

非構造格子氾濫解析モデルを用いた都賀川 水難事故時の流量配分と流量ハイドログラフの推定

ESTIMATION OF DISCHARGE DISTRIBUTION AND DISCHARGE HYDROGRAPH
AT THE FLASH FLOOD ACCIDENT OF THE TOGA RIVER USING FLOOD
INNUNDATION MODEL BASED ON UNSTRUCTURED GRID SYSTEM

國田洋平¹・藤田一郎²
Yohei KUNITA and Ichiro FUJITA

¹ 学生会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 正会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

Due to an extremely heavy downpour in the afternoon of July 28 in 2008, a flash flood occurred in the Toga River in Kobe City and as a result five peoples including children were drowned to death. The water level rose about one meter in a few minutes and there seemed to be little time remained for them to escape from the site. The downstream drainage area of the Toga River is mostly urbanized with residential area paved roads and a drainage network system is constructed adding to the tributary channels. According to the image monitoring system for sediment control dams, inflow from the mountainous region was found to be very small, which suggests the flash flood is originated from the urbanized area. In order to clarify the process of the flash flood, inundation simulation is performed paying attention to the roll of the drainage system. It was made clear that the more than half of the water is drained from the drainage system. Moreover, the estimated peak discharge agrees fairly well with the observed data using image analysis method.

Key Words: Flash flood, drainage system, discharge hydrograph, inundation simulation, water accident

1. はじめに

平成20年7月28日に神戸市内の都賀川において発生した水難事故では、児童を含む5名の犠牲者を出す結果となった^{1,2)}。都賀川では約1.8kmの本川全区間にわたって親水性に配慮した整備が行われており³⁾、通常は多くの市民が利用をさせていただきに、今回の水難事故は親水性施設の安全性に関して新たな問題提起をすることとなった。水難事故の直接的な原因は2,3分の間に約1.3メートルという親水域における急激な水位上昇であったが²⁾、この水位上昇は局地的に発生した集中豪雨に起因するものであった。水難事故の原因を調べるためには正確な流況を再現する必要がある、そのためには流量の把握が不可欠である。國田ら⁴⁾は河川表面を撮影したテレビ局の放映ビデオの画像解析^{5,6)}からピーク流量や粗度係数の推定を行うと同時に、地上レーザ測量による微地形計測データを用いて河道内流況の再現を試みている。一方、立川ら⁷⁾は、詳細分布型流出モデルを用いて水位観測地点（甲橋）における流量ハイドログラフの推定を行い、國田らと同等のピーク流量を再現している。

都賀川の下流域は都市化が進み、山地部を除くほぼ全域が住宅地や舗装道路で覆い尽くされているた

めに、いくつかの支川に加えて雨水幹線網の整備により内水排除が行われている。前述の急激な水位上昇はこのような内水排除システムが機能して本川への急激な流入が同時に発生したためと考えられるが、支川と雨水幹線の負担割合や降水の本川への流入状況に関する検討は十分には行われていない。そこで、本研究では都賀川下流域を対象を絞って河道部分を含めた降水による氾濫解析を行い、流量ハイドログラフの再現計算を試みる。また、各支川や雨水幹線への流入割合や流入経路等についても考察する。

2. 水文観測網と出水の特徴

都賀川は流域面積が8.57km²と小規模な河川であるが、流量観測を除けば、雨量観測が5箇所（自然保護センター、中一里山、自然の家、鶴甲、永峰）、水位観測所が1箇所（甲橋）、河川カメラ（甲橋）さらに砂防ダム用の監視カメラが3箇所（宮坂、大月、妙楽）あり、流域全体にわたる水文観測網は充実していると言える（図-1）。図-2に10分間雨量データを比較したが、山間部よりも下流の住宅域により大量の降雨が発生していたことがわかる。降雨は約1時間継続しただけであり、この間に急激な出水が発生した。図-3に甲橋における河川カメラの画



