

大阪大学大学院工学研究科 正会員 ○川崎 浩司

大阪大学大学院工学研究科 学生員 大谷 知樹

大阪大学大学院工学研究科 正会員 中辻 啓二

1. はじめに

近年、自由水面を有する複雑な水理現象を解明するための一手段として、空気（気相）、水（液相）を統一的に解く数値計算手法が提案されている（例えば、Yabe and Wang (1991)が開発したC-CUP法）。本研究では、気相・液相の混相流動場に対する数値解法をCIP（Cubic Interpolated Propagation）法に基づいて構築するとともに、水柱崩壊現象に適用することにより、本計算手法の妥当性・有用性を検証する。

2. 数値計算手法の概要

基礎方程式は、下式に示す2次元圧縮性流体に対する質量保存式、Navie-Stokes方程式、圧力方程式、密度関数の保存式から構成される。ここで、式中の ρ は流体密度、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル(u, w)、 p は圧力、 C_s は局所音速、 $\mathbf{Q}_u$ は粘性項、重力項、表面張力項といった外力項を示す。また、 ϕ_I はI相($I=1\sim 3$; ϕ_1 :固相、 ϕ_2 :液相、 ϕ_3 :気相)の密度関数であり、 $\phi_1+\phi_2+\phi_3=1$ ($0\leq \phi_I\leq 1$) の関係を満たす。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{Q}_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p = -\rho C_s^2 \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3) \quad \frac{\partial \phi_I}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_I \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

本計算では、上式を移流項と非移流項に分割して計算を行う。まず、移流項では、移流方程式に対する高精度数値スキームの一つであるCIP法を採用して計算を行った。ついで、非移流項に対しては、非圧縮性流体を対象に開発されたSMAC（Simplified Marker And Cell）法を圧縮性流体まで取り扱えるように展開し、その解法を用いて次の時間ステップにおける各物理量を算定した。なお、気液相界面で生じる表面張力の影響を、Brackbill(1992)が開発したCSF（Continuum Surface Force）モデルにより評価した。

3. 計算結果およびその考察

(a) ダム崩壊問題：

移動境界流れ解析の検証問題の一つであるダム崩壊問題を取り上げ、本計算手法の妥当性と有効性を検討する。計算条件は次のとおりである。計算領域を500cm×500cmとし、 x, z 方向のメッシュサイズを $\Delta x=\Delta z=5.0$ cmと一定にした。また、ダムの幅 L を150.0cm、時間ステップ間隔 Δt を0.0001s、水の密度 ρ_w を1000.0kg/m³、空気の密度 ρ_a を1.25kg/m³、表面張力係数 σ を 7.2×10^{-2} N/m、重力加速度 g を9.80665m/s²とした。図-1に、数値計算および水理実験による液相フロントの到達距離の時間変化を示す。同図から、計算結果は実験結果を精度よく再現していることがわかる。しかしながら、計算結果によるフロントの到達距離が実験結果に比べて若干長いことが認められる。この理由として、水理実験では初期状

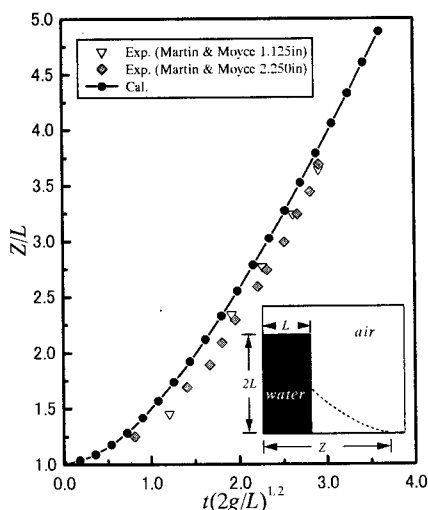


図-1 液相フロントの到達距離

態においてダム前面部の底面が濡れており，進行してきた液相フロントが抵抗を受けたためと考えられる．以上のことから，本数値解法は複雑に変化する気液界面を高精度に捉えているといえる．

