

# 佐用川流域における洪水氾濫統合解析システム構築に関する基礎的研究

## Fundamental Study on Development of Integrated Runoff System Considering Flood and Inundation Events at Sayou River Basin

戸田淳治・浜口俊雄・田中賢治

Junji TODA, Toshio HAMAGUCHI, and Kenji TANAKA

### Synopsis

We demonstrate the performance of the integrated runoff system to prepare for a flood disaster. To be concrete, we try a reproduction calculation featuring flood and inundation events at the Sayou River basin. To reduce the victims of flood disasters, let us at first show directions on evacuation decision for the river management administrators and the concerned residents using evacuation-warning system to be proposed in this research. We start with the simulation on floods to consider the above-mentioned system.

**キーワード:** 洪水災害, 流出氾濫統合システム, 外水氾濫, 内水氾濫

**Keywords:** flood disaster, integrated runoff system, flooding, inundation

## 1. はじめに

### 1.1 研究の背景

昨今の気候変動により, 防災上注意・警戒を要する気象現象(大雨など)が発生する頻度が増加し, 防災システムの不備のため, これまで数多くの方々が洪水災害や土砂災害など自然災害の犠牲となってきた. Table 1 に示されるように, 風水害による死者・行方不明者が毎年コンスタントに発生している現状がある.

このため自然災害に対する備えを強化し, よりきめの細かい防災システムの整備が喫緊の課題となっている.

### 1.2 研究の目的

自然災害による犠牲者を一人でも減らすため, 我々は気象分野, 土木分野, IT 分野の融合及びコンピュータと人の融合による包括的な防災システムの構築を目指している. 本研究は洪水災害や土砂災害の予測から避難警報に至るまでのプロセスをシステム化し, 防災情報を必要とする人々が避難に対する

意思決定を行う上での指針を示すことを最終的な目標とする. そしてそれぞれの事例に対し, 気象, 災害, 情報伝達の 3 つの側面から考慮すべき事柄を検証することも同時に行う. ただ今回は洪水災害対策に焦点を絞った内容を報告する (Fig.1 に示した赤枠部分).

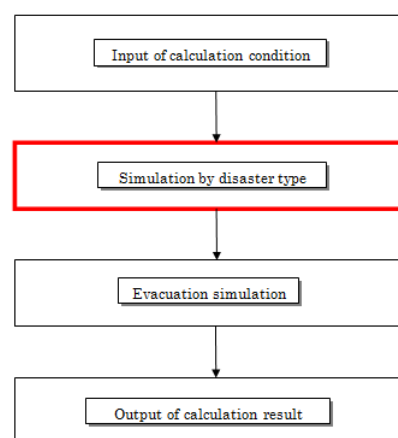


Fig.1 Evacuation warning system overview

Table 1 Breakdown of the dead or the missing by natural disasters  
(source: white paper on disaster prevention)

年	風水害	地震・津波	火山	雪害	その他	合計
平成 5 年	183	233	1	9	11	437
6	8	3	0	21	7	39
7	19	6,437	4	14	8	6,482
8	21	0	0	28	35	84
9	51	0	0	16	4	71
10	80	0	0	28	1	109
11	109	0	0	29	3	141
12	19	1	0	52	6	78
13	27	2	0	59	2	90
14	20	0	0	26	2	48
15	48	2	0	12	0	62
16	240	68	0	16	3	327
17	48	1	0	98	6	153
18	87	0	0	88	2	177
19	14	16	0	5	4	39
20	21	24	0	48	7	100
21	76	1	0	35	3	115
22	31	0	0	57	1	89
23	125	18,880	0	132	0	19,137

## 2. モデルの説明

### 2.1 概要

本研究では、2009年8月に兵庫県で発生した、佐用町水害を取り上げる。記録的な大雨により洪水氾濫、がけ崩れ等が発生し、人的被害が20名程度に及ぶ甚大な災害となった。とりわけ特徴的だったのは、犠牲者の多くが避難行動中に被災したことである。

