複雑な地形起伏を有する場における氾濫流の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATIONS OF FLOOD FLOWS IN FLOOD PLAIN WITH COMPLICATED TOPOGRAPHY

重枝 未玲¹・秋山 壽一郎²

Mirei SHIGE-EDA and Juichiro AKIYAMA

¹学生会員 修士(工) 九州工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 日本学術振興会特別研究員
(〒 804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

²正会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (同上)

A numerical model for 2D flood flows through a flood plain of complicated topography is developed. The model is based on Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows (SA-FUF-2DF model). An upwind treatment of bed slope terms and a procedure for the movement of a wet/dry boundary are incorporated into the model to treat flood flows on complicated topography. The model is verified against the 1D dam-break problem on an irregular bed as well as the experimental data of depth and velocities on the flood flow where submerged/emerged topography are presented. It shows that the model can reproduce the complex behavior of the flows with reasonable accuracy.

Key Words : flood flows, SA-FUF-2DFmodel, dry/wet treatment, complicated topography, submerge/emerge

1. はじめに

予想を超えるような局地的集中豪雨が近年頻発するようになってきた。このため、洪水氾濫対策は洪水氾濫を前提とした氾濫原管理に基づく対策、すなわち洪水避難体制などのソフト面での危機管理対策や水害防備林等による氾濫流制御に基づく家屋等への被害軽減対策へとシフトする方向にあり、効果的な洪水氾濫対策のベースとなる予測精度の高い氾濫シミュレーションモデルが強く求められている。

氾濫流の挙動は、氾濫原に存在する丘陵や窪地などの地形起伏、下水道網、家屋等の構造物および樹林帯などの様々な要素の影響を強く受ける。そのため、氾濫シミュレーションモデルには、これらの要素が氾濫流に及ぼす影響や効果を適切に評価できることが要求される。家屋群、下水道網や河川網などの氾濫流に固有な要素を考慮した数値モデルには、家屋群を考慮に入れた福岡ら¹⁾、末次と栗城²⁾、著者ら^{3),4),5)}のモデル、下水道網や河川網を考慮に入れた川池ら⁶⁾のモデル、樹林帯を考慮に入れた著者ら⁷⁾のモデルなどがある。水没状態の地形起伏を考慮したモデルには、Glaister⁸⁾や

Bermudez and Vazquez et al.⁹⁾のモデル、水没/非水没状態の地形起伏を考慮に入れたモデルには、Bradford and Sanders¹⁰⁾およびLiu et al.¹¹⁾のモデルがある。

地形起伏を取り扱う上で重要となるのは、基礎方程式に含まれる地盤高勾配項(水路床勾配)の離散化手法および水没/非水没つまりドライベッド状態の判別とその取り扱いである。氾濫シミュレーションモデルの基礎方程式に用いられる浅水流方程式は、双曲型の偏微分方程式であり、地盤高勾配項の離散化には基礎方程式の特性を踏まえた手法が必要となる。Glaister⁸⁾やBermudez and Vazquez et al.⁹⁾により、その離散化手法が提案されているものの、実験結果との比較による定量的な検証は行われていない。一方、ドライベッド状態の判別とその取り扱いについては、Bradford and Sanders¹⁰⁾、Liu et al.¹¹⁾、Zhao et al.¹²⁾およびFraccarollo and Toro¹³⁾によって研究がなされている。この中でもBradford and Sanders¹⁰⁾およびLiu et al.¹¹⁾の研究は、水没/非水没状態の地形起伏を考慮したドライベッド状態の取り扱い方法を提案し、単一地形起伏が存在する場における津波の実験結果を用いてモデルの検証を行っている。しかし、いずれのモデルも直交格子に基づくものであり、

複雑な地形形状や高低差のある構造物が存在するような氾濫原、例えば市街地氾濫シミュレーションでは細かな計算格子が必要となる。

非構造格子は、直交格子に比べ、少ない格子数でより正確に地形形状等を表現できることから、氾濫原の複雑な平面形状を取り扱う上での有効な手法として、洪水流や氾濫モデルで用いられるようになっている^{3),4),5),6)}。このような数値モデルに、氾濫流の状態に応じて水没／非水没状態となるような地形形状や構造物の取り扱いを組み込むことで、より複雑な氾濫現象に適用可能な数値モデルを構築できると考えられる。しかし、そのようなモデルは著者の知る限り存在していない。

