

Ⅲ. 突然の濁流の発生条件について

神戸大学大学院工学研究科

宮本仁志・門田 朗

1. はじめに

2008年7月28日午後、集中豪雨によって神戸市灘区の都賀川で突然の水位上昇がおり、河道内の親水空間や遊歩道を利用する市民・学童5名の人命が失われた。8月25日、灘警察署は事故後の調べで、さらに52人が自力避難もしくは救助されたと発表した。この報告では、このように多くの市民を危険な状況下においた突然の濁流に関して、その状況、流域の降雨と河道での出水の対応関係を調べるとともに、濁流の伝播速度とその発生条件を運動量則より解析的に検討した。そしてその結果をもとにして、事故防止対応策を考究した。なお、この冊子で別途報告される藤田、立川・江崎の調査内容は、この報告の内容と現象面で相互に強い関連性があり、併せて参照していただきたい。

2. 突然の濁流の状況

表-1は、事故直後から新聞やWebなどに掲載された報道情報のうち、特に、河道内での突然の濁流に関する記述を取りまとめたものである。これら一連の記述を総合すると、

表-1 突然の濁流に関連する報道情報

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、 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、 濁流が突然押し寄せた。
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、 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。
3	新都賀川橋付近で助けられた親子3人	津波のような水 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、 足もとにサーっと水が流れた。 「危ない。逃げろ」と誰かが叫んだので顔をあげると、 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。 もう駄目だと思った。 増水は想像を超える速さだった。 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	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。
6	都賀川を守ろう会事務局	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。
7	地元の児童NPO指導員	都賀川が急に増水することは知られており 、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。

今回の突然の濁流の押し寄せは、「分」単位ではなく「秒」単位の現象であることがわかる。このことから、後述するモニタリングカメラの2分の撮影時間分解能でも、河道内における水位上昇の時間特性はとらえきれないと判断される。また、表-1No.4のコメントにおける濁流の現象記述は、ダムブレイク時の段波伝播の現象記述に非常に似ている。第4章の解析的検討では、この事実をもとにして濁流の押し寄せを波動的な伝播過程と捉え、運動量則により現象を解析する。さらに、No.5-8に示すように、河道内を突然に濁流が押し寄せる今回のような現象は、複数人に認識されるかたちで過去にも存在する。その意味では、きわめて稀な現象とも言えない。No.9-10にあるように夙川でも類似の事故が過去に発生しており、同様の流域特性をもつほかの表六甲河川においても、このパターンの水難事故ポテンシャルを内在していると推察される。

3. 降雨レーダーと水位の応答関係

図-1は、神戸市の降雨レーダーに、気象庁の降水ナウキャスト画像および都賀川甲橋からの神戸市モニタリングカメラ画像を、時刻をほぼ合わせるかたちで重ね合わせ表示したものである。降雨レーダーは、250mの空間分解能、2分30秒の時間分解能をもち、気象庁のレーダーアメダス合成雨量により補正されている。ここでは都賀川流域のみ表示する。一方、モニタリングカメラの時間分解能は2分、ナウキャスト画像は10分である。

図-1に示すような流域の降雨状況と河道での出水状況の同時画面を動的に動かして検討すると、全般的に両者はおおよそ3~5分程度の時間遅れで応答する。これより、都賀川流域では、降雨に伴って非常に敏感に水位が応答することがわかる。(b)14:42:30には出水がはじまっている。この時点までの降雨レーダーは、ここに示していない時刻を含め、

