

# 平成21年8月兵庫県佐用町河川災害における 氾濫解析と避難行動判断基準に関する研究

## INUNDATION ANALYSIS OF APRIL 2009 DISASTER IN SAYO-CHO HYOGO PREFECTURE AND CRITERIA FOR EVACUATION BEHAVIOR

藤田一郎<sup>1</sup>・伊藤崇博<sup>2</sup>  
Ichiro FUJITA, Takahiro ITO

<sup>1</sup>正会員 学術博 神戸大学大学院教授 工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

<sup>2</sup>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)

The intensive rain induced by the Typhoon No.9 flooded the river basins of the Chikusa River and the Sayo River in Hyogo Prefecture on August 9, 2009. Especially, inundation disasters occurred in Sayo-cho caused huge damages in many areas of the town. The disaster includes eighteen loss of life and two missing people, many of whom were trying to evacuate from the area where inundated water level rises. In Kuzaki district, most of the area was flooded due to a levee breach occurred along the Sayo River but with no casualties. On the other hand, in Makuyama district, the upstream of Kuzaki, there were more than eight casualties while evacuation. To examine the difference of the two cases, we performed detailed inundation simulations using Laser Profiler (LP) data with the highest resolution of 1m. Several criteria for walking difficulty proposed so far as well as drag force acting on a person were compared using the simulated data.

**Key Words :** *Inundation, evacuation, flood, 2D simulation, drag force, walking difficulty*

### 1. まえがき

平成21年8月8日に日本の南海上で熱帯性低気圧として発生した台風第9号は、本土への接近とともに湿った空気を日本列島にもたらし、その影響で8月8日から11日にかけて西日本から東日本、東北地方にわたる広い範囲において大雨が発生し、各地で甚大な災害が発生した。このうち、特に8月9日から10日にかけて発生した豪雨は、兵庫県内播磨北西部から但馬南部にかけて記録的な大雨をもたらし、佐用町を含む兵庫県北西部では、洪水氾濫がけ崩れ、橋脚の流失などに加えて死者18名、行方不明者2名を出すという大惨事が発生した。このなかでも、千種川と佐用川にはさまれた久崎地区では堤防が半壊し、地区全域が浸水するに至ったが、死者を出すには至らなかったのに対し、上流の幕山川では避難途中で洪水流に巻き込まれて多数の死者を出す結果となった。本研究では、この2地点に関する詳細な氾濫解析を行うとともに、避難行動の困難度に関する様々な指標による避難困難度

分布を求め、各指標の特徴を明らかにする。また、このような被災の違いを生じさせた避難判断の要因を明らかにすることを目的とする。

### 2. 降雨の概要

今回の災害では、各地で記録的な降雨が観測され、これまでの観測記録が大幅に塗り替えられる地域も出た。24時間降水量については、兵庫県佐用町で過去最大の187mmの1.75倍に相当する327mmという豪雨、岡山県美作では過去の記録の1.08倍の大雨が発生している。佐用町を流れる千種川の河川整備基本方針では265mmの降雨が想定されていたが、今回の豪雨ではその値の1.23倍の降雨が発生したことになる。佐用町では1時間降水量についても過去最大の1.56倍の87mmという降水量があり、大幅な記録更新となった。兵庫県佐用町で特に降水量が多かった要因としては、大量の水蒸気を含んだ空気が紀伊半島を北西に通過し、それが中国山地にぶつかって雨雲

が発達したことが考えられる。佐用町に降雨が集中したことは図-1に示した24時間雨量の分布<sup>1)</sup>からも明らかである。すなわち、雨域は大気の移動に伴って西から東へその場所を移動することなく、佐用町周辺に停滞した結果、今回の記録的な豪雨をもたらしたものと考えられる。図-1からもわかるように、本研究で対象とした場所はピーク降水量が発生した地点に近接しているかもしくはその下流域であり、豪雨の影響を強く受けた地域であった。

