

ダム崩壊問題の実験結果を対象とした CFD の基礎的検討

A Basic Study of CFD Based on EFD of a Dam Break Problem

- 廣川 雄一, JAMSTEC, 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail: y-hiroka @jamstec.go.jp
- 松岡 大佑, JAMSTEC, 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail: daisuke @jamstec.go.jp
- 西川 憲明, JAMSTEC, 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail: nnishikawa @jamstec.go.jp
- 浅野 俊幸, JAMSTEC, 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25, E-mail: asanot @jamstec.go.jp
- Yuichi HIROKAWA, JAMSTEC, 3173-25 Syouwa-machi Kanazawa-ku, Yokohama, JAPAN
- Daisuke MATSUOKA, JAMSTEC, 3173-25 Syouwa-machi Kanazawa-ku, Yokohama, JAPAN
- Noriaki NISHIKAWA, JAMSTEC, 3173-25 Syouwa-machi Kanazawa-ku, Yokohama, JAPAN
- Toshiyuki ASANO, JAMSTEC, 3173-25 Syouwa-machi Kanazawa-ku, Yokohama, JAPAN

In recent years, the observations of seismic around JAPAN has been increased and the possibility of a large-scale tsunami which is induced by a large-scale earthquake has been more increased. In order to mitigate its damage to the society, especially for human beings, a countermeasure is the enlargement of the time for pedestrians to evacuate to the refugees. Therefore, it is important to decrease the flooding speed of a tsunami, based on its mechanism. In this paper, we discuss the accuracy of computational fluid dynamics simulation of the dam break problem, comparing the theoretical and experimental result of the problem. The result shows an efficiency of computational fluid dynamics. The result also indicates that the flow of liquid phase generates vortex in air phase, which may have possibility to cause ill effect to the evacuee.

1. 緒言

近年、地震活動が増加しており、地震の活動期に入った可能性が指摘されている。大規模な地震が発生した場合には津波による街区等への浸水が発生する可能性があり、事前の検討および対策をしておくことが重要である⁽¹⁾。浸水避難では浸水速度が避難速度を上回る場合、避難者は避難途中で浸水の被害を受ける。避難完了率を向上する上では周囲の浸水状況を正しく把握し、より正確に浸水状況を予測する必要がある⁽²⁾。

浸水予測において数値流体シミュレーションは有効な手段であるが、複雑な地形等を想定したシミュレーションの有効性は十分には検討されていない。そこで、本稿では河川など局所的な領域における数値流体シミュレーションの有効性を確認するため、ダム崩壊問題を対象とした気液二相流シミュレーション結果を解析解および実験と比較検証する。

2.でダム崩壊問題の概要、3.で水槽実験、4.で数値シミュレーション、5.で考察、6.で結言を示す。

2. ダム崩壊問題

気液二相流シミュレーションの基礎的な検証として、本稿ではダム崩壊問題を対象とする。Fig.1 に示すような長方形の領域をセパレータで貯水部と流路部に分け、貯水部に液相を貯める。また、

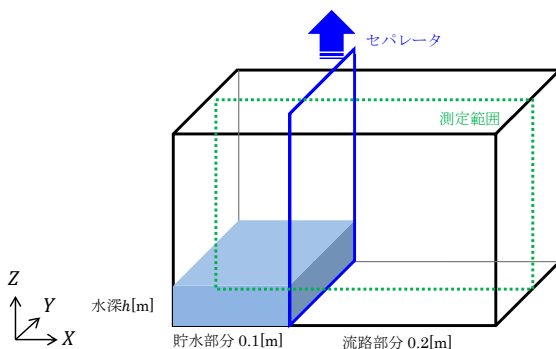


Fig. 1 An overview of the dam break problem.

