# 2004年10月出石川氾濫を対象とした 現地調査に基づく高解像度氾濫解析 FIELD MEASUREMENTS AND INUNDATION ANALYSIS OF THE FLOODED AREA OF THE IZUSHI RIVER IN 2004.10

大薗 政志<sup>1</sup>・椿 涼太<sup>2</sup>・藤田 一郎<sup>3</sup>・川谷 健<sup>4</sup> Masashi OZONO, Ryota TSUBAKI, Ichiro FUJITA and Takeshi Kawatani

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院 自然科学研究科建設学専攻(〒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 自然科学研究科地域空間創生科学専攻(同上)
 <sup>3</sup>正会員 学術博士 神戸大学教授 工学部建設学科(同上)
 <sup>4</sup>正会員 Ph.D 財団法人建設工学研究所(〒657-0011 神戸市灘区鶴甲1-3-10)

There occurred a levee break of the Izushi River near the district of Torii in Izushi-chou, Hyogo Pref. on Oct. 20, 2004, which is caused by the heavy rainfall induced by Typhoon No. 23(TOKAGE). In order to perform a high-resolution inundation simulation of this area, detailed topographical data is measured by using a kinematic GPS system. Two dimensional shallow water equation based on the unstructured grid system is used for the simulation. Since the grid size is adjusted so that respective houses can be resolved in the simulation, it became possible to estimate hydrodynamic forces exerted on the houses, which is found to have a close relation to the actual house damages.

*Key Words* : *Izushi river, inundation simulation, kinematic GPS, unstructured grid, hydrodynamic force, mesh generation* 

## 1. はじめに

近年多くの地域で洪水氾濫が頻発しており,被害を軽 減するために氾濫危険区域における家屋や道路等が密集 する市街地での氾濫流挙動の的確な把握と家屋の危険度 評価が重要になっている<sup>1)</sup>. このような背景から多くの 自治体で浸水状況を予想したハザードマップが公表され ているが,公表されているハザードマップの多くは浸水 深を示したものであり,個別の家屋被害までを予測した ものは少ない.

兵庫県円山川水系出石川流域(図-1<sup>2)</sup>に円山川水系 の流域図を示す)では、台風23号(TOKAGE)により 2004年10月20日に戦後最大日雨量である275mmを観 測し、20mmを越す時間雨量が5時間以上継続した<sup>3)</sup>. このため、円山川支川の出石川鳥居橋地点では、橋脚や 流木等による疎通障害が生じ、橋の上流部で水位が上昇 して溢水が起こり、鳥居樋門に続く左岸堤防の一部が破 堤した<sup>4)</sup>.この破堤により死者2名・負傷者2名の人的 被害が、床上・床下浸水あわせて483戸の家屋被害がそ れぞれ生じた<sup>5)</sup>.さらに円山川本川の立野付近でも堤防 が破堤し,豊岡市の9割が冠水,浸水面積は41km<sup>2</sup>に 及んだ.

本研究では、台風23号に伴う出石川鳥居周辺の氾濫 を対象とし、まずキネマティック GPS を用いた現地の微 地形の計測について述べる.次に計測したデータをもと に高解像度な氾濫解析を実施する.最後に氾濫解析の結 果を用いて氾濫流が個別の家屋に与える外力(流体力) を求め、流体力と家屋の被害状況の関連性について考察 を加えることを目的とする.なお流体力と家屋の被害状 況の関連に関する研究は、佐藤ら<sup>6)</sup>、河田・中川<sup>7)</sup>によっ てなされているが、氾濫区域を 50m 程度の比較的粗い メッシュで区切っており、本研究のように家屋個別の流 体力については求められていない.

# 2. 出石川の概要

出石川は円山川水系の1級河川であり,但馬平野で本 川の円山川と合流する.その延長は32,428mであり,円 山川水系の1級河川(97河川)の内2番目の延長,2級



図-1 円山川水系の流域図(文献 2)より作成)

河川 (50 河川) を含めても3番目の長さとなっている<sup>2)</sup>. 出石川が本川の円山川と大きく異なっているのは次の4 点である<sup>8)</sup>.