図-1 都賀川流域の水文観測地点

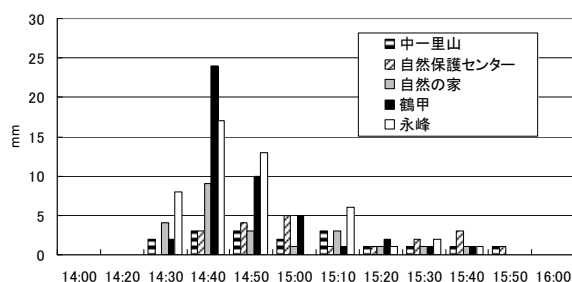


図-2 10分間降雨強度の分布

像を比較したが、平水時とは全く異なる流況が発生している。注目すべき点は、2008年は梅雨明けが早く7月初旬から晴れた日が続き、7月は事故の発生した28日以外はすべて晴れで全く降雨が発生していなかったことである。7月の最高気温は27度から34度の間で変化しており、28日の最高気温も33度と高温であった。したがって、山間部における土壌は乾燥状態が約1ヶ月続いていたものと考えられる。

砂防ダム用のモニタリングカメラの画像の一例を図-4に示すが、妙楽地点では最大でも数センチの水深が発生するに留まり、河床の砂礫がわずかに移動した程度であった。大月地点では大量の降雨は確認できるものの、水面はまったく発生していなかった。大月地点の映像でもわずかな流れが確認できる程度だった。これらの映像観察結果に加えて前述の都賀川流域山間部の乾燥化のために、降水の大部分は地下浸透し、表流水となって下流に到達するものはわずかだったと考えることができる。したがって、甲橋の水位観測所で記録された水位上昇(図-5)をもたらした河川水の大部分は下流の都市域への降水であり、それらが支川や雨水幹線を経て本川へ集中した結果発生した現象と捉えることができ



(a) 平水時 (b) 増水後

図-3 甲橋 ITV カメラ画像



(a) 妙楽 (b) 大月

図-4 六甲砂防モニタリングカメラ

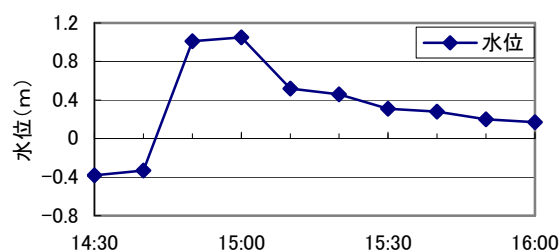


図-5 甲橋観測水位

る。

3. 都賀川流域の排水システム

都賀川流域の支川網は3本の二級河川と4本の準用河川および上流域のいくつかの普通河川で構成される(図-6)。このうち、二級河川については川幅が5~15mとある程度の規模を有するが、準用河川は川幅が1mに満たないものばかりである。都賀川流域ではこれに加えて排水システムとして雨水幹線網が整備されている。図-7にその配置図を示すが、雨水幹線網は支川網に匹敵する規模であることがわかる。雨水幹線からの本川への流入箇所は全部で17箇所あるが、甲橋よりも上流に12箇所と集中している。

甲橋付近から上流にかけての地形は1/20以上と非常に急勾配であり、100%近くの地表面が地下浸透されない構造(住宅や舗装道路)となっているため、住宅域への降水は2つの排水システム(雨水幹線網と河川網)により直ちに河道への排水される。確認のために、小降雨が発生した場合に雨水幹線の排水口からの流入状況を観察したところ、降雨発生と同時に河道への流入が始まり、降雨終了後に停止するといった極めて高い応答を示していることがわかった。このような応答性と都市域における土地利用の状況から考えて、これらの雨水の多くは住宅

