# 建物間に浸入する氾濫流に対する 3次元多相場の数値計算法(3D MICS)の適用

APPLICABILITY OF PREDICTION METHOD FOR MULTIPHASE-FLOWS (3D MICS) TO FLOOD FLOWS AMONG MULTIPLE BUILDINGS

# 牛島 省<sup>1</sup>·牧野 統師<sup>2</sup>·禰津 家久<sup>3</sup>

Satoru USHIJIMA, Osashi MAKINO, and Iehisa NEZU

# <sup>1</sup> 正会員 工博 京都大学大学院助教授 社会基盤工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町) <sup>2</sup> 学生員 京都大学工学部 地球工学科 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町) <sup>3</sup> フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 社会基盤工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

It is important to evaluate the detailed inundation process of flood flows in the area where multiple buildings closely exist. In this study, a small-scale experimental model is used to measure the initial stage of the unsteady free-surface flows which extend among impermeable boxes that simulate the arrangement of buildings. The experimental results are numerically predicted with a 3D computational method for multiphase flows, 3D MICS, which enables us to deal with the front area of free-surface flows without additional manipulation. As a result of computations, it has been shown that the unsteady process of flood flows are reasonably predicted with 3D MICS.

KeyWords : urban flood, free-surface flow, multiphase flow, 3D MICS

# 1.はじめに

洪水や津波等によって生ずる氾濫流に対しては,従 来行われてきたように氾濫域全体を対象とする浸水状 況の把握が重要であるが,このような評価に加えて, 近年より局所的かつ微視的なスケールの現象,すなわ ち破堤部付近の氾濫流による家屋の倒壊や,建物や道 路配置の細部に着目した氾濫水の挙動,また地下空間 への浸水過程などに対する現象解明と評価方法の確立 が重要な検討課題とされている.

氾濫流による建造物に対する被害に関しては,家屋 に作用する流体力を浅水流モデルに組み込んだ評価法 の提案<sup>1)</sup>や,家屋破壊と流体力に関する調査<sup>2)</sup>など が行われている.特に,2004年の新潟豪雨災害による 堤防決壊による建造物の破壊に関しては,2次元計算 に家屋流出モデルを組み込んだ手法による評価<sup>3)</sup>や, 高い分解能の数値データを用いた格子サイズ1mの詳 細な洪水氾濫流の計算<sup>4)</sup>などが行われている.

また,市街地を対象とした 1/100 スケールの詳細な 洪水氾濫流に関する実験が行われており,住区への浸 水のモデル化と非構造格子を用いた 2 次元計算法の適 用性が検討されている<sup>5)</sup>.さらに,地下空間への浸水 過程に関しては,階層構造となる複雑な流路空間への 浸水過程<sup>6)</sup>や地上部と地下空間を統合して扱う解析法 <sup>7)</sup>などが検討されている. 以上のような,氾濫流が建造物に及ぼす流体力や, 建物が密集した地域や地下空間といった局所的な領域 における自由水面流れの挙動を適切に評価するために は,構造物や微地形などを考慮した詳細な氾濫流の挙 動,すなわち状況によっては3次元的な流況を正しく 把握することが重要である.また,流体力の評価に際 しては,現象に対する仮定や近似,特に評価不能な効 果が集約された未定係数等が可能な限り少ない普遍的 な力学モデルを用いることが必要であると考えられる.

上記のような氾濫流の局所的な挙動を評価するため に、本報では3次元多相場に対して提案された数値解 法(3D MICS)を利用すること考え、その適用性を検 討する.MICSでは、抗力係数等の経験定数を用いず に物体に作用する流体力を評価でき、またドライエリ アに進入する3次元自由水面流れを容易に再現できる ので、氾濫流の浸入過程や先端付近の局所的な挙動を 評価する際に役立つと考えられる.

本報では,建物の配置を単純に模擬した小規模な模型を用いて,自由水面流れが道路部分や建物の間に流入して,模型内に広がっていく非定常的な過程を把握する.そして,この結果を対象としてMICSによる数値計算を行う.MICSでは気相と液相を計算対象として3次元計算が行われる.実験結果との比較により解法の適用性を検討する.