本研究は、以上のような背景を踏まえ、地盤高勾配の取り扱いについては貯水槽部の地盤高が変化する1次元ダム破壊に関するテスト問題に基づき、水没／非水没状態を考慮したドライベッド状態の取り扱いについては水没／非水没状態となる地形起伏上の2次元流れに関する実験データに基づき、氾濫原に存在する水没／非水没状態となる地形起伏や構造物の取り扱いを組み込んだ非構造格子に基づくSA-FUF-2DFモデル(A Spatial Averaged Finite volume method on Unstructured grid using FDS technique for 2D Flood flows)⁷⁾の妥当性を検討したものである。

2. 数値モデル

(1) SA-FUF-2DF モデルの概要⁷⁾

基礎方程式は空間平均操作を施した浅水方程式であり、 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、および S を発生項・消滅項ベクトルとすると、式(1)で表される。

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

$$U = (h, uh, vh)^T; E = (uh, u^2h + 1/2gh^2, uvh)^T;$$

$$F = (vh, uvh, v^2h + 1/2gh^2)^T;$$

$$S = (0, -gh(S_{ox} - S_{fx}) + F_x, -gh(S_{oy} - S_{fy}) + F_y)^T$$

ここに、 h は水深、 u と v はそれぞれ x と y 方向の流速、 g は重力加速度、 S_{ox} と S_{oy} はそれぞれ x と y 方向の地盤高勾配、および S_{fx} と S_{fy} はそれぞれ x と y 方向の摩擦勾配である。摩擦勾配 S_{fx} と S_{fy} は、マンニングの公式で計算される。 F_x および F_y は、計算メッシュ内に物体群が含まれる場合に、個々の物体に働く流体力を空間的に平均することで基礎方程式に付加される流体力項である。

式(1)を任意の検査体積 Ω で積分した後、ガウスの発散定理を適用すると、式(2)の積分型の浅水方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U dS + \oint_{\partial\Omega} (\mathcal{F} \cdot \mathbf{n}) dL + \int_{\Omega} S dS = 0 \quad (2)$$

ここに、 $\partial\Omega$ は検査体積の境界線、 S は Ω の面積、および L は $\partial\Omega$ の長さである。 $\mathcal{F} \cdot \mathbf{n}$ 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 と 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 $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ を用いると、式(3)のようになる。

$$\mathcal{F} \cdot \mathbf{n} = En_x + Fn_y \quad (3)$$

式(2)の離散化は有限体積法(FVM)に基づき行う。時間積分にはEulerの陽解法を、空間積分には流束差分法(FDS)¹⁴⁾を、計算格子には非構造格子を用いる。

(2) 地盤高勾配の取り扱い

地盤高勾配の離散化については、静水状態($u = v = 0$)において式(4)を満たすように、Glaister⁸⁾やBermudez and Vazquez et al.⁹⁾が提案するように、流束ベクトルと同様な手法で風上化を行う。

$$\oint_{\partial\Omega_i} (\mathcal{F} \cdot \mathbf{n}) dL + \int_{\Omega_i} S dS = 0 \quad (4)$$

ここで i は計算セルに対する添字である。まず、式(5)のように発生・消滅項ベクトル S を空間微分を含む項と含まない項に分離する。

$$S_i = S_{si} + \frac{1}{V_i} \sum_{k=1}^{N_e} S_k^* \quad (5)$$

ここに、 S_{si} は空間微分を含まない発生・消滅項ベクトル、 S_k^* は空間微分を含む発生・消滅項ベクトル、 V_i は計算セルの面積、および N_e は計算セルを構成する境界線数(計算セルが三角形の場合 $N_e=3$)である。ここに添字 k は、計算セルを構成する境界線に対する添字である。 S_{si} と S_k^* は、それぞれ次式のように表される。

$$S_{si} = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{fx} \\ ghS_{fy} \end{pmatrix}_i; S_k^* = \frac{1}{2} \left(\tilde{S}_k - \sum_{j=1}^3 \left(\frac{|\tilde{\lambda}^j|}{\tilde{\lambda}^j} \tilde{\beta}^j \tilde{e}^j \right)_k \right) \quad (6)$$

