

Building-cube 法に基づく有限体積法による気液二相流解析

Gas-liquid two-phase flow simulation with finite volume method based on building-cube method

森下 将吏 (名古屋大・工) 西口 浩司 (名古屋大・工)
 嶋田 宗将 (神戸大・システム情報) 田村 哲郎 (東工大・環境・社会理工)
 Masashi MORISHITA, Nagoya University
 Koji NISHIGUCHI, Nagoya University
 Tokimasa SHIMADA, Kobe University
 Tetsurou TAMURA, Tokyo Institute of Technology
 E-mail: morishita.masashi@a.mbox.nagoya-u.ac.jp

This study proposes a gas-liquid two-phase flow simulation method by the finite volume method using the building-cube method (BCM). Based on the 3D dam-break problem, we evaluate the inundation into the building room during floods and estimate the inflow to the basement.

1. はじめに

近年、気候変動により都市部での氾濫リスクが上昇している。しかし、一般的な浅水方程式に基づく1次元または2次元モデルでは、構造物が密集する都市部における水の複雑な3次元の流れや構造物に作用する非定常流体力を計算することはできない。そこで、本研究では大規模並列計算に適したビルディングキューブ法 (BCM) を用いた有限体積法による気液二相流解析手法を提案する。BCMに基づくセル中心有限体積法は、従来から単相流や流体-構造連成問題に適用されてきたものであるが、気液二相流への適用例はない。本研究では、3次元ダムブレイク問題と建物浸水解析を行い、その妥当性と有効性を検証した。

2. 基礎方程式

本研究では、非圧縮性の仮定の下で固体と流体の基礎方程式を体積平均化した方程式を用いる。

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_{\text{mix}} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_{\text{mix}} \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}_{\text{mix}}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{\text{mix}} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{\text{mix}} \right\} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\text{mix}} + \rho_{\text{mix}} \mathbf{b} \quad (2)$$

式(1)(2)の各物理量はそれぞれ以下のように定義される。

$$\mathbf{v}_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \bar{\mathbf{v}}_i \quad (3)$$

$$\rho_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \bar{\boldsymbol{\sigma}}_i \quad (5)$$

式(3)(4)(5)において、 ϕ_i は検査体積中の物質*i*の体積率である。本研究の数値計算においては、 ϕ_i は一つの計算セルにおける物質*i*の体積率に相当する。式(1)(2)では、各物質の速度 $\mathbf{v}_i$ を求めるのではなく、体積平均化された単一の速度場 $\mathbf{v}_{\text{mix}}$ を求める。さらに、式(4)(5)の計算では、物質毎に体積率 ϕ_i 、質量密度 ρ_i 、構成方程式を与える。

以上の空間平均化された運動方程式は、構成方程式に弾性体およびニュートン流体を仮定することで、構造-流体連成問題を取り扱える定式化になっているが、本論文では気液二相流を仮定し、構成方程式として次式のニュートン流体のみを仮定する。

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\mu \mathbf{D} - p\mathbf{I} \quad (6)$$

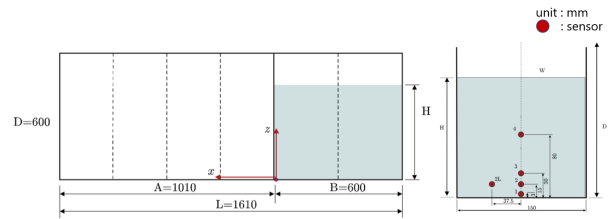


Fig. 1 Experimental setting of 3D dam-break problem and positions of pressure sensor

ここで、 μ は粘性係数、 $\mathbf{D}$ は変形速度テンソル、 p は圧力である。

3. 数値解析手法

本研究では、上述の空間平均化された運動方程式を部分段階法により速度場と圧力場を分離し、空間離散化にはセル中心有限体積法を用いる。圧力ポアソン方程式の解法にはRed-Black オーダリングによるSOR法を用いる。中間速度の算出およびVOF関数の移流方程式の時間発展には2次アダムス・バッシュフォース法を用い、移流項には5次WENOスキームを適用する。本論文の数値解析例では、スーパーコンピュータ「富岳」(プロセッサ:A46FX)を用いて、OpenMPとMPIによるハイブリッド並列により計算を実施した。