#### 2.数值解析手法

### 計算手法の概要

水深と同程度の比較的大きいスケールの物体を含む 自由水面流れを扱うことが可能な多相流場に対する数 値計算法である MICS<sup>8)</sup> (Multiphase Incompressible flow solver with Collocated grid System) を用いて, これまで2次元あるいは3次元自由水面流れにおける 物体の運動<sup>9),10)</sup>が概ね適切に再現されることが示さ れている.MICS では,抗力係数等の経験定数を用い ずに物体に作用する流体力を評価でき,またドライエ リアに進入する3次元自由水面流れを容易に再現でき るので,氾濫流による構造物への流体力や漂流物など の物体輸送の予測,また微地形等が影響する局所的な 自由水面流れの挙動などを評価する際に役立つと考え られる.本報では,氾濫流に対する解法の適用を図る ための第一歩として,建物を単純に模擬する不透水性 の構造物が複数存在する場に自由水面流れが浸入する 過程の計算を行い,模型実験で得られた結果との比較 を通じて解法の妥当性や問題点を検討する.

(2) 基礎方程式

本報の数値計算法では,空気と水という気液相が計 算対象とされる.MICS では,両者は混ざり合わない 物性の異なる非圧縮性流体として扱われるが,Euler 格子に基づく計算セル内では,これらの混合体に対し て一流体モデルが用いられる.基礎方程式は混合気体 に対する支配方程式<sup>11)</sup>として示されているものと同 様であり,その導出の際に用いられる仮定は文献<sup>10)</sup> に示されている.

気液相の支配基礎式は,質量と運動量の保存則から 構成される.計算セル内の混合体に対する Euler 表記 および Lagrange 表記された質量保存則はそれぞれ以 下のように表される.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = 0 \tag{2}$$

ここで, $\rho$ は計算セル内で体積平均された密度, $u_j$ は 質量平均された $x_j$ 方向の流速成分である.なお,質 量平均速度と気液各相の流速差に起因する項はここで は無視している<sup>10)</sup>.

以上の2式のうち,式(1)の計算結果はVOF法で 用いられる密度関数と同様に気液各相を区別するため に用いられる.ただし,MICSではVOF法と異なり, 気液界面付近における液相の移動を規定する人工的な 諸条件は用いられず,単に式(1)を有限体積法で離散 化して計算領域全体で解くことのみが行われる. 式(1)と式(2)から非圧縮条件に相当する次式が導かれる.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{3}$$

この非圧縮条件が満足されるよう, MICS における圧 力計算では C-HSMAC 法<sup>12)</sup> による収束計算が行わ れる.

次に,水・空気の混合体に対する運動方程式として は,次の保存形の関係式が用いられる<sup>10)</sup>.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = f_i + f_{s,i}$$
$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mu u_j) \right]$$
(4)

ここに, $f_i \ge f_{s,i}$ はそれぞれ外力と表面張力に起因する加速度成分, $p \ge \mu$ はそれぞれ体積平均された圧力と粘性率である.本報では, $f_{s,i} = 0$ としている.

(3) 計算手順の概要

基礎方程式の計算手順は,コロケート格子を用いる 非圧縮性流体の計算法<sup>13)</sup>と同様である.セル中心に定 義された流速成分  $u_i$ を用いて,保存系の運動方程式の 圧力項を除く部分からセル中心における流速の推定値 を計算する.移流計算を行うためのセル境界のフラッ クスは5次精度の手法により,数値振動を抑制するた めのフラックス制御を行って求めるものとし<sup>14)</sup>,計算 時間を短縮化するために陰的解法である C-ISMAC 法 <sup>15)</sup>を用いる.

保存形表示となっている式(1)も運動方程式と同様 に有限体積法で離散化され,セル境界のフラックスは 5次精度のTVDスキームで求めるものとした.運動 方程式と同じ時間ステップで計算できるよう,時間方 向にC-ISMAC法を同様に用いて離散化した.

