

水工学シリーズ 10-A-1

局地的集中豪雨の実態と避難対策
— 都賀川水難事故を例として

神戸大学大学院工学研究科 教授

藤田 一郎

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2010年8月

局地的集中豪雨の実態と避難対策―都賀川水難事故を例として

Recent Feature of Localized Torrential Rain and Evacuation Scheme – The Toga River Water Accident as an Example

藤 田 一 郎

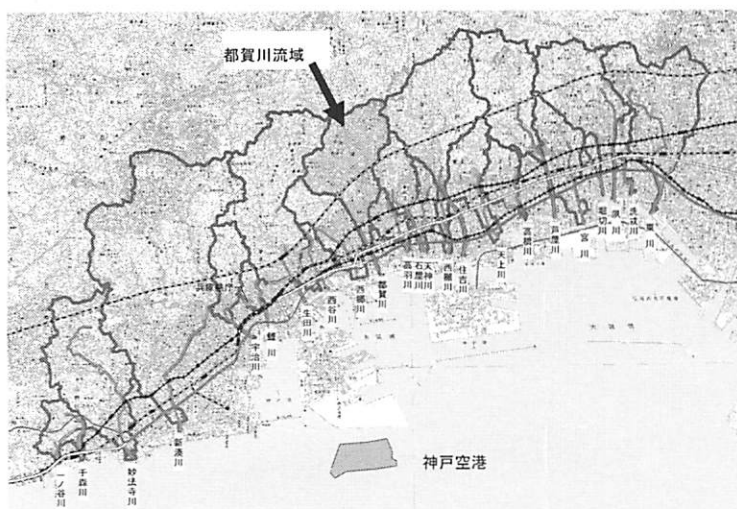
Ichiro FUJITA

1. まえがき

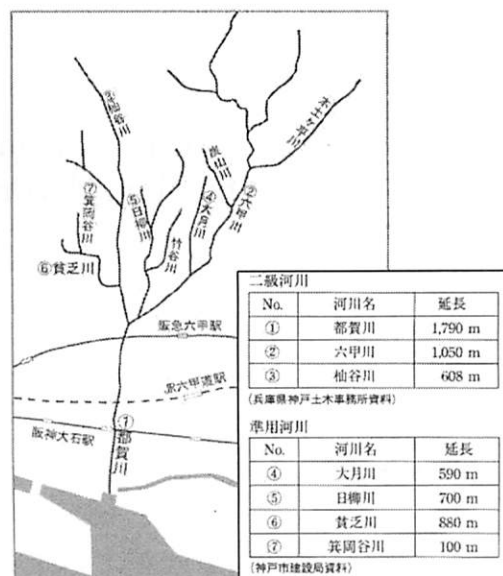
我が国における河川災害の多くが、台風や前線の接近・上陸に伴う大雨が原因で生じることは周知の事実である。降雨が長く継続する場合も多く、総降雨量が数百ミリ以上に達することもまれではない。ただ、近年ではこれらに加えて局地的な集中豪雨、いわゆるゲリラ豪雨が頻発し、それによる災害が目立つようになってきているのも確かである。総降雨量はそれほどではないにしても降雨が時間的に集中するため、河道内の流量が急増し、水位が急上昇することが災害の主な要因となる。このような雨の降り方の傾向を客観的に示唆するのが、以下のようなデータである。例えば、1時間降水量が50ミリ以上となる大雨の年間発生回数を見た場合、昭和51年から昭和62年までの10年間の平均が162回、その次の昭和63年から平成9年までが平均177回であるのに対し、平成10年から平成19年までの10年間では238回と3割以上もその回数が増加している。さらに、時間雨量が100ミリ以上の大雨では上と同様の期間において、平均で1.8回、2.0回、3.7回と近年になって8割以上もその発生回数が増加しており、より強い降雨強度の雨が頻発する傾向にあることがわかる。このような強い降雨強度の影響は特に都市域を流れる中小河川において顕著に見られ、10分間で1メートル以上の水位上昇が観測されたケースも多々見られる。中でも、平成20年に発生した兵庫県神戸市の都賀川や沖縄のガープ川における災害はこのような水位の急上昇によるものであり、多数の死亡者を出すに至った。特に、都賀川の場合には親水性を高めた場所での事故であったために、親水性施設の安全性や避難体制について、これまで以上に高い関心が払われる契機となった。そこで、本稿ではまず都賀川の水難事故を例として取り上げ、局地的集中豪雨および水難事故の実態について解説する。次に、具体的な対策として設置された警報システムについてアンケート結果をもとに考察を行う。

2. 都賀川流域の特徴

都賀川流域は兵庫県の南部、阪神地域の六甲山から瀬戸内海に注ぐ表六甲河川24水系の一つである。表六甲河川の特徴は、延長が高々数キロ程度であるにもかかわらず、流域に降った雨が急勾配な河川を一気に瀬戸内海に流れ下る点にある。表六甲河川における都賀川の流域を図-1に示す¹⁾。都賀川は、上流の六甲川と柚谷(そまたに)川の合流点から河口までの1.79kmの河川で、治水基準点西灘橋における流域面積は8.57km²である。河床勾配は河口から800mの国道2号付近までが1/200から1/60程度、そこから800m上流の甲橋付近は1/35程度、さらにそれから上流は1/20程度と全体的に非常に急になっている。流域の大半は六甲山系の山林であり、流域の下流側では山際まで市街地が開発されている。現在の河道は、88.4mmの計画降雨、250m³/sの計画高水流量(リターンペリオド100年)に基づいて設計されている。都賀川流域の支川網を図-2に示す。都賀川は上述の2つの支川(二級河川)に加えて4つの準用河川および上流域のい



図－１ 表六甲河川の中の都賀川



図－２ 都賀川の支川網



図－４ 阪神大水害の際の都賀川の被災状況²⁾

くつかの普通河川で構成される。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－３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。このように、都賀川流域に降った雨は河川だけでなく、雨水幹線網を通して本川・支川に横流入する構造となっている。

都賀川の河川改修は平成 8 年から 17 年にかけて行われ、治水機能の強化だけでなく親水機能を高めた川づくりが積極的に進められた。その際には、30 年以上の歴史をもつ「都賀川を守る会」や都賀川を利用する地域住民からの要望もあって、環境への配慮を考えた親水施設が整備された³⁾。阪神大震災時には都賀川の水を生活用水に利用したことから緊急時の河川水利用施設整備のニーズも生まれていた。その結果、階段・スロープ・遊歩道などの親水施設の整備や自然石や環境ブロックを使用した生物にやさしい水路整備が行われると同時に、注意喚起看板設置や出前講座など安全・マナーについての啓発を行うなどのソフト面の取り組みも行われていた。



図－３ 河川・雨水幹線図



(a) 大正 11 年

(b) 昭和 2 年

(c) 昭和 58 年

(d) 平成 21 年

図－5 都賀川流域の変遷（破線は暗渠）

都賀川流域の土地利用変遷図を図－5に示す⁴⁾。大正 11 年頃には民家がまばらだった山際周辺も昭和 2 年には開発が進んで住宅域が広がり、その分布状況は 56 年後の昭和 5 年とあまり変わっていない。ちなみに現在の状況は昭和 58 年の様子と大差ない。このように、都賀川流域は昭和に入ってから早い段階で急激に都市化が進み、現在に至っている。また、昭和 2 年の図からは河川が暗渠化された時期もあったことがわかる。

都賀川流域に限らず表六甲の河川は最近の 40 年近くの間は大規模な水害には見舞われていないが、過去を遡ると昭和以降でも 3 回の大きな被災を受けている。昭和 13 年の阪神大水害と呼ばれている水害、昭和 36 年および昭和 42 年の大規模水害がそれである。阪神大水害では 616 名、昭和 36 年災では 26 名、昭和 42 年災では 100 名の死者が発生している。この地域（摂津）は、昔から洪水の多発した地帯であり、古くは平安時代にまでさかのぼって大洪水や土石流（山津波）があったことが記録されている⁵⁾。都賀川下流の阪神電車の駅名が、「大石駅」であることもこの地域が洪水多発地帯であったことを物語っているように思える。図－4 は阪神大水害の際の都賀川の被災状況を示した貴重な写真であるが、河道の形態が破壊されるほどの土石流が発生していることがわかる。幸いなことに、砂防ダムの設置などが進んだこともあってか、過去 40 年以上にわたってこのような大規模な水害は発生していないが、それだけに表六甲流域の水害ポテンシャルが逆に高まっているのではないかと懸念され、今回の局地的集中豪雨はその一つの現われとみなすこともできる。