4. ダムブレイク解析

数値解析においては、水槽上面に対流境界条件を、その他の面には滑り壁境界条件を仮定する。解析領域は辺長1.171875 mmの立方体セルを 16^3 個だけ有するキューブで一樣に分割し、総セル数は53,764,096である。空気は質量密度として、 1.18 kg m^{-3} 、空気の粘性係数として、 $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pas}$ 、水の質量密度として、 997 kg m^{-3} 、水の粘性係数として、 $8.87 \times 10^{-4} \text{ Pas}$ を与える。

Fig. 1に自由界面を示す。ここで、 t^* は無次元化時間である。Fig. 2より、提案手法による数値解と実験結果はおおむね一致していることが確認される。次に、センサー1における無次元化された圧力の時刻歴の比較結果をFig. 3に示す。Fig. 3より、高精度に圧力ピーク値を捉えられていることが分かる。なお、ダムブレイク実験では計測値のばらつきが大きいため、この実験結果では同一条件で100回の実験が実施されており、Fig. 3では2.5パーセントイル値、中央値、および97.5パーセントイルの圧力時刻歴と数値解析結果を比較している。

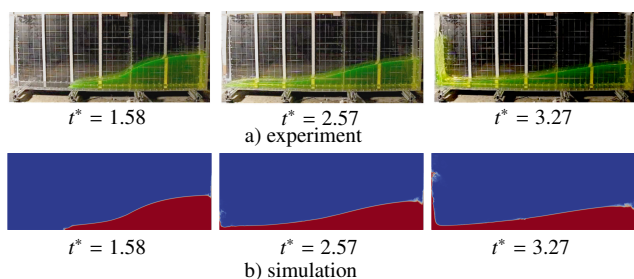


Fig. 2 Comparison of free surface between experiment and simulation

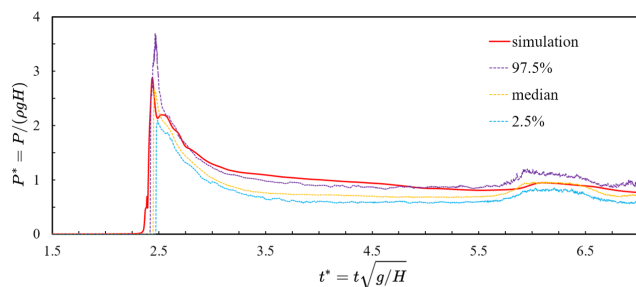


Fig. 3 Comparison of time history of pressure at sensor 1 between experiment and simulation

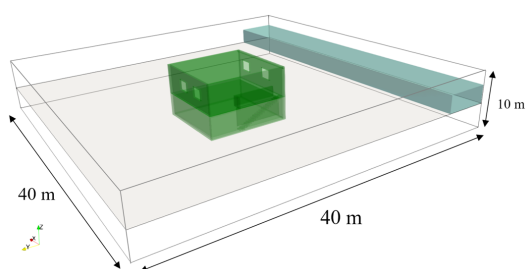


Fig. 4 Numerical model for estimating water immersion inside building during flooding

5. 建築物内部への浸水解析

次に, Fig. 4 の解析モデルを考える. 洪水による水流として, Fig. 4 に示すように解析領域境界から流速 3 m s^{-1} で流入する高さ 2 m のダムブレイク流を仮定する. 建築物として, 階段と地下空間を有する構造を仮定し, 窓からの流入を想定する. なお, 本研究では建築物を埋め込み境界法によりモデル化する. 流体の物性は前節の問題と同一である. 解析領域の上流面には流入境界条件, 底面には滑り壁境界条件, その他の解析領域端面には対流境界条件を適用する. 解析領域は直交メッシュにより階層的に分割し, 最小セルサイズは 78.125 mm , 総セル数は $14,876,672$ である.