ここに、式中の $\tilde{\lambda}^j$ は流束ベクトルの固有値であり、この符号により地盤高の離散化方向が決定される。 $\tilde{S}_k$ 、 $\tilde{\lambda}^j$ 、 $\tilde{e}^j$ および $\tilde{\beta}^j$ はそれぞれ次式のように表すことができる。

$$\tilde{S}_k = (0, g\tilde{h}(L_k\Delta z_b n_x), g\tilde{h}(L_k\Delta z_b n_y))^T$$

$$\tilde{\lambda}^1 = \tilde{u}n_x + \tilde{v}n_y + \tilde{c}; \tilde{\lambda}^2 = \tilde{u}n_x + \tilde{v}n_y;$$

$$\tilde{\lambda}^3 = \tilde{u}n_x + \tilde{v}n_y - \tilde{c}$$

$$\tilde{e}^1 = (1, \tilde{u} + \tilde{c}n_x, \tilde{v} + \tilde{c}n_y)^T; \tilde{e}^2 = (0, -\tilde{c}n_x, \tilde{c}n_y)^T;$$

$$\tilde{e}^3 = (1, \tilde{u} - \tilde{c}n_x, \tilde{v} - \tilde{c}n_y)^T$$

$$(\tilde{\beta}^1, \tilde{\beta}^2, \tilde{\beta}^3)^T = \frac{g\tilde{h}(L_k\Delta z_b)}{2\tilde{c}} (1, 0, -1)^T \quad (7)$$

図-1 部分ドライセルの概念図

図-2 実験装置および物体群の配列状況

図-3 測定点

ここに、 z_b は地盤高、 L_k はセル境界線の長さ、 Δ は $\Delta(\bullet) = (\bullet)_R - (\bullet)_L$ で定義されるオペレータ、 $\tilde{u} = (\sqrt{h_L}u_L + \sqrt{h_R}u_R)/(\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R})$ 、 $\tilde{v} = (\sqrt{h_L}v_L + \sqrt{h_R}v_R)/(\sqrt{h_L} + \sqrt{h_R})$ 、 $\tilde{c} = \sqrt{g(h_L + h_R)/2}$ および $\tilde{h} = (h_L + h_R)/2$ である。

(3) 水没／非水没状態を考慮したドライベッド条件

流束差分法では水深が 0 の場合は、セル境界線における数値流束を定められないため、計算不能となる^{12),13)}。そこで、そのような場合は極めて小さな水深 h_v を与える。ここでは、水深 h が h_v 以下であるセルをドライセルと定義する。

ドライセルは完全ドライセルと部分ドライセルに分けられる。完全ドライセルは隣接するセルの水深 h が全て h_v 以下のセルであり、そこでの水深および流速はそれぞれ $h = h_v$ および $u=v=0$ に設定する。一方、部分ドライセルは、隣接するセルのいずれかが水深 $h > h_v$

図-4 ダム破壊後 9.0 秒後の結果

となるセルであり、隣接するセルの水位とドライセルの地盤高との高低差に基づき、次のように処理する。図-1に示すように、ドライセルの地盤高より隣接セルの水位が高い場合には、通常通り計算を行う。一方、ドライセルの地盤高より隣接セルの水位が低い場合には、両セルの境界に閉境界条件を与え、ドライセルの水深および流速をそれぞれ $h = h_v$ および $u=v=0$ に設定する。 h_v の値は、1次元ダム破壊流れ問題を用いた数値実験結果に基づき計算精度および効率を勘案した上で 0.00001m とした。

水深が 0 に極めて近く流速が大きい洪水氾濫流のフロント部分では摩擦勾配 S_{fx} と S_{fy} が極めて大きくなるため、この場合も計算不能となる¹⁵⁾。これに対しては、限界の水深 h_c を与え、水深が h_c 以下となるセルでの摩擦勾配を $S_{fx}=S_{fy}=0$ として処理した。 h_c の値は、上述した h_v 値を用い $n=0\sim 0.07$ 程度まで計算可能な最小の値である 0.001m を与えた。

3. 実験の概要

実験装置は、図-2に示すような貯水槽部(幅 2.98m、長さ 0.85m)、越流・整流部(幅 2.4m、長さ 0.79m)および氾濫部(幅 2.4m、長さ 2.77m)より構成される洪水氾濫水槽である。整流部から流出部へは幅 2.4m から 0.5m へ緩やかに絞り込まれている。なお、このような漸縮に際して流れの剥離が生じないように配慮されている。また、氾濫部下流端には羽型堰が設置されている。氾濫部に設置された要素は、地形起伏を表す高さが異なる 2 種類の物体であり、それらの配置と諸元はそれぞれ図-2に示すとおりである。ただし、その物体は地形特性や想定スケール等を考慮した上でモデル化しているわけではない。これは、本研究の主眼が水没／非水没状態となる地形起伏や物体の取り扱いを組み込んだ非構造格子に基づく数値モデルの基本性能の検証にあるためである。

実験条件としては、定常状態で流量 $Q=0.0155\text{m}^3/\text{s}$ とし、氾濫流の水深は羽型堰の高さ (Case A: 0.08m、

図-5 水深コンターと流速ベクトル図 (Case A : 水没)