次に,圧力計算段階では,セル境界に空間内挿され た流速の推定値に圧力勾配を考慮した流速成分を用い て,C-HSMAC法<sup>16)</sup>により連続性を満足するような 流速成分と圧力場を求める.本研究の計算では,3次元 計算セルの大きさを単位とする不透水性の構造物(ボッ クス)を計算領域内の任意の位置に置くことができる ように,次節で述べるような工夫を加えた.

(4) 流体中に置かれた障害物 (ボックス) の取り扱い

本報では建物を模擬する不透水性の構造物が存在す る場において,ドライエリアに進入する自由水面流れ を主な計算対象としている.このような流路空間を表 現するため,流体中に固定された直方体形状の障害物 を設置する.この障害物を,以下では「ボックス」と 表現する.ボックスは,計算セルを最小単位として, これを積み木のように組み合わせて形成される.ボッ クスは,空間中に固定された固体領域であり,流体運動によって移動することはない.

流体計算においてこのような固体領域を取り扱う場合には,これを計算領域から除外する方法も考えられるが,その場合には境界形状が複雑になる.また流体中に孤立するボックスの取り扱いが容易ではない.このため,本研究ではこれを計算範囲に含め,計算過程で以下に示すようなボックス表面および内部における条件を設定することとした.

C-HSMAC 法における圧力の時間変化分  $\phi = p^{n+1} - p^n$ の連立 1 次方程式の計算では,特にボックスの角部の流体領域の計算を適切に行う必要がある.たとえば, 図-1 に示すように,ボックス角部に位置する計算セルC<sub>C</sub>には,側面と上部にある 2 つの流体セル C<sub>S</sub> と C<sub>T</sub>の圧力計算を行う際に, $\partial p/\partial n = 0$ を満足するような境界条件が設定される.ここにnはセル境界面の法線方向を表す.すなわち,C<sub>S</sub>の圧力計算の際にはC<sub>C</sub>に $\phi_S$ が設定され,一方C<sub>T</sub>の圧力計算ではC<sub>C</sub>に $\phi_T$ が設定される.しかし,一般には, $\phi_S$  と $\phi_T$ は一致しないので,この例ではボックス内のセル中心に異なる圧力を設定する必要がある.

連立1次方程式の高速解法としてクリロフ部分空間 法に代表される非定常反復解法を用いる場合には,計 算過程でC<sub>C</sub>に異なる圧力を設定することはできない ので,本報ではボックス内に複数の圧力を定義する方 法を用いることとした.図-1の例では1つの圧力計算 点が追加される.もし,境界に接触せず,流体中に孤 立したボックスの最小単位が1つ存在しているときに は,そのセルには5つの圧力計算点が追加されること になる.



図-1 ボックス角部におけるセル中心点の配置

本報の解法では,3次元空間中の圧力変数を1次元 表示して,その連立1次方程式の計算にBi-CGSTAB 法を用いることとした. 3.建物配置模型を用いる実験と考察

#### (1) 実験方法

実験模型はプラスチック製の直方体の模型ピースを 組み合わせて作成した.実験模型全体の概略形状と座 標系を図-2に示す.模型1ピースの大きさは,x, y, zの各方向におおよそ 16 mm × 16 mm × 10 mm で ある.実験模型の平面的な大きさは,x, y の各方向に  $20 \times 24$ ピースであり,水が漏れないように周囲に1 ピースの幅の境界を設けた.水の流入部分はx = 0の 境界上にあり,流入口のy方向位置は境界を含めて4 および5ピース目となっている.模型床面には厚さ約 2 mm の平滑なベースプレートが設置されているため, 流入口の高さは約8 mm となっている.