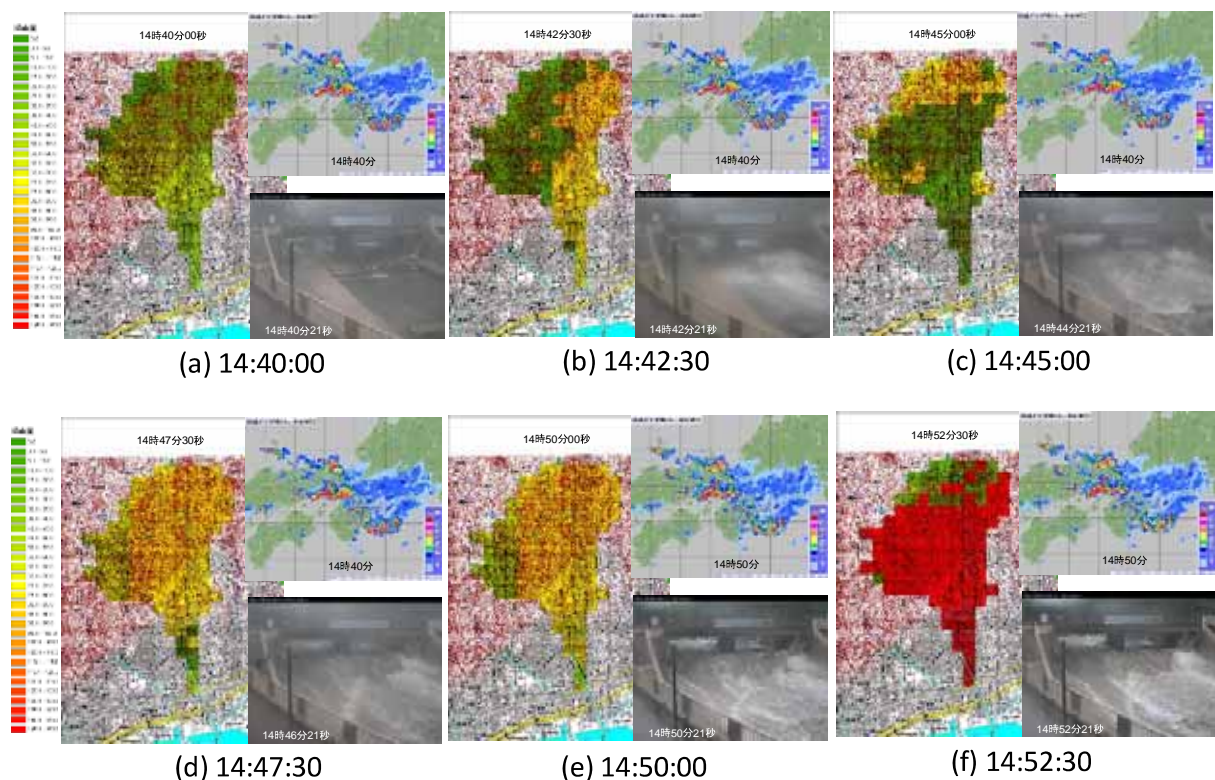


図-1 神戸市降雨レーダー(250m)・同モニタリングカメラ・気象庁降水ナウキャスト画像

柚谷川流域で若干値が大きい。また、この時刻においては六甲川流域のほうが降雨レーダーの値が大きい。モニタリングカメラの画像を検討すると、(d)14:47:30 の時刻付近で一度水位は小さいピークを迎える。このピークは前述の応答時間特性を考えると、六甲川流域の市街地からの流出が効いているように推察される。また、これ以降の降雨レーダーからは流域全域において降雨が認められ、流域の大部分を占める森林域にも降水している。(f)14:52:30 の時間帯で降雨レーダーはピーク値を示す。ここでは示さないが、モニタリングカメラで見られる水位は、その2~3コマあと(14:57~15:00)で再びピーク(最大)を示し、その後減衰する。

以上より、流域を適当な時空間分解能でモニターする降雨レーダーと河道モニタリングカメラの同時情報によって、都賀川流域の降雨と流出間の鋭敏な時間応答がある程度推測された。また、水難事故が発生したと推定される14:42-44 ごろの出水は、柚谷川流域からの初期出水に加えて、六甲川流域の市街地からの流出((b)14:42:30 の降雨レーダー参照)もかなり影響している可能性があることが推察される。

4. 突然の濁流の伝播速度とその発生条件に関する理論解析

この章ではこれまでの考察を踏まえて、水理学的な理論解析により、河道内を伝播する濁流の伝播速度およびその発生条件を与える式を導出する。また、その導出過程での考察と得られた条件式を用いて、水位が突然に急上昇する現象の要因と、発生を抑制する対応策を考察する。