3. 局地的集中豪雨の概要

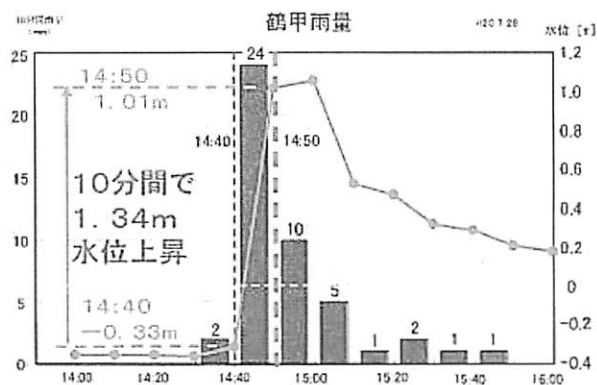
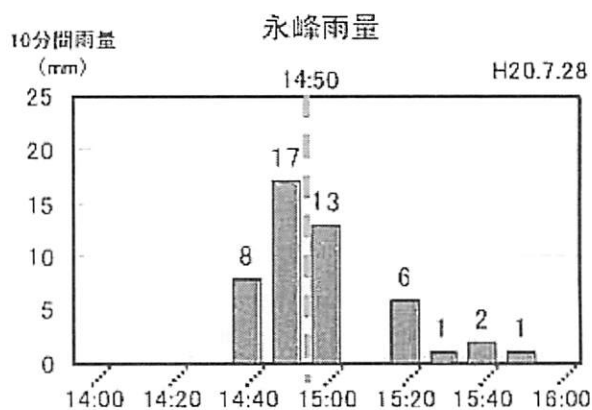
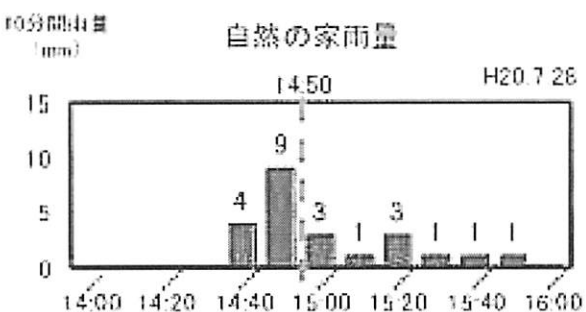
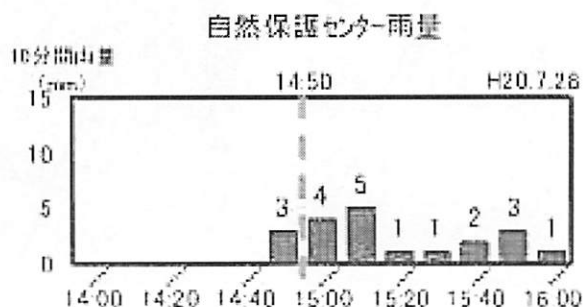
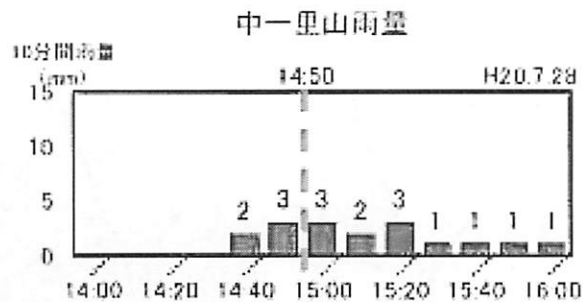
3－1 水文観測網

前述の通り、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、雨量観測所が 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）、神戸市の河川



図－6 水文観測地点

カメラ（甲橋）さらに砂防ダム監視用の国土交通省のビデオカメラが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。各観測地点の配置図を図－6に示した。このうち、神戸市の河川カメラは、表六甲河川の主要地点 30 ヶ所に設置されたモニタリングカメラの一つであり、都賀川では甲橋のカメラが事故当日の様子を鮮明にとらえていた。このモニタリングカメラシステムでは2分間隔で静止画を記録しており、最新の画像および過去 6 時間のデータを 30 秒に圧縮した動画をインターネットで公開している⁶⁾。国土交通省のカメラは完全な動画が3日前まで遡って記録されるシステムとなっている。以上の点計測観測地点に加えて、国土交通省や気象庁の雨量レーダーおよび神戸市の雨量レーダーがあり、降雨の時間空間分布を把握することができる。神戸市のレーダーは 250m の空間分解能があるが、アメダス解析雨量による補正後のデータしか記録されておらず、高い空間解像度のデータは得られなかった。ただ、いずれにしてもこれだけの観測網があったために、詳細な現象の検討を行うことができた。



図－7 雨量データ

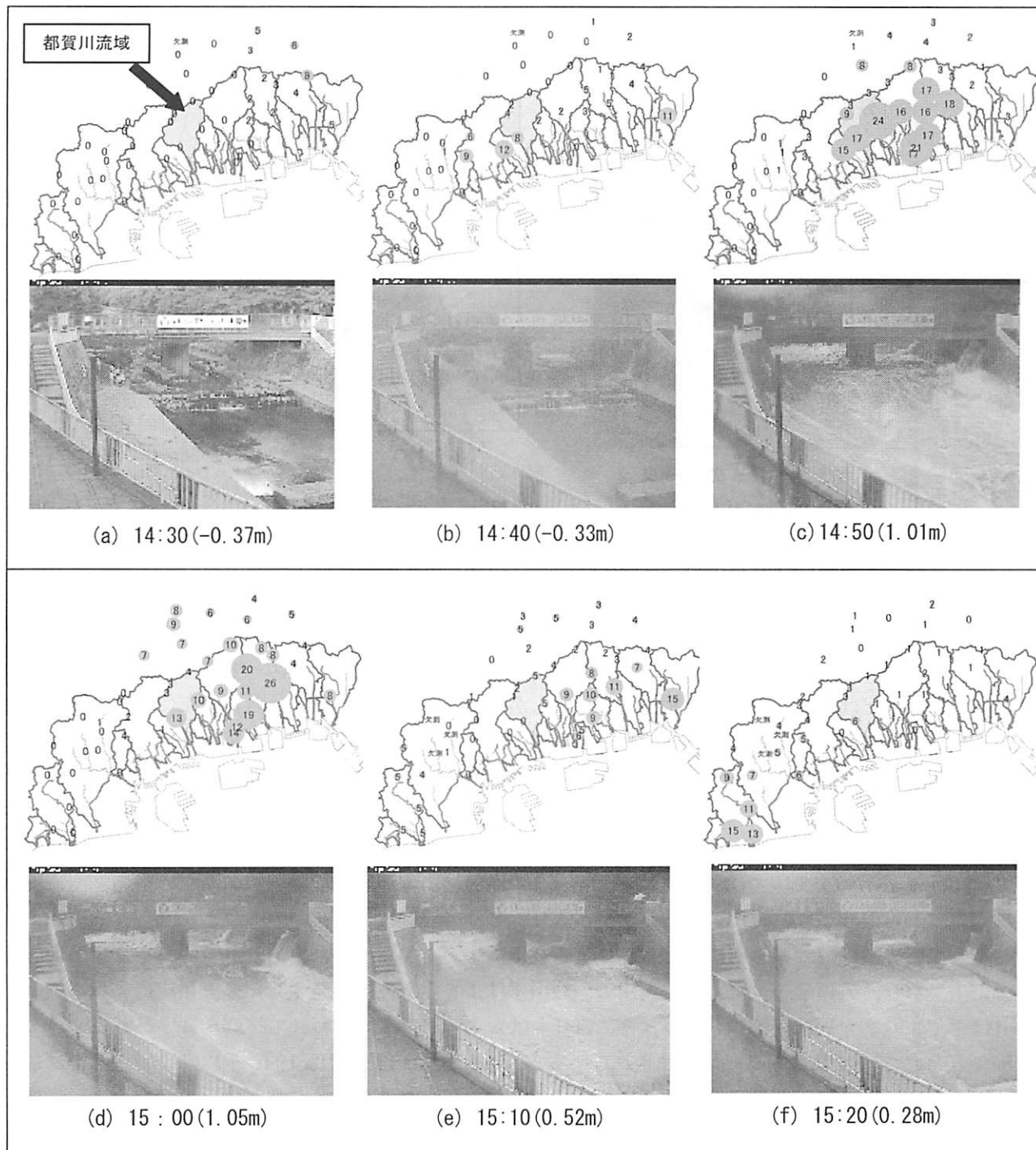
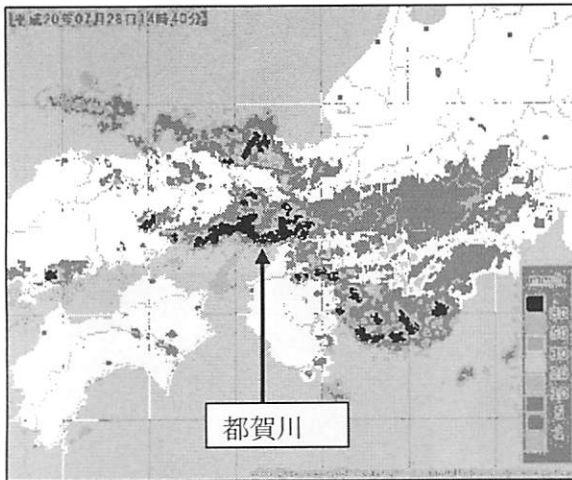


図-8 降雨分布と甲橋監視カメラの画像（カッコ内は水位）

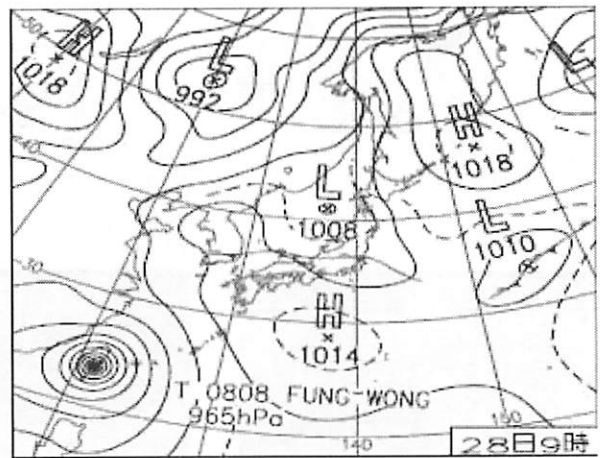
3-2 降雨の状況

各雨量観測地点のデータを図-7に示した。図-6 との比較からもわかるように、図-7 の上の3地点（中一里山、自然保護センター、自然の家）は流域の上流側、下の2地点（永峰、鶴甲）は流域下流の観測地点に相当する。明らかに、流域下流の降雨強度の方が強くなっており、特に鶴甲では10分間で24mm という非常に強い雨が計測されている。これは時間雨量に換算すれば144mmに相当する異常に高い値である。この強い雨は20～30分程度継続した後、1時間後にはほとんど止んでおり、典型的な局地的集中豪雨と言え

