

【建設工学研究所論文報告集第 62 号〔報告〕2020 年 11 月】

豪雨・強風による複合災害時を対象とした洪水氾濫解析手法の開発と検討

Development of High-resolution Inundation Model in Urbanized Areas

中山 恵 介 小林 健 一 郎
Keisuke Nakayama Kenichiro Kobayashi

1. はじめに

地球温暖化の影響によると考えられる豪雨災害が多発しており，中小流域を中心として大きな被害をもたらしている。対策を講じるためには，既往の研究で示されているように 5m 以下のメッシュを利用した高精度な洪水氾濫解析を行わなくてはならず，加えて洪水氾濫モデルの早急な精度検証が必要とされている。しかし，これまでの一般的な洪水氾濫解析では，複合的な災害を対象としておらず，豪雨と同時に与えられる可能性がある台風などによる強風の影響が考慮されていない。そこで本研究では，台風などによる強風下での洪水氾濫による解析が可能となるモデルの開発を行い，その精度検証を行うことを目的とする。モデルには，風の空間分布を考慮することができる 3 次元流体モデル Fantom を利用した洪水氾濫解析を行い，小林らによる洪水氾濫モデル DRR/FI との比較検証を実施した。

2. 手法

2. 1 DRR/FI

DRR/FI は，井上ら¹⁾の数値計算アルゴリズムをベースに，Kobayashi ら²⁾や小林ら⁴⁾が C 言語で京コンピュータに展開したモデルである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} + \frac{\rho_a C_d U_{10,x} \sqrt{U_{10,x}^2 + U_{10,y}^2}}{\rho_w} \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} + \frac{\rho_a C_d U_{10,y} \sqrt{U_{10,x}^2 + U_{10,y}^2}}{\rho_w} \quad (3)$$

ここで， h は水深， n はマニング粗度係数， $M = uh$ ， $N = vh$ で M ， N は流量フラックス， u ， v はそれぞれ x 方向， y 方向の水流速， H は水位， ρ_a ， ρ_w は空気密度，水密度， C_d はバルク係数である。

2. 2 Fantom

3次元環境流体モデル Fantom⁵⁾の数値計算では，GLS の乱流モデルを使用している。乱流モデルは，運動方程式，連

続式および輸送方程式を連立して解く。運動方程式および連続式は以下のように示される。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{turbulence}_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \text{turbulence}_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \text{turbulence}_z \quad (6)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

ここで、 U, V, W : 水平, 奥行き, 鉛直方向流速, x, y, z : 水平, 奥行き, 鉛直上向きの座標, ρ_0 : 参照密度, ρ : 流体密度を意味する。

Fantom では、3次元の運動方程式と連続式の他に、以下に示す乱流エネルギー k と一般化された乱れの長さスケールに関する量 ψ の輸送方程式を連立して解く。

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_M}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{D\psi}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\nu_M}{\sigma_\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + \frac{\psi}{k} (c_1 P + c_3 B - c_2 \varepsilon) \quad (9)$$

ここで、 D : 実質微分, z : 鉛直上向きの座標, ν_M : 鉛直渦動粘性係数, $\sigma_k \cdot \sigma_\psi$: それぞれ k と ψ の乱流シュミット数, ε : 乱流エネルギーの散逸率, $P \cdot B$: それぞれせん断流と浮力による生成項を意味しており以下で表される。

$$P = \nu_M M^2, M^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (10)$$

$$B = -\nu_H N^2, N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (11)$$

ここで、 U : 水平方向流速, ν_H : 鉛直渦拡散係数, ρ_0 : 参照密度, ρ : 密度を意味する。また、 M, N はそれぞれ Prandtl frequency, Brunt-Vaisala frequency と呼ばれる。その他式中に現れる係数に関しては省略する。渦動粘性係数の表記には、Umlauf and Burchard のパラメータ及び表記法を用いて、以下のように表現している。

$$\nu_M = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$\nu_H = c'_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

