

# 氾濫解析とリンクした洪水時の避難判断支援情報の提供に関する研究

小川 芳也\*・瀬良 昌憲\*\*・澤井 健二\*\*・足立 考之\*\*\*・

小笠原 裕介\*\*\*\*・正岡 聡\*\*\*\*\*

## Study on the Information for the Evacuation from Flood Disaster Linked with Inundation Analysis

Yoshiya OGAWA \*, Masanori SERA \*\*, Kenji SAWAI \*\*, Takayuki ADACHI \*\*\*, Yusuke OGASAWARA \*\*\*\* and Satoshi MASAOKA \*\*\*\*\*

### Abstract

For the temporary evacuation from flood disaster, it is necessary to keep both of the safe evacuation space and the safe evacuation route. In case of walking evacuation, the combination of water depth and flow velocity decides the stability of the human body. In this study, an equation was derived by hydraulic view point to express the degree of safety of walking against shallow flow.

Using the flood simulator “DioVISTA”, the flood in Sayo River Basin in the case of 9<sup>th</sup> Typhoon 2009 was analyzed. For the area Enoji, the time change of the distribution of flow depth and the degree of safety were shown visually. From this analysis, it is able to judge the appropriate time and route for safe evacuation.

キーワード：水害，氾濫解析，避難，歩行危険度，佐用町，ハザードマップ

Key words : flood disaster, inundation analysis, evacuation, walking risk, Sayo Town, hazard map

\* 摂南大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Setsunan University  
\*\* 摂南大学理工学部  
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University  
\*\*\* (株) 英晃コンサルタント  
Eiko Consultant

\*\*\*\* (一社) 近畿建設協会  
Association of Construction Kinki  
\*\*\*\*\* 摂南大学工学部  
Faculty of Engineering, Setsunan University

本論文に対する討論は平成26年11月末日まで受け付ける。

## 1. はじめに

わが国ではかねてより自然災害によって多くの生命と資産が失われており、防災対策の一層の充実が望まれている。防災対策には、施設対応によるハード対策と、避難や土地利用によるソフト対策があるが、ハード対策にはおのずと限界があり、計画規模以上の外力に対してはソフト対策が不可欠となる。

災害時の避難には、危険の到来が予想される場合の事前避難、すでに危険が差し迫った場合にそれを回避するために一時的に行う避難、差し迫った危険が過ぎ、やや落ち着いた状況のもとで、より長時間にわたって行う避難があり、避難計画としてはそれらのすべてを考慮しておく必要がある。

洪水時の避難場所としては、その場所が安全でなければならないことはもちろんであるが、そこへ到達するまでのルートが安全であることも重要である。

氾濫シミュレーションや避難対策については、既に多くの研究<sup>1-5)</sup>がなされ様々な場で報告や利用がなされている。その多くは避難指示や勧告等を出す行政が利用することを目的としており、シミュレーションによる出力範囲も市町村単位など、広範囲を対象としたものになっている。近年、大部分の市町村では、これらの検討結果を元に洪水ハザードマップが作成され、住民に公開されているが、その多くは、想定した洪水における最大浸水深の分布と、比較的長時間退避するための広域避難場所を示したものであり、浸水深の時間変化やその避難場所にたどり着くための安全な避難ルートまでは示されていない。

したがって、住民にとっては、いつどこを通過して避難すればよいかの判断が難しく、避難の必要があるのに避難しなかったり、危険な避難行動をとって避難途上で被災する事例も見られる。

また、危険度は水深のみによって規定されるものではなく、流速によっても大きく変化する。流速が大きい場合には、たとえ水深が小さくても、危険度が大きく増すのである。

そこで、水深と流速の組み合わせによる危険度の変化をより明確にするとともに、いつどこにい

ればどの程度の危険度になるかを、氾濫シミュレーションによって予測し知らせることができれば、より適切な避難判断を促せる可能性がある。

本研究はこのような観点から、氾濫解析とリンクした危険度の時間変化を防災講習会などにおいて示し、場合によっては水平避難よりも垂直避難の方が望まれるなど、住民サイドで防災意識を高めることができるような、洪水時の避難判断情報の提供法について考察するものである。