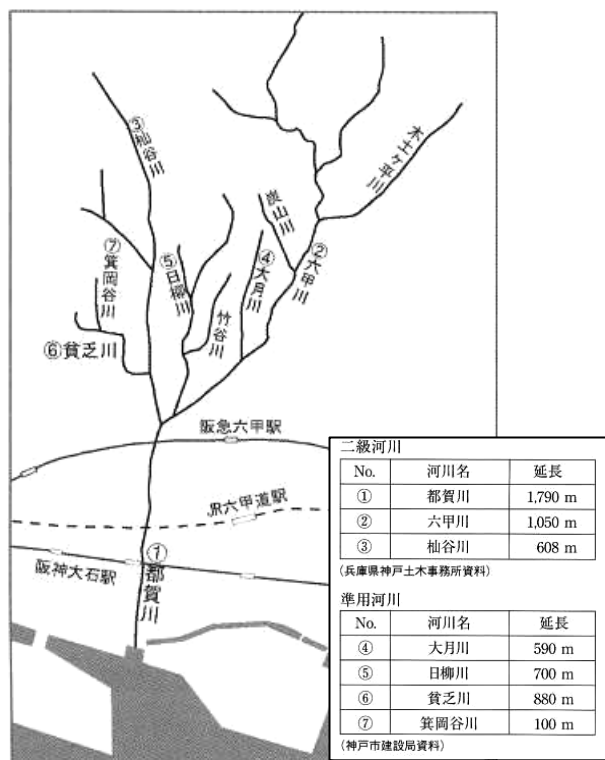


図 - 6 都賀川の支川網



図-7 河川・雨水幹線図

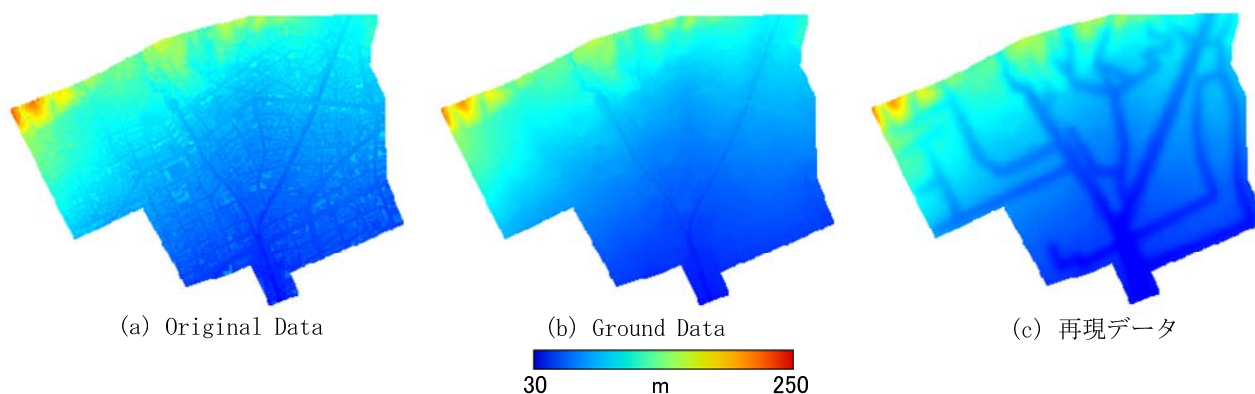


図-8 データ比較

の屋根への降水である可能性が高い。すなわち、屋根への降水は雨樋を伝って直ちに側溝から雨水幹線へと高速流入するものと思われる。

4. 数値解析の概要

(1) 氾濫解析モデル

数値解析には非構造格子有限体積法による数値解析モデル⁸⁾を用いた。本研究対象のような急勾配な流域、または都市域での氾濫解析はすでに様々なケースにおいて検討が進められている⁹⁻¹¹⁾。通常、河川網については一次元的に取り扱われることが多いが⁹⁻¹⁰⁾本研究では河道や雨水幹線も解像することにより、統一的な解析を試みた。