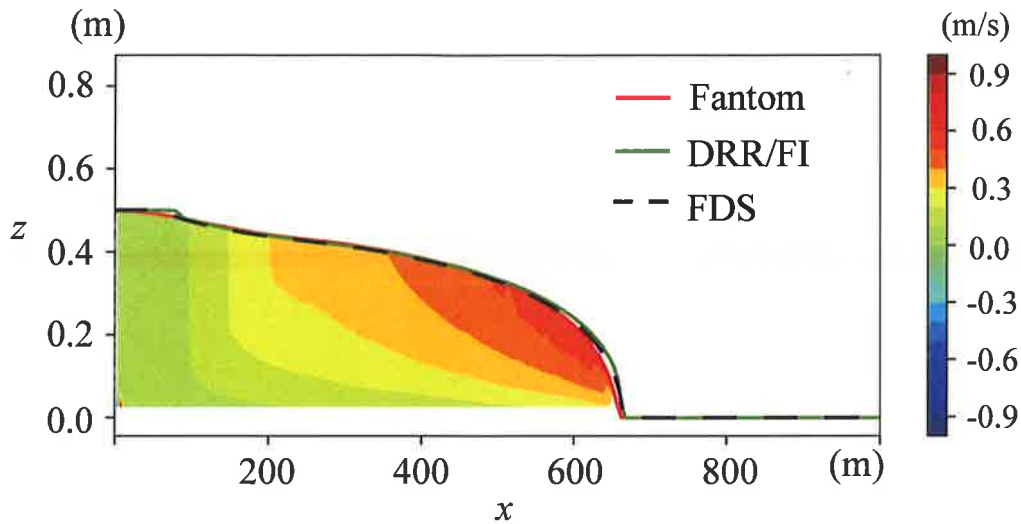


図-1 風の影響を考慮しない場合のダムブレイクシミュレーション結果 (200s 後)

c_μ 及び c'_μ はそれぞれ後に説明する運動量とスカラー量に関する Stability function であり, 乱れの散逸率 ε は以下の式で与えられる.

$$\varepsilon = (c_\mu^0)^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (14)$$

c_μ^0 は経験的パラメータ, l は乱流の長さスケールであり, l は以下に示す ψ との関係式から求めることが出来る.

$$\psi = (c_\mu^0)^{p/4} k^m l^n \quad (15)$$

ここで, p , m , n は 2 方程式モデルを規定するためのパラメータであり, 本解析では, 2 方程式モデルのうち壁関数を必要としない $k-\omega$ を使用した.

2. 3 FDS 方程式

強非線形強分散内部波方程式 (Fully-nonlinear and strongly-Dispersive Surface wave equations : FDS 方程式) ⁷⁾による解を厳密解とした.

$$\eta^\alpha \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\alpha + \beta + 1} \nabla(\eta^{\alpha+\beta+1} - b^{\alpha+\beta+1}) \nabla f_\beta - \frac{\alpha\beta}{\alpha + \beta - 1} \nabla(\eta^{\alpha+\beta-1} - b^{\alpha+\beta-1}) f_\beta = 0 \quad (16)$$

$$\eta^\beta \frac{\partial f_\beta}{\partial t} + \frac{1}{2} \eta^{\beta+\gamma} \nabla f_\beta \nabla f_\gamma + \frac{1}{2} \beta \gamma \eta^{\beta+\gamma-2} f_\beta f_\gamma + g\eta + \frac{P}{\rho} = 0 \quad (17)$$

