積関係式を用いて流出量を計算する。

kinematic wave法の基礎式は式(1)の連続式と



第3図 志津川の断面形状を測量した2地点(丸印)。国土地理院2万5千分の一地図による。



第4図 セル分布型流出モデルの概念図。

式 (2) の運動方程式である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e(t) \tag{1}$$

$$q(h) = \frac{\sqrt{I}}{n} h^m \tag{2}$$

$$q(h) = \begin{cases} v_m d_m \left[ \frac{h}{d_m} \right]^\beta & 0 \leq h < d_m \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) & d_m \leq h < d_a \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \alpha (h - d_a)^m & d_a \leq h \end{cases} \tag{3}$$

ここで、 $q$ ：単位幅流量 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $h$ ：水深 (m)、 $r_e$ ：有効雨量 (側方からの雨水流入量) (m/s)、 $I$ ：斜面勾配、 $n$ ：粗度係数 ( $\text{m}^{-1/3}\text{s}$ )、 $m$ ：斜面定数 (= 5/3) である。斜面勾配  $I$  は DEM によって求める。

地表面として透水性の高い表土層を考え、重力水 (重力によって自由に流れる水) が支配的な「大空隙部」と、表土層を毛細管移動流 (土粒子との間の表面張力によって重力に逆らって保持されている水の流れ) が支配的な「マトリックス部」との2種類に分ける。ただしマトリックス部と大空隙部はそれぞれ土層全体に広がっていると考える。飽和・不飽和浸透流を考慮した流量流積関係式を仮定する (立川ほか 2004)。表土層全体の厚さを  $D$ 、表土層全体の平均体積含水率を  $\theta$  とすると、表土層全体での見かけ上の水深  $h$  を  $h = D\theta$  とおくことができる。マトリックス部の最大体積含水率を  $\theta_m$  とすると、マトリックス部の最大水分量を水深で表した値は  $d_m (= D\theta_m)$  となる。想定する表土層において  $\theta_a$  を空隙率としたとき、大空隙部の体積含水率  $\theta$  の範囲は  $\theta_m < \theta < \theta_a$  であり、重力水を含めて表土層の土壤中に存在し得る最大水深は  $d_a (= D\theta_a)$  (m) である。大空隙部での平均流速を  $v_a$  (m/s)、マトリックス部での平均流速を  $v_m$  (m/s) とし、 $q$  を以下の式 (3) で表す。

この式で表される  $h$  と  $q$  の関係を第5図に示す。これにより水の速度を  $c = \partial q / \partial h$  とし、連続の式 (1) と組み合わせることで差分法により  $q$  を求める。このモデルのパラメータ (計算に先だてて与える必要のある値) は、全空隙に相当する水深  $d_a$ 、マトリックス部の水深  $d_m$ 、粗度係数  $n$ 、大空隙部の飽和透水係数  $k_a$ 、大空隙部の飽和透水係数とマトリックス部の飽和透水係数の比  $\beta$  である。

### 3.2 使用データ

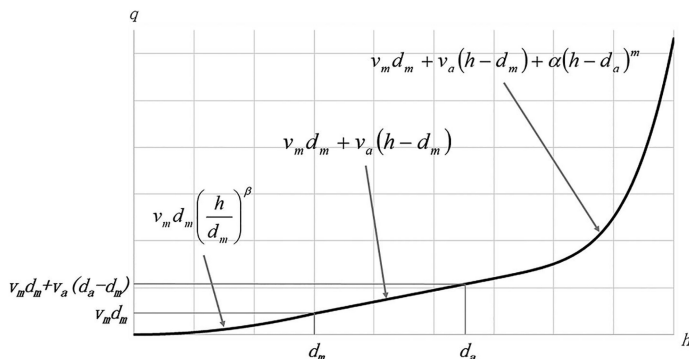
データ処理は GIS (Geographic Information System：地理情報システム) に基づいて行った。本研究では ESRI Japan 社の GIS 処理ソフト ArcGIS10.3 を用いて、以下の手順で各データを作成した。

a. DEM データの作成：国土地理院 50 m メッシュの標高データをもとに、空間分解能 50 m の DEM を JGD (日本測地系) 座標系で作成した。今回の対象流域は 4917 個のセルに分割された (第6図)。このデータセットをデジタルマップと呼ぶ。

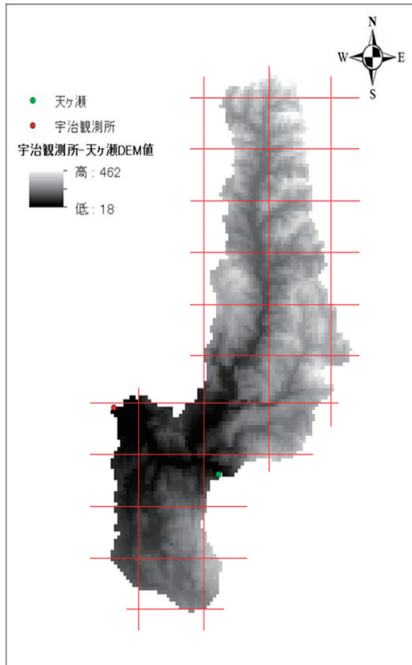
b. 最急勾配方向の決定：デジタルマップを用いて各セルの標高を周囲 8 方向のセルの標高と比較し、各セルにおいて雨水が流れ落ちる最急勾配方向を追跡し、流向図を作成した (第7図)。このとき追跡点をつなぐ線を落水線と呼ぶ。あるセルから雨水が落ちていく谷の下流の最終点まで