## 2. 建物内での被災危険度について

洪水時に現在の居場所にとどまるか別の場所へ避難するかの判断材料としてまず必要なのは、その建物内に留まった場合の被災危険度であろう。

建物が堅牢で倒壊や流失をしないものとすれば、浸水面が床の高さに達しなければ一応は安全が保たれることになる。その意味で、浸水位の時間変化情報はきわめて有用である。

次に、建物の倒壊や流失の危険性に対しては、建物に作用する流体力と抵抗力の評価が重要である。そのいずれもが、流れに直角方向の建物幅に比例するものとすれば、肝心なのはその単位幅当たりの流体力と抵抗力である。抵抗力は建物構造によって異なるが、建物の分類ごとにある程度評価することができよう。単位幅当たりの流体力は、流速の2乗と水深の積に比例するので、その時間変化がわかれば、建物の倒壊あるいは流失危険度を評価できる可能性がある。

既往の研究<sup>6,7)</sup>では、

- ・家屋に作用する流体力は、 $1.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えると家屋に何らかの被害が発生し、 $2.5\text{m}^3/\text{s}^2$ を超えると居住不可能な家屋が出現する。
  - ・水害経験の無いような新しい住宅群は、比較的流体力の大きい地点に立地していることが多い。
  - ・家屋の配置によっては、氾濫水が初めに衝突する家屋よりもその後方の家屋の方が流体力は大きくなる場合がある。
- 等が明らかになっている。

### 3. 避難路での被災危険度について

浸水時における避難路での被災危険度について、大西等の研究<sup>8)</sup>では流速と水深の大きさを考慮した単位幅比力を用いた検討がなされ、その適応性が報告されている。本研究では、さらに避難者自身の体格や歩行速度をも考慮した新たな被災危険度指標について検討する。

すなわち、歩いて避難することを考えれば、1 m/s 程度の歩行速度が考えられ、流速がなくても、避難者と周囲の水との間にその程度の相対速度が生じて流体力が発生することになる。流れに向かって歩行する場合には、相対速度は流速  $v$  と歩行速度  $v_0$  の和になるから、いっそう大きな流体力を受けることになる。

この場合の流体力  $D$  は次式のように表すことができる。

$$D = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho_0 (v+v_0)^2 \cdot h \cdot b \quad (1)$$

ここに、 $C_D$  は抗力係数、 $\rho_0$  は水の密度、 $v$  は流速、 $v_0$  は歩行速度、 $h$  は水深、 $b$  は流れに面する人体の幅である。

一方、抵抗力を人体と地面との間の摩擦力  $F$  で評価すれば、次のように表すことができる。

$$F = \mu(\rho_m gV - \rho_0 gV_0) \quad (2)$$

ここに、 $\mu$  は摩擦係数、 $g$  は重力加速度、 $\rho_m$  は人体の密度、 $V$  は人体の体積、 $V_0$  はその内で水に浸かっている部分の体積である。

$V$  は人の身長  $L$  と幅  $b$  と厚さ  $t$  の積に比例し、 $V_0$  は水深  $h$  と幅  $b$  と厚さ  $t$  の積に比例するから、幅と厚さがともに身長に比例するものとすれば、 $V$  は  $L$  の 3 乗に比例し、 $V_0$  は  $L$  の 2 乗と  $h$  の積に比例することになる。

さらに、モーメントのバランスや心理的な作用なども考慮すれば、体力や経験なども関係するが、ここでは、式 (1) と式 (2) で表される流体力  $D$  と摩擦力  $F$  の比をもって歩行危険度指標  $I_c$  と定義することにする。

$$I_c = D/F \quad (3)$$

ここで、与えられた流速において  $I_c = 1$  となる

ときの水深を  $h_{cw}$  とすれば、歩行可能限界を次のように表すことができる。

$$(h_{cw}/L) / (\alpha \cdot h_{cw}/L) = (1/\beta) gL / (v+v_0)^2 \quad (4)$$

ここに、 $\alpha$  および  $\beta$  は係数である。

従来、国土交通省のガイドラインとして、洪水避難時に水中歩行できる領域を水深/身長比と流速の関係で示した図 1 が提示されている<sup>9)</sup>。平均的な成人男子を対象として身長を  $L = 1.7\text{m}$  と仮定し、式 (4) が図 1 に最もよく適合するように  $v_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  を求めると、 $v_0 = 0.7\text{m/s}$ 、 $\alpha = 1.1$ 、 $\beta = 10.4$  が得られる。

図 2 はここで得られた  $\alpha$ 、 $\beta$  を用いて、式 (1) ~ (4) から危険度  $I_c$  をパラメータとして、 $h/L$  と  $(v+v_0)/\sqrt{gL}$  の関係を示したものである。