模型内部には,都市部の河川近傍の都市計画基本図 を参照して,建物配置をごく単純化した形状を2種 類定め,これに従って模型ピースを組み上げた.した がって,これらの建物配置は特定の地点の建物密度等 を再現したものではない.2種類の配置を case-A およ び case-B とする.前者の建物配置は図-3,後者は図-5 に示されるとおりである.case-A は模型2ピース幅の 道路が基本形状を作り,その内部に1ピース幅の建物 間の隙間がある比較的規則的な建物配置となっている. 一方,case-B では道路の碁盤目状の配置がほとんどな く,建物の並び方がより不規則的となる条件とした.

流入口から供給される水の流量は約 50 cm<sup>3</sup>/s であ り,流入開始から模型ピースの間隙部分がすべて冠水 する状態までを実験の対象とした.このため,模型ピー スを越流するような流況は発生せず,隙間のみに自由 水面流れが生ずる.なお,本実験は浸入水の挙動を把 握する基礎実験と位置づけており,水理条件には実際 の洪水流との相似性等は考慮されていない.

実験では,模型を水平に設置し,模型内を流下する 自由水面流れが明瞭となるように,流入水を水性塗料 で着色した.このようにして,鉛直上方からデジタル ビデオカメラで流入水が広がる状況を撮影した.







(d) t = 5.0 (s)



建物間に浸入する自由水面流れの計算結果 (case-A) X-4

(e) t = 6.0 (s)







(d) t = 4.0 (s)

(e) t = 5.0 (s)

(f) t = 6.0 (s)

図-6 建物間に浸入する自由水面流れの計算結果 (case-B)

#### (2) 計算条件

上記の水理実験を対象とする数値計算では,x, y, zの各方向の計算セル数を  $40 \times 48 \times 10$  とした.この条件では,模型 1 ピースが  $2 \times 2 \times 2$ のセルで表現される.運動方程式の予測段階の計算と密度の移流方程式の計算では,C-ISMAC法<sup>15)</sup>を用い,時間刻み  $\Delta t$ は  $1.0 \times 10^{-2}$  秒とした.水の動粘性係数と密度は  $1.0 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s および  $1.0 \times 10^{3}$  kg/m<sup>3</sup> とし,空気に対してはそれぞれ 1/10,1/1000の値を用いた.C-HSMAC法における連続性の誤差のしきい値は  $1.0 \times 10^{-10}$ とした.Pentium III 1GHz CPU を用いた場合,実時間 10 秒の計算に約 25 分の計算時間を要した.

#### (3) 実験結果と計算結果の比較

2ケースの建物配置に対する実験結果と数値計算結 果を図-3から図-6に示す.実験は各ケースとも模型 を実験室床面に置くときの方向を変えて複数回行い, それぞれについて流入水の挙動を撮影した.その結果, 模型を設置する実験室床面の微小な傾きが流れの広が り状況に影響を及ぼす場合があり,また同一の模型設 置条件においても微細な部分の流況,たとえば幅の狭 い道路部分におけるドライエリアの消失等に関しては, 複数回の実験で多少の差異が見られる場合もあった.本 報では標準的と判断される各ケースの実験結果を図-3 と図-5に示したが,上記のような実験誤差を考慮すれ ば,複数回の実験結果に対する統計的な処理が必要で あり,今後データ処理法に関しては検討を進めたい.

図-3 に示された case-A の実験結果では,流入水が まず幅2 ピースの外周道路を伝わり,その後に内部の 幅1 ピースの道路あるいは間隙に水が進入するという 傾向が見られる.幅の広い道路部分を直進する流れは, 進行方向の運動を妨げる障害物等がなければそのまま 流下し,途中の直交する道路への流れ込みは生じ難い ように見られる.図-4 に示された case-A の計算結果 では,同様の傾向が再現されており,ほぼ良好な一致 が見られるが,幅の狭い道路部分への冠水状況などの 細部に関しては計算結果では水の進入がやや遅れてい るようである.ただし,詳細に関しては,上述の実験 誤差の影響を考慮した比較が今後必要と考えられる.

図-5の case-B の実験結果では, case-A と同様に領 域の左および下方側の道路部分に流入水が満たされ, それに遅れて徐々に内部の領域に水が進入する.内部 の領域では,建物の間隙部分から出た流れが他の建物 に衝突し,直進しにくい条件となっているが,流入水 の進入状況は数値計算でも良好に再現されている.