落水線を辿る。その際、窪地が存在すると落水線の追跡がうまくいかない。その問題を解決するために、窪地を埋め込んで平らにして窪地をなくす作業を行う。

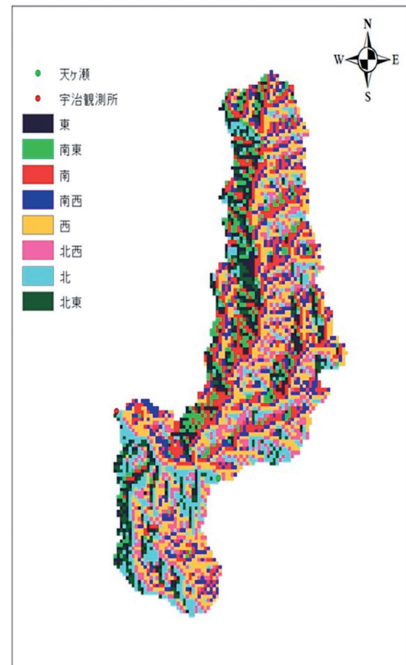
c. 擬河道網の作成：落水線図に最上流部を定義する閾値を設定して擬似の河道 (擬河道網) を作成した。ここで閾値とは、擬河道網の各上流端に対して計



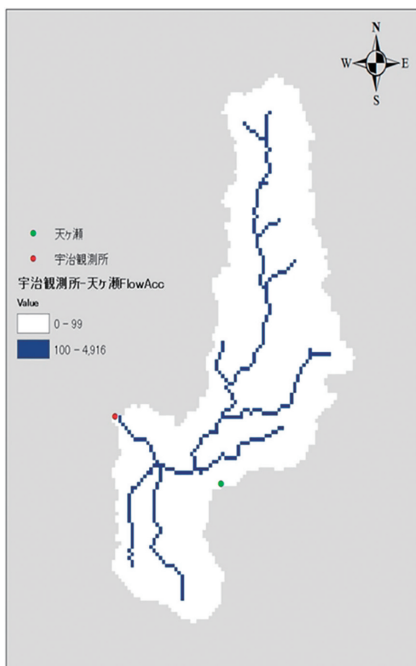
第5図 水深  $h$  (m) と単位幅流量  $q$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) の関係。



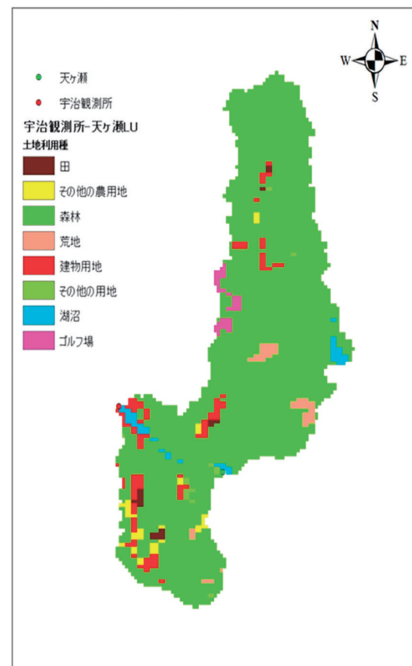
第6図 50 m 分解能 DEM による対象流域の標高分布 (m)。赤線は解析雨量の 1 km メッシュ。



第7図 最急勾配方向の追跡による流向図。



第8図 対象流域における擬河道網 (Value=上流セル数) (上流セル閾値: 100セル)。



第9図 対象流域の土地利用図。

何個のセルから雨水が流れ込んでいるかを表すものである。本研究では閾値を100に設定すると実情に近い河道網を再現できたので、こうして作成した擬河道網を使って流量計算を行った(第8図)。

d. 土地利用図の作成：国土数値情報(国土交通省2013 <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>)により得られた土地利用図を用いて、第9図のように各セルの土地被覆状況を定めた。この土地被覆状況によって、各セルにおける等価粗度を決定した。対象流域の土地利用状況は、森林84.2%、建物用地3.3%、農用地1.9%、ゴルフ場0.9%、荒地・内水地・その他9.7%である。