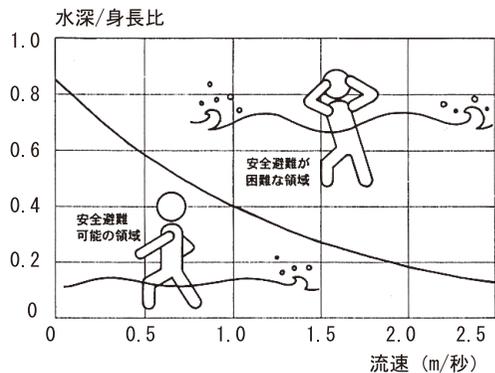


図 1 歩行可能限界

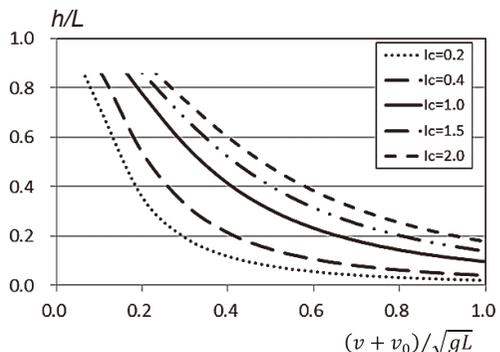


図 2  $h/L$  と  $(v+v_0)/\sqrt{gL}$  の組み合わせによる歩行避難危険度の等値線

なお、ここで示した危険度は流体力と摩擦力の比のみに着目したものであるが、水深が首の高さを越えるような場合には呼吸ができなくなるため、当然歩行は不可能となる。

また、体力や経験の少ない人、あるいは夜間や路面の凹凸などによって条件が悪化する場合には歩行可能限界水深はさらに低下し、危険度が増すであろう。

#### 4. 降雨情報を用いた氾濫解析について

降雨情報から流域の氾濫予測を行うためには、流出解析と氾濫解析を合わせて行う必要がある。その際、堤防の決壊や土砂堆積、流木による河道の閉塞など、複雑な現象が混在することが考えられるが、広域の危険度をより早く推定するには、上記の偶発的で複雑な現象を考慮せずに迅速な予測を行うことが重要である。そこで、本研究では、そのような予測解析の行えるシミュレータとして、DioVISTA<sup>10)</sup>を用いることにした。このシミュレータは、50mメッシュの地形データから落水線を自動作成し、擬河道網に沿った雨水の流れをKinematic Waveモデルを用いてシミュレーションするもので、土地利用が山地であるセルについては、3層モデルを使用している。河道については、一次元不定流計算によってメッシュごとの水位・流量の時間変化が計算され、堤内地については、二次元不定流方程式に基づいた氾濫解析が行えるようになっている。その際、河川堤防のある区間で破堤条件を与えることもできるようになっている。氾濫メッシュサイズは標準的には50mであるが、解析範囲が狭い場合には、10mメッシュにすることも可能である。解析結果の表示としては、各時刻における水深分布の色分け表示、および水深と流速を組み合わせた歩行危険度の色分け表示が可能となっている。

後述の兵庫県佐用町を対象としたシミュレーションでは、2009年台風9号における実績の降雨データを用いて計算を行っているが、これを時々刻々の降雨予測データを用いて行えば、リアルタイムでの氾濫予測につながれる可能性がある。

また、実績の降雨データを引き伸ばした仮想の

降雨データを与えることにより、計画規模を上回る降雨条件での氾濫状況をシミュレートし、避難計画の検討や、住民の意識改革に役立てられる可能性がある。

#### 5. 氾濫解析とリンクした避難判断支援情報の提供について

氾濫解析によって各場所の水深および流速の時間変化が予測できた場合、それをどのように避難行動に活かすかが問題となる。危険の到来をある程度の余裕をもって事前に把握することができれば、避難行動に結びつけやすいが、危険が差し迫ってからそれを把握できても、避難しようとするればかえって危険にさらされることもあり得る。また、情報を早く出し過ぎると、余計な不安をかきたてたり、繰り返しの避難喚起は慣れを招き、かえって行動を喚起しにくくなることも考えられる。どのような情報の伝達手段が効果的であるかについてもよく考えておく必要がある。