### 3. 氾濫解析モデル

千種川流域の地形データは、災害後、航空レーザによる計測が近畿地方整備局によって広範囲に行われた。ここでは、久崎地区で得られた2m間隔、幕山川流域で得られた1m間隔のデータ(LPデータ)を氾濫解析の地形データとして用いた。久崎地区の解析では、直交座標系モデルを用い、千種川と佐用川の合流点の佐用川上流左岸の堤防が約100mに渡って破損したため、堤防高の欠損分(約50cm)を予め考慮した。解析領域は合流後の河道区間を含んだ1.3×2.2kmである。境界条件としては合流する各河川の流量ハイドログラフおよび水位流量曲線から得られる水位を計算領域下流端で与え、流量の増大によっては堤防破損箇所から久崎地区内へ流入する状況を求めた。河道流と氾濫流の区別は行っていない。一方、幕山川の解析においては、非構造格子モデルを用い、解析領域の上流端から流出解析によって推定された流量ハイドログラフを与えた。メッシュサイズは、5mから0.5mの間で変化させた。被災地点付近では密なメッシュを内挿してメッシュを作成して解析を行った。解析領域は、およそ3.0×0.5kmの範囲である。

### 4. 避難困難度に関する考察

#### (1) 歩行限界に関するパラメータの種類

災害時の避難行動に関する研究は、これまで地震や津波あるいは火災発生時の避難行動だけでなく<sup>2-5)</sup>、洪水時の避難に関しても数多く行われてきている<sup>6-18)</sup>。避難行動解析において共通に考慮されている点は、時間経過とともに蓄積する疲労や避難者の混雑によって歩行速度が低下することなどである。一般的には、歩行速度は大人で1.4m/s(時速約5km)程度とされている。避難行動の再現には、ネットワークモデル、ポテンシャルモデルあるいはマルチエージェントモデルなどが用いられている。ただ、洪水時の避難行動に決定的な影響を及ぼすのは浸水した水の挙動であり、歩行困難度としてモデルに組み込まれている場合が多い。

浸水した水が歩行を困難にするパラメータとしては、

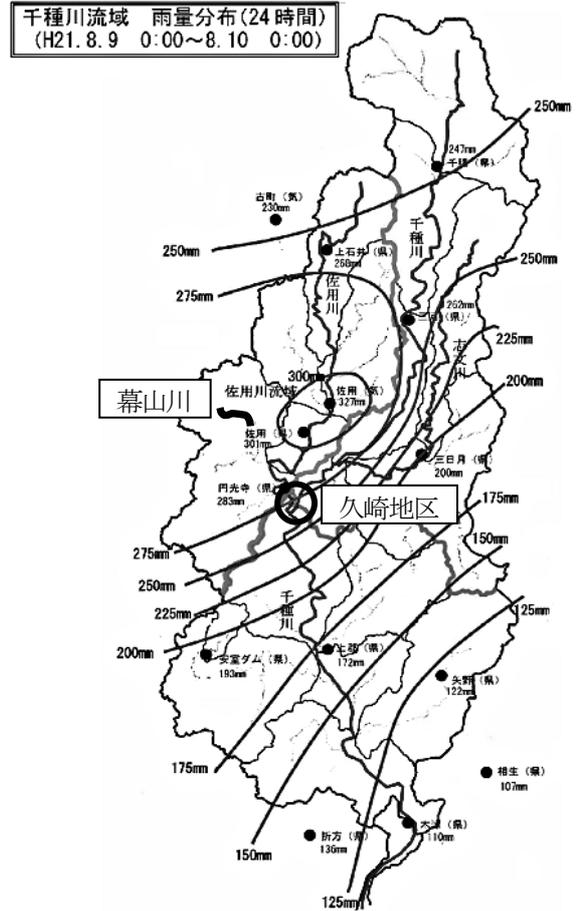


図-1 千種川流域の雨量分布と久崎地区、幕山川の位置

表-1 歩行困難度<sup>13)</sup>

浸水深(m) 流速(m/sec)	浸水深(m)		
	$H < 0.5$	$0.5 \leq H < 1.0$	$1.0 \leq H$
$V < 0.5$	可能	可能	困難
$0.5 \leq V < 1.5$	可能	困難	不可能
$1.5 \leq V$	困難	不可能	不可能