e. 地表・地中パラメータの同定：児島・立川モデルにおける計算では各種の地表及び地中に関するパラメータ(田, 建物用地, その他の用地, 森林, 荒地および河道セルの等価粗度  $N$  ( $m^{-1/3}s$ ), 土層厚  $D$ , 大空隙部での透水係数  $k_a$ , 土層に対する大空隙部の空隙率  $\gamma_s$ , 土層に対するマトリックス部の空隙率  $\gamma_c$ , 大空隙部とマトリックス部の透水係数比  $\beta$ , 流出率(流域の雨量のうち流出に寄与する割合)  $f_i$ , 初期流量  $Q_i$  ( $m^3/s$ )を設定する必要がある。各パラメータの最適値を求めするため、降雨データをモデルに入力して流量計算を行い、モンテカルロ法を用いてパラメータのキャリブレーションを行った。このキャリブレーションにおいては、目的関数には式(4)に定義するナッシュ・サトクリフ係数  $E$  (Nash and Sutcliffe 1970)を採用し、それを最大化することとした。係数  $E$  は計算流量に応じて $-\infty$ から1までの値をとり、

1に近いほど精度が高い計算結果であり、 $E=1$ ならば計算流量が観測流量と完全に一致していることを示す。

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0(t) - Q_m(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0(t) - \bar{Q}_0)^2} \quad (4)$$

ここで、 $Q_0(t)$ は観測流量 ( $m^3/s$ ),  $Q_m(t)$ は計算流量 ( $m^3/s$ ),  $\bar{Q}_0$ は平均観測流量 ( $m^3/s$ ),  $t$ は計算対象時間,  $T$ は計算終了時間である。本研究ではLuo *et. al* (2014)を参考に、第1表に示すように各パラメータの取り得る値の範囲を設定した。対象流域では森林の占める面積が大きく、森林による流出量への効果が大きいと考えられる。森林の等価粗度  $N$ の取り得る範囲を0.3~0.9とした。モンテカルロ法により決定したパラメータセットによると観測流量に対して $E=0.86263$ となり、流出率は0.9848、森林の  $N$ は0.7479である。すなわち、降った雨のほぼ全てが流出に関与する一方、森林による雨水の流れの妨げの影響が大きいパラメータセットとなった。

f. 解析雨量データ：各セルに入力する雨量は気象庁の解析雨量及び同庁の降水短時間予報データをもとにした。解析雨量とは、気象庁、国土交通省水管理・国土保全局、道路局、地方自治体等が全国に設置している気象レーダー、アメダス等の地上の雨量計を組み合わせ、ほぼ1km四方の分解能で雨量を解析したものである。対象流域における各セルでの観測雨量はセル周囲の解析雨量値を内挿した。対象流域における解析雨量の平均値の時間変化を第10図に示す。

g. 降水短時間予報データ：気象庁の降水短時間予報は過去の解析雨量と現在の解析雨量の分布をもとに、目先1~6時間までの降水の分布を1km四方の細かさで予測するものである。1~3時間先までは降水域を直近の移動速度で移動させて地形の効果などを考慮しながら雨量を予測し、その後は数値予報による予測の結果も加味して雨量を予測している。宇治大雨の事例を対象領域全体の

第1表 児島・立川モデルにおける各パラメータの取り得る値と決定値。

パラメータ	取り得る値		決定値
	最小値	最大値	
粗度係数 $n(m^{-1/3}s)$ (田)	0.3	0.5	0.312
同(その他の用地)	0.1	0.3	0.257
同(その他の農用地)		*	0.01
同(森林)	0.3	0.9	0.747
同(荒地)	0.1	0.3	0.121
同(建物用地)	0.05	0.2	0.136
同(湖沼)		*	0.0100
同(ゴルフ場)		*	0.0100
同(河川(擬河道))	0.001	0.3	0.155
$k_a$ (m/s)	0.0001	0.1	0.0269
$D$ (mm)	100	2000	217
$\gamma_s$	0.1	0.5	0.335
$\gamma_c$	0.1	0.5	0.396
$\beta$	2	10	2.94
$Q_i(m^3/s)$		*	20.6
$f_i$	0.5	1	0.984

\*はパラメータの最適化を行っていない

平均値で見ると、予測時間が長くなるにつれて降水短時間予報の雨量値は解析雨量の値から乖離する傾向があり（図略）、e項で示したパラメータセットと降水短時間予報データをもとにした対象流域の有効雨量（観測された雨量のうち、地上・地下パラメータによって決まる地表に流出する量）の平均値（各セルでの有効雨量を流域全体で平均化した値）も、予測時間が長くなるにつれ解析雨量をもとにした有効雨量の平均値から大きく乖離する傾向があった。このため、今回は1～3時間先までの降水短時間予報データに限って使用した。