たとえば、リアルタイムの氾濫予測解析となれば、誰でもができるわけではないので、行政担当者や専門家が解析を行うことになろうが、そこで得られた解析結果の情報をどのような形で、誰に伝えるのが効果的であろうか。先に述べたDioVISTAでは、水深と危険度の分布図をコンピュータの画面上にほぼリアルタイムで表示することは可能であるが、住民の一人ひとりがそれをモニタリングすることは困難であろう。また、個々の住民は、市域全体のことよりは、自分の周辺の避難地や避難路のことが主な関心事であり、ローカルでよいから詳細な情報を必要としている。一方、行政は、個々の詳細な情報もさることながら、市域全体での情報を把握し、公平な立場で対応する必要がある。その意味で、どのような情報を取りだすかは、発信者側でなく、受信者側が選択できるのが有効であるかもしれない。しかし、災害時においては、受信側が混乱状態に陥っていることが想定され、冷静な対応すら困難なことがある。そのような中での情報は、極力シンプルでわかりやすいものでなければならぬであろう。

そこで有用と考えられるのが、災害時の状況を模擬した、平常時における訓練である。すなわち、こういう場合にはこのような氾濫状況になるというシミュレーション結果を、平常時に住民に見てもらい、どのようなときにどのような行動を取るのがよいかを判断してもらい、洪水時に役立ててもらえるとよいであろう。

従来提供されているハザードマップもそういう趣旨で作られたものであろうが、最大浸水深のように情報が静的であることから、十分に活用されていないように思われる。

これが、浸水深の時間変化という形で表示されれば、いつ、どこへ避難するのが適切であるかの判断材料として役立つであろう。

ただし、現在のところ、このようなシミュレータで模擬できるのは、比較的狭い領域でも10mメッシュ程度の分解能であり、幅が1m程度の水路や側溝などを含めた解析は難しい。特に、夜間などは、現地においてもその存在の確認が難しく、普段から、きめ細かな状況を把握しておくことが必要である。そのようなことは行政で行うことは難しく、手法の提示はできても、その実践は地域住民が自ら進めることが必要である。

## 6. 事例研究としての佐用川への適用について

2009年8月に発生した台風9号によって、兵庫県最西端に位置する佐用町では、過去最高を記録する、最大時間雨量89mm、最大24時間雨量326.5mmの降雨が発生<sup>11)</sup>し、それによる佐用川の氾濫によって多くの地区が浸水した。また、豪雨による急激な河川水位の上昇により、避難が遅れ、家屋に取り残される人や避難所に向かう途中で氾濫した流れに流される等の被害が発生し、死者・行方不明者20名<sup>12)</sup>に及ぶ甚大な被害が発生した。

著者らは、2011年度と2012年度に現地の復興状況を調査するとともに、前述の氾濫解析ソフトDioVISTAを用いたシミュレーションを行い、よりよい避難のありかたについて検討した。

解析範囲は、図3に示す久崎地区の千種川合流

点より上流の佐用川本川と各支流とした。河道データが入手できた石井地区までの佐用川本川には河川測量データを与え、石井地区より上流及び支流には地盤データから作成した簡易河道とした。降雨条件は、「レーダーアメダス解析雨量2009年」による1kmメッシュごとで30分単位の実績降雨データ（最大日雨量280mm）、ならびにその強度のみを1.7倍引き伸ばしたもの（最大日雨量486mm）を用いた。降雨エリアは北緯34度42分47秒、東経134度10分30秒から北緯35度13分52秒、東経134度43分48秒までの範囲として、シミュレーション時間は2009年8月9日0時から8月10日12時までの36時間とした。日雨量486mmは、この地域においては過去に例がなく、過大な想定であるようにも思えるが、最近の全国における豪