(b) 水柱崩壊問題

図-2は，水柱を計算領域の中央に配置した場合で，液相の形状変化と気液両相における流速ベクトルを同時に図示したものである．計算条件は上述した条件と同様である．計算開始直後，水柱は自重の影響によりその形状を崩すとともに，気相領域においては大きな循環流が発生している．このことから，液相部の流体運動は気相領域に大きな影響を及ぼしていることがうかがえる．そして，液相フロントが両壁面に衝突・遡上した後，重力の影響を受けて下降し計算領域の中央で衝突している様子がみられる．一連の計算結果より，気液界面付近での流動場は滑らかに変化しており，本数値解法は圧縮性流体（気体）と非圧縮性流体（液体）の流動場を高精度に計算していることが理解できる．また，全計算時間を通して左右対称な計算結果が得られており，本研究で構築した計算手法の妥当性および安定性が確認できる．

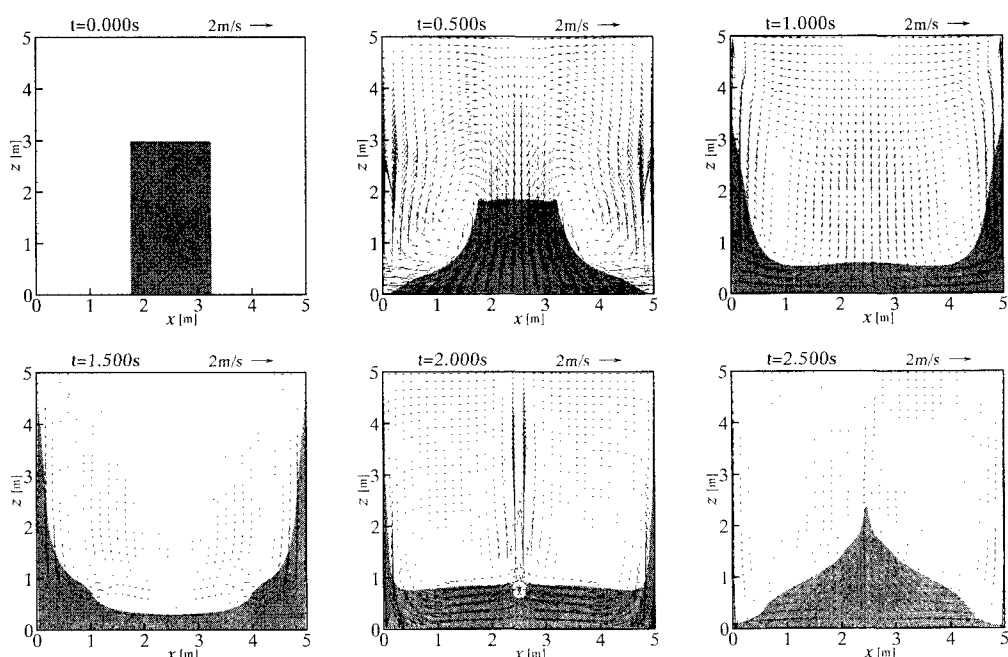


図-2 水柱崩壊に伴う流動場と液相領域の形状変化

4. おわりに

本研究では，気液混相場を統一的に解く数値計算手法をCIP法に基づいて構築した．本手法は気液相界面の挙動を精度よく追跡できるとともに，気液相の流動場を高精度に数値解析できる手法であることが実証された．今後は， $k-\epsilon$ 2方程式モデルあるいはLES（Large Eddy Simulation）などの乱流モデルを導入する予定である．最後に，本研究を遂行するにあたり，日本学術振興会科学研究費補助金（奨励研究(A)：研究代表者 川崎浩司）を受けたことを付記する．

【参考文献】

- Brackbill, J.U., D.B. Kothe, and C. Zemach: A Continuum Method for Modeling Surface Tension. J. Computational Physics, Vol.100, pp.335-354, 1992.
- Yabe, T. and P.-Y. Wang : Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, J. Physical Society of Japan, Vol.60, No.7, pp.2105-2108, 1991.