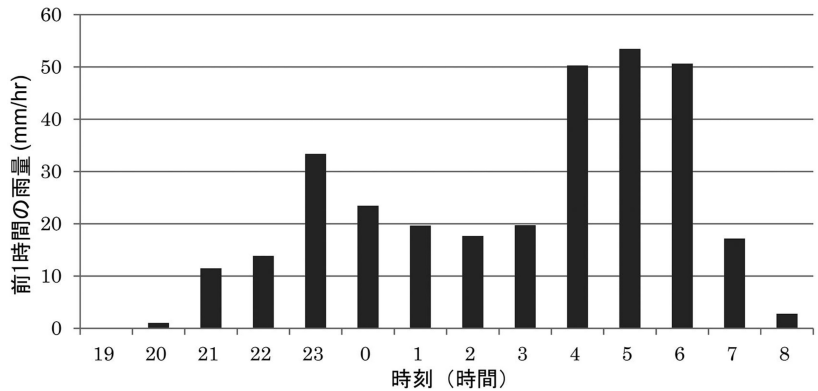
#### h. 水文観測データ

国土交通省から提供され、本研究で利用した宇治観測所における水位と流量の関係を図11に示す。宇治観測所の水位、天ヶ瀬ダムと宇治発電所の放流量、図11の関係式から計算した宇治観測所における観測流量、及び宇治観測所観測流量から天ヶ瀬ダムと宇治発電所からの放流量を差し引いた対象流域の流量を図12に示す。

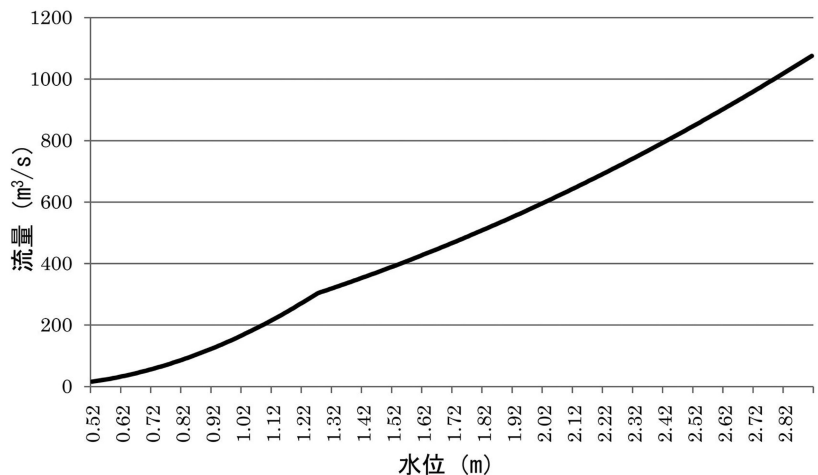
## 4. 結果

### 4.1 モデルによる流量計算結果

雨量データとして気象庁の解析雨量を用いて児島・立川モデルによって計算した対象流域における平均有効雨量と計算流量、及び観測流量を図13に示す。これによると宇治大雨の期間である8月13日21時から14日8時のすべての時刻で計算流量値が観測流量値を下回った。計算流量値のピーク値は289 m<sup>3</sup>/sであり、観測流量値のピーク値346 m<sup>3</sup>/sと比べると57 m<sup>3</sup>/s小



第10図 対象流域における解析雨量の平均値の時間変化、2012年8月13日19時～14日8時。

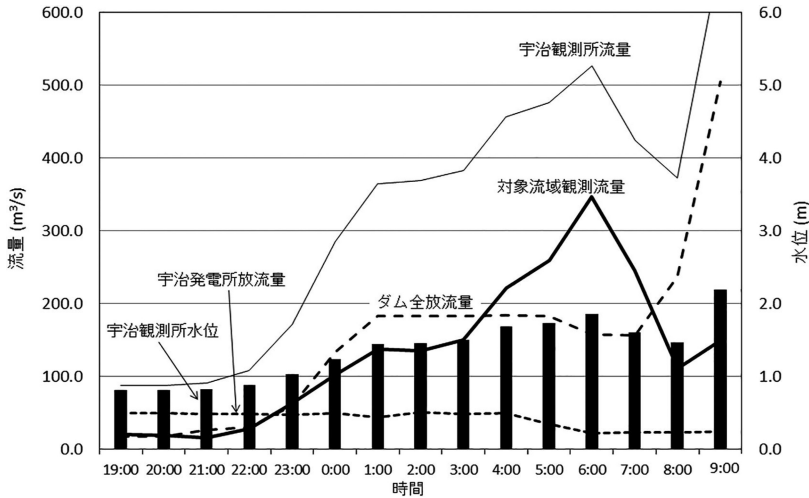


第11図 2012年8月13, 14日当時の宇治観測所における水位-流量の関係（国土交通省提供）。

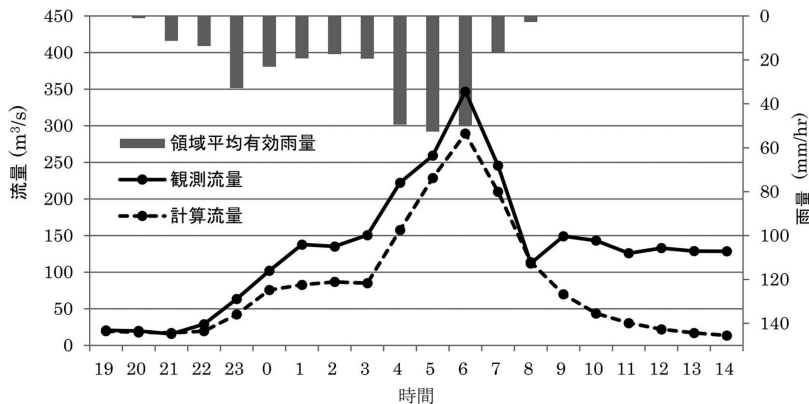
さい値を示した。これは16%の誤差である。13日21時から14日8時の期間の計算流量値と観測流量値の平均誤差は29.6 m<sup>3</sup>/sであり、最大誤差は14日3時の65.6 m<sup>3</sup>/sであった。