このような洪水災害に対抗する手段として、流出予測及び氾濫予測を行うための流出氾濫統合システムが構築された。Fig.2 にその概念図を示す。

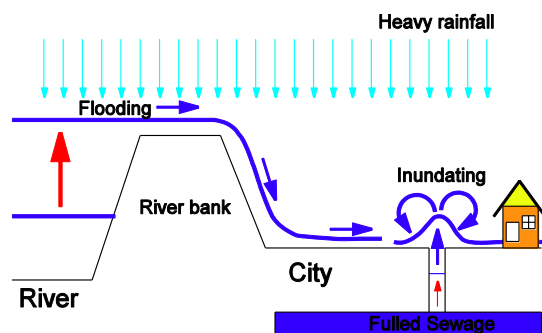


Fig.2 Integrated runoff system overview

### 2.2 流出モデル (HydroBEAM)

本モデルは外水氾濫に対する流出モデルとして使用した。空間解像度は1km、計算時間間隔は10分とした。Fig.3 はモデル概念図、Table 2 は使用データの一覧である。

以下にモデルの概略を列挙する。

- ・鉛直構造はA層～C層とし、D層は考慮しない
- ・地表面、A層、河道に対しては Kinematic wave 法を使用
- ・B層及びC層に対しては線形貯留法を使用

本研究では手始めとして再現計算を行った。世界測地系 (JGD2000) を基にしてデータ処理を行ったため、以下のデータを扱う際は注意が必要である。

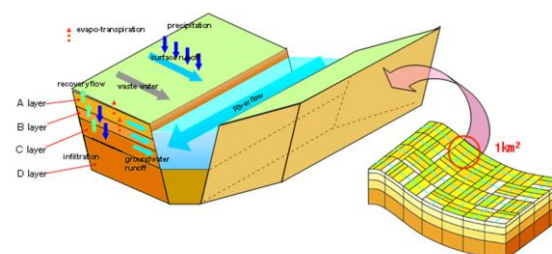


Fig.3 HydroBEAM overview

Table 2 Dataset used in HydroBEAM

データ名及び内容	測地系	空間解像度	時間解像度
W07_52M(流域・非集水域メッシュ)	日本測地系	1km	-
W15-52L(流路データ)	世界測地系	-	-
W13_52T(河川台帳)	-	-	-
L03-a-06(土地利用データ)	世界測地系	1km	-
DEM_10m(標高データ)	世界測地系	10m	-
analysis precipitation(解析雨量)	世界測地系	1km	1時間毎
water level observation(水位観測データ)	-	-	1時間毎

\* W07\_52M

世界測地系と日本測地系(Tokyo Datum)の位置のずれ(Fig.4)を考慮して、世界測地系のメッシュで流域メッシュを抽出

\* W15-52L

ArcGISの「空間検索」で河道メッシュを抽出

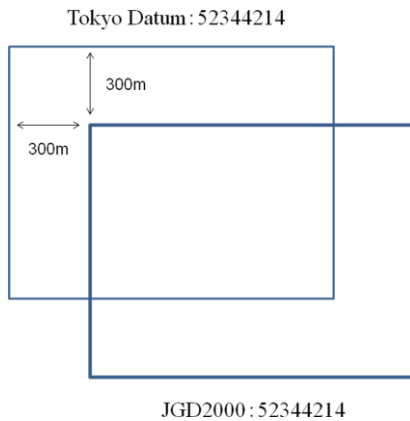


Fig.4 Handling for geographical coordinate system

これらのデータを用いて対象流域の落水線を算定したのが Fig.5 である。

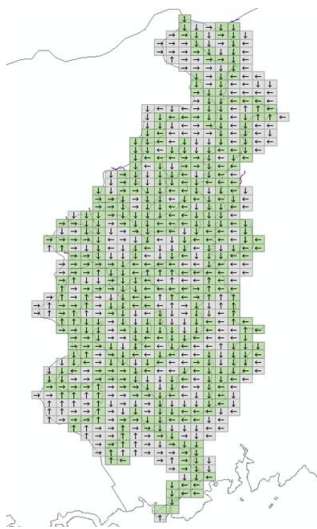


Fig.5 Flow direction map in Chikusa river basin

2.3 氾濫モデル(内・外水氾濫マクロモデル)