る。



図－9 気象庁レーダーのデータ
(2008. 7. 28. 14:40)



図－10 天気図 (2008. 7. 28, 9:00)

図－8 には表六甲流域の降雨分布状況を河川カメラの画像および水位のデータとともに示している¹⁾。水位データは、図－7 の下段の鶴甲雨量の図にもプロットしている。降雨データや水位データのデータ更新は 10 分間隔が現在の標準となっている。水位データは、瞬間値ではなく 10 分間の平均値がアウトプットされるために、瞬間的には図－7 に示した以上の変動があったことが予想される。図－8 からは、局地的な集中豪雨が都賀川流域だけでなく東西に分布していることがわかる。強い雨の領域は西から東に徐々に移動しているが、20 分程度で減衰している。図－9 には、急激な増水が始まる直前における気象庁レーダーのデータを示した。カラー画像をモノクロ化したために多少見づらいだが、黒い部分が時間 80mm 以上のエリアに相当する。この図からも、強い雨の雨域が東西に延びていることがわかる。この雨域は山陰側から東南に向かって降下してきたものであり、約 40 分後には瀬戸内海に抜けて減衰している。

当日 (2008.7.28) の天気図を図－10 に示した。日本海周辺に停滞した前線周辺の冷たい空気と南海上の太平洋高気圧から流れてくる暖かく湿った空気が入り混じり、積乱雲が発生しやすくなっていた。そのため、前日の 7 月 27 日には福井県や石川県で雷雨による突風被害が発生していた。当日は、西日本や東海地方で激しい雷雨があり、石川県の浅野川でも河川の急な増水による浸水被害が発生した。気象庁によればこの年の 7 月は平年よりも早い梅雨明けとなり、特に西日本は太平洋高気圧に覆われて晴れた暑い日が多く、1946 年以降 7 月としては 3 番目の高温が観測された。また、西日本太平洋側では 1946 年以降 7 月としては最も少ない雨量となり、各河川流域は非常に乾燥した状態となっていたと考えることができる。ちなみに、神戸市の 7 月の天気は 28 日の直前まで 1 ヶ月程度、最高気温が 30 度を越えるような晴れの状態が続いていた。当日の午前 5 時に神戸海洋気象台が発表した兵庫県南部の天気予報は、「南西の風、曇り時々晴れ、所により昼過ぎから夜のはじめごろ雨で雷を伴う」であり、降水確率は 6:00～12:00 が 10%、12:00～18:00 が 30%、18:00～0:00 が 30% というものであった。

3－3 水位変化の状況

都賀川における水位急上昇の様子は図－8 にも示したが、六甲川と杣谷川の合流下流にある甲橋の右岸に設置された河川カメラが明瞭にとらえていた。このような水面の急激な変化をタイミングよく撮影したケースは全国的にみてもほとんど例がないといってよく、河川をよく利用する人だけではなく一般の人々にも大きな衝撃を与えた。このことは、河川の流れを映像でモニタリングすること、すなわち流れを可視化することの重要性をあらためて再確認するきっかけとなるものであった。水面の様子をもう少し、詳細に見るため



(a) 14:40



(b) 14:42



(c) 14:44

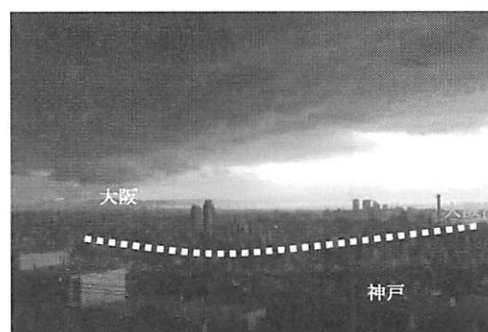


(d) 14:46

図－１１ 鉄砲水流入直後の水面の様子（甲橋の河川カメラ）

に急増水直後の画像を図－１１に並べた。これより、急激な水位上昇が始まったのは 14:42 分頃と推測できる。その約 10 分前の 14:30 には雨は降っていないが（図－8(a)）、上空では黒い雲が南下しつつあり、周囲が暗くなっていることが神戸市内の方の撮影したビデオに明瞭に写っている¹⁾。図－１２はそのビデオの一場面であり、瀬戸内海と六甲山をはさんで黒い雲域がほぼ直線状に張り出している。大阪側はまだ晴れている。

図－１１と図－８に戻ると、14:30 の前には橋の下の遊歩道にはまだ人が残っていたが、雷鳴などもあったためか 14:30 の時点では少なくとも画像内の河川には人がなくなっている。そして、実際に雨が降り始めたのは 14:36 頃であり、14:40 には視界が悪くなるほどの降雨が発生し、2 分後の 14:42 にはすでに大規模な流入が発生している。この甲橋の上流に設置された水位計では 15:00 までの 10 分間で 1.3m 程度の水位上昇が記録されているが（図－7）、監視カメラの画像では 14:44 にはすでに同程度の水位上昇が確認できる。したがって、1m を超える増水は現実には 2 分以内に生じているものと推定できる。この激しい流れの状況はその後 30 分程度続き、河川内に取り残されていた人々を巻き込むこととなった。この間、遊歩道は部分的に冠水状態とな



図－１２ 都賀川上空の雲(14:20 頃)

り、それが人々の避難行動を妨げたものと思われる。また、右岸側の側壁に開いた雨水幹線の出口からは水が噴出している様子もわかる。他の例として、図－13に同じく神戸市の河川カメラが同日にとらえた福田川（垂水区内）の雨水幹線からの流入の様子を示す。雨水幹線が圧力管となった状態で非常に強く水を噴出している様子を見事にとらえている。これらより、住宅域で局地的な集中豪雨が発生した場合には、雨水幹線で集められた水が噴流に近い状態で河川に流入することがわかる。



図－13 福田川における雨水幹線からの流入

一方、流域上流の山地部に降った雨からの寄与については、砂防ダム監視用のビデオカメラの映像からおよそのことを推定できる。図－14には、妙楽と大月の映像の一場面を示す。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。ここには示していない宮坂地点の映像でもわずかな流れが確認できる程度だった。前節でも説明したとおり、この年は例年になく降雨が少ない状態が続いていたために、都賀川流域の上流部は十分に乾燥しており、そのため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。



(a) 妙楽



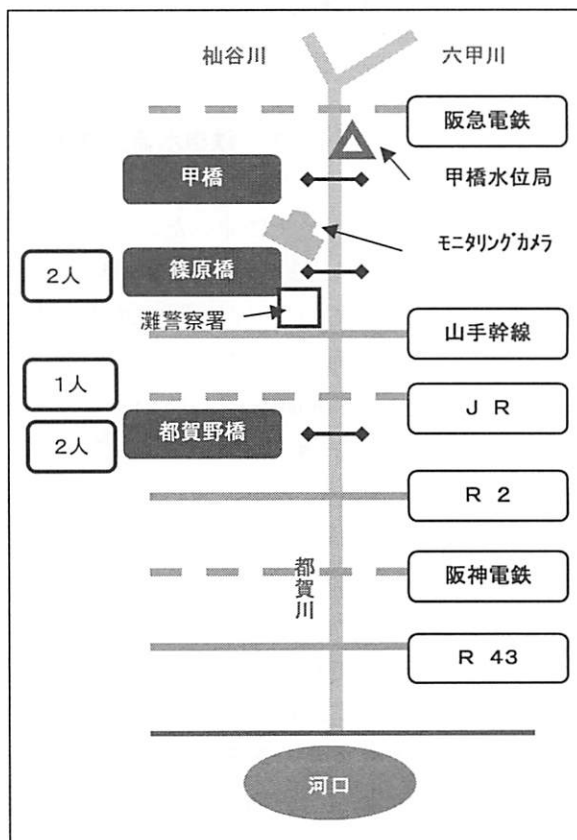
(b) 大月

図－14 六甲砂防監視ビデオの画像

4. 水難事故の概要

3章で説明したように、今回の出水は異例とも言えるような急激なものであったため、最終的に逃げ遅れた5人の方が亡くなるという痛ましい水難事故が発生した。図－15に事故発生地点の概要を示す¹⁾。これを参考に新聞報道等による水難事故の状況を記すとおよそ以下のである。

篠原橋近くでは小学生の児童二人、都賀野橋では保育園児一人と大人の女性が流されて亡くなり、翌々日になって JR 神戸線の高架下の遊歩道で休憩中だったと思われる行方不明の男性が、河口付近の海上で遺体となって発見された。今回の出水では他にも子供を含めた多くの人が流れ、ロープを使って救出などもあった。灘署の発表では、救助された人は 11 人、自力で避難した人は 41 人に上った。都賀川には、他の表六甲河川と比べてかなり多くの階段工が設置してある



図－15 水難事故地点

が、あっという間に水位が上昇したため、近くの階段にもたどり着けなかったという証言が多かったようである。したがって、状況によってはさらに犠牲者がでた可能性もあったと言える。