次のようなものが提案されている。

- a) 水深のみ<sup>6,11)</sup>
- b) 水深と流速(段階的)<sup>12)</sup>
- c) 水深と流速(連続的)<sup>14,15)</sup>
- d) 単位幅比力<sup>16)</sup>

このうち、a)に関しては、伊勢湾台風時の避難の経験に基づいて70cmと設定されることが多いが、30cmや1mを限界値としている研究も見られる。b)については、表-1に示されるような流速も考慮する基準が提案されている。c)については、限界浸水深( $h_{crit}$ )と流速( $u$ )の関係が図示されたものが提示されているが、近似曲線は次式のようなになる。単位は(m,s)である。

$$h_{crit} = 0.83 \exp(-0.71u) \quad (1)$$

浸水深が、この限界値を上回ると安全な避難が困難になるとされている。最後に、d)の単位幅比力は、

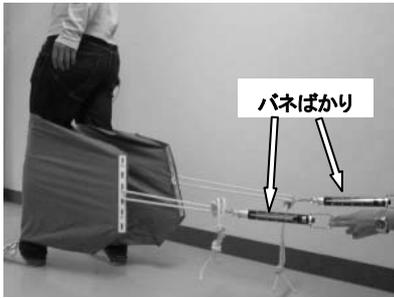


図-2 簡易流体力疑似体験キット

$$M = \frac{h^2}{2} + \frac{u^2 h}{g} \quad (2)$$

で定義されるが、石垣<sup>17)</sup>はこの値が0.125(m<sup>2</sup>)を上回ると避難が困難になるとした。式(1)と比較しやすくするために、式(2)を変形すると次式のようになる。

$$h_{crit} = -\frac{u^2}{g} + \left( \frac{u^4}{g^2} + 2M \right)^{1/2} \quad (3)$$

一方、歩行困難度の別の指標として考えられるのは、人の体に直接作用する抗力としての流体力である。簡単のために脚を2本の円柱と見なし、直径を $d$ とおけば、流体力(抗力) $F_D$ は

$$F_D = C_D \rho d h u^2 \quad (4)$$

で与えられる。 $C_D$ は抗力係数(≒1.0)、 $\rho$ は水の密度、 $h$ は浸水深、 $u$ は接近流速である。流体力については、どの程度の値が歩行の限界値に相当するのか不明だが、筆者らは簡易な流体力疑似体験キットを試作し、都賀川水難事故に関する市民向けのシンポジウムで年代別のデータを得ている。図-2にキットの概要を示す。筒状にした布地を平アングルで挟み込んで止め、ロープでフルスケール50kgfのバネばかりと連結させただけのものである。これを2セット作成し、各筒の中に脚を入れた状態でバネばかりを引っ張れば、脚全体に均等に力がかかり、流体による抗力を疑似体験できると考えた。浸水深は、布地を適宜折り曲げることによって調整できる。図-2は、浸水深70cm程度の抗力を体験中の様子である。シンポジウムの試みでは、膝上までの浸水深を想定して布地の高さを調整し、自然立位状態でどの程度の力まで耐えられるか、また、体を前傾させて抵抗した状態ではどの程度が限界かを調べ、年代別、男女別にまとめた。サンプル数は20である。結果は表-2に示すように、自然立位の状態では200N、抵抗限界の状態では300N程度であった。ちなみに、200Nという値は、二脚幅(2d)30cm、流速2m/sとすると水深約30cmで体験するはずの流体力である。水深からみれば歩行可能とも思えるが、実際には一歩も歩くことができない力が作用しており、実際の避難行動はこれよりも小さな流体力でなければとることができない。すなわち、洪水中の避難行動を考えるには、浸水深だけ

表-2 歩行限界力の調査結果 (単位: N)

	男性	女性	10代	20代	30代	40代	50代	60代
立位限界	214	196	147	172	221	245	233	196
抵抗限界	325	302	245	331	319	358	307	319