最初に本モデルの基礎式を以下に示す. 連続式は式(1), 運動式は式(2)で与えられ, 基礎式(3)を得る. 導出過程は巻末に記した参考文献を参照されたい.

$$(1-\lambda)\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} + r_e = -\frac{\partial}{\partial x}(u_m h) - \frac{\partial}{\partial y}(v_m h) + r_e \quad (1)$$

$$u_m = -\kappa_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_m = -\kappa_y \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2)$$

$$(1-\lambda)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\kappa_x h \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\kappa_y h \frac{\partial h}{\partial y}\right) + r_e \quad (3)$$

ここに,  $h$ : 水深,  $\lambda$ : 建物占有率,  $q_x, q_y$ :  $x, y$  方向の流束,  $r_e$ : 有効降雨などの流入強度,  $u_m, v_m$ :  $x, y$  方向の平均流速,  $\kappa_x, \kappa_y$ :  $x, y$  方向の氾濫伝達係数である.

本モデルは氾濫流動を表す微小要素を集約化することで流出モデルと同じ格子スケール(1km)で解析可能となるよう構築された. 当然1kmより小さい計算格子でも流出解析の出力データを調整することで適用可能となる. また外水氾濫と内水氾濫の両方に対応し, 内水氾濫に対する流出解析をも含む. 空間解像度は1km, 計算時間間隔は10分とする. Table 3 に使用データの一覧を示す.

次に以下のデータに関して補足説明する.

\* BldA, BldL

建物占有率の算定に使用. ArcGISの「インターセクト」「ディゾルブ」「ジオメトリ演算」等を用いてメッシュ毎の面積比を算出する.

被災地点(後述)を含む3次メッシュ(52344214)と建築物, 及び河道を重ね合わせたものがFig.6である. 建物占有率は「0.019399」とかなり小さい値である.

\* water level data 及び BI, HI

HydroBEAMの出力データ. 本間の越流公式を用いたメッシュ毎の越流量の算定に使用.

具体的にはこれら各メッシュの水位データ等が氾濫モデル入力データとなることで, 両モデルは統合され一元的な扱いが可能となっている.

Table 3 Dataset used in inundation model

データ名及び内容	測地系	空間解像度	時間解像度
DEM_10m(標高データ)	世界測地系	10m	-
BldA, BldL(建築物及び建築物の外周線)	世界測地系	-	-
water level data(水位データ)	世界測地系	1 km	10分毎
BI, HI(川幅及び計画高水位)	世界測地系	1 km	-
inundation depth record(浸水深実績データ)	-	-	-
analysis precipitation(解析雨量)	世界測地系	1 km	1時間毎



Fig.6 Superposition (3rd mesh, BldA, and W15-52L)

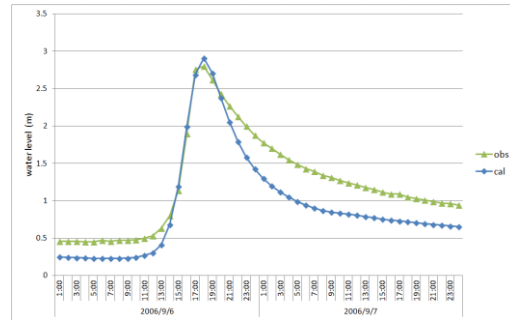


Fig.8 Hydrograph at Enkohji (2006 event)

Fig.8に関しては、ピーク前後の基底水位が低く計算されていることが問題点である。

### 3. 算定結果と考察

#### 3.1 流出モデル

最初に千種川流域のサイトマップをFig.7 に示す。



Fig.7 Site map in Chikusa river basin

今回注目するのは中流域にある円光寺という観測地点である。まず当該地点で氾濫が発生していないと思われる2006年9月の事例で再現計算を行った。モデルのパラメータ等を調整して導いた結果がFig.8及び Fig.9 である。