- (a) 河道が蛇行している.
- (b) 河床勾配が急である.
- (c) 流域の低地面積が小さい.
- (d) 築堤が少ない.

# 3. キネマティック GPS による現地計測

## (1) 現地調査の目的

氾濫解析を行う上で、地形勾配は流れに対して非常に 大きな影響を与える.国土地理院は全国の地盤高さを約 50m間隔のグリッドで整備しているが、細やかな地形の 再現が困難であることは否めない.一方、近年ではGPS (Global Positioning System,汎地球測位システム)装置 が比較的安価な価格で普及してきており、GPSを用いた 測量(以下 GPS 測量)が容易に行えるようになった.

出石町鳥居を対象とした本現地調査では、キネマティック GPS 装置(古野電気製)を利用して、集落の細かな地 形勾配(徒歩により計測)とその背後の比較的なだらか な地形勾配(GPS 装置を乗用車の屋根に搭載して測定) を計測した.このデータをもとに、微地形を考慮した氾 濫解析を行うことが現地計測の目的である.

### (2) GPS 測量とキネマティック GPS<sup>9)</sup>

GPS とは米国によって開発・運用されている高精度の 測位システムで,地上約 20,000km の上空を周回する 24 個の人工衛星の電波を受信して計測を行う. GPS 測位に は単独測位と干渉測位の 2 種類の方法があるが,GPS 測 量に通常用いられるのは干渉測位である.

干渉測位は、2点間の距離と方向をミリメートルの精 度で求めようとするもので、測定する2点(基準局と移 動局)に受信機を置き、同時に同じ各衛星からの電波の 位相を測定する.本計測においては、干渉測位の中でも 特にキネマティック GPS と呼ばれる手法を用いた.

キネマティック GPS とは、GPS のアンテナを移動し ながらその位置を高精度に測定する方法であり、次のよ うな特長がある.

- (a) 移動局(未知点)の3次元座標を一度に求められる.
- (b) 一定周期で位置情報を取得できる.
- (c) 高精度である(精度 20mm).

### (3) 鳥居橋周辺の地形

図-2に計測によって得られた出石町鳥居周辺の地形の コンターを示す.

キネマティック GPS 計測では、位置の基準が基準局 の位置となるため、何らかの方法で位置を合わせる必要 がある.そこでトータルステーションによりいくつかの 点の位置を計測し、これを基準として GPS 計測値を移 動させた.GPS による計測経路は図-2の黒の太線で示 してある.本計測システムでは 5Hz ごとに計測が行え るため、徒歩により測定した堤防破堤付近は約 10cm 間 隔、乗用車では約 2m 間隔でデータの取得が行えている。 計測値の総計は約 50,000 点である.

これらの GPS 計測データをもとに,氾濫領域で値を補 間してコンター図を作成した.データの補間には GoldenSoftware 社製 Surfer8 を用い,補間法には Kriging 法 を採用した.補間に用いるデータのうち,堤防や山間部 のデータはこれを除去し,集落および農地の地形勾配だ けが得られるようにした.図-2の計測経路から破堤地点 付近の地形情報は細やかに得られていることが分かる.

## 4. 基礎方程式と流体力評価

# (1) 基礎方程式と離散化手法

基礎方程式として保存形で示された2次元浅水流方程 式を用いる.2次元浅水流方程式はUを保存量ベクトル, EとFをそれぞれxとy方向の流束ベクトル,Sを発生 項・消滅項ベクトルとすると

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial F}{\partial y} + S = 0$$
(1)

ここで,

$$\boldsymbol{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{E} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{pmatrix},$$

$$\boldsymbol{F} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}, \quad \boldsymbol{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ -gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$
(2)

ここに、hは水深、 $u \ge v$ はそれぞれ $x \ge y$ 方向の流速、gは重力加速度、 $S_{ox} \ge S_{oy}$ はそれぞれ $x \ge y$ 方向の河床



図-2 出石町鳥居周辺の標高のコンターと計測経路

勾配,および $S_{fx} \ge S_{fy}$ はそれぞれ $x \ge y$ 方向の摩擦勾配である.摩擦勾配 $S_{fx} \ge S_{fy}$ は、マニングの式で評価する.

