

〈一般研究課題〉 内水氾濫における建築物耐水性評価のための  
気液二相流の超並列計算法の研究  
助成研究者 名古屋大学 西口 浩司



## 内水氾濫における建築物耐水性評価のための 気液二相流の超並列計算法の研究

西口 浩司  
(名古屋大学)

Massively parallel simulation method of gas-liquid two-phase  
flow for evaluation of building water resistance in flooding

Koji Nishiguchi  
(Nagoya University)

### Abstract :

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

洪水は、自然災害の中でも最も頻繁かつ多くの人々に影響を及ぼす災害であり<sup>(1)</sup>、近年の気候変動により、特に都市部での洪水リスクは深刻化している<sup>(2)</sup>。都市部の洪水では、水が交差点・下水道・公園・建築物の周囲やその内部等を流動するため、田園地帯に比べ、より複雑な流れを示す<sup>(3)</sup>。既往の洪水解析では、1次元または2次元の洪水解析モデル<sup>(4, 5)</sup>が使用されることが一般的である。ただし、交差点・下水道・公園・建築物の周囲やその内部等の水の3次元的な流動および構造に作用する非定常流体力を評価するには、ナビエ・ストークス方程式に基づく3次元解析<sup>(6, 7, 8)</sup>が必要であるが、膨大な計算コストを要する。そのため、詳細な構造物形状を再現した3次元洪水解析の研究例は極めて少ない。

そこで本研究では、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(BCM)に基づくセル中心有限体積法<sup>(9)</sup>(図1)に着目する。ビルディング・キューブ法は階層型直交メッシュ法の一つであり、解析領域はキューブと呼ばれる立方体領域に分割され、各

キューブは同一のセル数を有する．そして各プロセッサに割り当てるキューブ数を同一にすることで，各プロセッサのロードバランスが均一化され，かつループ処理は各キューブ領域で実行されるため，局所的かつ連続的なメモリアクセスが可能となる．ビルディング・キューブ法に基づくセル中心有限体積法は，既往研究では单相流解析<sup>(10)</sup>，構造-流体連成解析<sup>(11, 12)</sup>に適用されているが，気液二相流解析に適用された例はない．

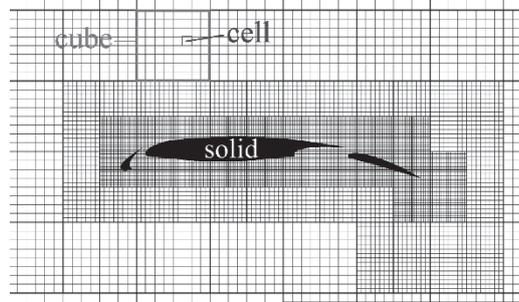


図1 ビルディング・キューブ法の計算メッシュ

以上より，本研究では，界面捕捉法としてVOF法<sup>(13)</sup>を用いたビルディング・キューブ法に基づくセル中心有限体積法を提案し，3次元洪水解析により建築物内部への流入挙動を推定する．

## 2. 基礎方程式

液体と気体の流動のように，オイラー型解法で複数の物質を取り扱う場合，一つの計算セルに複数の物質が存在し得る．そこで本研究では，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<sup>(11)</sup>．いま，3次元ユークリッド空間内の検査体積

$$(x - \Delta x/2 \leq \bar{x} \leq x + \Delta x/2, y - \Delta y/2 \leq \bar{y} \leq y + \Delta y/2) \quad (1)$$

に存在する複数の物質に対する基礎方程式を考える．ここで，検査体積内で物質 $i$ の存在する領域を $\Omega_i$ としたとき，

$$I_i(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x, y, z) \in \Omega_i \\ 0 & \text{if } (x, y, z) \notin \Omega_i \end{cases} \quad (2)$$

なる指示関数を定義する．すなわち，この関数は検査体積内において物質 $i$ が存在する領域では1，存在しない領域では0の値をとる．指示関数(2)を用いれば，検査体積に存在する $n$ 種類の非圧縮性物質に対する連続の式と運動方程式はそれぞれ次式で与えられる．

$$\sum_{i=1}^n I_i \nabla \cdot \mathbf{v}_i = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i \rho_i \frac{D\mathbf{v}_i}{Dt} = \sum_{i=1}^n I_i \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_i + (\sum_{i=1}^n I_i \rho_i) \mathbf{b} \quad (4)$$