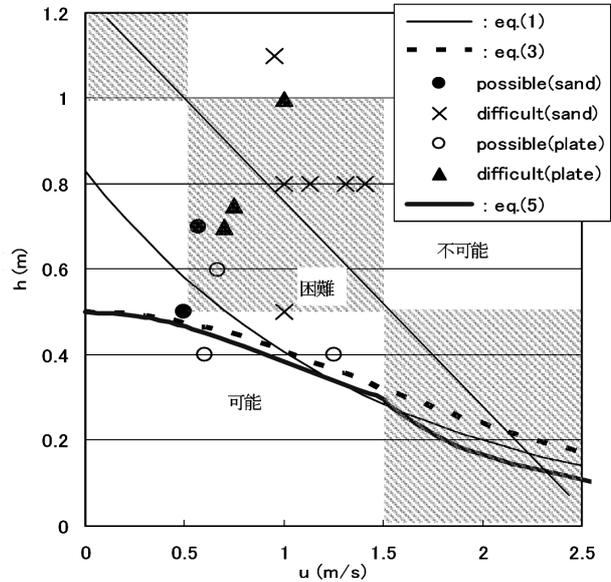


図-3 歩行困難度パラメータの比較

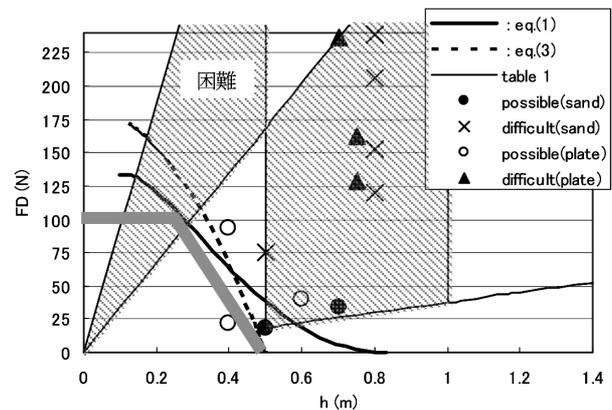


図-4 流体力から見た比較

ではなく正確な流速値も重要なパラメータでなければならない。

## (2) 歩行限界パラメータの比較

これまで、提示してきたパラメータを図-3に比較した。利根川研究会の式(1)と単位幅比力の式(3)は水深40cm以下では良く似た分布を示しているが、それ以上の水深ではズレが生じている。流速ゼロに対する水深は式(1)が83cm、式(3)が50cmとなる。水深のみを基準と考えた場合の70cmはこの間に入るが、式(3)はこの基準を満たさず、式(1)もわずかな流速の増大で基準から外れる。この点から、水深70cmという基準は一般的に使うには問題

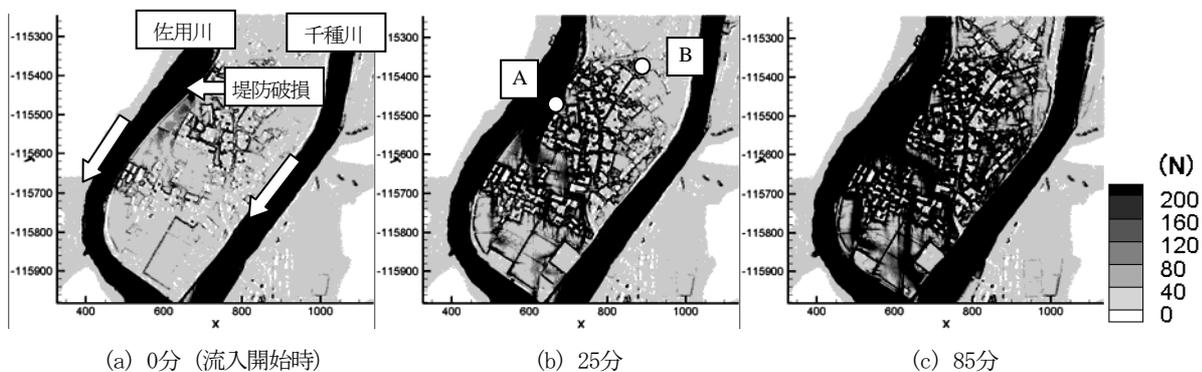


図-5 久崎地区の流体力分布の時間変化(縦横軸の単位はm)