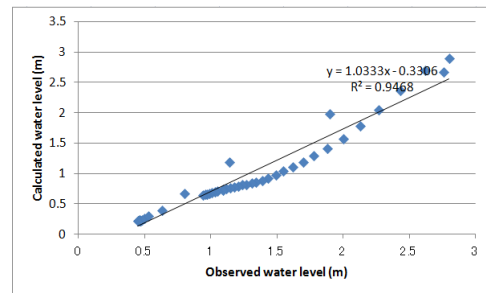


Fig.9 Comparison of water level at Enkohji (2006 event)

次に上記事例と全く同じパラメータを用いて2009年8月における再現計算を行った。その結果をFig.10 に示す。なお、ここでは観測された水位データをH-Q式を用いて流量データに変換している。また、ピーク流量を記録してから観測値が0になっているのは観測機器の故障のためである。ただ、ピーク前の時間帯で観測値が計算値より小さくなっていることが問題点である。

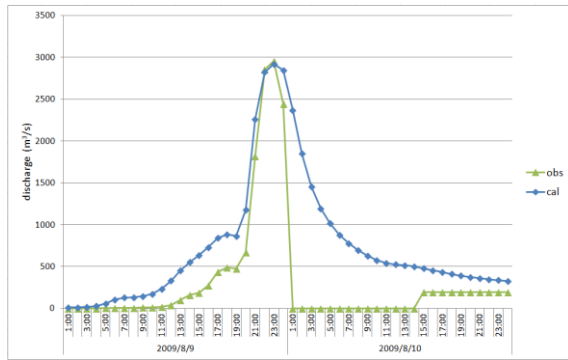


Fig.10 Hydrograph at Enkohji (2009 event)

### 3.2 氾濫モデル

まずFig.11に氾濫計算を行う対象となるメッシュ位置を示す。水色で囲んだメッシュの内、左側が越流地点を含むメッシュ、右側は氾濫流が拡散するメッシュである。同時に右側メッシュは2009年の大雨事例に関し、幕山川付近での避難行動中の被災地点を含んでいる。またFig.12は幕山川付近の浸水実績図を表しており、灰色の丸印は被災地点を示している。なお、被災地点付近の浸水深は70cm程度であった。

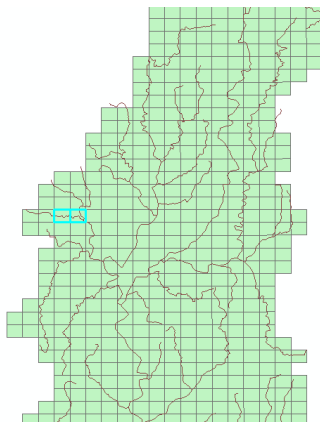


Fig.11 Target 3rd mesh on inundation simulation

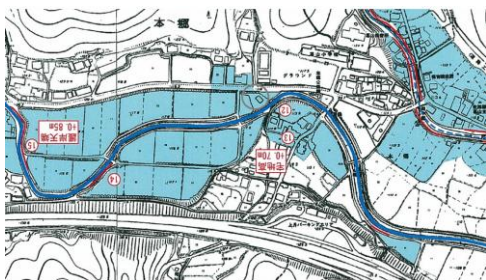


Fig.12 Flood area map (near the Makuyama river)

さて本題の計算結果の評価手法であるが、内・外水氾濫マクロモデル(H\_model)とは別に平面氾濫解析モデル(K\_model)を入手し、両者の計算精度を比較した。

まずは K\_model の基礎式を以下に示す。連続式は式(4)、運動式は式(5)及び式(6)で与えられる。詳細は巻末の参考文献を参照されたい。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2h)}{\partial x} + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = - \frac{gnu\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2h)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = - \frac{gnv\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \quad (6)$$

ここに、 $h$  : 水深、 $u, v$  :  $x, y$  方向の実流速成分、 $n$  : マニングの粗度係数である。

K\_modelの空間解像度(50m)に対し、H\_modelの空間解像度を1000mとしたときの浸水深の算定結果を比較した図が Fig.13である。これを見ると、H\_modelの浸水深が少し大きめの値を示しているが、今後パラメータのより正確な同定等を行うことで両者の算定結果は近づき、空間解像度(1000m)での H\_modelの有効性を示すことができると思われる。