以上の基礎式を重枝ら<sup>10)</sup>による FDS (Flux Difference Splitting, 流束差分離法)を用いた有限体積法で計算する. すなわち,式(1)を任意の検査体積 $\Omega$ で積分した後,ガウスの発散定理を適用すると,式(3)の積分形の浅水流方程式が得られる.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \boldsymbol{U} ds + \oint_{\partial \Omega} (\boldsymbol{\mathcal{F}} \cdot \boldsymbol{n}) dL + \int_{\Omega} \boldsymbol{S} ds = \boldsymbol{0} \qquad (3)$$

ここに、 $\partial \Omega$  は検査体積の境界線、S は  $\Omega$  の面積、および Lは  $\partial \Omega$  の長さである.  $g \cdot n$  は境界線  $\partial \Omega$  の法線方向を通 過する流束ベクトルであり、 $x \ge y$  方向の流束ベクトルと 境界線  $\partial \Omega$  における外向き単位法線ベクトル $n = (n_x, n_y)$ を用いると、式 (4) のようになる.

$$\mathcal{F} \cdot \boldsymbol{n} = \boldsymbol{E} \, \boldsymbol{n}_{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{F} \, \boldsymbol{n}_{\boldsymbol{Y}} \tag{4}$$

式(3)は有限体積法に基づき離散化される.時間積分は Euler 陽解法を,空間積分は FDS をそれぞれ用いる.

## (2) 流体力評価

流体力は本来物体周囲の圧力分布により物体に働く力 であり、物体周囲の圧力分布の差を3次元計算によって 厳密に求めることができれば、直接求められる量である. しかし、式(1)に示した2次元浅水流方程式は鉛直積分 した2次元方程式であるため、物体周囲の流れを厳密に 計算することができず、物体周囲の圧力分布を厳密に求 めることは不可能である.このため何らかの方法で流体 力をモデル化する必要がある.モデル化の方法として福 岡らは次の2つの方法を提案した<sup>11)</sup>.

- (a) 抗力係数を用いた抗力モデル
- (b) 家屋前後の水深差を利用したモデル

福岡らは実際に家屋の模型を配置し分力計によって流 体力を計測する水理模型実験を行い,様々な家屋に対し て抗力係数を正しく定めることは困難であるという結論 を得た.一方,家屋前後の水深差から求めた流体力と分 力計で測定した流体力の計測結果は,良く一致したと報 告している.すなわち,家屋に作用する流体力は静水圧 分布と見なすことができる.同様の実験が重枝ら<sup>10)</sup>に よってもなされた.彼らの結論は,洪水氾濫流が到達し てから少しの間は,構造物周りの圧力分布は静水圧分布 で近似できないが,それ以降では静水圧近似が可能であ るというものである.

以上のことから、本稿においても流体力の評価に関し て家屋前後の水深差を用い、圧力分布を静水圧分布と近 似する.具体的な式としては、川口らの方法<sup>12)</sup>を用い る.すなわち、家屋に作用する流体力をFとして、これ を次式によって定める.

$$\boldsymbol{F} = \oint \frac{\rho g h^2}{2} \boldsymbol{n} \, ds \tag{5}$$

ここで, n は家屋境界内向きを正とする単位ベクトル, ds は家屋境界周囲を表す. なお式(5)では家屋境界周囲 の長さが長くなるにつれて流体力が大きく評価されるた め,式(5)によって求めた流体力を各々の家屋の長さで除 した単位幅当たりの流体力で評価する. 家屋延長はメッ シュ生成時に家屋の概形を入力する際に求められる.