ここで， $\mathbf{v}_i$ は物質 $i$ の速度， $\rho_i$ は物質 $i$ の質量密度， $\boldsymbol{\sigma}_i$ は物質 $i$ のCauchy応力， $\mathbf{b}$ は体積力である．式(3)(4)にそれぞれ体積平均化操作を施すことにより，次式が得られる．

$$\nabla \cdot \mathbf{v}_{\text{mix}} = 0 \quad (5)$$

$$\rho_{\text{mix}} \left( \frac{\partial \mathbf{v}_{\text{mix}}}{\partial t} + (\mathbf{v}_{\text{mix}} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{\text{mix}} \right) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\text{mix}} + \rho_{\text{mix}} \mathbf{b} \quad (6)$$

式(5)(6)の各物理量はそれぞれ以下のように定義される。

$$\mathbf{v}_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \bar{\mathbf{v}}_i \quad (7)$$

$$\rho_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \rho_i \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n \phi_i \bar{\boldsymbol{\sigma}}_i \quad (9)$$

式(7)(8)(9)において、 $\phi_i$ は検査体積中の物質*i*の体積率であり、指示関数(2)を用いて

$$\phi_i = \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} I_i(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) d\bar{x} d\bar{y} d\bar{z} \quad (10)$$

で定義される。また、式(7)(9)において

$$\bar{\mathbf{v}}_i = \frac{1}{\phi_i} \left( \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} I_i \mathbf{v}_i d\bar{x} d\bar{y} d\bar{z} \right) \quad (11)$$

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}_i = \frac{1}{\phi_i} \left( \frac{1}{\Delta x \Delta y \Delta z} \int_{x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \int_{y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} I_i \boldsymbol{\sigma}_i d\bar{x} d\bar{y} d\bar{z} \right) \quad (12)$$

なる体積平均値が定義される。本研究の数値計算においては、検査体積(1)は一つの計算セル、 $\phi_i$ 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(5)(6)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(8)(9)の計算では、物質毎に体積率 $\phi_i$ 、質量密度 $\rho_i$ 、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<sup>(11)</sup>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。

$$\boldsymbol{\sigma} = 2\mu \mathbf{D} - p \mathbf{I} \quad (13)$$

ここで、 $\mu$ 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<sup>(14)</sup>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：A64FX)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

提案手法による数値解の妥当性を検証するため、気液二相流解析のベンチマーク問題である3次

元ダムブレイク問題(図2)の実験結果<sup>15)</sup>と比較する。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2.34375mmの立方体セルを $16^3$ 個だけ有するキューブで一様に分割し、総セル数は11,534,336である。空気の質量密度として $1.18 \text{ kg/m}^3$ 、空気の粘性係数として $1.84 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、水の質量密度として $997 \text{ kg/m}^3$ 、水の粘性係数として $8.87 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ を与える。数値計算では、256プロセス×11スレッドを用いた。

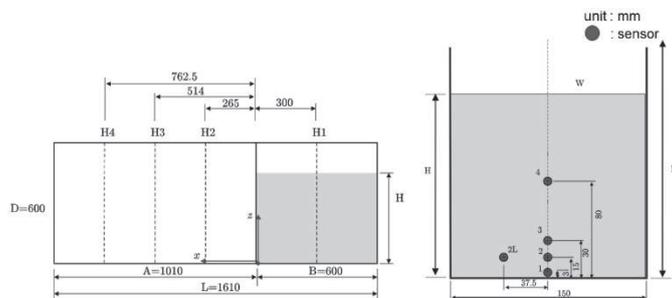


図2 ダムブレイク実験の概要

図3に自由界面を示す。ここで、 $t^*$ は無次元化時間である。図3より、提案手法による数値解と実験結果は概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図4に示す。圧力のピーク値は捉えられていないが、概ね実験結果と一致する結果が得られている。なお、ダムブレイク問題では計測値のばらつきが大きいいため、この実験結果<sup>15)</sup>では同一条件で100回の実験が実施されており、図4では2.5パーセンタイル値、中央値、および97.5パーセンタイルの圧力時刻歴と数値解析結果を比較している。圧力のピーク値をより高精度に捉えるには、さらに細かい計算メッシュが必要になると思われる。

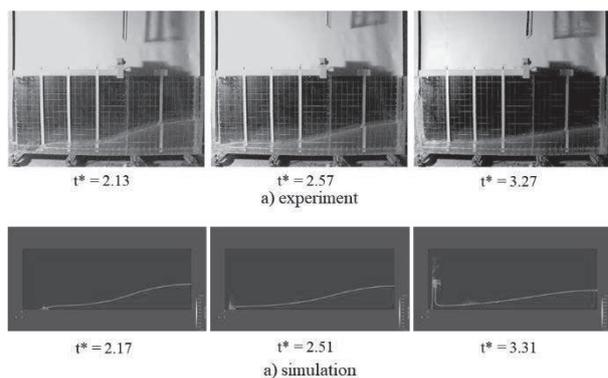


図3 自由表面の結果(実験と数値解析)