先に示した、図－１１の河川カメラの画像は確かにインパクトの強い貴重な情報であるが、静止画であるためダイナミックな流れの情報はわからない。そこで、実際の流れの状況がどうであったのかについて報道記事を整理したのが表－１である。証言の中で特徴的なのは、「津波のような」あるいは「濁流が突然押し寄せ」などの表現が目立つことである。このことから、人々が巻き込まれたのは非常に短時間に発生した段波的な流れであり、気がついたときには避難する余裕がまったくなかったということが想像できる。このように急激に押し寄せる流れは、雨水の河川への直接の流入に加えて雨水幹線からの本川・支川への流入がほぼ同時的に発生したことが要因と考えられる。別の観点で証言からわかることは、都賀川だけでなく同じ表六甲河川の一つである夙川でも過去に同様の事故が発生している点である。お年寄りのお話では、「六甲山に雨が降ったら川に近づくな」ということは地元住民の間では古くから言い伝えられていた。この点からみれば増水直前まで晴れていたとは言え、80分前の13:20には大雨・洪水注意報、さらに50分前の13:55には大雨・洪水警報が実際に出されていたという事実は重要な点である。すなわち、このような警報発表の事実が予め河川利用の人々に十分に伝わっており増水の危険性が十分に周知されていれば、被害は軽減できた可能性が高い。

表－１ 流れの急増水に関する報道情報

No.	人・団体・位置など	コメント・状況など
1	篠原橋から上流側で水難にあった学童保育所の団体	雷雨を避けるために篠原橋に避難。その数分後、川が増水しはじめたため、 <u>70m 上流にある階段スロープに遊歩道を縦列で走る。このわずかの間に水かさ</u> が 150cm の女性の肩辺りまで急激に上昇。子供たちの大半がスロープに到着したところ、 <u>濁流が突然押し寄せた。</u>
2	No.1 と同じころ、国道 43 号線付近で釣りをしていた小学 6 年生 2 人	雨のため橋の下に避難。小雨になったと判断して上流へ向かおうとしたところ、 <u>上流より大量の水が押し寄せ、自転車ごと流れにのまれた。</u>
3	新都賀川橋付近で助けられた親子 3 人	<u>津波のような水</u> が押し寄せてきた。自転車も流されて、子供を助けるのが精いっぱいだった。
4	新都賀川橋で耐震補強工事中の建設業者(橋脚にしがみついていた救出される)	雨宿りをする人が見えたあと、 <u>足もとにサーっと水が流れた。</u> 「危ない。逃げろ」と誰かが叫んだので顔をあげると、 <u>自分の背丈よりも高い茶色い濁流が数十メートル先に押し寄せていた。</u> もう駄目だと思った。 <u>増水は想像を超える速さだった。</u> 濁流にのみ込まれた人は逃げる間もなかっただろう。
5	連携して、ロープを用いて 6 人を救助した会社従業員	<u>一気に増水し、津波のように押し寄せてくる。川底は渦巻くようになる。今までも猛威をふるう都賀川を目にしてきた。</u>
6	都賀川を守ろう会事務局	<u>以前、魚のつかみ取り大会で山側が雲で真っ黒になり、参加者を避難させた途端、濁流が押し寄せたことがあった。</u>
7	地元の児童 NPO 指導員	<u>都賀川が急に増水することは知られており</u> 、子供たちには危険な川だと教えていた。
8	1998 年 7 月 26 日にも都賀川増水で子供を含む 8 名が逃げ遅れて孤立。	
9	cf. 夙川 (兵庫県西宮市：表六甲河川のひとつ)：2002 年 9 月、釣りの男性が突然の出水で死亡。10 分で水位 1m 以上上昇。	
10	cf. 夙川では今回、水位上昇のペースは比較的穏やか。学校の運動場などを一時的な貯水施設として活用する。2007 年度までで 31 か所整備。将来的には 64 か所を予定。	

5. 放映ビデオ映像からの流量推定

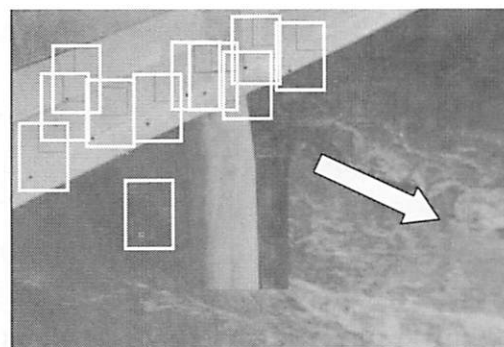
ここまで、水位や雨量のデータあるいは河川カメラの情報をもとに局地的集中豪雨に伴う急激な増水に関する考察を進めてきたが、河川のパラメータの基本である流量については不明確であった。流量推定は、局所的な降雨に対する流出過程を再現するためのパラメータ設定に必要なだけでなく、遊歩道など河川内を利用していた人々にどのような力が及んだのかを知る上でも重要である。今回の流れ場では、1 m程度の水深に対して河床の凹凸のスケールが 50cm 程度（飛び石のサイズは一辺 60cm の立方体など）と大きいので、河道計画の際に用いられた粗度係数(0.025)を用いて等流近似するとかなり過大な流量を与える可能性がある。そこで、ここでは甲橋よりも下流の新都賀川橋で作業員を救出中の放映ビデオ画像(NHK)を利用して流量の推定を試みた結果を示す⁷⁾。

5-1 画像のブレ補正と幾何補正

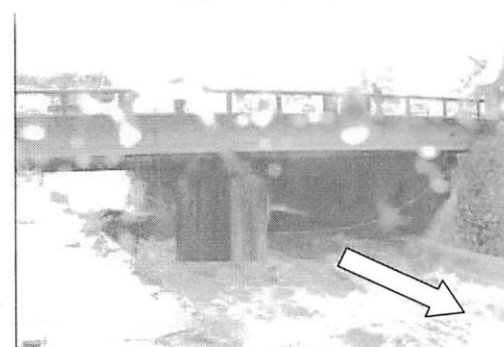
放映されたビデオは逃げ遅れて新都賀川橋の下流側の橋台につかまり、かろうじて難を逃れることのできた作業員の救出の様子を中心に撮影したものである。表-1の No.4 の証言の方に相当する。撮影はカメラマンが手持ちの状態での撮影したものであり、ブレが大きいためそのままでは画像解析に利用できない。そのため、前処理として一枚一枚の画像のブレ補正を行った。用いたのは、図-16に示した2つの撮影アングルの映像である。多少の時間のずれはあるが2つのアングルで撮影されたのは 15 時頃であり、ピーク水位が継続中の時間帯に入っている。これらのアングルを採用したのはズームが固定されており、背景の動きが比較的少なかったためである。なお、人物の部分はマスキング処理で消している。

ブレ補正は橋の側面や橋脚に見られるコンクリート面上の凹凸などの固定点（不動点）を参照して行う。例えば、図-16(a)の白枠内には少なくとも1ヶ所の不動点が含まれるように配置し、その不動点の次のフレームでの相対的な移動ベクトルをテンプレートパターンマッチングによりサブピクセルレベルで求める。これらの移動ベクトルが移動前の位置と重なるように移動後の画像を幾何補正する。幾何補正にはアフィン変換を用いた。この幾何補正作業を1枚目の画像を基準として繰り返し実行することでおおまかなブレ補正が終了する。ただし、1巡目の補正だけでは背景移動を完全には除去できなかったため、全体の補正作業を数回繰り返したところ幾何補正の誤差をほぼ取り除くことができた。この手順はアングル2の映像にも適用できた。

河川表面の画像から求められるのは表面流速であり、そのためにはブレ補正した斜め画像をさらに無歪の画像に補正する必要がある。ここでは、ブレ補正に用いた各不動点の現地測量を行い、映像から水位を推定



(a) アングル1



(b) アングル2

図-16 撮影アングル（新都賀川橋下流）

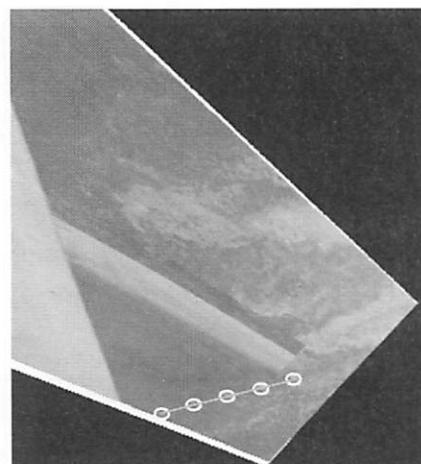


図-17 幾何補正画像と浮遊物の軌跡

画像に補正する必要がある。ここでは、ブレ補正に用いた各不動点の現地測量を行い、映像から水位を推定して画像の補正を行った。その結果の一例を図-17に示す。図には、偶然撮影中に流れてきた浮遊物(ボール)の軌跡を1/6秒間隔で多重合成して示している。ボールがほぼ等間隔で移動していることがわかる。

5-2 STIV (Space-Time Image Velocimetry) による解析⁷⁾

STIVは、流れ方向に設定した検査線上の輝度分布の時間変化を時空間画像として生成し、そこに現れる縞パターンの傾きから検査線上の平均流速を求める画像計測手法である。図-17にはボールの軌跡に沿って一本の検査線を引いている。この検査線に対してボールがある場合とボールが通過した後の同じ位置の時空間画像を図-18に示す。横軸が検査線の長さに相当しここでは3mと設定している。縦軸は用いる映像の長さに依存するが、ここではボールの通過時間に合わせて0.67秒、すなわち20枚の画像データを使っている。