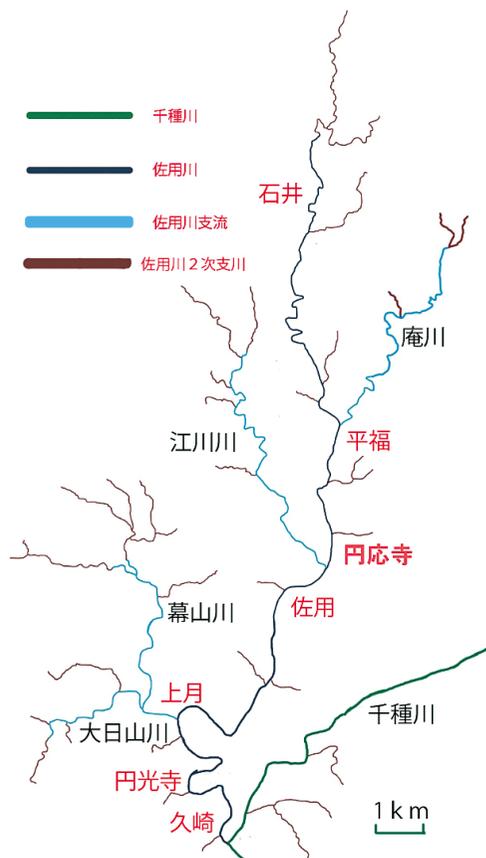


図3 佐用川水系図

雨の状況が鑑みれば、必ずしも過大とは言えないであろう。

解析のメッシュサイズは全域に対しては50mとしたが、円応寺集落付近については、10mメッシュでさらに詳細な検討を行った。詳細な解析対象として円応寺地区を選んだのは、佐用町役場でのヒアリングの結果、円応寺地区では住民の防災意識が特に高く、詳細な情報提供の効果を検証しやすいと期待されたからである。また、この近くにある佐用高校の教諭が、生徒たちに防災訓練や防災説明会に参加してもらい、やがては地域のリーダーになってほしいと話しておられるとのことであった。

図4<sup>13)</sup>は、円応寺集落付近における台風9号の実績降雨に対する各場所での最大浸水深の解析結果と兵庫県が公開している実績浸水区域図を比較したものである。これによると、浸水エリアについては両者で概ね一致している。

図5は、台風9号の1.7倍の降雨における各時刻の浸水深とその際の歩行危険度の時間変化を2時間ごとに示したものである。ただし、歩行危険度は水深や流速が同じでも、避難者の身長によって異なるため、ここでは成人男子の平均的な身長

である1.7mを用いて、式(3)に基づいて危険度を算出した。図中、黄色の中央部分を危険度約0.4、赤色部分を危険度1以上、青色部分を危険度0.2以下に対応させ、その途中の危険度に対してはグラデーションをかけている。すなわち、青色部分は安全な水平避難が可能、青色部分から赤色部分に向かってはしだいに水平避難が困難、赤色部分では水平避難が不可能であることを示している。

まず、台風9号による実績降雨の場合(図4)、円応寺地区の周辺では、若干の浸水は見られるものの、浸水深は40cm以下とさほど大きくなく、必ずしも避難が必要というほどのレベルではない。しかし、その1.7倍の降雨があった場合(図5)には、19時40分の時点では浸水深が40cm以下であるが、21時40分には浸水深が1mにも達し、何らかの避難が必要となる。

この地域のハザードマップによれば、この地域から最寄りの広域避難場所としては、対岸の佐用町子育て支援センターが指定されており、この場所は浸水予想範囲から外れていることから、早期避難をしていれば、安全な避難場所として推奨されよう。しかし、解析結果によれば、21時40分に