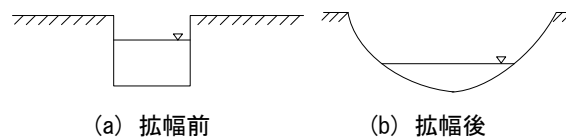


図-9 拡幅方法

(2) 地形再現方法

地形を再現するにあたり、市街地を多く含む計算範囲の複雑な地形を正確に再現するために航空レーザー計測されたデータを用いた。まず市街地を含むLPデータ(Original Data)をベースとして、一辺が3~7m程度の三角形から構成される非構造格子を生成し解析を行ったが、メッシュの大きさに対し市街地部分の地形が複雑すぎたため良好な解析を行えなかった。次に構造物を除去したデータ

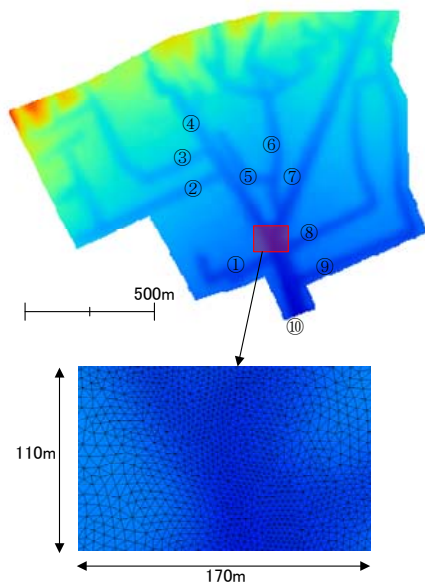


図-10 メッシュ形状と流量算出地点(①～⑩)

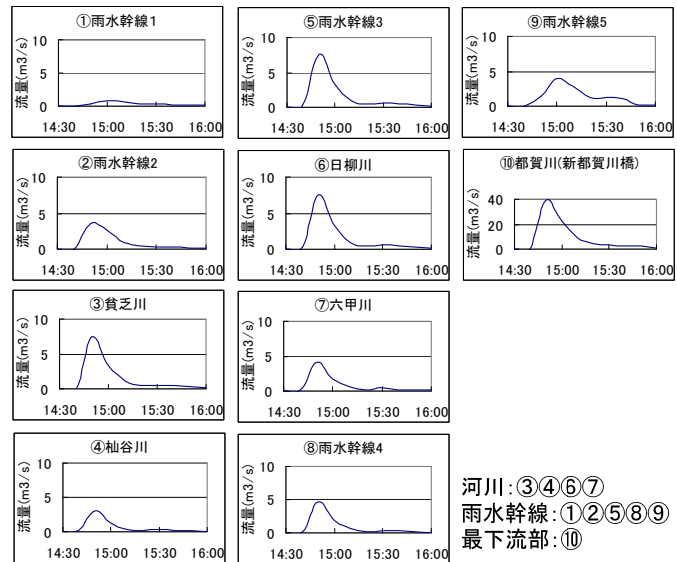


図-12 各地点ハイドログラフ

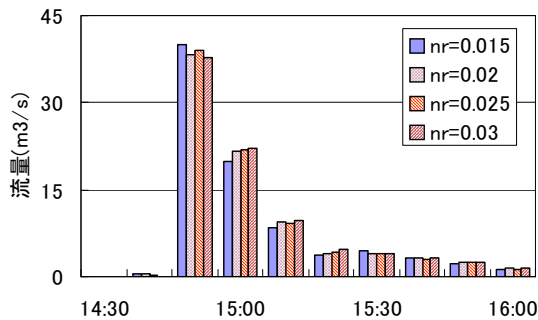


図-11 各ケースの新都賀川橋における流量ハイドロ (nr は雨水幹線・河川の粗度を示す)