図-18(a)には、ボールの移動軌跡が斜め方向に走る点列として明瞭に現れている。この点列の傾きがボールの移動速度に相当する。計算すると移動速度は秒速5.2メートルすなわち時速19キロとなり、ボールがかなりの高速で移動していることがわかる。図-18(b)は、ボール通過直後の画像を用いて時空間画像を生成したものである。ボールの場合ほど明瞭ではないが、水面の凹凸や泡などの移動が全体的な縞パターンとして現れている。縞パターンの平均的な傾きもボールの場合とほぼ一致している。これより、特に浮遊物がなくても水面に現れる縞パターンの移流速度は表面流速とほぼ等しいと仮定できる。そこで、横断方向に平行に配置した検査線に対しても同様の解析を行い、表面流速分布を求めた。

図-19に各アングルに対する結果を示す。多少のばらつきはあるが、最大流速は5~6 m/sに達していることがわかる。ちなみに図-19(a)の矢印は前述の浮遊物のデータである。隣接するデータとの連続性も良く、良好に表面流速が得られている。図-19(a)の中央の速度欠損は橋脚後流の影響である。図-19には底面形状も示しているが、人工的に造り上げた河床であるため複雑な横断形状を呈している。図-20に示す写真からも横断構造物や落差が縦断方向に並んでおり、増水時の流れは非常に三次元性の高い流れとなっていることが予想される。

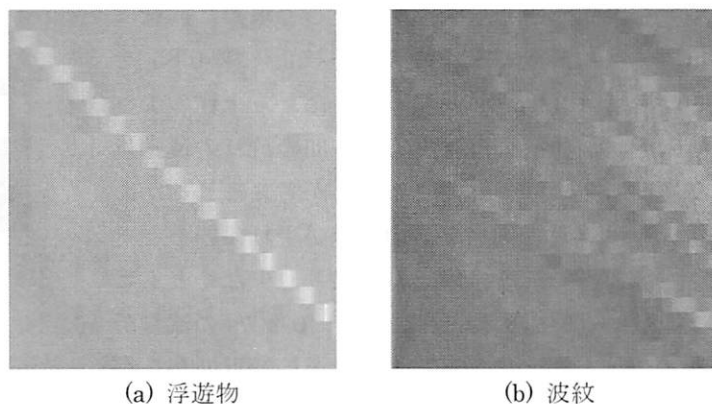
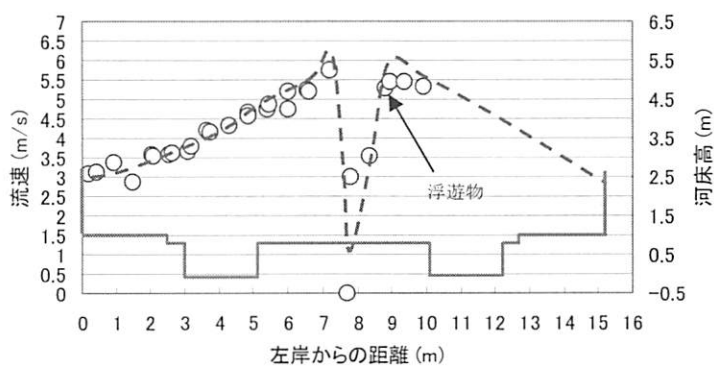
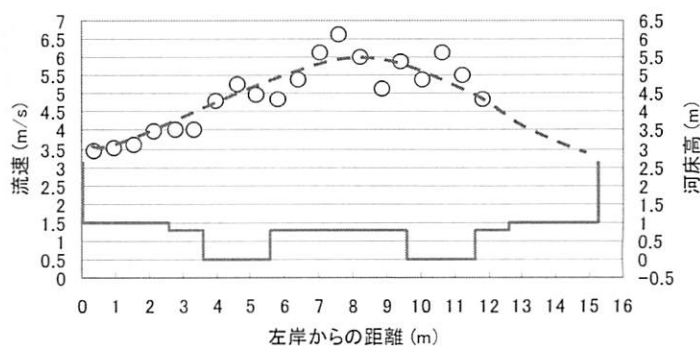


図-18 時空間画像 (横軸:3m, 縦軸:0.67s)



(a) アングル1



(b) アングル2

図-19 表面流速分布

図－19に示した河床横断のデータを用いて表面流速分布から求めた流量を図－21に示す。ただし、撮影の死角部分の流速分布は不明なため、河床形状の対称性を考えて図－19に示した破線のような流速分布を与えて流量を算出した。どちらのアンクルでも表面流速を水深平均値として求めた流量は $37\text{m}^3/\text{s}$ 、河川計測でよく使われる校正係数 0.85 を乗じた流量は $32\text{m}^3/\text{s}$ となった。ただ、上述のように河床形状が非常に複雑で鉛直方向の流れの運動量の交換が活発に行われていることが考えられるため、表面流速は近似的に水深平均流速が現れていると考える方が妥当である。以上の点より、少なくともピーク流量に近い撮影時にはおよそ $40\text{m}^3/\text{s}$ の流量が流れていたと推定できる。これは、等流近似から得られる流量よりはかなり小さい値であり、画像を用いた非接触流速計測法の有用性をあらためて確認することができた。ただ、今回のケースはたまたま放送局のカメラマンによる撮影ビデオを利用できた稀有なケースであり、本来ならば神戸市の河川カメラなども静止画だけではなく、動画撮影機能を有する高性能なものにしていくべきと考える。

6. 二次元浅水流解析による流況の推定⁷⁾

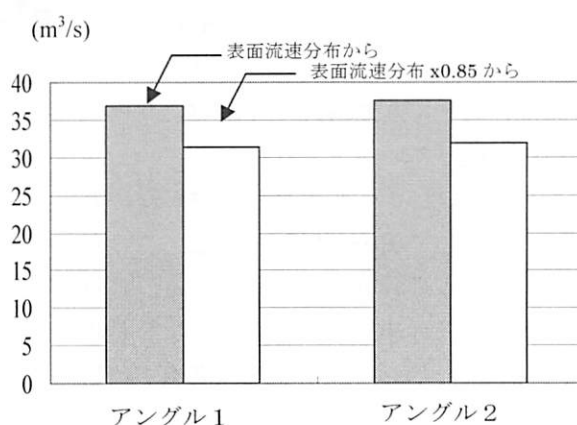
6-1 地上レーザ計測

これまで述べてきたように、都賀川は全川にわたって環境や親水性に配慮した工夫が施されているため、通常の河川のように一定間隔の横断測量のデータだけでは、河床の微地形を再現できない。そこで、本川1.8km区間を対象として地上型レーザ計測を実施した。地上型レーザ計測装置は三脚に載せた状態で使用するものであり、自動的に360度回転しながら設定した空間をカバーするように一秒間に数千発のレーザを発射し、反射するまでの時間から相対的な距離を計測できる。計測精度はセンチ以下であり、非常に高精度に多くの点の情報を得ることができる。ただし、使用した機器でレーザの届く有効半径は

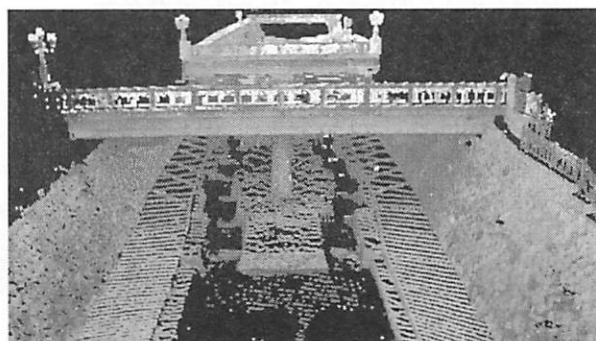
100～150m程度であったため、約200mの間隔で順次移動しながら本川全体をカバーした。得られた各計測点のデータは中継の標定座標を用いて統合し、最終的には一つの3次元微地形データ(1.8km区間相当)を得ることができた。図－22に新都賀川橋付近のデータを抜き出した結果を示す。橋や側壁の部分も含めてきわめて詳細なデータが得られている。河床の黒い部分は水面に相当しているが、これはレーザが水面ではうまく反射されないためである。したがって、このようなデータの欠損部分は現地における水深の実測値に



図－20 新都賀川橋下流の河床



図－21 流量の推定値 (校正係数=0.85)



図－22 地上レーザ計測の一例 (新都賀川橋下流から上流にむけての部分)

より補正した。また、植生や橋桁の部分もマニュアル作業により除去した。

6-2 平面二次元解析の概要

平面二次元解析は非構造格子に基づく浅水流解析プログラムを用いて行った。乱流渦粘性はゼロ方程式で与えている。解法は、FDS(Flux Difference Splitting)法に基づいている。

河床データに関しては、地上レーザ計測により得られた河床面の微地形は平面的にセンチメートル単位で得られていて逆に細かすぎるので、一辺が 0.6m の三角形を基本とする非構造格子網の河床面データに変換して解析を行った。この 0.6m という値は、横断方向に設置してある飛び石の一辺の長さに相当する。ただし、格子サイズは橋脚などの壁面付近では細かくし解析精度の向上に努めた。格子数は約 73000 である。解析範囲は、図-2.3 に示すように上流の合流点から新都賀川橋下流までの 400m の範囲とした。この範囲の平均勾配は約 1/20 である。計算の初期条件は、六甲川と柚谷川にそれぞれ $0.25\text{m}^3/\text{s}$ の流量を与えて定常となった状態とした。なお、格子サイズの依存性を調べるために、格子サイズを 1m と 0.3m にしたものを比較した結果、1m では結果に差が現れたが、0.3m では 0.6m の場合と大きな違いが見られなかった。したがって、0.6m とした格子サイズは概ね妥当な値と考えられる。