図-2 に理論解析のモデルと関連する物理量の概要を示す。現象の定式化に際しては、図-2(b)に示すように、濁流の伝播速度 C で動く移動座標系で考え、河道単位幅を取り扱う。濁流の先端部分は流れのエネルギー散逸を伴うため、運動量則(と質量保存則)を用いる。図-2(b)に示す[0]-[1]断面間のコントロールボリューム(CV)において流下方向の運動量変化を考える。[0]断面、[1]断面での水圧は静水圧で近似できると仮定し、CV 前後の平均流速は Manning 式を仮定する。親水整備による底面摩擦抵抗 τ_* は乱流抵抗として式(1)で、CV 部分の水塊重量 W は式(2)でそれぞれ与える。

$$\tau_* = \rho c_f C^2 \quad (1), \quad W = K\rho gL \frac{h_0 + h_1}{2} \quad (2)$$

ここに、 ρ : 流体の密度、 c_f : 底面摩擦係数、 K : CV 区間の形状に関する補正係数、 g : 重力加速度、 L : 濁流の水位変化区間(CV 区間)の長さ、 h_0, h_1 : それぞれ CV 区間前後の水

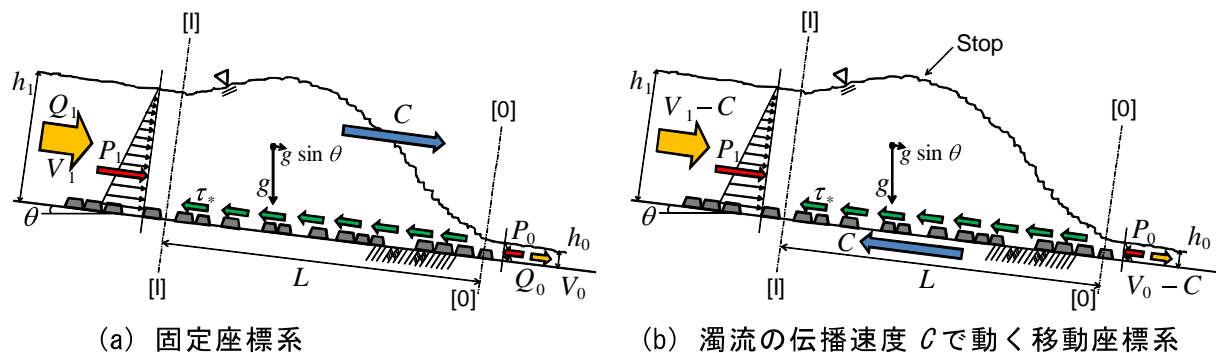


図-2 濁流伝播現象の解析モデルの概要と関連物理量

深であり、この報告では下添字の $0 \cdot 1$ はそれぞれ濁流前・後の物理量を表す。

以上より、運動量保存式と質量保存式を立てて連立させて解くと、濁水の伝播速度 C に関して次式が得られる。

$$C = \frac{\Delta h}{\Delta h + c_f L \eta} V_1 \pm \frac{\sqrt{\eta}}{\Delta h + c_f L \eta} \sqrt{g \bar{h} (\Delta h + c_f L \eta) (\Delta h \cos \theta + KL \sin \theta) - c_f L \Delta h V_1^2} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta h = h_1 - h_0$: 濁水通過前後の水位変化量、 $\eta = h_0 / h_1$: それらの比、 $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$: 平均水深、 V_1 : 濁流通過後の平均流速、 θ : 河床の傾きである。

式(3)におけるプラス(+)の符号をもつ解は、基本的に平均流速 V_1 より早く伝播する正の段波に対応する。表-1No.4 のコメントにおける【足もとにサーッと水が流れた】現象に対応すると推察される。一方、マイナス(-)の符号の解は、上流側に伝わろうとする負の段波に対応する。しかし、流速 V_1 が大きいので切り立っている波面は下流に押し流され、固定座標系でみると C の伝播速度で下流方向に移動することになる。このマイナス(-)の符号をもつ解にて表記される波動伝播が、突然の濁流を本質的に表現すると推察される。濁流の先端が激しく乱流するのは、底面からの乱れに加えて、負の段波が上流側に伝播できずに砕波することが原因にあると考えられる。

このように考えると、突然の水位上昇を伴う濁流が発生する条件は、以下で定義されるフルード数 Fr_p が 1 を超えるときになる。

$$Fr_p = \frac{V_1}{\sqrt{\frac{\eta}{\Delta h^2} (g \bar{h} (\Delta h + c_f L \eta) (\Delta h \cos \theta + KL \sin \theta) - c_f L \Delta h V_1^2)}} \quad (4)$$