Case B: 0.04m) で調節し、地形起伏の水没/非水没状態を再現した。図-3 中に示した測定位置で、容量式波高計により水深 h 、電磁流速計により底面より 0.02m 上方から水面まで 0.01m 刻みの x および y 方向の流速 u_x および u_y を測定した。流速 u_x および u_y に基づき水深方向の流速分布を 2 次曲線で近似し、その積分より単位幅流量を求め、それを水深で除することで、 x および y 方向の水深平均流速 u , v を求めた。水深および流速測定のサンプリング時間とサンプリング間隔は、それぞれ 50 秒と 0.05 秒である。

4. 数値モデルの検証

(1) テスト問題に対する検証

地盤高勾配の取り扱いの妥当性を検証する目的で、貯水槽部が図-4 のように変化する河床でのダム破壊流れのテスト問題に本数値モデルを適用した。従って、ここでは底面摩擦は考慮していない。貯水槽部の河床の起伏および水位にはそれぞれ $z_b = 100.0 - (50x/1000 + 10 \cdot \sin(4x/1000\pi))/8$ および一定水位を与えた。計算に用いた格子数は 800 で、流下方向の分割数は 80 ($\Delta x = 25\text{m}$) である。

水平面上のダム破壊流れでは貯水槽部の水深を h_r とすると、貯水槽部を伝播する波の波速は $\sqrt{gh_r}$ で表される。この場合、ダム付近の最大水深が 7.0m 程度であることから、波速は約 8.3m/s となる。この波が伝播し

図-6 水深コンターと流速ベクトル図 (Case B : 水没/非水没)

た際に、貯水槽部では流れが生じる。

図-4 にダム破壊後 9 秒後の計算結果を示す。なお、図中には本研究で用いた風上化を行った離散化の妥当性を示すために、中心差分を用いた結果もあわせて示している。地盤高勾配が適切に取り扱えているのであれば、波のフロント位置より上流側で流れが生じることはない。先程の波速を用いると、貯水槽部を伝播する波は、9 秒後には約 75.0m 程度上流に伝播する。しかし、地盤高勾配を中心差分で離散化した場合、 $x = -75\text{m}$ よりもはるか上流 ($x = -1000\text{m}$) で水面形に変化が生じており、そこでは流れが生じていることがわかる。一方、本研究で用いた離散化では、波のフロント位置は波速より求めた $x = -75.0\text{m}$ より Δx ほど大きい $x = -100\text{m}$ 程度で、その位置より上流の水位は一定であり、そこでは流れが生じていない。

以上のことから、本数値モデルが地盤高勾配を適切に評価できることがわかる。

(2) 本実験結果に対する検証

計算メッシュのサイズを数通り変化させた数値実験を行い、計算精度と効率の良い計算メッシュサイズおよび配列を決定した結果、3986 個のメッシュで計算領域を分割することにした。計算に用いた Manning の粗度係数 n は、底面がアクリル板であることを踏まえ、 $n = 0.01$ とした。境界条件として、上流端には一定単位幅流量 ($q = 6.5 \times 10^{-3} (\text{m}^2/\text{s})$)、下流端には実験より求めた一

図-7 水位の比較 (Case A : 水没)

定水深 (Case A: $h=0.10\text{m}$, Case B: $h=0.056\text{m}$), 壁面には閉境界条件をそれぞれ与えた. 初期条件として, 流速 $u=v=0$ と全ての地形起伏が非水没状態となるような水位および最も高い地形起伏が非水没状態となるような水位の2通りを与えたが, いずれの定常解にも有意な差異は認められなかった. Bradford and Sanders¹⁰⁾ が指摘したように, ドライベッド状態の取り扱いでは, その方法によっては大きな質量エラーが生じ, 引いては汜濫流の広がりを通小評価することにつながる. ちなみに, 本研究で提案した取り扱いは質量エラーが $1.0 \times 10^{-6} \sim 3\%$ の間であった.

図-5および図-6は, それぞれ定常状態と判断された時点での数値シミュレーションより得られた水面形状と流速ベクトルを各Caseごとに示したものである. 両Caseの実験および計算のいずれも, 流出部付近で常射流混在流が生じていた. 全ての地形起伏が水没状態となるCase Aでは, 図-3に示すA-A'およびE-E'断面の交点を中心とし設置された地形起伏の影響により主流速の方向が大きく曲げられる様子が確認できる. また, いずれの地形起伏においても, 前方で水位が上昇し地形起伏上で水位が低下することも確認できる. 非水没状態の地形起伏が現れるCase Bでは, 図-3に示すB-B'およびD-D'断面の交点を中心とし設置された地形起伏により流れが2分される様子が確認できる. また, 流出部の両端と側壁の間に大きな渦が発生していることも確認できる. 発泡スチロール球を用いた流れの可視化実験においても, このような流況が観測された.