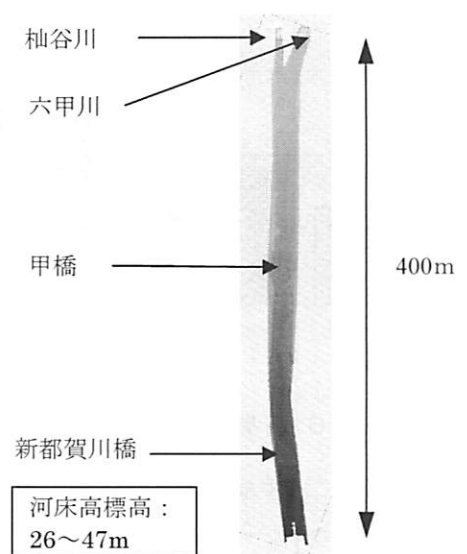


図-2.3 平面二次元解析の範囲

6-3 水理パラメータの推定法

流入ハイドログラフは、ステップ的にピーク流量まで急増する分布形を与えた。流量と粗度係数のチューニングは、以下の4つの事項をいずれも満足する組み合わせを求めるために、流量は $20\sim60\text{ m}^3/\text{s}$ 、粗度係数は 0.03~0.05 の範囲で変化させた。

- a) 甲橋直上流の水位データ
- b) 甲橋監視カメラでの遊歩道の冠水状況
- c) 新都賀川橋遊歩道の冠水状況
- d) 新都賀川橋下流の流速分布

甲橋上流の水位データを比較したのが図-2.4 である。水位計によるピーク水位 1.05m を図中に破線で示すが、この場合は流量 $30\text{m}^3/\text{s}$ のケースの再現性が高い。この流量は画像解析から得られた流量とほぼ一致する。なお、水位が粗度係数に応じて連続的に変化していないのは、河床底面が単純な平面ではなく縦横断に複雑なために局所的な流れの影響がケースごとに異なるからである。ただ、注意が必要なのは前述のように水位データは 10 分間の時間平均データである点である。従って、実際の水位は、この値を上回っている可能性が高い。

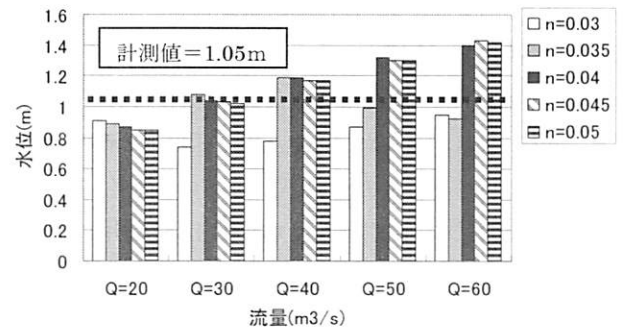


図-2.4 甲橋上流の水位データの比較

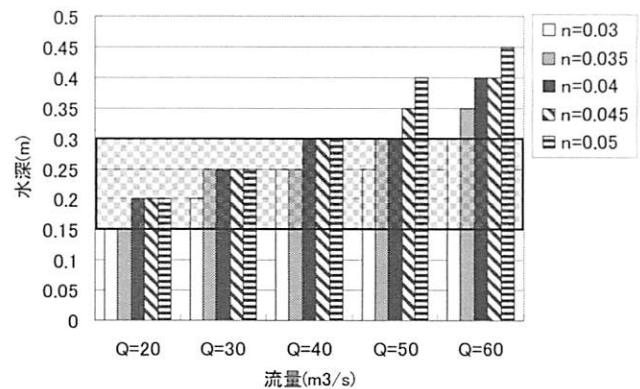
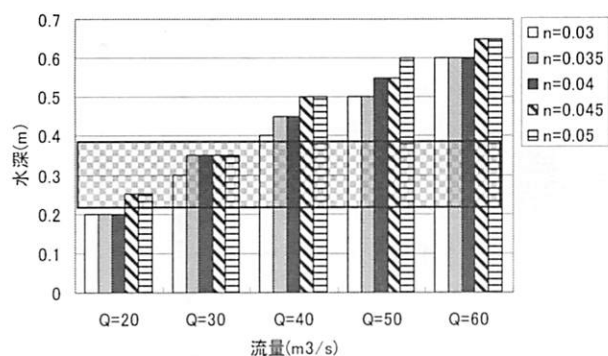
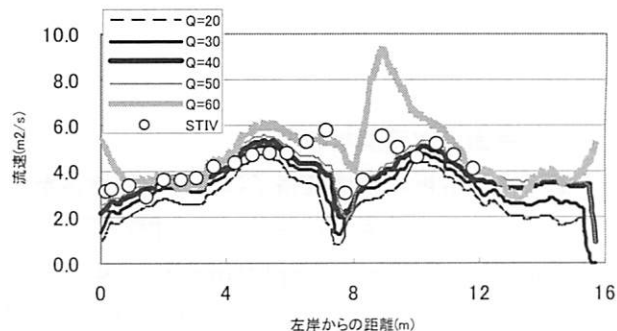


図-2.5 甲橋遊歩道の冠水深の比較



図－２６ 新都賀川橋遊歩道の冠水深の比較



図－２７ 新都賀川橋下流の流速分布の比較

図－２５には甲橋の階段工前面の遊歩道部分における冠水深を比較した。監視カメラから推定できる冠水深の値は 15cm から 30cm 程度なので、その範囲をハッチングで示している。この場合は粗度係数にかかわらず 30～40m³/s が範囲に入っている。図－２６には、新都賀川橋の遊歩道の冠水深を比較した。冠水深はビデオ画像から目測で推定したおよその値である。流量が 30m³/s のケースの多くが範囲内に入っている。一方、画像解析(STIV)でも求めた新都賀川橋の下流部における流速分布を比較したのが図－２７である。解析では粗度係数は 0.035 とした。白丸が表面流速の画像解析結果に対応する。局所的な分布形に違いは見られるが、遊歩道から橋脚にかけての流速分布は流量が 30～40m³/s のケースで実測値とよく合っている。以上の結果を総合して考えた場合、実測値にもバラツキや推定値が含まれるため、最適値の組み合わせを一つだけ選ぶことは難しいが、ここでは危険側のピーク値をとることとして流量は 40m³/s、粗度係数は 0.035 とする。この粗度係数の値は、河道計画時の 0.025 と比べると大きな値となっているが、これは計画流量の 250m³/s の場合とは異なって水深が小さく、粗度の影響を大きく受けるためである。従って、計画流量規模の洪水が発生した場合には、0.035 という粗度係数は逆に過大な値になる。

6－４ 局所的な流況

水難事故が発生した当時の詳細な流況を明らかにするために、数値解析結果をいくつかの視点で整理してみる。図－２８はその一例であり、甲橋下流の地点におけるいくつかの水理量の分布を示した。平常時の平面写真を図－２８(a)に示すが、河道の両側に遊歩道があり、下流側の河川中央には横断ブロックが設置されてプール状態になっている。右岸側に避難用に階段工が見られる。ピーク流量が発生したときの水深の解析結果を図－２８(b)に示す。甲橋の橋脚の下流で交差波が発生し、それがプール中央部で交わっている。河道部分の水深は下流側のブロックにせき止められて 1 m 以上となっている。重要な点は遊歩道上でも局所的に水深が最大 80cm 程度まで上昇している点である。水深は浅い場所でも 20cm 程度となっている。これを図－２８(c)の流速分布と照らし合わせると、水深が浅い場所でも流速は 1～2 m/s もあることがわかる。河川中央では、5m/s 以上の流速が発生している。図－２８(d)のフルード数の分布からは、射流と常流が混在しており、遊歩道上でも高いフルード数となっている。水深と流速の分布から、その場所に人がいたと仮定して人体に作用する流体力を推定してみた。人体のモデルとして大人のサイズを想定し、股下までは人の脚を 2 本の円柱、それ以上の水深では直径 40cm の 1 つの円柱とみなして流体力（抗力）を計算した。抗力係数は 1.0 とした。図－２８(e)がその結果である。相対的に水深の低い遊歩道上でも 200N、すなわち約 20kgf の力が作用していることが推定される。