$Fr_p > 1$: 突然の水位上昇を伴う濁流が発生する。 $Fr_p < 1$: 負の段波が遡上可能なため、急激な水位上昇とならない。

次に、式(4)の Fr_p を用いて突然の濁流が発生する条件を詳細に検討するために、藤田の解析結果と表-1 の状況記述を参考にして理論解析モデルの係数 c_f を同定した。同定に用いた条件は以下の通り : $C : 3.0\text{m/sec}$ 、 $\Delta h : 1.0\text{m}$ 、 h_0, h_1 : それぞれ 0.2m 、 1.2m 、粗度係数 0.035 、河床勾配 $1/35$ 、 $L : 120\text{m}$ 。最後の $L = 120\text{m}$ は、 $C = 3.0\text{m/sec}$ を仮定するので、 40sec で水位が h_0 から h_1 に上がりきることに対応する。以上を用いると c_f の同定値は 0.016 となる。

図-3 は、 Δh と L を変化させて Fr_p の値を算出し、等値線図として表したものである。突然の水位上昇を伴う濁流の発生条件(式(4))を前段の条件にて可視化したものとなる。今回の水難事故の推定値を赤丸で示す。この図におい

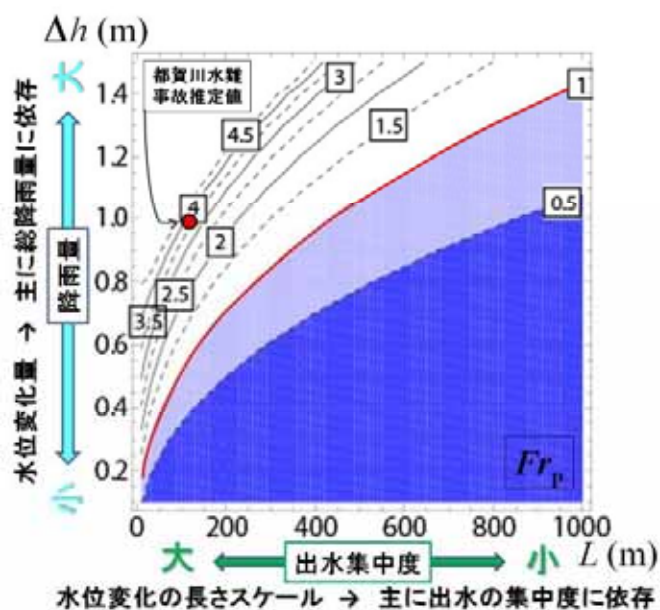


図-3 突然の水位上昇を伴う濁流の発生条件

て、 $Fr_p < 1$ の領域(青のハッチの部分)では急激な水位上昇を伴う濁流は発生しない。 L が小さくて集中的に河道に流出するような条件であると、 Δh がある程度小さくても Fr_p が 1 をこえやすくなり、突然に水位上昇する濁流が容易に発生することがわかる。また同図より、濁流発生を抑制するためには主に出水の集中度を表す L (水位変化の長さスケール)を大きくすればよいことがわかる。これには、今回の水難事故後にも一般的によく耳にすることであるが、河道への集中的出水を低減するように、雨水を一時貯留するなど流域対応の施策を検討することがよいと考えられる。この施策の有効性をここでの理論解は支持している。また、同一規模の降雨の場合、流域内で雨水を一時貯留することによって Δh も小さくなることが期待され、 $Fr_p < 1$ の領域に容易に入るようになることも考えられる。

5. まとめ

この報告では、突然の水位上昇を伴う濁流に関して、その状況、流域の降雨と河道での出水の対応関係を調べるとともに、濁流の伝播速度とその発生条件を解析的に検討した。得られた調査結果は以下のとおりである。