$$\phi(x, y, t) = \sum_{\alpha=0}^{N-1} Z_\alpha f_\alpha(x, y, t) \quad (18)$$

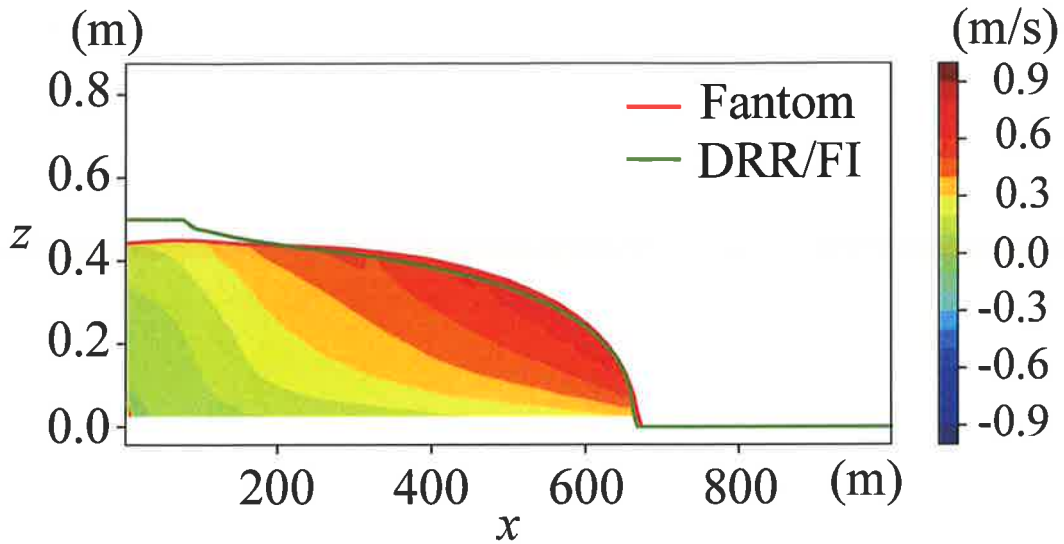


図-2 追い風におけるダムブレイクシミュレーション結果 (200s 後)

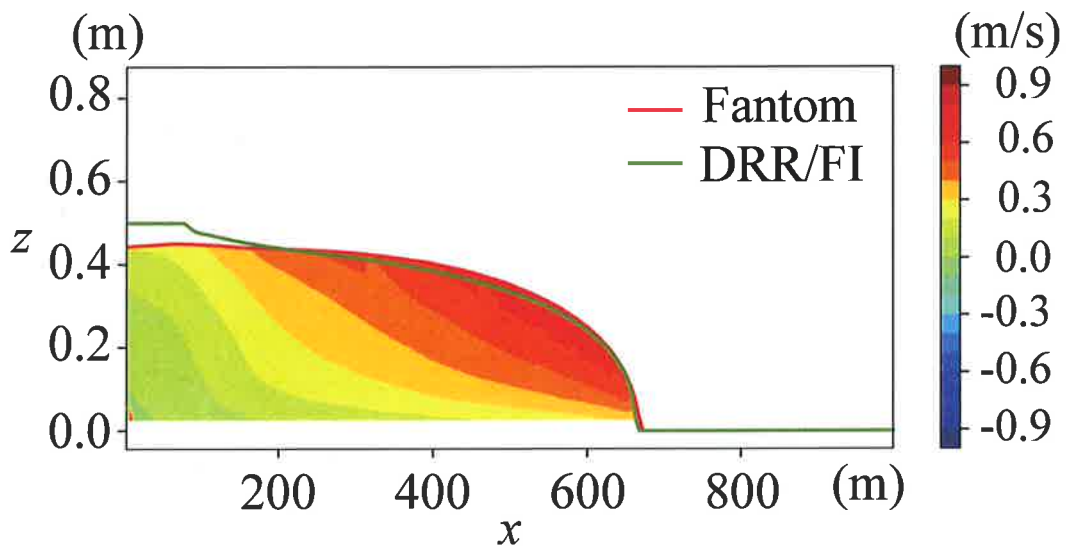


図-3 向かい風におけるダムブレイクシミュレーション結果 (200s 後)

$$Z_{\alpha} = z^{\alpha} \quad (19)$$

ここで、 $\alpha = 0, 1, 2, \dots, N-1$, $\beta = 0, 1, 2, \dots, N-1$, and $\gamma = 0, 1, 2, \dots, N-1$, ϕ : 速度ポテンシャルである。

2. 4 1次元ダムブレイク

1次元ダムブレイク問題に対して風のせん断力を与えた解析を行った⁹⁾。1000mの1次元計算領域を用意し、初期条件として左端原点から500mまでの位置に0.5mの水深を与えた。DRR/FI, FDS法については、水平格子間距離は5m、底面粗度0.03を与えた。Fantomについては水平格子間距離5mに加えて、鉛直方向にも計算領域分割(0.05m)し、18層を与えた。風を考慮しない場合、3モデルの結果は良く一致していた(図-1)。図中のコンターはFantomによる流速分布を示している。水平流速が鉛直方向に大きく変化しても、氾濫域の変化はそれほど影響を受けないことが示された。つまり、長波近似モデルを用いても、ダムブレイクのようなフロントをともなった洪水氾濫計算を高精度に再現できる

ことが分かった。

続いて、追い風と向かい風 20 における計算結果を示す (図-2, 図-3)。風速が 20m/s では、水面形状と先端フロント位置について、Fantom の方が DRR/FI よりもやや変化が目立っていた。特に向かい風では中膨らみの流速分布となることから、フロント位置に大きな差が発生したと考えられる。200 秒での結果であるので、その影響は無視できないと考えられる。10 分間 (600 秒) 吹き続ければ、風なしと比べて、単純には 3 倍の 45m といった差が生じることが予測され、張り出し距離 480m の約 10% に相当することが分かる (表-1)。