があると思われる。表-1の基準は「困難」と「不可能」の区別がつきにくい、「困難」の中心を結んだ灰色の実線は式(1)や式(3)よりも危険側の設定、「可能」の範囲は流速1.5m/s以下では全体的に危険側の設定となっている。図中には、須賀ら<sup>18)</sup>による水中歩行実験のうち、砂と鉄板上を歩行した際のデータをプロットした。黒丸は「少し歩きにくい」、×印は「歩きにくい」から「とても歩きにくい」と判定されたデータである。作成された各基準はこの貴重なデータを参考にしていると思われることもあってか、各基準はデータを概ね良好に識別しているが、低水深の高速域のデータは取得されていない。

以上の基準を単純化した式(4)の流体力から評価したのが図-4である。式(1)と式(3)は水深変化に対して類似した流体力の変化を示すが、水深が約30cm以下で100Nを上回る領域が生じている点、単位幅比力基準では水深20cmで150N以上の抗力が作用する点が懸念される。表-1に関しては「可能」の上限値をプロットしたが、上限の水深50cm、流速1.5m/sでは抗力が170N近いことが注意すべき点である。水深が増大すると浮力の影響が無視できなくなり、歩行を困難にする流体力は相対的に低下するはずだが、ここでは式(4)を用いて須賀ら<sup>17)</sup>のデータもプロットしてみた。100N以上のデータが概ね歩行困難に相当することがわかる。ゲリラ豪雨などでは低水深、高流速に遭遇することがあるため、この範囲においても抗力の最大値が100N程度となるように上限を追加すべきではないかと考える。

そこで、安全側を考えて図-4の太灰色で示した折れ線すなわち、単位をNとして

$$F_D = \begin{cases} 100 & \text{for } h < h_0 \\ \frac{100(h_{\max} - h)}{(h_{\max} - h_0)} & \text{for } h_0 \leq h < h_{\max} \\ 0 & \text{for } h \geq h_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

を流体力( $F_D$ )による歩行可能基準としてみる。図-4では、 $h_0=0.3\text{m}$ 、 $h_{\max}=0.5\text{m}$ とした。この関係を浸水深と流速の関係としてプロットしたのが、図-3の $F_D$ の曲線である。単位幅比力の曲線とほぼ同様の傾向を示すが、低水深の高速流において流体力に上限を設けているため、その部

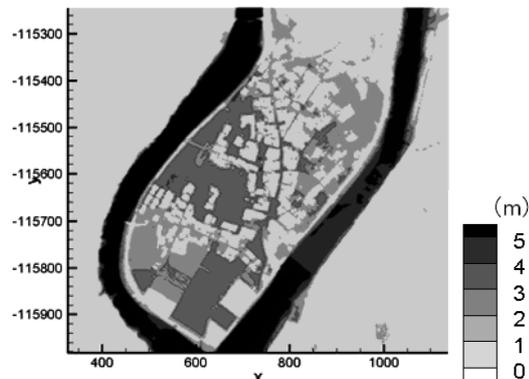


図-6 水深分布 (85分)

分では他の基準よりも安全側となっている。

## 5. 氾濫解析による歩行困難度の評価

### (1) 久崎地区の氾濫解析

この地区の氾濫は、前述のように佐用川左岸における堤防破損箇所からの洪水流の流入によってもたらされた。氾濫流の時間変化を流体力の広がりとして示したのが図-5である。流体力が100Nを上回る範囲が25分という短時間に破損箇所から広がり、85分後には全域に及んでいる。避難を困難とする流況が短時間に発生したことが見て取れる。図-6は、85分後の水深分布を示したものであり、合流点に向かう下りの地形勾配のために下流域ほど水深が増大し、2m近くまで達している様子がわかる。合流点近くで流体力の低下が見られるのは85分後の氾濫水は湛水状態に近くなり流速が低下したためである。

