固気液多相流動場を対象とした数値シミュレーションに関する一考察

大阪大学大学院工学研究科	正会員	川崎	浩司
水資源開発公団	正会員	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

密度成層水域において,気圧変動や水表面に作用する風外力は,無(貧)酸素水塊の湧昇,成層破壊など複 雑な内部流動現象を引き起こす.一方,多量の連行気泡を伴う砕波現象は沿岸海域の物理環境に大きな影響を 及ぼす.このように,気液界面の複雑な挙動を伴う物理現象を解明することは極めて重要である.そこで,本 研究では,風外力・気圧変動に伴う閉鎖性水域の内部応答や砕波の内部構造を究明するための一手法として, 気液混相場のみならず固気液多相共存場に対しても統一的に解析できる計算手法を構築することを目的とする. 2.統一数値解法の概要

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,Navier-Stokes方程式,圧力方程式,異相間の割合を示す密度関数の保存式,そして状態方程式から構成される.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0 \qquad (1) \qquad \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{u}} \qquad (2)$$
$$\frac{\partial p}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla p = -\rho C_{\boldsymbol{s}}^{2} \nabla \cdot \boldsymbol{u} \qquad (3) \qquad \frac{\partial \phi_{I}}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi_{I} \boldsymbol{u}) = 0 \qquad (4)$$

ここで,式中の ρ は流体密度,uは流速ベクトル(u,w),pは圧力, C_s は局所音速, 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, $\phi_1+\phi_2+\phi_3=1$ ($0 \le \phi_I \le 1$)の関係を満たす.

本計算では,基礎方程式を移流項と非移流項に分割して計算を行った.移流項では,Yabe and Aoki(1991) が開発したCIP(Cubic Interpolated Propagation)法を採用して計算を行った.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 et al.(1992)が考案したCSF(Continuum Surface Force)モデルにより評価した.また, Xiao et al.(1997)と同様,固相領域は剛体かつその運動形態が移動と回転であると仮定することにより,固相 領域に作用する圧力を用いて物体重心の移動速度と角速度を求め,剛体運動を解析した.

3.計算結果とその考察

(a) 気液相共存場の計算例: 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 $5.0m \times 5.0m$ とし,x,z方向のメッシュサイズを $\Delta x = \Delta z = 0.05m$ と一定にした.また,ダムの幅Lを1.5m,時間ステップ間隔 Δt を0.0001s,水の密度 ρ_w を $1000.0kg/m^3$,空気の密度 ρ_a を $1.25kg/m^3$,表面張力係数 σ を $7.2 \times 10^{-2}N/m$,重力加速度gを $9.80665m/s^2$ 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.したがって,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判断できる.

-298-

- キーワード: 固気液多相流動場, 統一数値解法, CIP法, 数値シミュレーション
- 連絡先: 〒565-0871 吹田市山田丘2-1 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻 Tel 06-6879-7605 Fax 06-6879-7607

(b) 固気液相共存場の計算例: 図-2は流体圧力の作用に伴う物体の移動現象の計算例を示す.なお,図-2の t=0.00sに示すように,ダム前面部に物体を配置した場合を想定した.また,計算領域を7.5m×5.0m,物体 (固相領域)の密度 ρ_s を1000.0kg/m³とし,それ以外の計算条件は前述した条件と同じに設定した.同図より, ダム崩壊後,流出した水が物体に衝突し,物体はその形状を変えることなく右方へ移動している.さらに,物 体が右壁に衝突した後,流出水が物体上に乗り上げていく様子が認められる.紙面の制約上図示できないが, 物体の密度を $\rho_s=8000.0$ kg/m³と設定した場合,物体の移動速度は物体の自重の影響により $\rho_s=1000.0$ kg/m³に 比べて遅くなることを確認している.以上のことから,本計算手法を用いることにより,固気液多相共存場に おける流動場や異相間の相互干渉を高精度に解析できるといえる.

4.おわりに

本研究では,固気液多相流動場を統一的に解く数値解法を CIP 法に基づいて構築した.本手法は固気液相の 各異相界面の挙動を精度よく追跡できるとともに,各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-*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 るとともに,風外力・気圧変動に伴う密度成層水域や砕波現象に適用し,

その内部構造を検討する予定である.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. et al. (1992): A Continuum Method for Modeling Surface Tension, J. Computational Physics, Vol.100, pp.335-354.
- Xiao, F., et al. (1997): An Algorithm for Simulating Solid Objects Suspended in Stratified Flow, Computer Physics Communications, Vol.102, pp.147-160.
- Yabe, T. and T. Aoki (1991): A Universal Solver for Hyperbolic Equations by Cubic-Polynominal Interpolation, Computer Physics Communications, Vol.66, pp.219-232.



図-1 液相先端の到達距離