表-1 モデル毎の各ケースでのフロント位置

ケース モデル	風なし	追い風 20m/s	向かい風 20m/s
DRR/FI [m]	665	670	660
Fantom	660	670	645

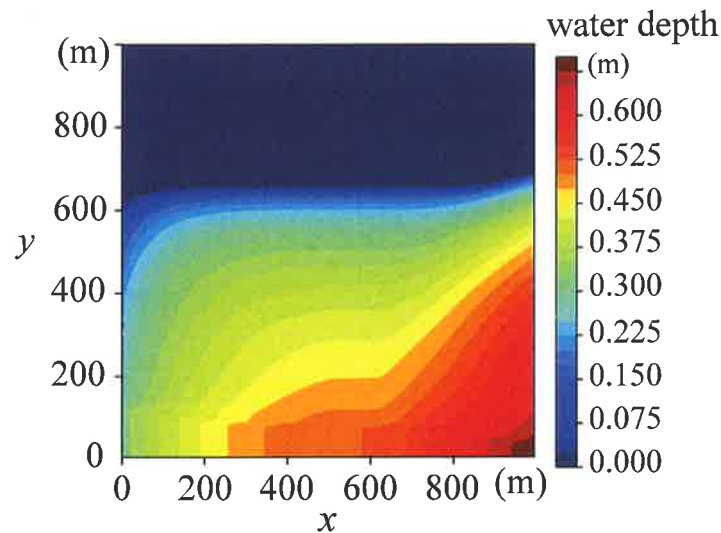


図-4 DRR/FI による 2 次元ダムブレイクシミュレーション結果 (200s 後)

2. 5 2 次元ダムブレイク

2 次元ダムブレイク問題に対して、横風が吹く場合を考える。計算領域を 1km×1km とし、 $y=0\sim 500\text{m}$ まで 0.5m の初期水深を与える。この条件で、1 次元ダムブレイクよりさらに大きな風速である西風 30m/s を計算期間中与えた (図-4, 図-5)。両者に共通しているのは、風上側よりも風下側の方に浸水が広がっているということである。両者の結果は非常に一致しているようにみえるため、Fantom から DRR/FI の計算結果を差し引いた値を表示することとした (図-6)。これにより、両モデルの結果は大体の領域ではほぼ一致しているが、浸水フロント付近では数 cm～最大 10cm 程度の浸水深の差が見られた。1 次元ダムブレイクでもみられた結果であり、フロントの進行に対して 10%～20% 程度の差が発生していることから、風による影響を受けた再現計算では DRR/FI のような長波近似モデルでは、氾濫域が過大に評価される可能性があることが分かった。

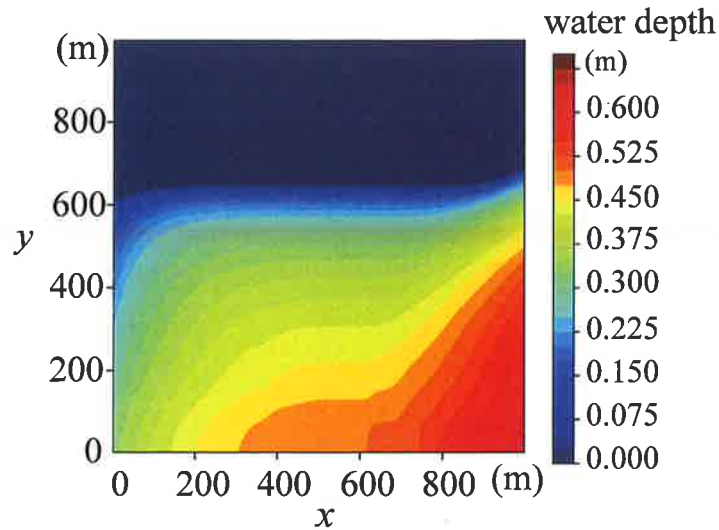


図-5 Fantomによる2次元ダムブレイクシミュレーション結果 (200s 後)