6－５ 流水中を避難する際に作用する流体力

図－２８(e)で出てきたこの 20kgf という値の物理的な意味を調べるために、図－２９に示すような簡単な

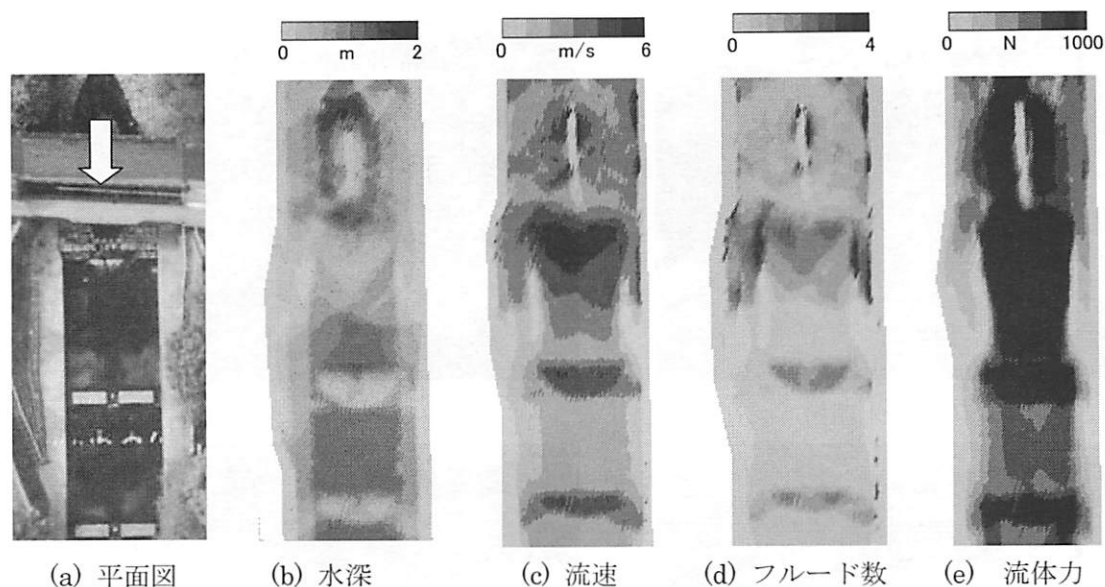


図-28 甲橋における解析値

器具、流体力疑似体験キットを考案した。これは、筒状にした丈夫な布地の一方の端をボルト・ナットでアングルに固定しただけのものである。これを2セット作り、図-29に示すように片足に一つずつ巻きつけた状態で後方からバネばかりで引っ張る。布の幅は適当に折りたたむことで簡単に調整できるため、さまざまな水深に対する流体力を疑似体験できる。このキットの使用において注意すべきは、バネばかりでいきなり引っ張ると体験者が転倒する危険性がある点である。したがって、必ず、補助者が体験者の傍に立ち、万一転倒しかかった場合でも、怪我をしないようにサポートをする必要がある。このような力は通常は体験することがないため、特にバネばかりを引っ張る人は注意が肝要である。

平成21年5月30日に行った都賀川水難事故に関する市民シンポジウムにおいて、このキットを用いた疑似体験コーナーを設置し、実際に市民の方に流体力を体験してもらった。午後からの数時間の間ではあったが、20名の方からのサンプルを取得した。結果を図-30にまとめた。この疑似体験コーナーでは、力を入れずに自然に立った状態で引っ張ったときの限界値、およびできるだけ踏ん張って引っ張りに抵抗したときの限界値を調べた。この場合の限界値とは転倒しかかったときの状態をさす。図-30から自然状態では男女ともおよそ20kgfが限界であり、抵抗したときには30kgf程度であることが

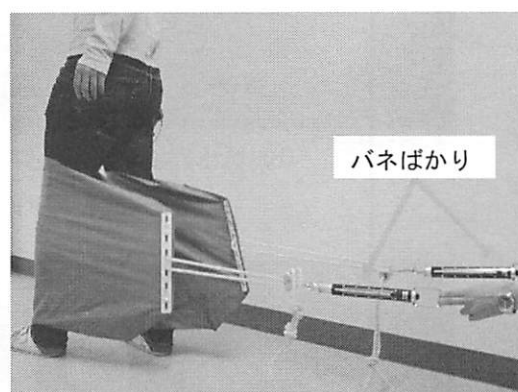


図-29 流体力疑似体験キット

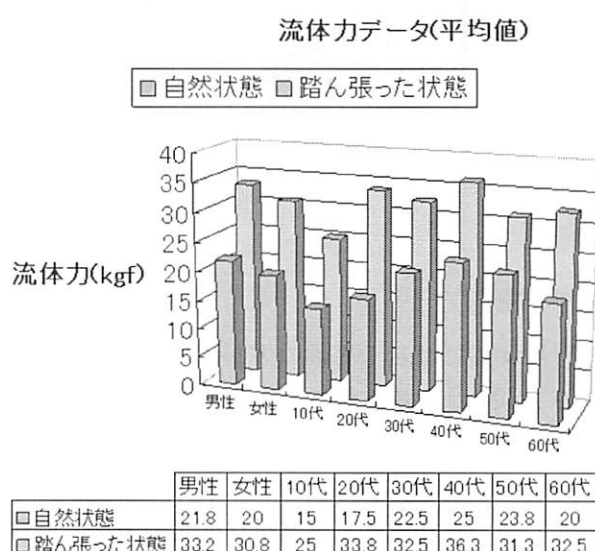


図-30 歩行限界の力



(a) 増水開始



(c) ステップによる堰上げ

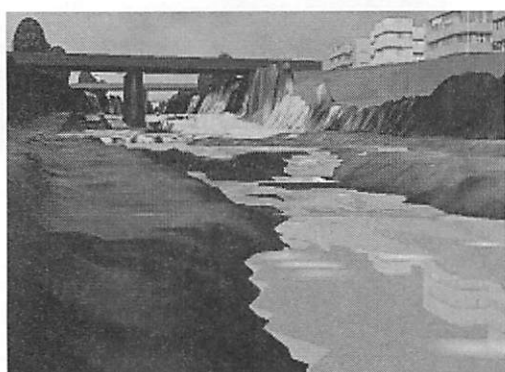


(b) 低水路満杯状況

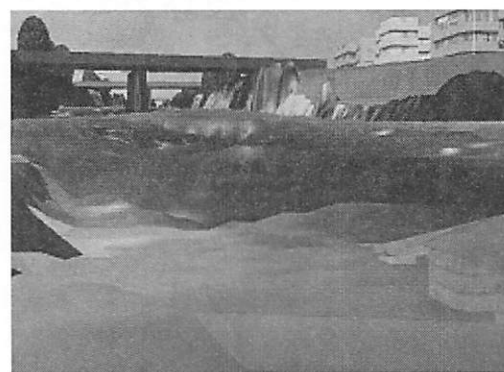


(d) ピーク流量時

図－3 1 甲橋地点の流れのアニメーション.



(a) 増水前



(b) ピーク流量時

図－3 2 甲橋下流の遊歩道からの視点

わかる。男女別では若干男性の方が高い値を示し、10代は平均値の80%程度の値であった。この限界値20kgf(約200N)は、数値解析で示した遊歩道上の人に働いたであろうと思われる流体力の下限値に相当する点に興味深い。上の実験からこの20kgfという値は、現場では一步も前に進めない状態の力と考えることができる。例えば、水深が50cmで流速が1.6m/sの場合がこの流体力に相当する。増水時に遊歩道にいた人は、最低でもこのような流体力が働く場所を通過して避難しなければならなかったはずである。図－2 8(e)からは、遊歩道上でも20kgfを上回る場所が局所的に分布しているため、現実には増水後に避難行動を開始して

も無事に避難することは非常に困難であったことがここからも予想される。

6-6 増水状況のアニメーション化

以上の画像解析や数値解析により、都賀川で局地的集中豪雨が発生した際の増水状況がある程度推定することができた。神戸市の河川カメラがとらえた連続画像は確かに社会的にも大きなインパクトを与えたが、流れの実際の動きについては想像することしかできなかった。ここで得られた結果を実際の防災面などで生かしていくためには、流速や水深のコンターラインのような静的なものでは不十分であり、一般市民にも実感として理解しやすい動画やアニメーションの形で提示していくことが重要である。この場合のアニメーションは二次元平面的な色の変化ではなく、三次元的な感覚に訴えられるものであることが望ましい。このような観点から、ここでは平面二次元解析の結果をできるだけ三次元的にリアルに表現することを考えた。そのために、実際の解析においては 0.1 秒間隔でデータを出力し、各瞬間の水面形のデータを河床地形やその周辺のデータと合わせて俯瞰的に表示した。最後に、このようにして得られる俯瞰図を一つの動画として結合しアニメーションを作成した。実際の俯瞰図の作成にはフリーソフトの POV-RAY を使用した。俯瞰図には橋脚、橋、周辺の建物群および樹木を付け加えた。ここで、地上レーザで計測された範囲については各計測点が色情報を持っているためその色をそのまま利用した。建物群については、平面図や航空写真などから各々の位置は正確にわかるが、高さや形状や色彩の詳しい情報は入手できなかったため任意のデータを与えた。橋脚などについても同様でありリアリティに欠ける面もまだ残っている。ただ、最も重要なのは水の流れの様子をどのように表現すべきかという点である。ここで最も注意したのは色彩である。増水事故の際には周辺が暗くなっており、その点で色の識別も明瞭ではなくなっていると考えられるので水の色はモノクロの灰色がかったものとした。また、平面二次元の解析ではピーク流量が続く時間帯の水面形状が定常となって鉛直変動の激しい実際の現象とは異なることがわかった。鉛直変動がうまく表せないのはそもそも使用している浅水流方程式が鉛直方向の加速度を無視しているからであり、この点を改善するには鉛直加速度に関する Boussinesq 項を加えて解析を行うかあるいは自由水面を考慮した三次元解析を行う必要がある。ただ、これらの解析は計算負荷が大きくなるため、ここでは少なくとも流れの動きの様子を認識できるように水面に流速とともに移動する白いマーカーを付加して擬似的に流れを表現した。このような工夫を行って解析結果をアニメーション化した例を図-31と図-32に示す。図-31は甲橋の河川カメラと同様のアングルから見た流れの再現状況である。図-31(a)は増水した流れがちょうど甲橋に到達した場面である。水面の白いマーカーは実際には動いている。図-31(b)は甲橋下流のプールに流入した水が満杯になり、横断ステップで堰あげられ遊歩道にまで水があふれかかっている様子、図-31(c)はさらに流入量が増えて遊歩道の冠水範囲が広がった様子を示す。そして、図-31(d)はピーク流量が通過中の様子であり、横断ステップで堰あげられた水面がうねるように変化していることがわかる。図-32は遊歩道にいる人の目から見た増水の様子である。遠方に見えていた増水流れの水面があっという間に手前まで到達し、周囲が水面で充満している様子である。これらの図は基本的には図-28で示したデータに基づいているが、水面形を三次元表示したことで、より実際の現象に近い状況を視覚的に体験することができ、一般市民の方の現象理解にも役立つと考えている。