この地域は、これまでにもたびたび洪水被害を受けており、その記憶も新しいことから、洪水に対する心構えは他の地域よりは進んでいたと言える。ただ、これまで下流の合流点からの逆流による氾濫は経験していたが、今回は未経験の堤防破損が発生したために、これまでの経験だけでは対応しきれなかった面がある。その中でも迅速に避難所に向かったり、二階に避難したりするなどの有効な避難行動も見られた。ただ、そのような中でも

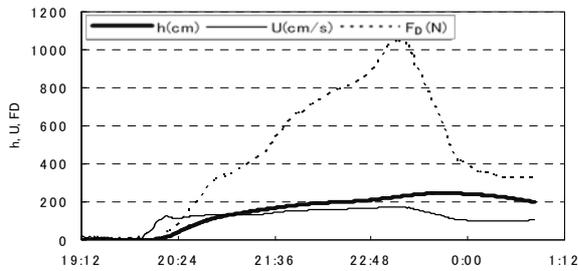


図-7 水深、流速、流体力の時間変化 (点A)

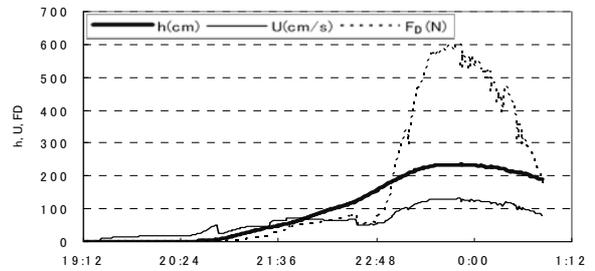


図-8 水深、流速、流体力の時間変化 (点B)

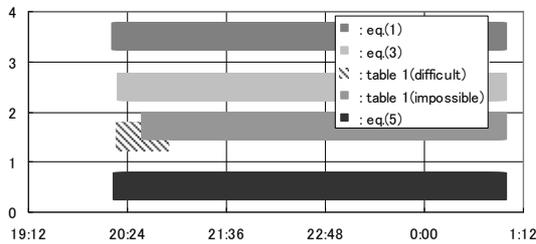


図-9 歩行困難となる時間帯の各基準の比較 (点A)

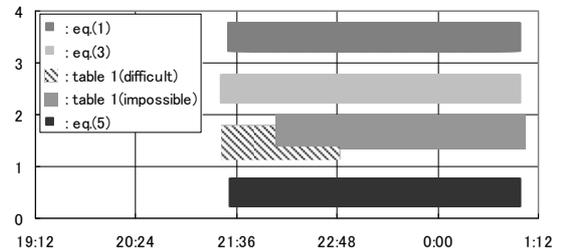


図-10 歩行困難となる時間帯の各基準の比較 (点B)

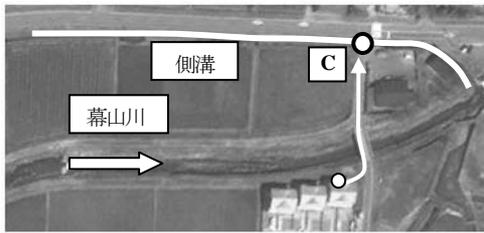


図-11 被災地点付近の様子

逃げ遅れて電柱に避難した人(図-5の地点A)や浸水深30cm程度の中を無事に避難できた人(図-5の地点B)などがいた<sup>18)</sup>。これらの各点における水深、流速と流体力の時間変化を示したのが図-7と図-8である。地点Aと地点Bを比較すると、地点Aでは越水の影響が強いため急激に水位が上昇しているのに対し、地点Bでは相対的に緩やかな水位上昇が生じている。そのため、地点Aでは避難する余裕がなかったのに対し、地点Bでは避難所まで避難する時間的余裕が生まれたと思われる。