セパレータを外した時のx-z 断面における重力場中における液相および気相の非定常流れを解析する。長方形の寸法は $0.30 \times 0.183 \times 0.242$ [m]であり、セパレータはx方向の上流側から 0.1 [m]地点に設置した。

底面摩擦を無視した場合の流速および水位の解析解は式(1)および(2)に示す Ritter 解で求められる⁽³⁾。ここで、 x は位置座標、 t は時刻、 $u(x, t)$ はx方向の流速、 $h(x, t)$ は水位、 h_1 は貯水部の初期水位、 g は重力加速度の大きさを表す。

$$u(x, t) = \frac{2}{3} \left(\sqrt{gh_1} + \frac{x}{t} \right) \quad (1)$$

$$h(x, t) = \frac{1}{9g} \left(2\sqrt{gh_1} - \frac{x}{t} \right)^2 \quad (2)$$

本稿では液相として水、気相として空気を使用し、貯水部の初期水位は 0.03 [m]とした。この時の Reynolds 数は 1.62×10^4 , Froude 数は 0.39 である。

3. 水槽実験

ダム崩壊問題の実験には Fig.2 に示す水槽を用いた。液相は約 25 [°C]の水に少量の液相トレーサを追加し、液相には約 25 [°C]の空気にドライミストを追加した。セパレータを外した後に液相の先端部が水槽の最下流地点に到達する(流路部 0.2 [m]を移動する)

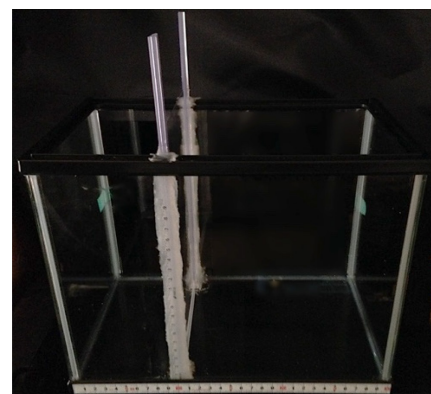


Fig. 2 Water tank of the experimental fluid dynamics.

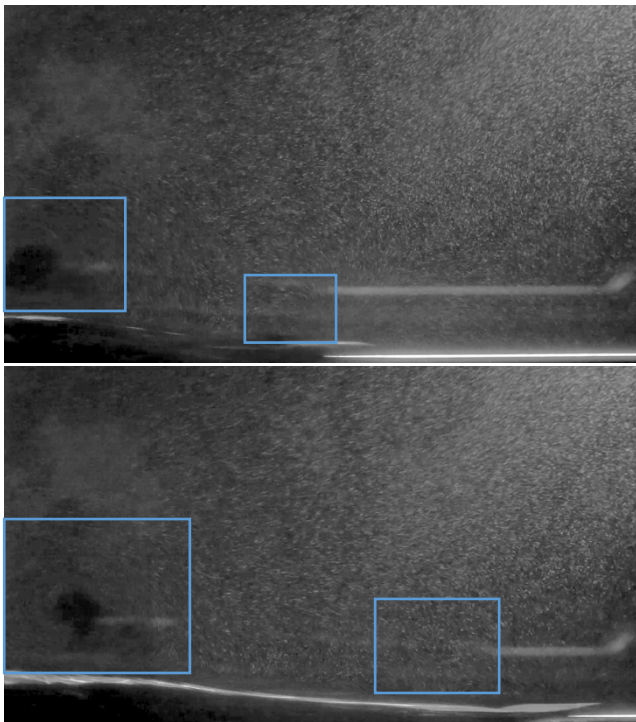


Fig. 3 A transient behavior of vortex between 0.066[s].
(Upper) $t = 0.067[s]$ (Lower) $t = 0.133[s]$

時間は約 0.3[s]であり、流速は 0.67[m/s]である。この時の底面摩擦を無視した流速の解析解は式(1)より 0.72[m/s]であり、差異は 7%である。また、この時の水位は約 $4 \times 10^{-3}[m]$ で、式(2)による解析解の $3.354 \times 10^{-3}[m]$ とは 2 割程度の差異が生じている。