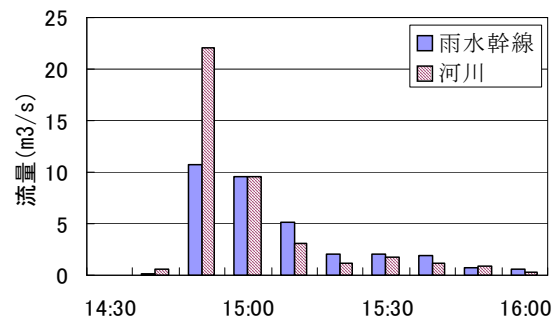


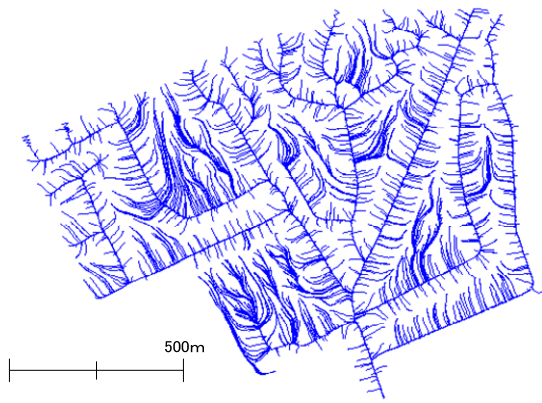
図-13 河川と雨水幹線の流量比較

(Ground Data)を用いたが、山地部分では高低差が大きく、川幅がメッシュに対し狭すぎるため流れを再現することが難しかった。そこで、Ground Dataを用いる際に仮想的に各河川の横断形状を多少変形させることとした。すなわち、河道幅が数メッシュ以上となるようにし、地図を参照しながらレーザー計測データでは捉えられない雨水幹線網を再現した。計算上では河川・雨水幹線ともに同じ開水路として扱っている。そして、地形の高低差を滑らかにするためにガウシアンスムージングフィルタを適用し、地形の再現を行った。計算範囲は雨水幹線の排水面積がほぼ含まれるように設定した。但し、流出が僅かと考えられる山地部は除き、解析結果の比較を行う新都賀川橋を下流端とした。また流路となる河川・雨水幹線においてはメッシュはなるべく細かく作成した。図-8 に各地形データの比較を示す。Original Dataと比べて再現データでは雨水幹線や河川が明瞭に現れていることがわかる。また、拡幅する際は、単純に川幅を広げるのではなく、発散の原因ともなる川道内と市街地との急な高低差をなくすために、図-9 に示すようになだらかに変化させ

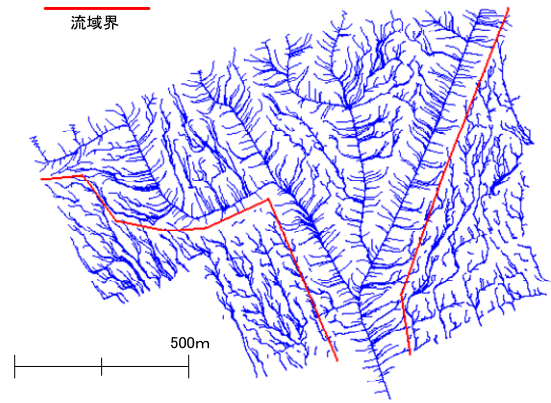
た。拡幅する手順としてはまず河川と雨水幹線の平面線形を地図から抽出した。次に抽出した線形に幅を与え、その部分の地盤高を周囲より低くした。但し、今回の解析では断面積を一定にするといった操作はしていない。河道等の拡幅による流量への影響については別途検討したが、ある程度の川幅を与えると流れる流量に及ぼす影響がほとんどなくなることを確認している。

(3) 解析条件

降雨の再現としては、甲橋水位計の変化に最もよく似た挙動を示している鶴甲雨量計での観測値をセルからの湧き出し流量に与えた。計算時間は鶴甲において降雨が観測され始めた14時30分から雨が収まる16時までとし、 dt は0.05sとした。またドライウェットの境界水深を5mmとした。粗度係数については市街地部分を0.015とし、雨水幹線・各河川については0.015～0.03の範囲で値を変えて計算を行った。メッシュについては3～7mの範囲で大きさを変化させ、河川・雨水幹線において十分にメッシュ数を確保できるよう図-10 に示すように