また、4. で比較した歩行困難度パラメータで歩行困難あるいは歩行不可能と判定される時間帯を図-9と図-10に比較した。若干の違いは見られるが、どの基準でも概ね同様な時刻で歩行困難と判定されることがわかる。地点A, Bを比較すると、地点Bに約1時間の時間的余裕があることが明確にわかる。

## (2) 幕山川の氾濫解析

この地区は、集中豪雨により河川の増水、溢水が生じ、避難場所への避難中に被災するという痛ましい事故が発生した。事故が発生した付近の航空写真を図-11に示す。矢印が推定避難ルートであり、被災は地点Cの側溝を渡る橋の付近と報道されている。そこで、氾濫解析ではこの付近のメッシュを0.5mまで細かく内挿補間し、ぎりぎ

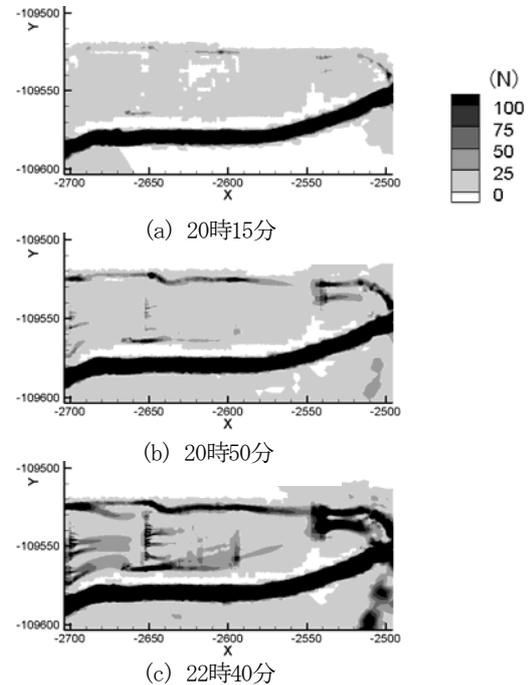


図-12 幕山川における流体力分布の時間変化

り側溝が解像されるようにした。図-12に流体力の時間変化の解析結果を示す。側溝の値が時間とともに増大し、被災地点付近で大きな値となっていることがわかる。被災地点付近の地点Cにおける水深などの時間変化を図-13に示す。今回の解析では、午後8時頃から急激に流速や水位が増大している。歩行が困難となる時間帯を図-14に示すが、避難が困難な状態が夜間に5時間程度続いたことが推定される。実測データがないため定量的な比較は難しいが、氾濫流の様子は概ね再現できたのではないかと考えている。

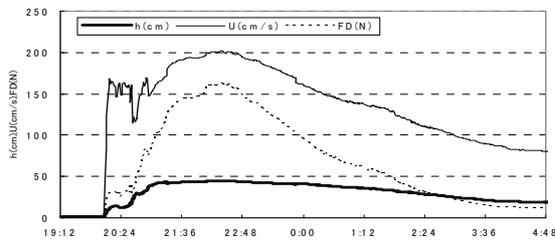


図-13 水深，流速，流体力の時間変化（点C）

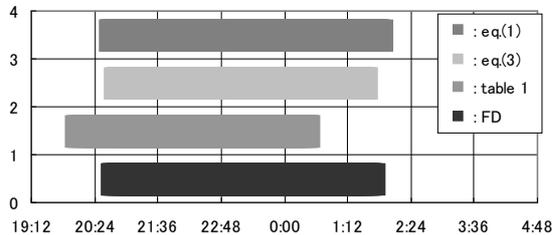


図-14 歩行困難となる時間帯の各基準の比較（点C）

## 6. あとがき

本研究では，洪水時の避難行動に関してこれまで提案されている歩行限界パラメータを比較し，その特徴を整理するとともに，歩行時に人体に作用する流体力に基づく新たな基準を提案した．この基準の特徴は許容最大流体力を100Nとした点である．この値は，流体力の疑似体験キットによるデータ収集からわかった限界値の5割に相当している．ここで紹介したキットは，仮想的に水の力を体験する簡単な器具であるが，市民シンポジウムでの結果は好評であった．2つの地区を対象にした氾濫解析においては，集中豪雨に伴う急激な浸水深の増大が避難を困難なものにした状況を，各歩行限界パラメータを用いて明らかにした．その結果，流体力による判断基準も有用であることを示した．これまでは空間解像度が数十メートルの氾濫解析を用いて避難行動に関する検討が行われてきたが，今後は，本研究で示したような流速値や流体力が正確に把握できる高解像度の解析が重要になると思われる．