- 1) 今回の突然の濁流の押し寄せは、「分」単位ではなく「秒」単位の現象である。複数人に認識されるかたちで過去にも発生しており、その意味では、きわめて稀な流体现象とも言えない。同様の流域特性をもつほかの表六甲河川においても、このパターンの水難事故のポテンシャルは内在していると推察される。
- 2) 流域を適当な時空間分解能で観測する降雨レーダーと河道モニタリングカメラの同時情報によって、都賀川流域の降雨と流出間の鋭敏な時間応答がある程度推測された。この意味で、流域の規模に適合した分解能をもつ降雨および河道モニタリングは非常に有効だといえる。
- 3) 理論解析により突然の水位上昇を伴う濁流の発生条件を導き、現象の考察を行った。この現象は、出水が河道に時間的に集中することによって生じ、上流側へ伝播するはずの負の段波(波面)が、出水時の流速が大きいため下流に押し流されることで発生すると推察される。そのように考えると、発生条件は本文中に示したフルード数により規定されることがわかる。

以上を踏まえて、事故防止のための対策を挙げると、以下のようになる。

- 1) 突然の水位上昇を伴う濁流の発生を極力抑えるためには、河道への集中的出水を低減するような方策が有効であり、雨水を一時的に貯留するなど流域対応の施策の実施が望まれる。
- 2) ここで報告した内容や説明では、都市河川の親水空間を利用する市民にとって難解すぎる。一般の人々が、自身のすむ流域の流出特性や出水時の河川の流れ特性、特に、危険サイドの特性が実感をもって理解できるような、啓発のためのツール開発が望まれる。

IV. 短時間豪雨時の親水河川の流況解析事例（京都市鴨川）

京都大学防災研究所
戸田圭一

1 解析モデル

今回の都賀川の水難事故に関連して、以前に実施した、短時間豪雨による親水河川の流況解析結果¹⁾を要約して示す。京都市民にとって身近な存在である鴨川流域（図-1）を対象として、短時間豪雨による出水時の流況とそのときの水難事故発生の危険性を検討したものである。

流況を各地点の特性にあわせて表現するため、領域を、上流域山地部、柘野堰堤直上流部の柘野公園周辺部（図-2）、中流域都市部の3つに分割する。上流域では、kinematic wave モデルに基づく山地部の流出解析を用いて水深や流速の時間変化を求める。柘野公園周辺部に広がる親水空間の局所的な流況の検討では、流出解析で得られた対象地点上流の流出流量ハイドログラフを上流端境界条件、堰堤での段落ち流れの流量を下流端境界条件として、一般曲線座標系による平面二次元の汜濫解析を適用する。さらに中流域では、対象区間上流端の流出流量ハイドログラフを上流端境界条件、下流端の段落ち部での流量を下流端境界条件として一次元の不定流解析（洪水解析）を行い、水深の急激な変化を明らかにしている。

2 解析結果

まず、1999年6月26日～27日の降雨を与えて解析し、上流部、中流部それぞれの水位観測所の水位、および柘野公園の浸水実績を用いて解析モデルの中の等価粗度、粗度係数などのパラメータを決定した。

次に、短時間豪雨である1994年7月26日14～19時の降雨（図-3）を与えた場合の上流域親水地点のおおまがりの流速と水深、柘野公園周辺部の浸水深、中流域西賀茂橋地点の水深の時間変化を図-4に示す。7月26日14時を計算開始時刻とし、0時と表している。おおまがりでは、最大流速が4m/sを超え、しかも、短時間のうちに最大値まで上昇している。一方、柘野公園周辺部の親水域のA点では、水深が約20分で1m程度、中流域西賀茂橋では約30分で70cm程度、それぞれ上昇している。以上の結果より、鴨川流域でも、短時間の豪雨により、かなり急激に流速や水深が上昇し



図-1 鴨川対象領域



図-2 柘野公園周辺部

ており、危険な状態が生じることがわかる。

次に、短時間豪雨での出水時の危険度マップの作成を試みる。降雨継続時間 30 分、総降雨量 30mm の矩形波のモデル降雨を流域に一樣に与え、最大流速が 2m/s、あるいは最大水深が 1m を上回るかを第一段階の指標(上回る場合を A、そうでない場合を B)、そして A のうち、流速、水深のどちらかの 10 分間の最大変化量が、1.0m/s、0.5m を上回るかを第二段階の指標(上回る場合を AA)として対象地点をランク分けし(図-5 参照)、出水時の危険度を流域図に重ねあわせて表示したものが図-6 である。このようにして、短時間豪雨時における流域内の各地点での河川流況の変化や危険性を、相対的に表現することも可能である。