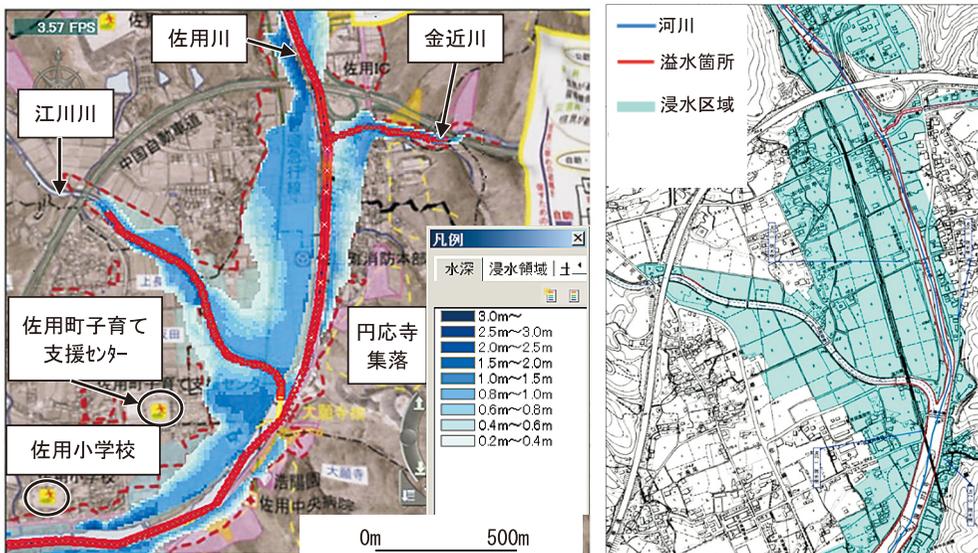
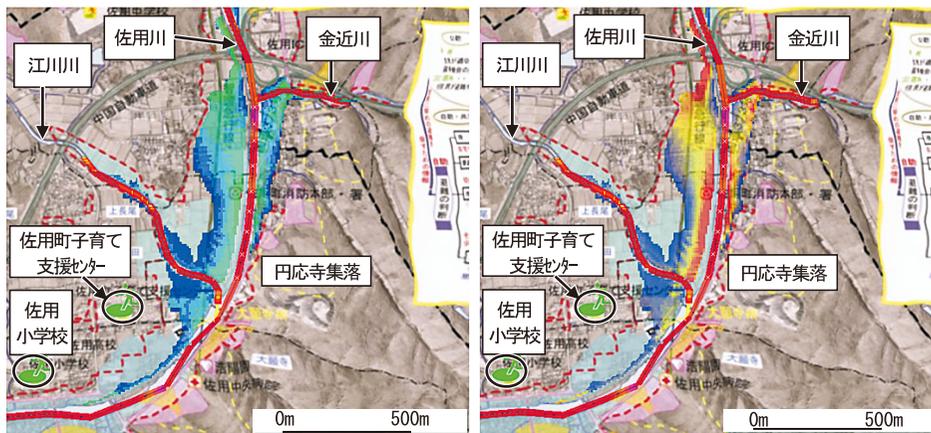
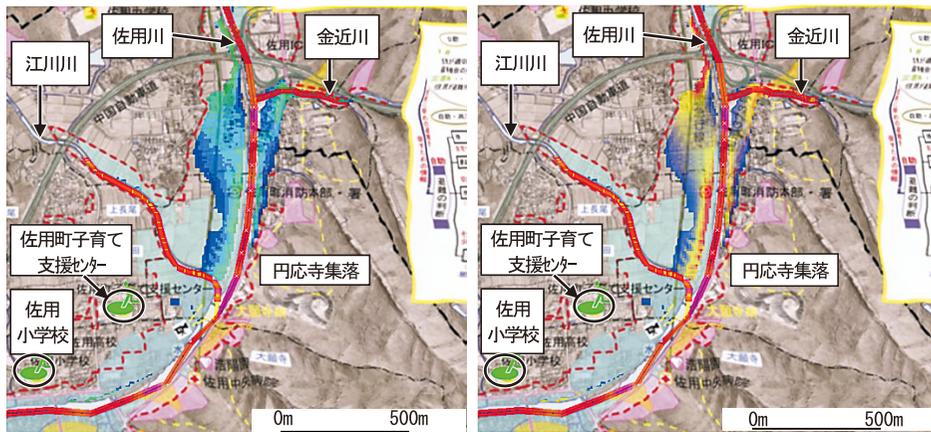


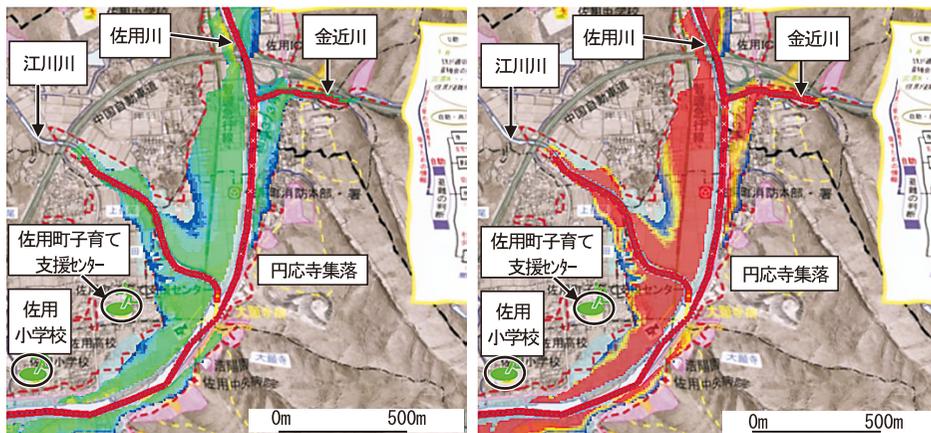
図4 円応寺付近の氾濫解析結果に基づく最大浸水深分布(左)と実績浸水区域図(右)の比較



17時40分 (左：浸水深，右：歩行危険度)