(a) 雨水幹線あり



(b) 雨水幹線なし

図-14 流跡線

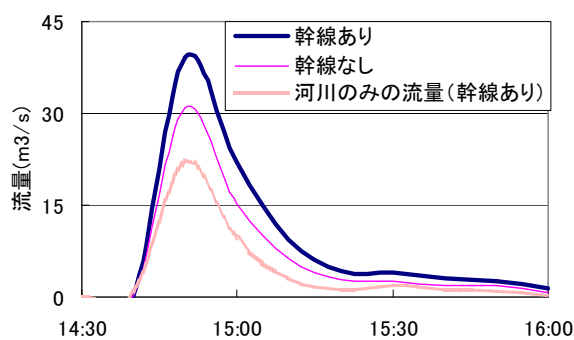


図-15 雨水幹線を除去したケースとの流量比較
(新都賀川橋における流量ハイドログラフ)

メッシュを部分的に細かく作成した。この場合の総メッシュ数は 106480 である。

5. 解析結果

(1) 粗度係数による結果比較

河道の粗度係数を変化させたケース毎の新都賀川橋付近における流量は図-11 に示す値となった。どのケースにおいても流量はほとんどゼロの状態から 14 時 50 分にはおよそ $40\text{m}^3/\text{s}$ のピークを示しており、事故当時の流量の急激な変化をおおむね良好に再現できているものと思われる。また、粗度が大きくなるにつれピーク流量が若干少なくなり、全体的に流量変化が緩やかになるという傾向が見られる。これは粗度が大きいほどそれぞれの雨水幹線・河川が合流するタイムラグが大きくなることが原因と考えられる。ただし、全体的にはハイドログラフの大きな違いは見られないので、以降の解析では $nr=0.025$ を採用した。また、河道や雨水幹線の流量は、解析結果から横断面内を通過する流量フラックスの流れ成分を補間することで算出した。

(2) 考察

図-12 に $nr=0.025$ としたケースの各支川と各雨水幹線の本川への出口付近（図-10 の①から⑩で示した地点）での流量ハイドログラフを示す。また、図

-13 には河川に関する流量の合計（③＋④＋⑥＋⑦）と雨水幹線に関する流量の合計（①＋②＋⑤＋⑧＋⑨）のハイドログラフを比較した。図-12・図-13 から、ほぼ同時に雨水幹線と河川が流量ピークに達していることがわかる。その立ち上がりは非常に急激なものであり、事故原因となった鉄砲水のような段波の発生を示唆している。ただ、①雨水幹線 1 と⑨雨水幹線 5 においてはピークが他のもの比べて遅れていることがわかる。これは他の水路と比べて勾配が緩やかであることが要因と考えられる。ただし、⑩都賀川地点へのピーク流量を変化させるほどの影響は見られない。また図-13 から、流量ピーク時の雨水幹線には河川の 50% 程度の流量が流れていることが推定される。逆に 15 時 10 分以降は雨水幹線の流量が河川流量を上回る結果となっている。それは、前述のように雨水幹線は相対的に勾配が緩やかであり、流出時間に遅れが生じたためと考えられる。図-14 には、仮想的にトレーサーを流域全体に配置し、それらが流れの流下とともに描く流跡線を描いてみた。流域に降った雨水が河川や雨水幹線に吸い込まれるように流入している様子がよくわかる。図-14 (b) には流跡線の向きから判断できる領域界を示した。

一方、仮想的に雨水幹線が整備されていない状況に対する解析も行ってみた。解析範囲下流端の新都賀川橋における流量ハイドログラフを図-15 に示す。また、その場合の流跡線を図-14 (b) に示す。雨水幹線がなければ、表流水は流域界を越えて隣接する他の河川流域へ流出するため、都賀川の合計流量は $31\text{m}^3/\text{s}$ となり、雨水幹線がある場合より $10\text{m}^3/\text{s}$ 程度減少した。逆に河川の負担は、 $5\text{m}^3/\text{s}$ 程度増加した。ただ、流量が急変していることに変化はないため、都賀川本川ではこの場合でも水位の急上昇は避けられないと考えられる。