### 4.2 志津川の2地点における流量計算結果

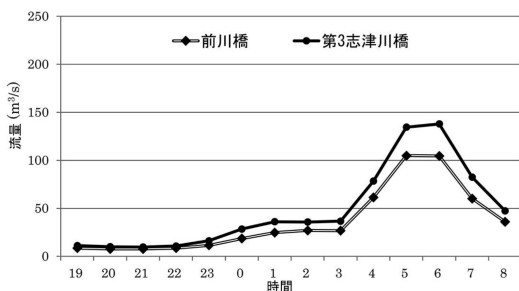
雨量データとして解析雨量データを用いた場合の志津川の2地点（相対的に上流側の前川橋と下流側の第三志津川橋）での児島・立川モデルによる流量の計算結果を図14に示す。宇治大雨によって前川橋付近では周辺の民家が床上浸水し、そのうちの1軒が川に流出した。第三志津川橋では川沿いの民家に床上浸水が発生した。計算流量値は前川橋では14日5時に105



第12図 宇治観測所観測水位、宇治観測所流量、天ヶ瀬ダム全放流量、宇治発電所放流量及び対象流域観測流量の時間変化。2012年8月13日19時～14日9時。



第13図 雨量データに解析雨量を使用した場合の、対象領域における平均有効雨量、観測流量及び計算流量。2012年8月13日19時～14日14時。



第14図 雨量データに解析雨量を使用した場合の志津川の2地点における流量計算結果。2012年8月13日19時～14日8時。

m<sup>3</sup>/s, 第三志津川橋では6時に138 m<sup>3</sup>/sのそれぞれピークを示した。なお、これらの地点では流量は観測されていないため観測流量値は不明である。

## 5. 考察

### 5.1 観測流量と計算流量の比較

ここでは第13図の観測流量と計算流量を比較する。計算値は全体的に観測値を下回っている。この要因としては、3.2節eで述べたように対象流域の大部分を占める森林の等価粗度の値をひとつの値で代表させたこと、また解析雨量に関しては、雨量計を含む解析雨量のグリッドでは解析雨量は実際の雨量値を示すが、その他のグリッドでは必ずしも実際の雨量値を示すとは限らないことが考えられる。こうした不確定要素があるにもかかわらず、流量の変化傾向とピークの発現時刻に関しては観測値と計算値が一致したこと、またピーク値における観測値と計算値の差が16%程度であったことを考慮し、今回はこの計算結果をもとに議

論を進める。

14日8時から9時には降雨が終わりそれ以降の計算流量は減少するが、観測流量はほぼ一定を保っている。第12図を見ると、14日9時以降天ヶ瀬ダムからの放流量が急増したことが分かる。ダムからの放流量の増加により宇治観測所での水位が高くなり、その高水位からの流量への換算が第11図で示される関係式では十分に表現できなかったため、見かけ上計算流量が減少した可能性がある。

これらのことから、今回のパラメータセットによっ



て、1 km 分解能の解析雨量のデータと50 mメッシュのDEMを用いて見島・立川モデルを実行することで、今回の対象流域のような狭い流域を対象としても、流量及びその変化傾向をほぼ再現できなかった。

## 5.2 志津川2地点での氾濫

4.2節では志津川における2地点において流量を計算した。第15図は大雨終了の数時間後に撮影された両地点の写真である(防災研究所流域災害研究センター2012)。同図aは前川橋付近から下流側を見た風景であり、写真の中央に14日5時過ぎに流失した1軒の家屋が位置していた。同図bは第三志津川橋から上流側を見た風景である。ここでは川沿いの家屋の外壁の上下真ん中あたりまで水跡が残っており、近くの電柱が折れるという被害が起きた。筆者らは2013年11月に

付近の住民から聞き取り調査を実施し、これらふたつの橋の周辺で床上浸水が発生したことを確認した。

計算された流量から当時の志津川の水深を推定した。計算には河道断面の値が必要であるため、2014年1月に実地測量を実施し、両地点付近で川幅が最も狭くなる地点(ボトルネック部)における河道の断面積を求めた(第16図)。国土地理院の地図から、ボトルネック部を挟む2地点間の標高差と河道に沿った長さを求め、河道の勾配を求めた。それらから次の Manning の式(池淵ほか2006)を用いて各地点での最大流下能力  $Q$  を求めた。

$$Q = vA = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} A \quad (5)$$

ここで、 $Q$ : 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $v$ : 平均流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )、