## 5. 鳥居周辺の氾濫解析

#### (1) 計算格子

計算に用いる格子は非構造三角形格子である.計算格 子を図-3に示す.三角形格子の大きさは、破堤地点か ら遠ざかるにつれてメッシュサイズが大きくなるように 調整し、破堤地点の周辺は4m、最大で100mとした. 全体の格子数は24,000個程度である.図中白くなって いる箇所が家屋を示し、家屋の位置や大きさは航空写真 を参考に割り出した.なお、メッシュの生成はTsubaki ら<sup>13)</sup>による自動生成プログラムを用いた.

#### (2) 流入流量

破堤地点からの流入流量としては、以下の2種類の流 量を仮定する.

- (a) 越流に伴う流入流量
- (b) 破堤に伴う流入流量

まず(a)について述べる.従来,破堤箇所からの越 流流量の計算には本間の越流公式が多く用いられてきた が,横越流成分を抽出する必要がある.土木研究所では 水理模型実験により,本間公式を補正する形式で横越流 特性をふまえた氾濫流量公式を提案した<sup>14)</sup>.すなわち, 越水に伴う越流量 Q は本間公式による氾濫流量 Q<sub>0</sub> を用 いて,河床の平均河床勾配 I に対し,以下の式により算



図-3 計算格子

定する.

$$Q/Q_0 = \begin{cases} \cos\left(155 - 38 \times \log_{10}\frac{1}{I}\right) & (I > 1/12,000) \\ 1 & (1/12,000 \le I) \end{cases}$$
(6)

ここに、本間の越流公式は次式による.

$$Q_0 = \begin{cases} 0.35Bh_1\sqrt{2gh_1} & (完全越流) \\ 0.91Bh_2\sqrt{2g(h_1 - h_2)} & (もぐり越流) \end{cases}$$
(7)

ここで、Bは破堤幅、破堤部において敷高から見て高い ほうの水位が $h_1$ 、低い方の水位が $h_2$ である.

本計算においては、完全越流を仮定し、平均河床勾配 I = 1/1,300、破堤幅 B = 100m、越流水深  $h_1 = 0.40$ m (円山川堤防委員会資料<sup>15)</sup>)として越流流量を求めた. この結果は約 30m<sup>3</sup>/sec となった.

次に(b)の破堤に伴う流入流量について述べる. 越流 水深等の資料がないため,氾濫域に貯留した氾濫水の総量 から流量を求める.まず,氾濫水の総量の求め方は次の 様である.対象地域を翌日に撮影した写真<sup>16)</sup>から定常状 態の水位を推定し, 各々の地点の標高から差し引いて水深 を求める.この水深に氾濫域の面積を乗じることで、氾 濫水の総量を得る. この結果は約3.500.000m<sup>3</sup> である. 次に降雨による貯水は、流域流量が 275mm<sup>5)</sup>であった ことから、これに氾濫域の面積を乗じて約 1,100,000m<sup>3</sup> の降雨体積を推定した.従って越流・破堤に伴う流入体 積は、氾濫水の総量から降雨による貯水を差し引いた約 2.400.000m<sup>3</sup>となる. 越流による流入体積は、 越流が6時 間程度継続したという報告<sup>15)</sup>から求められるため,破堤 のみの流入体積が推定できる. 出石川自体の流量はピー ク時で1,000m<sup>3</sup>/sec であり,破堤が起こった時刻(23:18 ごろ)には水位は下がっていた。このため、これより少 ない流量と推定される.以上のことから、図-4に示すよ うな流量ハイドログラフを想定して解析に用いた.