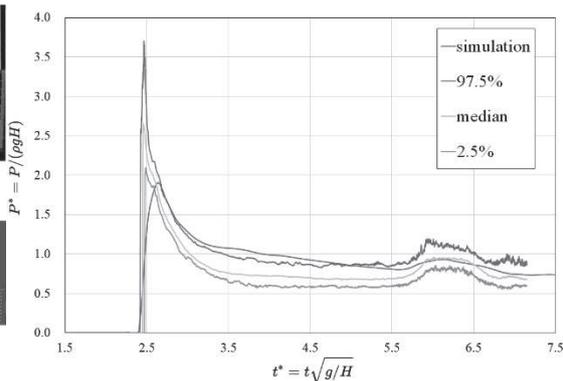


図4 センサー1の圧力の時刻歴比較

## 5. 建築物内部への浸水解析

次に、1次元または2次元の洪水解析モデルでは解析が困難である建築物の周囲やその内部等の水の3次元的な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、図5の解析モデルを考える。図5におけるメッシュはBCMにおけるキューブであり、各キューブに $16^3$ 個の計算セルで一様に分割されている。洪水による水流として、図5に示すように解析領域境界から流速 $3\text{m/s}$ で流入

する高さ2m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78.125mm、総セル数は14,876,672である。数値計算では、908プロセス×4スレッドを用いた。

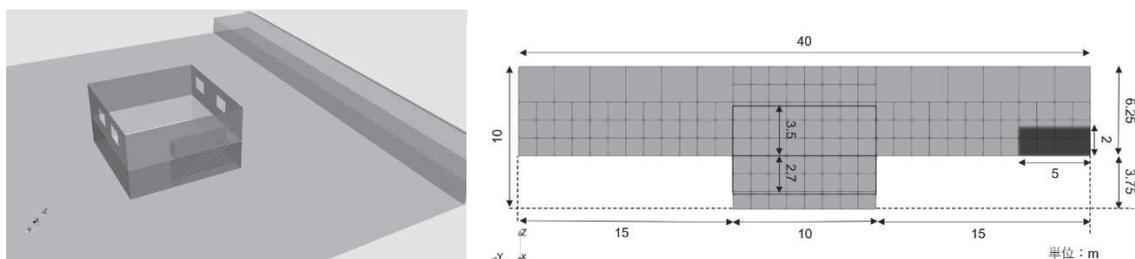


図5 建築物浸水解析モデル

解析結果を図6-8に示す。図6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、窓から水が建物内に侵入する挙動が確認できる(図7)。また、図8は圧力分布を示しており、非定常な水の流動によって、窓枠上部と下部にそれぞれ正圧と負圧が生じていることが確認できる。以上のような水の3次元的な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。