(a) 前川橋下流



(b) 第三志津川橋上流



(c) b 図の拡大



第15図 志津川における被災状況。(a) 前川橋下流の家屋流失地点、(b) 第三志津川橋上流の床上浸水地点(防災研究所流域災害研究センター2012)。

(a) 前川橋上流



(b) 第三志津川橋上流



第16図 測量実施時(2014年1月7日)の写真。(a) 前川橋上流、(b) 第三志津川橋上流。赤破線は各ボトルネック部の位置。流出した家屋はa図で前川橋を挟んだ反対側に位置していた。赤数字は実測した各辺の長さ(cm)。

$A$ : 断面積 ( $m^2$ ),  $n$ : 粗度係数 ( $m^{-1/3}$ ),  $R$ : 径深 (断面積 ( $m^2$ ) / 潤辺 ( $m$ )),  $I$ : 斜面勾配である。

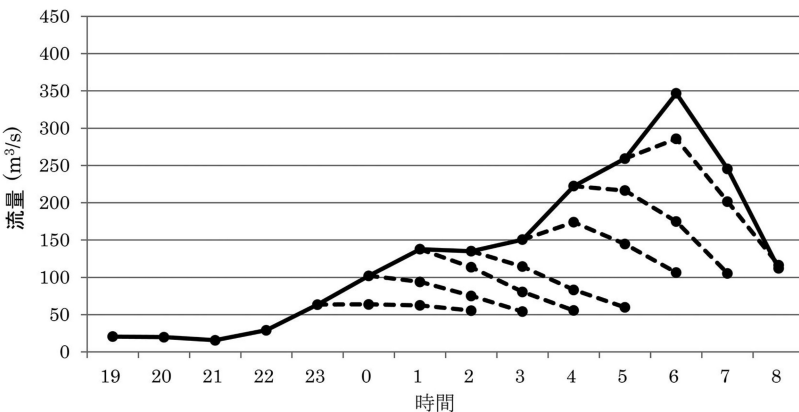
志津川における実地測量時に得られた河床部の砂礫の代表粒径より  $n$  を0.035とした。第16図 a は単断面であるため護岸部の粗度係数も考慮し、合成粗度係数として0.029を求めた。第16図 b の高水敷部 (川床より一段高い部分) では平均植生の高さを考慮して  $n$  を0.031とした。その結果、前川橋上流側における最大流下能力は142  $m^3/s$ 、及び第三志津川橋上流側では146  $m^3/s$  という値を得た。

この結果から見ると、第14図に示す前川橋での計算流量のピーク値 (14日5時の105  $m^3/s$ ) は最大流下能力 (142  $m^3/s$ ) を超えてはおらず氾濫が起きたことを再現していない。4.1節で述べたように、対象流域全期間を通じて計算流量が観測流量を下回ったことが第一の原因であろう。さらにたとえ流量が最大流下能力以下であっても、防災研究所流域災害研究センター (2012) の現地調査結果が指摘するように、流木などが橋の欄干に引っ掛かり流れをせき止めて迂回流を発生させたことが第二の原因として推測される。第三志津川橋においても計算流量のピーク値 (138  $m^3/s$ ) が最大流下能力 (146  $m^3/s$ ) をわずかに下回り、浸水が起こった実際の状況を再現できたとは言えないが、これについても上記2つの原因が可能性として考えられる。

5.3 降水短時間予報データを使用した流量予測

a. 対象流域での流量予測

次に雨量データとして降水短時間予報のデータを用いて計算した対象流域での流量の予測値を第17図に示



第17図 降水短時間予報データを使用した場合の対象流域全体における流量計算結果。実線は観測流量、各破線は各時刻を開始時刻とする降水短時間予報データによる予測流量。2012年8月13日19時~14日8時。