図-4 仮定した流量ハイドログラフ

## (3) その他の計算条件

流れの抵抗則にはマニングの式を用い,マニングの粗 度係数 0.04 を計算格子内に一律に与えた. さらに詳細 なモデル化のためには,岩佐<sup>17)</sup>らが行った地目別の等 価粗度係数を与えるべきと考えるが,本解析地域は田畑 が大部分であり,道路盛土等の構造物被害に対する影響 は都市域の氾濫現象に比して少ないものと考える. 建造 物境界はノンスリップ条件である.また時間ステップは Δ*t*=0.001~0.01sec の間で解が発散しないように与えた. 初期水深としては降雨による貯留を考慮し,計算領域全 体にあらかじめ流域雨量に相当する 30cm の水深を与え る. これは越流が始まったときにはすでに日雨量の 2/3 の降雨量に達しており,氾濫域での細かな降雨パターン と浸水被害の関係は大きくないと考えたためである. 解 析は流速ベクトルや水深をモニタリングしながら行った.

以上の計算では,破堤地点からの流入のみを対象とし, 河道の流れを直接取り扱っていない.しかし流入流量を 想定する際,越流水深は河道を2次元不定流解析によっ て解析した円山川堤防委員会の試算<sup>15)</sup>をもとにしてい る.また破堤流量も河道のピーク流量と破堤時の水位を 参考に決定している.



図-5 氾濫水の推移

# (4) 氾濫水の推移

図-5に越流開始から15.000sec(越流開始後約4時間), 19,000sec (破堤直後), 24,000sec (破堤後約2時間) 後の 鳥居橋周辺の浸水深の分布と流速ベクトル図をを示す. 流速ベクトル図は、矢印で流れの方向を示し、 流速の絶対 値を色分けして示している. 浸水深の分布図から時間の 経過とともに氾濫水が広がっていく様子がわかる. 越流 開始から 24,000sec 後の水深の分布では、最大 3m 程度の 浸水深となっている. 氾濫水の広がり方を見ると, 破堤 の前後で、破堤点より北側の浸水深は1.5m~2m程度と 深くなっているのに対し、南側での水深の変化はあまり 見られない. これは破堤点南側のほうが北側より 2m 程 度標高が高くなっており, 氾濫水が標高の高いところから 低いところへ移動したためと考えられる. また越流開始 から15,000sec と24,000sec を比較した場合, 15,000sec の場合浸水深はどの場所においてもほとんど変化してい ないことから、 越流による流入と破堤による流入では、 破堤による流入が支配的であったことがわかる.

流速ベクトル図からは、破堤地点からの流向が読みと れ、流速が速い地点では約4m/sec程度と計算された.局 所的に速い流速は、現地の局所的な地形によって生じた ものと考えられる.

鳥居地区の目撃証言によると、堤防決壊後鳥居地区の 家々の1階は完全に水没した<sup>18)</sup>という報告がある.一 般的な住居の1階部分の高さは2~2.5mと考えられる. これに対して,計算結果は破堤点に近いところでは2.5m 程度となっていることからおよそ良好に結果を再現できたことがわかる.

## 6. 流体力と家屋被害の関連性

鳥居橋周辺では破堤による2種類の家屋被害が見られた. すなわち,家屋全体が傾いて居住不可能となっている場合と1階部分のガラス戸やふすまが破壊された場合である. これらの地域の家屋(約30戸)に対して,個別に流体力を求め,求めた値を補間して(補間法にはKrigingを用いた),被害地域周辺の流体力のコンター図を描くと図-6のようになる.

図-6から流体力が大きい箇所では家屋被害が生じていることが分かる.したがって、家屋被害の規模を推定する目安として、流体力は有効な指標となると言える.

# 7. おわりに

本稿では2004年の台風23号に伴う出石川鳥居付近の 高解像度な氾濫解析を実施した.以下に結論を列挙する.

(a) 鳥居橋周辺は徒歩によるキネマティック GPS 計



図-6 流体力のコンター

測を行い、広範な範囲については乗用車に装置を 搭載して、細やかな地形勾配を求めた.

- (b) 現地周辺の細やかな地形データをもとにして氾濫 解析を行い,破堤地点から氾濫水が推移していく 様子を計算することができた.また浸水深に関 しては新聞等にあった被害報道の結果とほぼ一致 し、良好なシミュレーションが行えた.
- (c) 家屋に作用する流体力は家屋被害と密接な関係を 有している.