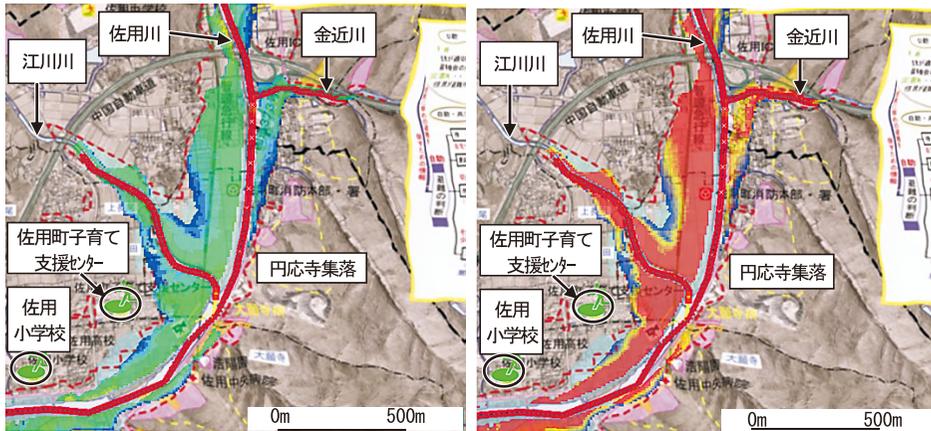


19時40分 (左：浸水深，右：歩行危険度)

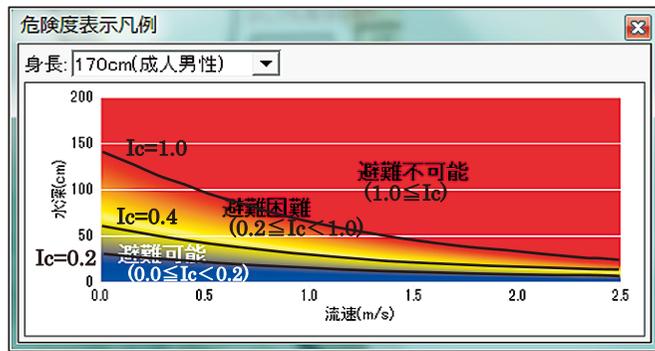
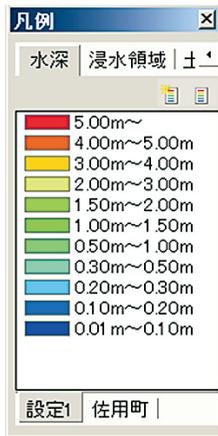


21時40分 (左：浸水深，右：歩行危険度)

図5 円応寺地区における浸水深(左)と歩行危険度(右)分布の時間変化に関するビジュアル表示



23時40分 (左：浸水深, 右：歩行危険度)



凡例の拡大図 (左：浸水深, 右：歩行危険度)

図5 続き

は円応寺地区と子育て支援センターの間に、浸水深が1mを越えるような浸水域が広がっており、もはやここへ避難することはかえって危険であろう。このような事態に至った場合の一時的な避難場所としては、むしろ、円応寺集落内で2階などに一時避難の方が安全であろう。しかし、一時避難場所では救援物資の配給が期待できず、災害情報の入手も難しい。したがって、本来は、このような事態に至るまでに、より安全な避難場所へ移動するのが望ましいことは言うまでもない。

このように浸水深や歩行危険度の時間変化をビジュアルに把握できるハザードマップを用いて、

いつどのようなルートで避難するのがより安全であるかを防災講習会等において示すことは、住民の防災意識を高める上で大きな効果があるものと考えられる。動画を用いれば、さらにその効果を高めることができるであろう。今後、円応寺地区を対象として、そのような説明会を開き、より高度な防災計画の立案に役立つことが期待できる。そして、そのような手法の有効性が確認され、それをさらに他地域にも普及・展開させることができると望まれる。

## 7. 結論

以上、本研究では2009年に水害が発生した兵庫県佐用町を事例として、氾濫解析とリンクした洪水時の避難情報の提供のあり方について考察を行った。得られた結果を要約して結論とする。

災害時の避難には、当面の差し迫った危険を回避するために一時的に行う避難と、やや落ち着いた状況のもとで、より長時間にわたって行う避難があり、避難計画としてはその両方を考えておく必要がある。

洪水時の一時的な避難においては、安全な避難場所の確保とともに、安全な避難経路の確保が不可欠である。徒歩による避難を想定した場合、水深と流速の組み合わせによって歩行が困難となる度合いを、人体に作用する流体力と地面との摩擦力の比によって定量的に表すことを提案し、水深、身長、流速、歩行速度の組み合わせによる歩行避難危険度の等値線図を作成した。