図-8 水位の比較 (Case B : 水没/非水没)

図-7および図-8は, それぞれCase AおよびCase Bの図-3に示すA-A'からF-F'断面における水面形状について計算結果と実験値との比較を行ったものである. これらの図から, Case Aでは, 地形起伏上で水面形にくぼみが生じていること, 水面形状はほぼ一定であること, などがわかる. またCase Bでは, 非水没物体の前面で水位が上昇していること, 非水没物体の前面に比べ背後では水位が低下していること, などが確認できる. いずれのCaseにおいても計算結果は実験をほぼ再現している.

図-9および図-10は, それぞれCase AおよびCase Bの図-3に示すA-A'からC-C'断面における x および y 方向の水深平均流速について比較を行ったものである. なお, 図中の影をつけたところは, 地形起伏の位置を表している. これらの図から, Case AのB-B'断面では, B-B'およびD-D'断面の交点を中心とし設置された地形起伏上で x 方向の流速は加速され, その下流側では水深が深くなるために急激に減速することなどが確認できる. またCase Bでは非水没物体の影響の小さい上流側で, 全体的に x 方向の流速が早いことなどがわかる. B-B'断面の流出口付近では跳水が発生したため, x 方向流速が急激に減速している. いずれのCaseにおいても計算結果は実験をほぼ再現していることも確認できる.

以上のことから, SA-FUF-2DFモデルが水没/非水没状態の物体が混在し, そこで常射流混在流となるような極めて複雑な流況を再現できることがわかる.

図-9 x , y 方向流速の比較 (Case A : 水没)

図-10 x , y 方向流速の比較 (Case B : 水没/非水没)

5. おわりに

本研究では水没/非水没の地形起伏の取り扱いを組み込んだ SA-FUF-2DF モデルの検証をテスト問題および実験に基づき行った。その結果、SA-FUF-2DF モデルが地盤高勾配を適正に取り扱えること、水没/非水没状態にある地形起伏が存在する場合での複雑な洪水氾濫流の挙動を十分な精度で予測できることなどがわかった。今後は本数値モデルの実問題への適用性について検討する予定である。

謝辞: 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (特別研究員奨励費) の援助を受けた。また、現 (株) 奥村組 小林俊彦君および本学大学院生 大田和正君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 末次忠司, 栗城 稔: 改良した氾濫モデルによる氾濫流の再現と防災への応用に関する研究, 土木学会論文集, No. 593/II-44, pp. 41-50, 1998.
- 3) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦 勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面 2 次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 895-900, 2001.
- 4) 秋山壽一郎, 重枝未玲, 浦 勝: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく 1 次および 2 次精度平面 2 次元洪水流数値モデル, 土木学会論文集, No. 705/II-59, pp. 31-43, 2002.
- 5) 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.

- 6) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 中川吉人: 寝屋川流域を対象とした都市域の氾濫解析, 河川技術論文集, Vol. 8, pp. 37-42, 2002.
- 7) 重枝未玲, 秋山壽一郎: 水害防備林の洪水氾濫流制御と被害軽減効果, 土木学会論文集: (投稿中).
- 8) Glaister, P.: Approximate Riemann solutions of shallow water equations, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 26, pp. 293-306, 1988.
- 9) Bermudez, A. and Vazquez, M.: Upwind methods for hyperbolic conservation laws with source terms, *Computers & Fluids*, Vol. 8, No. 8, pp. 1049-1071, 1994.
- 10) Bradford, S. F. and Sanders, B. F.: Finite-volume model for shallow-water flooding of arbitrary topography, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 3, pp. 289-298, 2002.
- 11) Liu, L. P., Cho, Y., Driggs, M., Kanoglu, U. and Synolakis, C.: Runup of solitary waves on a circular island, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 302, pp. 259-285, 1995.
- 12) Zhao, D. H., Shen, H. W., Tabios III, G. Q., Lai, J. S. and Tan, W. Y.: Finite volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 7, pp. 863-883, 1994.
- 13) Fraccarollo, L. and Toro, E. F.: Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 6, pp. 843-864, 1995.
- 14) Roe, P. L.: Approximate Riemann solvers, parameter vectors and difference schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357-372, 1981.
- 15) アキレス・クマール・ジャ, 秋山壽一郎, 浦 勝, 重枝未玲: FDS を用いた洪水流の数値モデル, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 73-82, 2000.

(2002. 9. 30 受付)