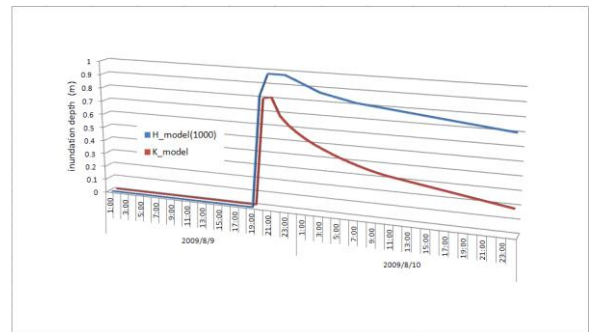


Fig.13 Comparison of Inundation depth result

次に、外水氾濫に加えて内水氾濫も考慮した再現計算(out\_in)を行い、外水氾濫のみを考慮した浸水深結果(out)と比較した図がFig.14である。

両者とも時間の経過と共に浸水深は低減するが、排水能力を示すパラメータの違いにより低減スピードは異なっている。

再現計算(out\_in)のピーク値が大きいの今後計算精度を上げる必要があるが、外水氾濫と内水氾濫の両方に対応するモデルの存在価値は高く、今回はその有効性を示すための第一歩である。

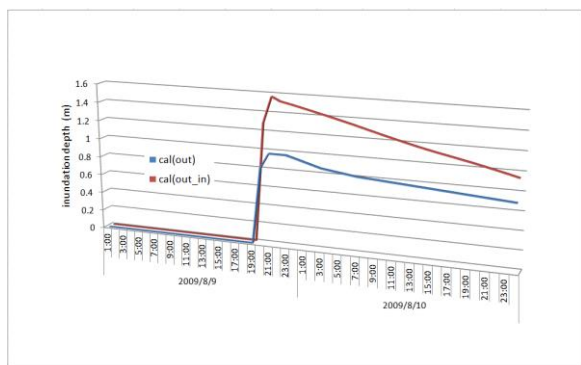


Fig.14 Change of inundation depth by disaster

#### 4. 今後の課題及び展望

今回は洪水災害対策としての洪水氾濫統合解析システムの構築について述べたが、現状ではシミュレーション精度が不十分である。そのため、さらなる計算精度の向上に向けた取り組みを行わなければならない。以下に現状の問題点を列挙する。

##### \*モデルのキャリブレーション

モデルパラメータを対象流域ごとに変化させる必要があり、またその決定に対し多大な時間を要する。

##### \*観測データの同化

流出モデルに関しては河川の正確な水位及び流量、氾濫モデルに関しては河川からの正確な越流量を算定するため、河川の断面データが入手できると計算精度の向上につながる。また、対象地域の排水能力がデータとして整備されていればなお良い。

次に今後の展望として、まずすべきことは氾濫計算を行う際の格子サイズ及び計算結果としてのグリッドスケールを避難モデルに適合するように決めることである。さらにリアルタイムでの避難予測を行うに際してメッシュが細かすぎると予測精度が良くなる反面計算時間が増大し避難の意思決定が間に合わなくなったり、逆にメッシュが粗すぎると計算精度が不十分でユーザの信頼を損なう可能性がある。このような観点から適切なメッシュサイズを選定することが求められる。

#### 参考文献

- 井本昂志, 小尻利治, 田中賢治, 浜口俊雄(2008): 気候変動による流域水環境の変動特性に関する比較, 京都大学防災研究所年報, 第51号, pp. 799-813.
- 川池健司, 井上和也, 林秀樹, 戸田圭一(2002): 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集 No.698.
- 佐藤嘉展, 道広有理, 鈴木靖, 中北英一, 小尻利治(2010): 気候変動に伴う木曾三川流域の流況予測, 京都大学防災研究所年報, 第53号, pp. 723-735.
- 浜口俊雄, 小尻利治, Mukta SAPKOTA(2011): 分布型流出モデルと統合化可能な内・外水氾濫マクロモデルの開発, 京都大学防災研究所年報, 第54号B, pp. 673-682.
- 藤田一郎(2010): 平成21年台風9号による兵庫県佐用町河川災害について。

(論文受理日: 2013年6月10日)