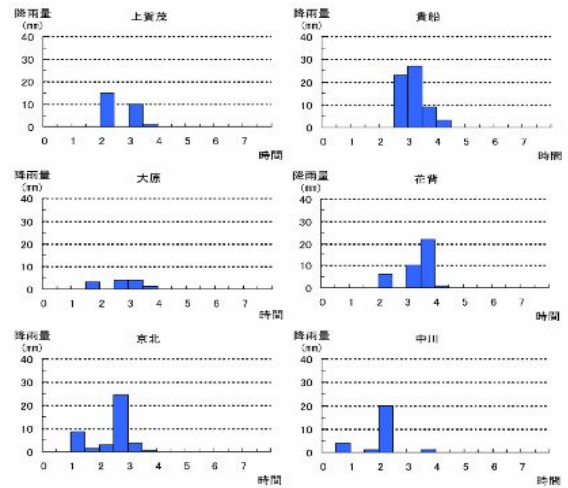


図-3 1994年7月26日降雨

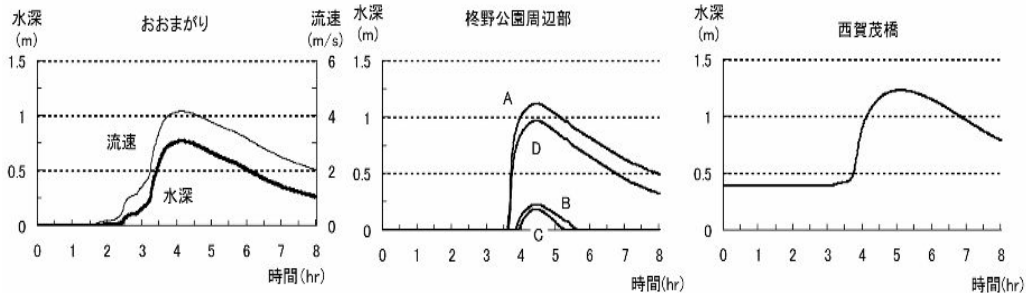


図-4 水深・流速の時間変化

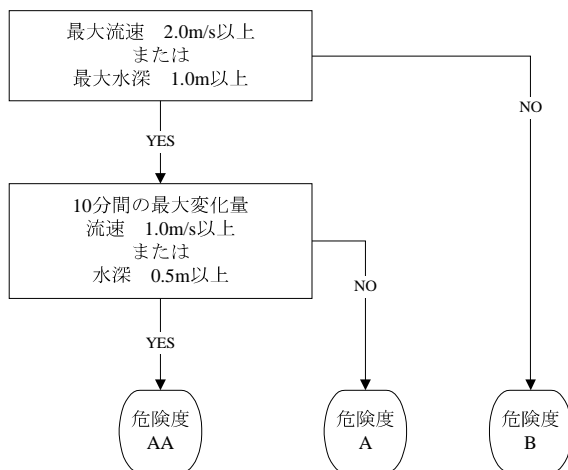


図-5 危険度ランク選定フローチャート



図-6 短時間豪雨時の危険度マップ

参考文献：

(1) 戸田圭一・徳永智宏・井上和也：親水河川の出水時の危険度解析，自然災害科学 22-3, pp.285-297, 2003.

V. 都賀川水難事故調査を踏まえた事故防止のための技術課題と施策に関する提言

土木学会都賀川水難事故調査団
藤田一郎・立川康人・多々納裕一・戸田圭一・
道奥康治・宮本仁志・矢守克也

ここでは、各調査報告における提言に関する部分を再度列挙し、それらに補足説明を加えて取り纏める。これより、このたびのような水難事故を防止するための技術的課題と施策に関する現段階での調査団提言とする。なお、調査団の最終報告は5月末に公表する予定である。

1. 高解像度の降雨レーダーおよびそれとリンクした警報装置の設置、分布型流出モデルの利用：

都市小流域の急激な流出を再現するためには地点観測雨量では不十分である。また、流域条件を一様とすると、流出現象を再現できない。レーダー雨量と詳細な土地利用、地形を反映することができる分布型流出モデルの利用が有効である。また、降雨レーダーと直結した警報装置の設置も有効である。