7. 増水事故防止対策に関するアンケート調査

2008 年の都賀川の事故を受けて兵庫県は、親水空間のある表六甲河川 12 河川に増水警報システム（回転灯）を 85 箇所、2009 年度に設置した。ここではこのシステムの有効性を検証するために行ったアンケート調査の結果を紹介する。アンケート調査は都賀川と住吉川の 2 河川において行った。

7-1 増水警報システム

整備された増水警報システムの概要は以下の通りである。

- ① 櫛ラジオ関西の放送電波を利用し、大雨・洪水注意報及び警報の発表と連動して回転灯(黄色)を作動させ、河川利用者に注意喚起する。
- ② 回転灯は、河川内で人が集まりやすく見通しの良好な箇所(橋の下など)に設置する。今回対象とした都賀川には14箇所、住吉川には16箇所の回転灯が設置されている。
- ③ 回転灯の近くには回転灯設置の趣旨とシステムの概要を説明したパネルを設置する。

7-2 アンケート調査内容

アンケート調査の項目を表-2にまとめた。アンケートは平日と休日の正午から午後3時までの間に行った。回答は都賀川の平日で70名、休日で121名、住吉川の平日で75名、休日で104名の総計370名である。調査場所は親水区域の上・中・下流に分かれて同時に行っている。調査日の天候は晴れか曇りであり、降雨発生に伴う回転灯の点灯は起きていない。なお、午後からの調査のため平日の子供のデータは得られず、休日の家族連れの場合も保護者が回答するケースが多かったため、低年齢層のデータは十分には得られていない。全体では大人が6割、高齢者(65歳以上)が3割を占めた。

表-2 アンケート調査項目

1.利用者に関する項目	世代(Q1)、性別(Q2)、利用形態(Q3)、利用回数(Q4)、住所(Q5)、居住年数(Q6)
2.回転灯に関する項目	増水事故の認知度(Q7)、回転灯の認知度(Q8)、回転基準の認知度(Q9)、回転を見たことがあるか(Q10)、回転時の行動(Q11)、避難しない理由(Q12)
3.避難意識などを尋ねる項目	避難の目安(Q13)、事故防止案(Q14)

7-3 アンケート結果

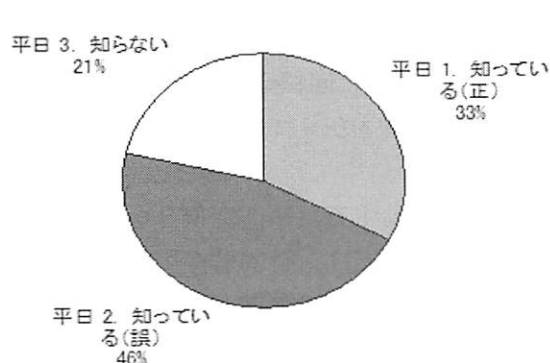
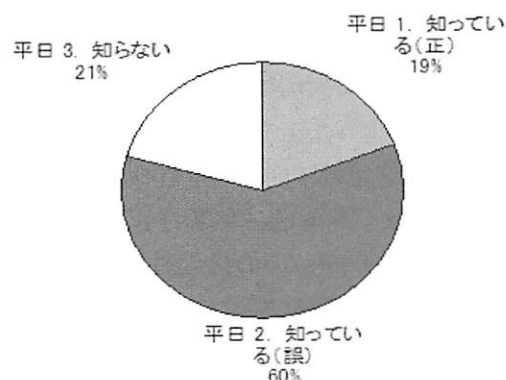
アンケート結果の内容は多岐に渡るが、ここでは回転灯の有用性や避難に関する意識に焦点を絞って結果を示す。表-3に回転灯の認知度に関する結果を整理した。これより、回転灯の存在そのものはほとんどの利用者に認知され、初めて親水空間を利用する人でも7割程度がその存在に気づいていることがわかる。しかしながら、回転灯がどのような基準で点灯するのかを正しく理解している利用者は両河川とも3割程度であった。平日における回転基準の認知度を図-33と図-34に示すが、特に住吉川では認識度の低さ、勘違

表-3 回転灯の認知度に関するアンケート結果

		回転灯の 認知度	回転基準の認知度		回転をみ たことが ある	回転時に 避難した 人	逃げなかった理 由が自分で安全 だと思った人
			正しく知 っている	勘違いし ていた			
都賀川	休日	9割	3割	4割	4割	4割	8割以上
	平日	ほぼ全員		半数程度	6割	6割	
住吉川	休日	9割		2割	4割	半数程度	
	平日	ほぼ全員	6割		6割	1割	

表－４ 避難意識に関するアンケート結果

		避難の基準		対策案	
		最も多い回答	その割合	最も多い回答	その割合
都賀川	休日	山に雲がかかる	3割	意識系	6割
	平日	雨が降り始める	25%	意識系	半数近く
住吉川	休日	雨が降り始める	2割	サイン系・意識系	3割
	平日	増水してくる	3割	サイン系	4割

図－３３ 回転基準の認知度
(平日・都賀川)図－３４ 回転基準の認知度
(平日・住吉川)

表－５ 避難行動・意識の比較

	避難の目安(%)	点灯で避難(%)	対策案(%)
都賀川	降雨始(27), 山に雲(27), 雨脚強(16), 増水(15), 雷(8), 呼掛け(1)	47	意識系(54), サイン系(24), 施設系(11)
住吉川	降雨始(22), 増水(22), 山に雲(16), 雨脚強(16), 雷(11), 呼掛け(1)	18	サイン系(35), 意識系(29), 施設系(18)

いの多さが目立つ。勘違いの内容の多くは『増水しそうなときに点灯する』であり、掲示板の内容が十分には浸透していないことがわかった。また、点灯を見たことのある平日の利用者は6割程度であるが、住吉川では点灯しているのを見ても避難しない割合が多かった。避難しない理由の多くは「自分で安全だと思ったから」であった。

8 あとがき

以上のさまざまな検討結果を踏まえ、今後考えていくべき増水事故の予防策を以下に記す。

① 個人の意識を高める必要性

表－５に避難行動や意識に関するアンケート結果をまとめたが、増水事故を未然に防ぐために個人の意識を高める必要性があることは多くの河川利用者が感じている。都賀川では、2008年の事故以前にもたびたび急な増水が発生しており、雨が降れば危険な川になることは古くからの地域住民にはよく知られたことであ

った。したがって、河川に関する様々なイベントや小中学校などにおける防災教育の場で増水事故のことを伝えていき、決して事故があったことを風化させないことが最も重要なことである。防災教育の場では、前章で提示した流体力の擬似体験キットや3Dのアニメーションなども有効に活用すべきである。神戸市では具体的に防災教育用のDVDを作成し⁸⁾、河川は普段は楽しいところだが一旦雨が降ると危険になることや橋の下で雨宿りをするのは絶対にしてはならないことなどを、上のアニメーションなどを用いてわかりやすく説明している。このようなDVDはもっと広く普及させるべきである。

② 回転灯の点灯基準を周知する必要性

今回のアンケートでは、回転灯の点灯基準を正確に把握している河川利用者は全体の3割程度に過ぎないことがわかった。点灯基準である大雨・洪水注意報のことが十分に理解できていれば、たとえ上空が晴れていても回転灯が点灯していることに疑問を抱かず、発生する可能性のある増水に対する心の準備ができるはずである。したがって、回転基準に関する正確な情報の周知がやはり必要である。そのためには、日頃からの広報活動はもちろん大切であるが、住吉川のアンケートでも出されたように回転灯点灯時にのみ音声のメッセージが流れるような工夫をするなど、一般市民にわかりやすい形で情報を伝えていくことが必要である。

③ 大雨・洪水注意報の精度を向上させる必要性

回転灯の点灯は、基本的に気象庁が発表する大雨・洪水注意報と連動するため、空振りが多すぎると増水警報システムそのものの信頼性が低下する懸念がある。最近では、空間・時間解像度の高い高性能なXバンドレーダも導入されてきているため、これを活用した降雨予測技術の進展とその早急な運用が期待される。

最後に、都会における河川の親水空間は市民にとってはつかの間の憩いの場であり、また、子供たちにとっては絶好の遊び場所でもある。晴天日には何の問題もない快適な場所が、突如として危険な空間に変身してしまう点が自然の怖さであり、一般のアメニティ施設とはまったく異なる点でもある。したがって、河川の利用者にはこの大きな違いをよく伝えていかなければならない。水難事故等の災害防止のためには、川の楽しさだけでなく怖さも教える啓発教育が今後ますます重要になってくると確信している。

謝辞

この調査研究では、河川整備基金による支援および兵庫県や神戸市からの協力があつた。また、河川流のアニメーション制作においては、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。なお、本稿の内容の大部分は土木学会の水難事故調査団の調査研究および河川整備基金の支援により行われたことを記す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 神戸市役所, 神戸市水害誌, 附図, 1939.
- 3) 都賀川を守ろう会, 30周年記念誌, 2007.
- 4) <http://ktgis.net/kjmap/>, 時系列地形図閲覧ソフト, 今昔マップ2.
- 5) http://web.pref.hyogo.jp/af20/af20_000000002.html, 兵庫県HP.
- 6) <http://kobe-city-office.jp/kawa-camera/pc.html>, 神戸市河川モニタリングカメラシステム.
- 7) 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.
- 8) 神戸市, 楽しい川あぶない川—川の危険を知って, 楽しく遊ぼう—, DVD, 2009.