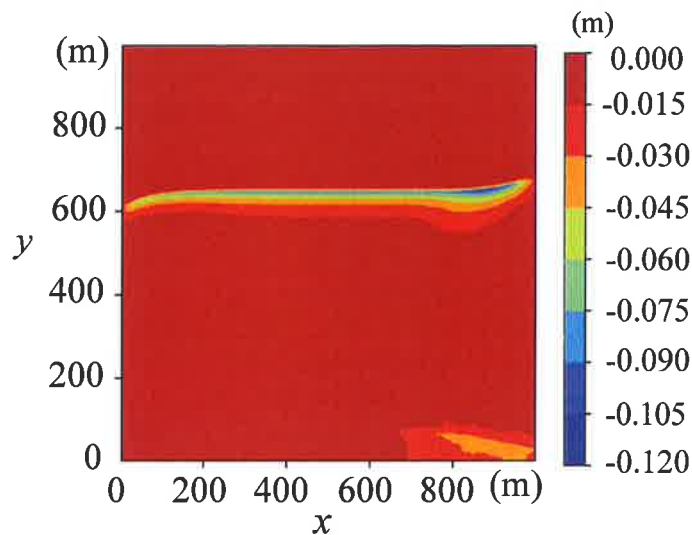


図-6 2次元ダムブレイクシミュレーション結果 (Fantom - DRR/FI)

3. おわりに

本研究では、風のせん断力が洪水氾濫に与える影響を検討した。2次元浅水流方程式モデル (DRR/FI)、3次元流体モデル (Fantom)、そして強非線形共分散波動モデル (FDS) を用いることとした。まず、1次元ダムブレイク問題について、細部において差はあるもの、風の影響による浸水伝播過程が両モデルで類似していることが見て取れた。その際、風の影響がなければ長波近似モデルでも十分な再現性を得ることが分かった。風速が 20 m/s 程度になると、浸水伝播速度や浸水深への影響は無視できない程度に大きいことが分かった。2次元ダムブレイク問題において、DRR/FI と Fantom の比較から、1次元ダムブレイク問題と同様な差を得ることができた。洪水シミュレーション手法はかなり確立されているが、風の影響は無視できるものではないことが分かった。今後は実際の風を用いたシミュレーションを実施していきたい。

参 考 文 献

- 1) 井上和也, 戸田圭一, 前田修 : 河川網が発達した領域での氾濫解析法とそのメコンデルタでの適用, 土木学会水工学論文集第 44 卷, pp. 485-490, 2000.
- 2) Kobayashi K, Takara K, Sano H, Tsumori H, Sekii K : A high-resolution large-scale flood hazard and economic risk model for the property loss insurance in Japan. *Journal of Flood Risk Management*, DOI: 10.1111/jfr3.12117, 2014.
- 3) Kobayashi K., D. Kitamura, K. Ando, N. Ohi: Parallel computing for high-resolution/large-scale flood simulation using the K supercomputer, *Hydrological Research Letters*, Vol. 9 , No. 4, pp. 61-68, 2015.
- 4) 小林健一郎, 中山恵介, 阪口詩乃 : 洪水氾濫解析を対象とした浅水流方程式の適用性に関する検討, 土木学会論文集 B1 (水工学) , Vol.73 , No.4 , pp. I_1405-I_1410, 2017.
- 5) Nakayama K., Shintani T., Kokubo K., Kakinuma T., Maruya Y., Komai K. and Okada T. : Residual current over a uniform slope due to breaking of internal waves in a two-layer system, *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, C10002, pp.11, 2012.
- 6) Nakayama K., Shintani T., Shimizu K., Okada T., Hinata H. and Komai K. : Horizontal and residual circulations driven by wind stress curl in Tokyo Bay, *Journal of Geophysical Research*, Vol.119, pp.1977-1992, 2014.
- 7) Nakayama, K. and Kakinuma, T.: Internal waves in a two-layer system using fully nonlinear internal-wave equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.62, pp.574-590, 2010.
- 8) Sakaguchi, S., Nakayama, K., Vu, T. T. T., Komai, K. and Nielsen, P.: Non-linear wave equations for free surface flow over a bump, *Coastal Engineering Journal*, Vol.62, pp.159-169, 2020.
- 9) Kondo, J. : Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, *Boundary Layer Meteorology*, 9, pp. 91-112, 1975.

著 者

中山 恵介 所員, 博士 (工学), 水工学
小林健一郎 研究員, 博士 (工学), 水工学