解析結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 より, ダムブレイク流が建築物の周囲に流れ込み, 構造と水流が衝突することで, 複雑な水の流動が再現されていることがわかる. 特に, 建築物の壁面に水流が衝突し跳ね上がり, 窓から水が建築物内に侵入する挙動が確認できる. また, Fig. 6 は圧力分布を示しており, 非定常な水の流動によって, 衝突の前後で複雑に圧力値が上下していることがわかる.

以上のような水の 3 次元流動および建物壁に生じる非定常な流体力は, 1 次元や 2 次元の洪水解析モデルでは評価が困難であり, 3 次元解析によってのみ評価することができるものである.

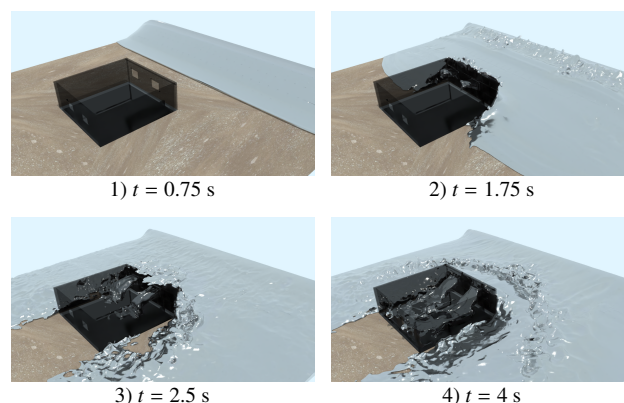


Fig. 5 Numerical result of free surface of water immersion inside building during flooding

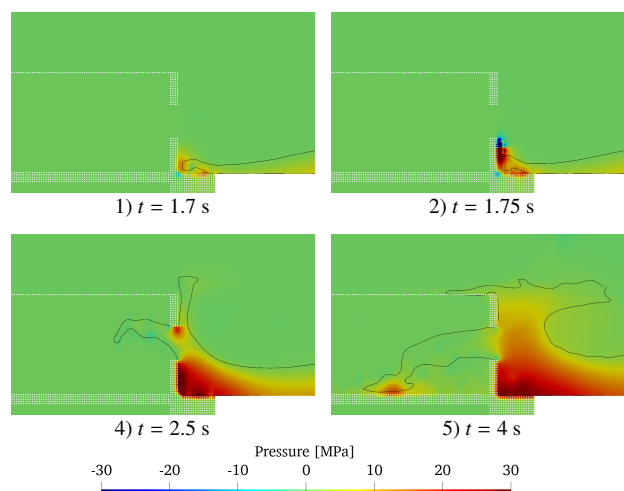


Fig. 6 Pressure distribution at $x = 18.85 \text{ m}$. Black line represents 0.5 contour line of VOF function.

6. 結言

本研究では, 1 次元や 2 次元の洪水解析モデルでは計算が困難である建築物の周囲やその内部等の水の 3 次元流動および構造に作用する非定常流体力を評価するため, 大規模な 3 次元気液二相流問題に着目した. そして, 超並列計算機環境で高いスケーラビリティを実現できるビルディング・キューブ法に基づくセル中心有限体積法を用いた気液二相流解析法を提案し, 洪水時の建築物内への浸水評価を試みた. また, 本論文で述べた空間平均化された運動方程式は, 構成方程式に弾性体及びニュートン流体を仮定することで, 構造-流体連成問題を取り扱える定式化となっている. よって, 今後の研究として, 構造内部の非定常な応力分布の評価も考えられる.

参考文献

- 1) 西口浩司, 岡澤重信, 坪倉誠: 大規模並列計算に適した階層型直交メッシュ法による完全オイラー型固体-流体連成解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.73, No.2, pp.153-163, 2017.
- 2) Lobovsky, L., et al.: Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break, Journal of Fluids and Structures, Vol.48, pp.407-434, 2014.
- 3) Shimada, T., Nishiguchi, et al. Eulerian finite volume-formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid-structure interaction problems, Int J Numer Methods Eng, Vol.123, pp.1294-1328, 2021.