す。このとき、降水短時間予報データの各発表時間から3時間先までを予測計算時間とし、初期流量として各々の発表時間での観測流量を使った。

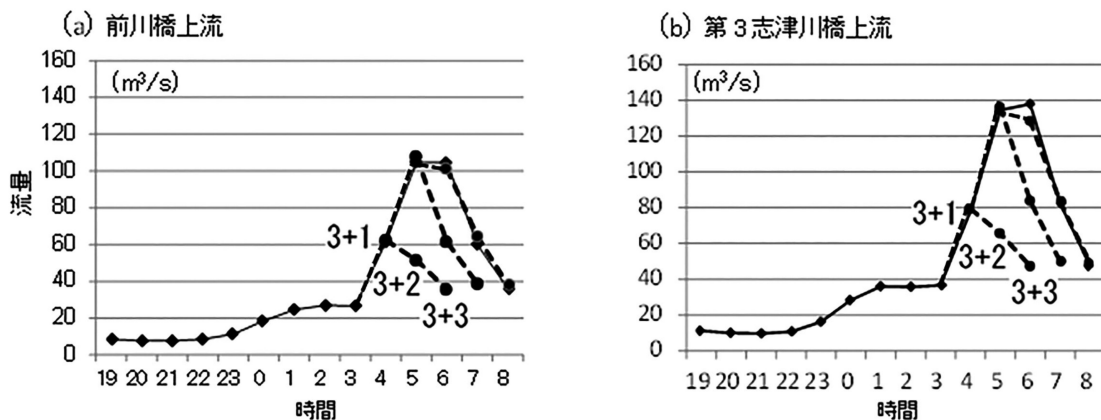
第17図によると、13日23時から14日4時までの各時刻では予測流量値は観測流量値を下回った。変化傾向に着目すると、14日3時の1時間予報流量値は実際よりは少ない流量を予測しているが、1時間先に流量が増えることを住民に警告できる可能性がある。14日5時からの1時間予報流量値はやはり実際の値より小さいながら、流量が増えることは予想しており、6時に流量がピークを迎えることも再現した。これらのことから、予測雨量データとして降水短時間予報データを使用した場合、宇治大雨の全期間をとおしては流量を適切に予測することはできなかったが、大雨の末期には1時間先の水量が増加しピークを迎えることを予測することができた。

石原・寶 (2018) によると、宇治大雨で対象流域に降雨をもたらした降水システムは幅10 km、長さ50 km 程度の複数の線状降水帯であった。それらの動きは遅かったが、各線状降水帯は消長の激しい積乱雲の集合体であった。このため時間外挿を基本原理とする3時間先までの降水短時間予報では、こうした線状降水帯群にともなう雨量の時間変化を的確に予測することは困難であり、結果的に今回の宇治大雨に関しては流量を精度よく予測することができなかったものと推測される。

b. 志津川2地点における流量予測

第18図に、降水短時間予報のデータを用いた場合の志津川2地点での流量予測の計算結果を示す。ここでは2地点で流量がピークを迎えたと考えられる14日5時と6時を予報時間に含む同日3時、4時、5時における予測結果を示す。2地点の予測流量値は2地点における流出予測の計算値を取り出すことで得た。なお、2地点には実際の観測流量がないため、第18図の実線は第14図に示す計算流量値である。

14日3時、4時、5時の各時刻から始まる予測で



第18図 解析雨量データによる計算流量値 (実線), 及び14日3時から5時までにける1時間から3時間先までの降水短時間予報データを使用した場合の予測流量 (破線)。破線上の3+1とは14日3時から1時間先の予測流量値。(a) 前川橋上流, (b) 第三志津川橋上流。2012年8月13日19時~14日8時。

は、両地点とも1時間先の予測値に関しては4.2節の計算流量値とほぼ一致した。しかし2, 3時間先の予測値は計算流量値を大きく下回った。2地点とも5時から始まる予測値は4.2節における14日7時、8時の計算値とよく一致したが、これは流量のピークが到来した後の流量が減少する期間であった。14日3時及び4時の時点でそれぞれ1時間先には流量がさらに増加することを予測できたことは、少なくともその時点からの増水や氾濫発生を監視する上で有効な情報となった可能性がある。

## 6. 結論

本研究の目的は、流域面積が11  $km^2$ である志津川流域のような小河川において、児島・立川モデルが大雨時の流量をどの程度再現できるか、また流量の予測がどの程度の精度で可能であるかを明らかにすることであった。

雨量データとして解析雨量を使用した場合の流量の計算では、ピーク時で16%以内の誤差で流量を再現した。洪水被害が発生した志津川の2地点では、実際の流量は不明であるが、現地調査により得た氾濫の時刻や被害状況から推察される当時の流量の変動を過小評価気味ながらほぼ再現する計算結果を得た。これらのことは今回使用した児島・立川モデルが、この程度の小河川であっても大雨時の氾濫を監視する上で有効な手段になり得ることを示している。

降水短時間予報データを用いた流量予測の計算では、1時間先までに限れば一部の時刻で流量の増加傾

向とピークを捉える結果が見られた。しかし、大雨期間をとおして実用的な精度で流量を予測することはできなかった。これは小領域を対象とする際の降水短時間予報の困難さを示している。

現在、本研究で対象とした志津川のような小さな河川では、河川を特定した洪水注意報・警報は発表されていない。河川周辺に住む住民に対して洪水に対する危険意識を向上させるには、大規模河川だけでなくそこに注ぐ中小の支流にまで対象を細かくした洪水予報を発表することも検討に値する。それを実現するためには、各河川流域において土地利用や標高などのデータを用い、流出を再現するための最適なパラメータセットをあらかじめ揃えておく必要がある。労力を必要とする作業であるが、近年短時間強雨の発生回数が増加傾向にあること(気象庁 2017)を考えると、十分に価値ある仕事である。

洪水予報を発表するにあたっては雨量の予測が不可欠である。本研究では流量予測のため降水短時間予報のデータの使用をしたが、予報期間全体を通しては精度の高い流量の予測値を得ることはできなかった。本研究で対象とした志津川のような流出時間の短い小流域の河川において流出解析及び洪水予報を行う場合は、本研究で使用した1時間ごとの解析雨量の代わりに、より時間間隔の短い降雨観測及び予報データが有効であろう。気象庁の全国合成レーダーデータは5分ごと1  $km$ メッシュで降水実況データと1時間先までのナウキャストを提供している。近年、二重偏波レーダー網である国土交通省のXRAINは1分おき250  $m$