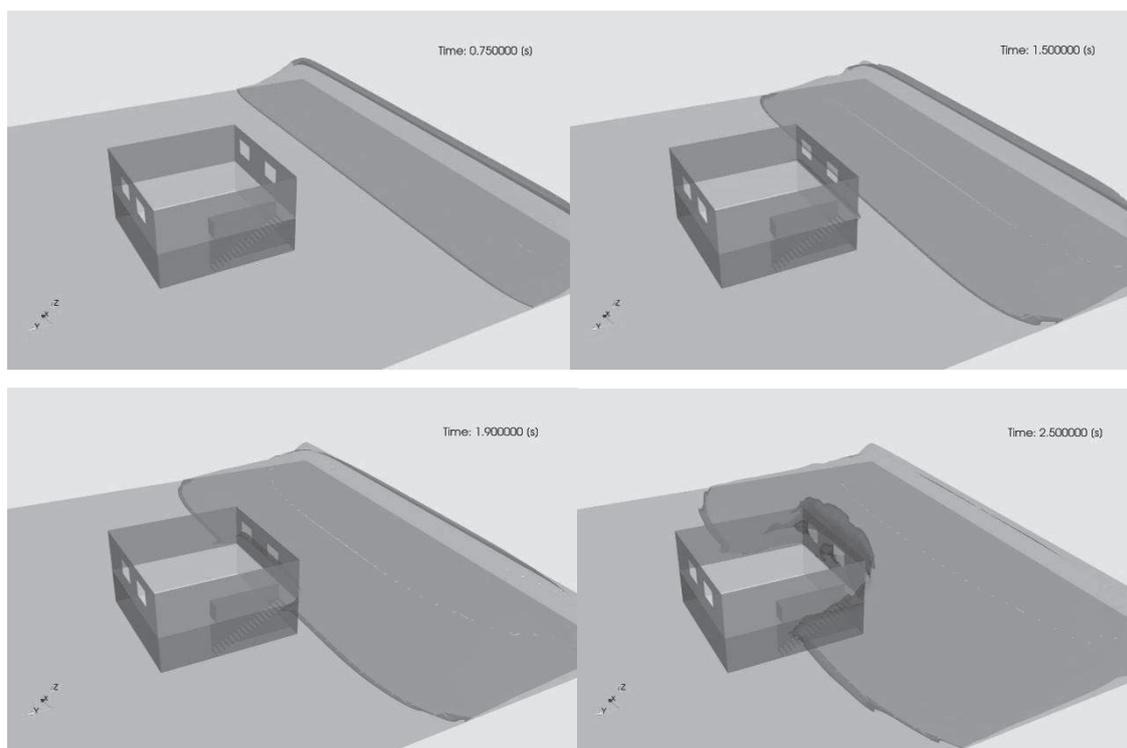


図6 自由表面解析結果



図7  $x = 18.85\text{m}$ ,  $t = 2.55\text{s}$ におけるVOF関数分布

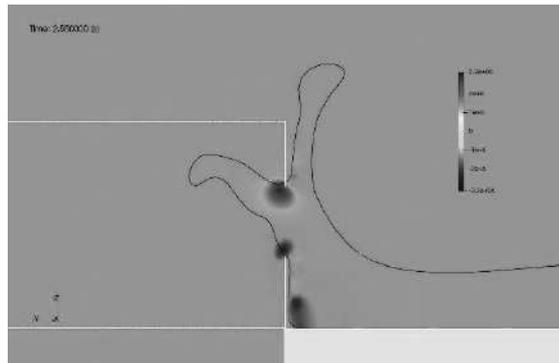


図8  $x = 18.85\text{m}$ ,  $t = 2.55\text{s}$ における圧力分布

## 1. おわりに

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次元的な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、洪水時の建物室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<sup>(11)</sup>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. UNISDR, 2015. The human cost of weather related disasters, CRED 1995-2015, United Nations, Geneva.
2. Chen, Yangbo, et al. "Urban flood risk warning under rapid urbanization." *Environmental research* 139 (2015): 3-10.
3. Paquier, Andre, Emmanuel Mignot, and Pierre-Henri Bazin. "From hydraulic modelling to urban flood risk." *Procedia Engineering* 115 (2015): 37-44.
4. Mark, Ole, et al. "Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding." *Journal of Hydrology* 299.3-4 (2004): 284-299.
5. Mignot, Emilie, André Paquier, and T. Ishigaki. "Comparison of numerical and experimental simulations of a flood in a dense urban area." *Water science and technology* 54.6-7 (2006): 65-73.
6. Ghostine, Rabih, et al. "Simulation of supercritical flow in crossroads: Confrontation of a 2D

- and 3D numerical approaches to experimental results." *Computers & fluids* 38.2 (2009): 425-432.
7. Gems, Bernhard, et al. "3-D hydrodynamic modelling of flood impacts on a building and indoor flooding processes." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16.6 (2016): 1351-1368.
  8. Rodi, Wolfgang. "Turbulence modeling and simulation in hydraulics: A historical review." *Journal of Hydraulic Engineering* 143.5 (2017): 03117001.
  9. Nakahashi K. Building-cube method for flow problems with broadband characteristic length. In: Armfield S, Morgan P, Srinivas K, eds. *Computational Fluid Dynamics 2002: Proceedings of the Second International Conference on Computational Fluid Dynamics, ICCFD, Sydney, Australia, 15-19 July 2002*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2003:77-81.
  10. Jansson, Niclas, et al. "CUBE: A scalable framework for large-scale industrial simulations." *The International Journal of High Performance Computing Applications* 33.4 (2019): 678-698.
  11. Nishiguchi, Koji, et al. "Full Eulerian deformable solid - fluid interaction scheme based on building - cube method for large - scale parallel computing." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 117.2 (2019): 221-248.
  12. Nishiguchi, Koji, et al. " Eulerian finite volume formulation using Lagrangian marker particles for incompressible fluid--structure interaction problems." *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, in press, (2021)
  13. Hirt CW, Nichols BD. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J Comput Phys*. 1981;39(1):201-225.
  14. Jiang, Guang-Shan, and Chi-Wang Shu. "Efficient implementation of weighted ENO schemes." *Journal of computational physics* 126.1 (1996): 202-228.
  15. Lobovský, Libor, et al. "Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break." *Journal of Fluids and Structures* 48 (2014): 407-434.