本研究では静水圧の差を持って流体力を定義したが、 家屋が破壊に至るような場合は、静水圧の差だけではな く、動圧や衝撃力も無視できなくなると考えられるため、 今後の検討が必要である.

謝辞: 現地計測では神戸大学都市安全研究センター齋藤雅彦助手,明石工業高等専門学校都市システム工学科神田 佳一助教授のご協力を得た. ここに記して感謝の意を表する. また神戸大学大学院生岩原 径氏, 江見 崇氏, 冨尾 恒一氏,中村有加里氏には現地調査ならびに関連資料の収集で助力を得た. あわせて謝意を表す.

#### 参考文献

- 秋山壽一郎・重枝未玲・小林俊彦・太田和正:非定常自 由表面流中の正角柱に働く流体力,水工学論文集,第46 巻,pp.1205–1210,2002.
- web 資料:国土交通省 近畿地方整備局豊岡河川国道事務 所「但馬地域河川データ」
   http://www.kkr.mlit.go.jp/toyooka/ river07-data.html, 2005/05/15.
- 国土交通省 豊岡河川国道事務所:「台風 23 号の出水概要」 説明資料,2004/12/09.
- 4) 土木学会 平成 16 年 10 月台風 23 号災害緊急調査団:平 成 16 年 10 月台風 23 号災害緊急調査報告会資料(財団 法人河川環境管理財団河川整備基金助成事業), pp.5-8, 2005/03/03.
- 5) 兵庫県豊岡土木事務所:台風23号の円山川出水概要資料, 2004.

- 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 台風による吉田川の場合—,水工学論文集,第33巻,pp.331–336,1989.
- 河田恵昭・中川一:三隅川の洪水災害 —洪水氾濫と家屋の 被害—,京都大学防災研究所年報,第27号 B-2, pp.179– 196, 1984.
- web 資料:平成16年台風23号で発生した北但地方における洪水・土砂災害の調査と考察 http://www.ohta-geo.co.jp/x/gan/ 04\_23rd/toyooka041106.pdf, 2004/11/06.
- 9) web 資料:日本測地学会 CD-ROM テキスト 測地学 WEB 版「キネマティック GPS」 http://wwwsoc.nii.ac.jp/geod-soc/
- web-text/part3/kato/kato-3.html, 2005.
   10) 重枝未玲・秋山壽一郎・浦勝・小林俊彦:洪水氾濫流と 構造物に働く流体力の数値シミュレーション,水工学論文
- 集,第46巻,pp.833-838,2002.
  11) 福岡捷二・川島幹雄・横山洋・水口雅教:密集市街地の 氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の 研究,土木学会論文集 No.600/II-44, pp.23-36,1998.
- 川口広司・末次忠司・福留康智:2004年7月新潟県刈谷 田川洪水・破堤氾濫流に関する研究,水工学論文集,第 49巻, pp.577-582,2005.
- R. Tsubaki, I. Fujita and George V. Lugomela: Automated grid generation for flood prediction using LiDAR data, Proceeding of XXXI IAHR CONGRESS, pp.117–126, 2005.
- 14) 土木学会編:水理公式集 [平成 11 年版], pp.125-133, 1999.
- 15) 円山川堤防調査委員会:円山川堤防調査委員会報告書, 2005/03/30.
- 16)神戸新聞但馬総局・編:円山川決壊 台風 23 号記録と検 証,神戸新聞総合出版センター,2005.
- 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文:氾濫水の水理の数値解析法,京都大学防災研究所年報,第23号 B-2, pp.305–317, 1980.
- 18) web 資料:神戸新聞 Web News 台風 23 号 円山川水系記 録 28

```
http://www.kobe-np.co.jp/chiiki/rensai/
200501tajima/index.html, 2005/02/15.
```

(2005.9.30 受付)