氾濫解析ソフト DioVISTA を用いて、兵庫県佐用町を例に降雨データと地形データから洪水時の氾濫状況の時間変化を精度よく解析し、浸水深ならびに歩行危険度の時間空間分布をビジュアルに表示することを試みた。その解析結果から、どのような時にどのようなルートで避難するのが適切であるかを判断できることを示した。

しかし、この解析は現地の大まかな地形に基づくものであり、さらに詳細な状況を反映したものにするためには、地域の方々自身による情報の導入や、シミュレーション結果を見ながらの模擬避難訓練などを通じて、意識改革を図ることが重要である。

## 謝辞

本研究の一部は平成23年度近畿建設協会研究助成「防災リテラシーの視点での、洪水氾濫シミュレーション技術活用の研究－ハザード情報の「わかりやすさ」をめざして－(代表者 瀬良昌憲)」ならびに平成24年度河川整備基金「住民防災力の視点でのハザードマップの利活用に関する調査研究(代表者 澤井健二)」の助成を受けて実施したものである。佐用川の災害資料については、兵庫県

ならびに佐用町から提供いただいた。また、氾濫解析には(株)日立パワーソリューションズの手を煩わせた。記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 片田敏孝・桑沢敬行・信田 智・小島 優：大都市大規模水害を対象とした避難対策に関するシナリオ分析，土木学会論文集B1(水工学)，Vol.69, No.1, pp.71-82, 2013.
- 2) 桑沢敬行・片田敏孝・及川 康・児玉 真：洪水を対象とした災害総合シナリオ シミュレータの開発とその防災教育への適用，土木学会論文集D, Vol.64, No.3, pp.354-366, 2008.
- 3) 高橋 保・中川 一・東山 基：洪水氾濫水の動態を考慮した避難システムの評価に関する研究，京都大学防災研究所年報，32, B-2, pp.757-780, 1989.
- 4) 飯田進史・館健一郎・武富一秀・川本一喜・金本 誠・平川了治・谷岡 康：水害時の避難解析システムの構築と危機管理対応支援への適用性検討，河川技術論文集，8, pp.139-144, 2002.
- 5) 坂井広正・深草 新・原田翔太・田中耕司・井辻英雄・酒井伸一：避難行動を支援するための洪水氾濫予測システムの設計と構築，安全問題研究論文集，Vol.5, 34, 2010.
- 6) 佐藤 智・今村文彦・首藤伸夫：洪水氾濫の数値計算および家屋被害について－8610号台風による吉田川の場合－，水理講演会論文集，33, pp.331-336, 1989.
- 7) 高橋 保・中川 一・加納茂紀：洪水氾濫による家屋流失の危険度評価，京都大学防災研究所年報，第28号，B-2, pp.455-470, 1985.
- 8) 大西良純・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：地下空間浸水時における避難困難度指標とその適用，水工学論文集，52, pp.841-846, 2008.
- 9) 国土交通省水管理・保全局：洪水ハザードマップ作成の手引き(改訂版)44p., 2013.3  
[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/jigyو\\_keikaku/saigai/tisiki/hazardmap/pdf/hm\\_kaitei.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyو_keikaku/saigai/tisiki/hazardmap/pdf/hm_kaitei.pdf), 2013年13日
- 10) (株)日立パワーソリューションズ：DioVISTA,  
[http://www.hitachi-power-solutions.com/products/product03/p03\\_08.html](http://www.hitachi-power-solutions.com/products/product03/p03_08.html), 2013年11月13日
- 11) 気象庁：災害時自然現象報告書2009年第2号，pp.13-15, 2009. [http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigai/saigai\\_200902.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigai/saigai_200902.pdf), 2013年11月9日

- 12) 佐用町台風第9号災害検証委員会：台風第9号災害検証報告書. 21 p., 2010.  
[http://www.town.sayo.lg.jp/cms-sypher/open\\_imgs/info/0000002342.pdf](http://www.town.sayo.lg.jp/cms-sypher/open_imgs/info/0000002342.pdf), 2013年11月13日
- 13) 兵庫県：平成21年8月台風9号による千種川水系浸水区域図, <http://web.pref.hyogo.lg.jp/wd15/documents/000141919.pdf>, 2013年11月9日

(投稿受理：平成25年11月19日  
訂正稿受理：平成26年2月18日)