メッシュで雨量を観測している。気象庁では上記ふたつの雨量データを利用した分解能250 mの高解像度降水ナウキャストの提供を始めた。われわれの今後の課題は、これらの降雨データを利用して小河川を対象とした実用的な洪水予報を検討することである。

## 謝 辞

本論文を作成するにあたり、京都大学大学院工学研究科の佐々木俊明氏には数値モデルの利用についてご指導いただきました。宇治川水文観測データは国土交通省近畿地方整備局河川部河川計画課の成宮文彦氏を通じて提供いただきました。気象庁の太田琢磨氏から流域雨量指数に関してご指導をいただきました。志津川周辺の聞き取り調査では、住民の皆様から宇治大雨当時の同川の水深や氾濫状況について貴重な情報をいただきました。お二人の査読者及び林 修吾天気編集委員からは、原稿を推敲する上で貴重なコメントをいただきました。皆様に厚く御礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 防災研究所流域災害研究センター, 2012: 2012年8月宇治水害調査速報. [http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web\\_j/contents/event\\_text/20120913.pdf](http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/contents/event_text/20120913.pdf)
- 池淵周一, 椎葉充晴, 宝 馨, 立川康人, 2006: エース水文学. 朝倉書店, 201pp.
- 石原正仁, 寶 馨, 2018: 2012年8月14日に宇治市周辺に発生した大雨災害. 第1部 大雨をもたらした線状降水帯群のメソ構造. 天気, 65, 6-23.
- 気象庁, 2017: アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について. 気象庁ホームページ. <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html> (2017年4月参照).
- 児島利治, 宝 馨, 岡 太郎, 千歳知礼, 1998: ラスター型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響. 水工学論文集, 42, 157-162.
- Luo, P., K. Takara, Apip, B. He and D. Nover, 2014: Palaeoflood simulation of the Kamo River basin using a grid-cell distributed rainfall run-off model. J. Flood Risk Manag., 7, 183-192.
- Nash, J. E. and J.V. Sutcliffe, 1970: River flow forecasting through conceptual models part 1: A discussion of principles. J. Hydro., 10, 282-290.
- 大阪管区气象台, 2012: 平成24年8月14日の近畿地方の大雨について (近畿地方の気象速報). 気象速報.
- 佐々木俊明, 2012: 放射性物質の流動を考慮した分布型土砂流出モデルに関する研究. 京都大学工学部地球工学科特別研究報告書.
- 立川康人, 永谷 言, 寶 馨, 2004: 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発. 水工学論文集, 48, 7-12.
- 田中信行, 太田琢磨, 牧原康隆, 2008: 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善. 測候時報, 気象庁, 75, 35-65.
- 宇治市, 2014: 平成24年8月13日・14日京都府南部地区豪雨災害記録集. 宇治市, pp75.

# The Rainstorm Generated around Uji, Kyoto on 13-14 August 2012. Part II: Data Analysis for the Flooding of the Shizu-River in Uji City and Possibility of Its Forecasting

Yohei KUROSE\*<sup>1</sup>, Kaoru TAKARA\*<sup>2</sup>, LUO Pingping\*<sup>3</sup> and  
Masahito ISHIHARA\*<sup>4</sup>

\*<sup>1</sup> (Corresponding author) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (Present affiliation: Japan Meteorological Agency)

\*<sup>2</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

\*<sup>3</sup> Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University (Present affiliation: Chang'an University)

\*<sup>4</sup> Center for Promotion of Interdisciplinary Education and Research, Kyoto University (Present affiliation: Meteorological Research Institute)

(Received 4 August 2014; Accepted 22 December 2017)

## Abstract

A heavy rainstorm occurred in the area ranging from Hirakata City of Osaka to Uji City of Kyoto on 13 and 14 August 2012, causing flooding of small rivers and giving serious damage to residents in the cities. We call this storm “the Uji rainstorm”. This is the second part of the two-series papers concerning the Uji rainstorm, describing simulation results on the flooding of the Shizu River: a small-scale river of 9 km in length and 11 km<sup>2</sup> in area, using the hydrological runoff models of Kojima et al. (1998) and Tachikawa et al. (2004).

When the Analysis Precipitation data of Japan Meteorological Agency (JMA) are used as the rainfall amount data, the true water flow rate was simulated with the error of 16% at the time of the peak of water flow. The water level of the Shizu River at the site where a house was washed away by the flooding was estimated with the accuracy enough for practical use for issuing flooding warning. In case of using the JMA precipitation forecast data, the best simulation result showed that the water flow rate was well forecasted up to one hour later.

These results have indicated that flooding information could be issued to residents around small rivers, if the runoff models which have been applied to larger rivers are used.

---