流路部では液相の移動に伴い、気相に Fig.3 の四角で示すような渦が複数発生している。渦は液相の先端付近上部で発生し、渦の直径は水位の約 2~3 倍に発達する。

4. 数値シミュレーション

ダム崩壊問題のシミュレーションは VOF 法による気液二相流解析を用いた⁽⁴⁾。解析には OpenFOAM ベースの汎用有限体積法流体解析 solver-HELIX v2.5 を用いた。Fig.4 は計算に用いた非構造の四面体格子であり、要素数は約 232 万である。また、計算領域の境界は全て滑りなしの固定壁とした。気相は空気と密度は

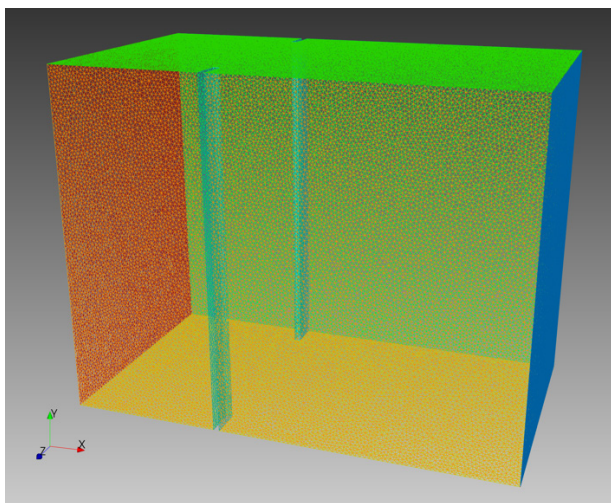


Fig. 4 Grid of the computational fluid dynamics.

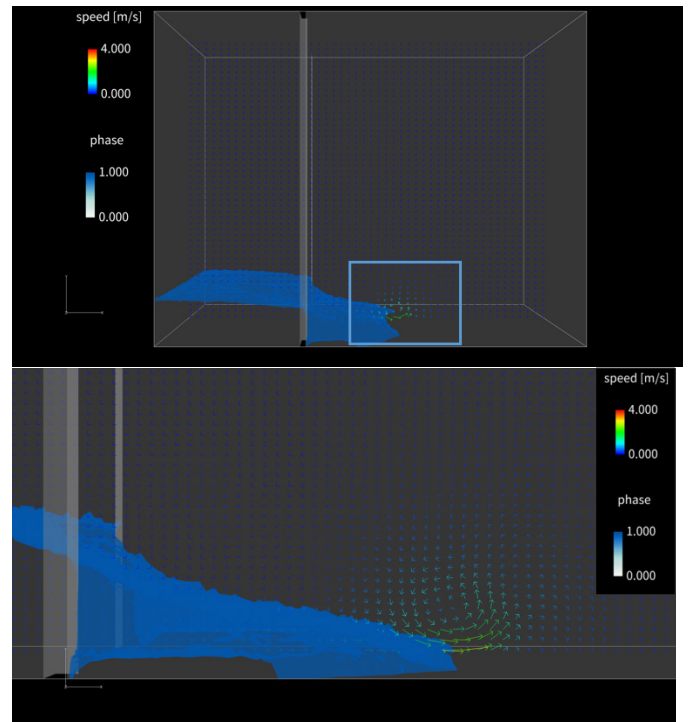


Fig. 4 Phase interface and velocity at 0.0913[s].
(Upper) Overview (Lower) Front of liquid phase

$1.21[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘性係数は $1.59 \times 10^{-5}[\text{m}^2/\text{s}]$ 、液相は水と密度は $9.98 \times 10^2[\text{kg}/\text{m}^3]$ 、動粘性係数は $1.00 \times 10^{-6}[\text{m}^2/\text{s}]$ とし、鉛直下向きに重力加速度 $9.8[\text{m}/\text{s}^2]$ を考慮した。解析モデルは非定常の層流モデルを用い、解析アルゴリズムには PIMPLE 法を用いた⁽⁵⁾。空間差分スキームは風上 1 次で、時間積分にはアダプティブタイムステップを用いた⁽⁶⁾。