**謝辞：**本研究は，河川環境管理財団，河川整備基金の支援を受けて行った．また，航空レーザ計測データは国土交通省近畿地方整備局から提供頂いた．土木研究所（ICHARM）の佐山先生には幕山川の流出解析結果を提供していただいた．ここに記して謝意を表します．

## 参考文献

1) 第1回千種川委員会資料，兵庫県ホームページ，2009.11.18.  
 2) 犬飼洋平，小国健二，堀宗朗：計測に基づく避難行動マルチエージェントシミュレータの開発，応用力学論文集，Vol.8，pp.629-636，2005.

3) 片田敏孝，及川康，田中隆司：災害時における住民への情報伝達シミュレーションモデルの開発，土木学会論文集，No. 625/IV-44，pp.1-13，1999.  
 4) 片田敏孝，桑沢敬行：津波に関わる危機管理と防災教育のための津波災害総合シナリオ・シミュレータの開発，土木学会論文集D，Vol.62，No.3，pp.250-261，2006.  
 5) 齊藤 拓哉，長谷見 雄二，井田 敦之，成瀬 功一：千日デパート火災のシミュレーションと工学的避難安全検証手法による被害要因分析，日本建築学会技術報告集，Vol. 16，No. 33，pp.553-556，2010.  
 6) 高橋保，中川一，東山甚：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，第32号B-2，pp.757-780，1989.  
 7) 中川一，高橋保，澤田豊明，石橋晃睦：GISを用いた避難行動の解析—岐阜県吉城郡上宝村栴尾地区周辺を対象に—，京都大学防災研究所年報，40B-2，397-407，1997.  
 8) 飯田進史，館健一郎，武富一秀，川本一喜，金木誠，平川丁治，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，第8巻，pp.139-144，2002.  
 9) 館健一郎，武富一秀，吉谷純一：GISを用いた洪水時の避難解析システムの開発，土木学会第56回年次学術講演会，第2部門，pp.436-437，2001.  
 10) 明田修，天野貴文，内田裕丈：GISを用いた洪水氾濫時避難行動解析システムの開発，GIS—理論と応用，Vol.15，No.1，pp.23-28，2002.  
 11) 山本一浩，上野幹夫，小林一郎，橋本淳也：マルチエージェントモデルを用いた洪水・避難シミュレータに関する研究，第6回KK-MASコンペティション論文，2006.  
 12) 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.  
 13) 片田敏孝，児玉真，浅田純作：東海豪雨災害における住民の情報取得と避難行動に関する研究，河川技術論文集，第7巻，pp.155-160，2001.  
 14) 利根川研究会：利根川の洪水—語り継ぐ流域の歴史—，山海堂，1995.  
 15) 中山大地，森永大介，松山洋：洪水氾濫シミュレーションに基づく避難経路の歩行可能評価，地学雑誌，Vol.117，No.2，pp.424-438，2008.  
 16) 石垣泰輔：生体計測技術による地下空間浸水時の災害時要援護者避難に関する研究，萌芽的共同研究（課題番号：19H-02），2007.  
 17) 須賀堯三，上阪恒雄，白井勝二，高木茂知，浜口憲一郎，陳志軒：避難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第38巻，pp.829-832，1994.  
 18) [http://www.kkr.mlit.go.jp/himeji/higai\\_kento/frame.html](http://www.kkr.mlit.go.jp/himeji/higai_kento/frame.html)

(2011.5.19受付)