以上のように,建物間への自由水面流れの進入状況 を3次元 MICS により計算した結果,細部の相違はあ るものの概ね実験結果との良好な一致が見られた.

#### 4.おわりに

本報では,建物の配置を単純に模擬した小規模な模型を用いて,自由水面流れが道路部分や建物間に流入して模型内に広がっていく過程を把握し,この実験結果を対象として MICS による3次元数値計算を行った. 2 種類の建物配置を用いた実験結果との比較を行った 結果,計算結果の再現性は良好であるとの結論を得た. 今後は,微地形の影響や建物等に加えられる流体力, また漂流物の挙動などに対する適用性の検討を行い, 現地への応用を進めたいと考える.

#### 参考文献

- 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.
- 高橋保,中川一,西崎丈能.堤防決壊による洪水危険度の 評価に関する研究.京都大学防災研究所年報,Vol. 29B2, pp. 431-450, 1986.
- 川口広司,末次忠司,福留康智. 2004 年 7 月新潟県刈 野田川洪水・破堤氾濫流に関する研究.水工学論文集, Vol. 49, pp. 577–582, 2005.
- 細山田得三.7・13新潟豪雨災害での住宅区域の氾濫流 解析.水工学論文集, Vol. 49, pp. 589–594, 2005.
- 5) 中川一,石垣泰輔,武藤裕則,馬場康之,張浩,八木博嗣, 藤本幸史.住区内での浸水を考慮した洪水氾濫の実験と 解析.京都大学防災研究所年報,Vol. 47B, pp. 517–525, 2004.
- 6)間畠真嗣, 戸田圭一, 大八木亮, 井上和也. 都市域の地上・ 地下空間を統合した浸水解析.水工学論文集, Vol. 49, pp. 601–606, 2005.
- 7) 関根正人、河上展久.都市域における内水氾濫と地下鉄 に接続する地下空間の浸水に関する数値解析.水工学論 文集、Vol. 49, pp. 595–600, 2005.
- 8) 牛島 省, 竹村 雅樹, 山田 修三, 禰津 家久. 非圧縮性 流体解析に基づく粒子 – 流体混合系の計算法 (MICS) の提案. 土木学会論文集, No. 740/II-64, pp. 121–130, 2003.
- 9) 牛島省,竹村雅樹,山田修三,後藤孝臣.非圧縮性多相流 場の解法 (MICS) による自由水面流中の粒子輸送の数 値解析.水工学論文集, Vol. 48, pp. 649–654, 2004.
- 10) 牛島 省,山田 修三,藤岡 奨,禰津 家久.3次元自由水 面流れによる物体輸送の数値解法 (3D MICS)の提案 と適用性の検討.土木学会論文集,投稿中.
- 11) 森岡茂樹. 気体力学. 朝倉書店, 1982.
- 12) 牛島省,奥山洋平. 非圧縮性流体計算における C-HSMAC 法と SOLA 法の収束特性. 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 197-202, 2003.
- 13) 牛島省, 竹村雅樹, 禰津家久. コロケート格子配置を用 いた MAC 系解法の計算スキームに関する考察. 土木学 会論文集, No. 719/II-61, pp. 11–19, 2002.
- 14) 牛島 省,吉田 圭介,竹村 雅樹,禰津 家久. フラックス 制御を利用する移流方程式の5次精度保存形スキーム.
  土木学会論文集,No. 747/II-65, pp. 85-94, 2003.
- 15) 牛島 省, 禰津 家久. 陰解法を用いたコロケート格子に よる高次精度の流体解析手法の提案. 土木学会論文集, No. 719/II-61, pp. 21–30, 2002.
- 16) 牛島省,奥山洋平,藤田学,禰津家久. C-HSMAC 法を 用いる3次元非構造コロケート格子上の並列流体計算 法.応用力学論文集,Vol. 7, pp. 347-354, 2004.

(2005.9.30 受付)