液相の先端部が水槽の最下流地点に到達する(流路部 0.2[m]を移動する)時間は約 0.22[s]であり、流速は 0.90[m/s]である。2.の解析解と比較すると流速を 2 割程度速く予測している。また、実験結果との比較では流速を約 3 割大きく評価している。

Fig.5 は時刻 $t = 0.0913[s]$ のシミュレーション結果であり、瞬間場の気液二相界面の等値面と $x-z$ 断面の流速ベクトルを表している。Fig.5 上図の四角で囲った部分で渦が発生しており、気液二相の界面形状は Fig.3 の実験結果と類似していることが確認できた。Fig.5 下図はこの部分の拡大図であり、渦の循環速度は約 0.2[m/s]で液相の速度と同程度であることが分かった。液相の先端部付近で気相に渦が生成されているが、この渦は時間経過とともに消失する。

5. 考察

本項では数値シミュレーションの有効性を確認するため、ダム崩壊問題を対象とした解析解および実験結果との比較を検討した。

液相では実験とシミュレーションの液相の流れ場は定性的に一致していることが確認できた。なお、流速の絶対値は実験と解析解、シミュレーションで各々異なり、最大で 3 割の差異が発生することが分かった。

気相の流れ場では界面付近で渦が発生することが実験およびシミュレーションから示唆された。浸水避難を想定した場合、界面付近の渦が避難者に影響を与える可能性があり、水位や浸水速度等を含めたより詳細な検討が必要である。なお、実験結果では液面の上部に複数の渦が発生するが、シミュレーションでは 1 個の渦が一時的に生成されるのみであり、定性的な差異が認められた。

差異の発生要因については実験とシミュレーションで壁面摩擦やセパレータの移動等といった条件の差異が考えられるため、今後、PIV 解析等を行い、より詳細な分析をしていく予定である⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

6. 結言

本稿では浸水避難の事前検討を行うための基礎的な検証として、気液二相流の有効性を検討した。気液二相シミュレーションでは液相の定性的な流れ場を再現できることを確認した。また、気相では界面付近に渦が発生することが示唆された。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K04676 の助成を受けたものです。実験の計画にあたり国立研究開発法人宇宙航空研究開発法人の加藤裕之 博士、カトウ光研株式会社の加藤 竹朝 様、新日本空調株式会社の古川 太郎 様には大変貴重な御助言を頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 国土交通省, "新たなステージに対応した防災・減災のあり方", 国土交通省, (2015), pp. 1-22.
- (2) 廣川 雄一, 西川 憲明, 山田 武志, 印南 潤二, 浅野 俊幸, "浸水シミュレーション予測が避難行動に与える影響の検討", 合同エージェントワークショップ&シンポジウム2018, (2018), pp. 1-8.
- (3) 松富 英夫, "ダム破壊流れの一近似解", 第 29 回数値講演会論文集, (1985), pp. 669-674.
- (4) C.W.Hirt and B.D.Nichols, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol.39, (1981), pp.201-225.
- (5) 一般社団法人 オープン CAE 学会編, "OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析", 森北出版, (2016), pp. 128-149.
- (6) Tomislav Maric, Jens Hopken, Kyle Mooney, "OpenFOAM プログラミング", 森北出版, (2017), pp. 75-106.
- (7) 一般社団法人 可視化情報学会編, "PIV ハンドブック 第 2 版", 森北出版, (201), pp. 79-152.
- (8) M.ラッフエル, C.E.ヴィラート, J.コンペンハンス, "PIV の基礎と応用 粒子画像流速測定法", 丸善出版, (2015), pp.99-135.