6. おわりに

本研究では、平成 20 年 7 月に都賀川において発生した急激な出水による水難事故に関して、雨量観

測データを基に都市域の雨水排水解析を行い、以下の結論を得た。

- 1) LP データに基づく複雑で急勾配の都市域の地形を非構造格子の解析モデルに用い、各河川と雨水幹線への雨水の流入量と流量ハイドログラフを得た。
- 2) 流域における雨水幹線の負担は、流量ピーク時には河川の 50%程度、それ以外ではほぼ同等であったと推定できる。
- 3) 雨水幹線が設置されていない場合を想定した解析から、その場合には河川の負担が相対的に増すことを示した。
- 4) 雨水幹線の排水を完全に制御できても、今回の降雨条件では都賀川本川における流量の急増は避けられない。

以上のことから、今回のような突発的で急激な降雨条件においては、雨水幹線への流入など流域内の雨水を制御しても、都賀川本川における流量や水位の急上昇は避けることができなかったものと推定できる。ただし、流域内の内水対策を進めれば先鋭的な流量のピークをある程度カットすることはできるはずである。対策としては以下のような方法が考えられる。

- a) 特に流量の急増が著しい貧乏川・日柳川に対して、流域内貯留（地下貯留や公園貯留など）によりピーク流量を低減させる
- b) 雨水幹線の水の一時貯留によりピーク流量を低減させる
- c) 流域内の各家庭において雨水貯留タンクを設置することにより河川・雨水幹線への流出量を減少させる
- d) 公園や校庭などを吸水性や保水性の高い人工芝へ切り替えていく

ただし、このような流域対策だけでは突発的集中豪雨における水難事故の発生を完全になくすことは不可能である。警報システムの整備とその内容の河川利用者への徹底した情報提供、教育関係者への啓発活動あるいは河川利用者自身の河川特性に対する理解の促進などが、ソフト対策としてこれから

ますます重要になってくると思われる。

謝辞：本研究では、土木学会都賀川水難事故調査団として財団法人河川環境管理財団河川整備基金助成事業（助成番号：20-1251-1）からの支援を得た。また、広島大学大学院の椿涼太助教からの多大な協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会都賀川水難事故調査団：都賀川水難事故調査について、平成20年度河川災害に関するシンポジウム、2009。
- 2) 土木学会平成20年度都賀川出水調査団（団長 藤田一郎）：2008年7月28日突発的集中豪雨による都賀川水難事故に関する調査研究、河川環境管理財団河川整備基金報告書、2009。
- 3) 都賀川を守ろう会：30周年記念誌、2007。
- 4) 國田洋平・藤田一郎・安藤敬済：局地的集中豪雨による都賀川水難事故時の流量・流況の推定、河川技術論文集、第15巻、pp.61-66,2009。
- 5) 藤田一郎：実河川を対象とした画像計測技術、2003年度水工学に関する夏期研修会講義集、水工学シリーズ 03-A-2, 2003。
- 6) Fujita, I., Watanabe, H. and Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space time image velocimetry (STIV), International Journal of River Basin Management, Vol.5, No.2, pp.105-114, 2007。
- 7) 立川康人・江崎俊介・椎葉充晴・市川温：2008年7月都賀川水難事故における流出現象の再現と事故防止対策に関する考察、河川技術論文集、第15巻、pp.43-48,2009。
- 8) 藤田一郎・椿涼太：中小都市河川に設置された側岸凹部構造物の非構造格子有限体積法による影響評価、水工学論文集、47巻、pp.523-528, 2003。
- 9) 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。
- 10) 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.57-68,2004。
- 11) 張馳・岩堀康希・阿部真郎・登坂博行：急勾配地形を有する場における洪水氾濫の数値解析、水工学論文集、48巻、pp.625-630, 2004。

(2009.12.18 受付)