2. 流域対応の施策実施：

水難事故防止のためには、現況を把握するだけでは限界がある。今回の豪雨では上流域からの流出はほとんどなく、上流で河道の状況をモニターするだけでは、下流の水難事故防止には役立たない。豪雨があった場所の雨水流出によって水位が急上昇している。突然の水位上昇を伴う濁流の発生を極力抑えるためには、河道への集中的な流出を低減するような方策が有効であり、降った場所で雨水を一時的に貯留するなど流域対応の施策の実施が必要である。

3. 大雨洪水警報などの発令状況が現地利用者にわかる仕組みの開発：

前線あるいは台風に伴う大雨は、それを予測する技術が進展している。しかし、その中で発生するピンポイント的な集中豪雨を事前に予測することは容易ではない。現状では、空振りとなっても、注意報あるいは警報が発令されたら河川には近づかないなどを地域住民の共通認識とする必要がある。

4. 警報発令時の行政と地元のボランティア組織が連携した見回り体制の確立：

例えば、水遊びに熱中している子供たちは、どうしても避難行動をとるまでの時間が遅れがちである。短時間豪雨が十分予想されるときに地元住民が河川内にいる子供たちや子供連れを見かけたら、「危ないぞ」と声をかけて回るだけでも最悪の事態の回避につながると考えられる。

5. いざというときに水に流されない装置の設置（手すり、取っ手、人が登れる護岸など）：

都市河川の親水整備区間で増水時に避難がままならないと予想される箇所については、緊急時の河道からの脱出支援機能も兼ねて、手すり、取っ手の設置や、人が登れる護岸などの整備が望ましい。

6. 災害教育の啓蒙、そのための教材作成と配布：

災害教育では、紙ベースの教材の配布だけでなく、ビデオのような動画的な教材を活用するのが効果的である。今回の水難事故に関しても、事故現場の都賀川の流況変化画像をとりまとめて示すだけでも、川の恐ろしさを表わす有効な教材になると考えられる。また、都市河川やその周りの市街地を表現したミニチュアの模型を作成し、そこに通水して、河川の急な増水や外水・内水氾濫といった現象を説明するのも教育効果が上がる一つの方法であろう。さらに、あやうく水難事故にあうような経験をした人達の体験談も、インパクトがあると考えられる。なお、このような災害教育は、子供たちだけでなく、保護者や野外活動のリーダー達にとっても重要である。

7. 流れる水の力の強さを知る体験教育：

水の怖さを理解するのに、擬似的な体験はきわめて効果的である。京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーは、水害時の避難に関する研究装置として、実物大の階段模型、ドア模型、自動車模型を備えている。これらの装置は見学や研修時に体験実験に活用され、好評を博している（写真1参照）。



写真-1 実物大のドア模型

階段模型や自動車模型、河川を想定したような模型は規模も大きくなり、模型によっては相当の水量を必要とする。一方、ドア模型は、材質を問わなければ比較的安価に製作でき、必要な水量もドア前面の水槽に水を張る程度であり、工夫すれば移動可能なものとすることもできる。移動式のもの関西大学の石垣教授が試作しており¹⁾、イベントなどで既に活用されていると聞いている。このような装置を用いれば、水の力の大きさを、身をもって体験することができ、流れる水ではなくても水難事故防止の教育活動に役立つであろう。

8. 水位の急増を疑似体験できるソフトウェアの開発

一般の人々が、自身のすむ流域の流出特性や出水時の河川の流れ特性、特に、危険サイドの特性が実感をもって理解できるような、啓蒙のためのツール開発が望まれる。

参考文献：(1) 毎日新聞，2008年10月17日（朝刊）

【謝辞】：本調査を実施するにあたり、(財)河川環境管理財団河川整備基金の助成を受けました。調査団の立ち上げにあたり、土木学会水工学委員会中川一副委員長および清水義彦幹事長、土木学会古木守靖専務理事をはじめ社会支援部門担当の関係各位にご尽力いただきました。国土交通省六甲砂防事務所、兵庫県、神戸市の関係各位には、貴重なデータのご提供を含めてご協力いただきました。以上、記して謝意を表します。