

2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の構築と応用

名古屋大学大学院工学研究科 正 会 員 川崎浩司

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○袴田充哉

1. 緒言

沿岸域でみられる碎波現象，防波堤などの海岸・海洋構造物に作用する衝撃碎波力，波や流れによる浮体構造物の動揺といった物理現象は固相，気相，液相の異なる物性が混在する多相場で成り立っている．近年，このような多相流体場に支配される複雑な水理現象を解明するための手段として，固相，気相，液相を同時に解析する数値モデルがいくつか提案されている．川崎ら(2001)は，2次元多相場を対象に，気液界面の複雑な挙動，また固相の動的応答を高精度に解析可能な固気液多相流モデル DOLPHIN-2D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic Interaction - 2 Dimension version) を構築した．本研究では，同モデルに乱流モデル LES (Large Eddy Simulation) を導入するとともに，気液界面と流速場の時空間変化を精緻に解析できるようにモデルの更なる高精度化を行う．そして，異相間の相互干渉を伴う様々な2次元水理現象に適用することにより，本モデルの妥当性・有用性を検証する．

2. 数値計算手法の概要

基礎方程式は，2次元圧縮性流体に対する質量保存式(1)，Navier-Stokes 方程式(2)，圧力方程式(3)，密度関数の移流方程式(4)，バロトロピー流体に対する状態方程式(5)から構成される．

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

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

$$\rho = f(p) \quad (5)$$

ここで， ρ は流体密度， $\mathbf{u}$ は流速ベクトル， p は圧力， C_s は局所音速， $\mathbf{F}$ は粘性項，重力項，表面張力項，SGS (Subgrid Scale) 応力を含む外力項である． 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， $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_I \leq 1$) の関係を満たす．式(4)に関しては，双曲型方程式を採用することで各相の体積率の保存性をより満足させ，さらに tangent 関数変換の導入により異相境界面を高精度に捕獲可能となった．

DOLPHIN-2D モデルでは，Time Splitting 法を用いて，式(1)～式(3)を移流段階と非移流段階に分割し計算を行う．まず，移流段階では，双曲型方程式を高精度に解くことが可能な CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法を採用して計算し，非移流段階に対しては，非圧縮性・圧縮性流体を同時解析できる拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法を用いて各物理量を算定する．なお，気液界面で生じる表面張力の影響は，CSF (Continuum Surface Force) モデル (Brackbill et al., 1992) により評価した．また，乱流モデルとして LES モデルを導入し，Smagorinsky モデルに基づく SGS 応力項を運動方程式の外力項に付加した．最後に，非移流段階の計算後，算定された固相内部の圧力を用いて，並進・回転運動を伴う固相の移動速度を求めるとともに，密度関数 ϕ_I を CIP 法により計算し，各相の空間分布を算定する．

3. 計算結果と考察

液相同士が激しく衝突するときの水理現象を検討するために，図-1 に示すような静水面への水滴の落下現象を取り上げて数値計算を行った．ここで，初期条件として，静水深を 0.004m とし，静水面から高さ 0.02m の地点にある水滴に鉛直下向き 2.5m/s の初速度を与えた．同図より，計算開始から静水面に衝突するまでの間に水滴が円形から変形している様子が認められる．その後，水滴が静水面に衝突することにより波が発生

キーワード 多相乱流数値モデル，CIP 法，拡張 SMAC 法，LES モデル

連絡先 〒464-8603 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 Tel 052-789-4632

し、左右対称に伝播していく．時刻 $t=0.6s$ では、液相同士の衝突で発生した波が波進行方向に弓形になっており、自由表面が王冠形状を形成するミルククラウン現象に近い特徴がみられる．以上のことから、本モデルは気液界面の動的挙動と気液相の流動場を高精度に解析可能であるといえる．

ついで、固相を含めた多相場の物理現象に本モデルを適用した．まず、水より密度の小さい剛体を静水面上に配置し、重力と浮力が作用することによって静水面付近を振動する剛体の動的挙動を取り上げる．図-2 は剛体の z 方向最大振幅の計算値とアルキメデスの原理に基づく理論値を剛体密度 ρ_s と水の密度 ρ_w の比と関連づけて示す．同図より、計算結果は理論値とほぼ一致しており、本モデルは多相流体場を精度高く解析していることが定量的に検証される．図-3 は、水柱前面部に剛体構造物を配置し、水柱崩壊する水塊が剛体に衝突した際の計算結果を示す．ここで、剛体の密度は $\rho_s=800\text{kg/m}^3$ で水の密度より軽い密度を設定した．同図より、水柱崩壊した水塊が剛体に衝突した直後、剛体は水塊の衝突力に耐えきれずに横転し移動し始める．その後、水塊は剛体を右方へ運んでいき、右壁で倒れかけている剛体を持ち上げ、壁に押しつけている様子が認められる．このとき、剛体は壁の反作用の影響で一度跳ね返り、その後、壁に再衝突することを確認した．また、紙面の制約上、ここでは図示しないが、剛体の密度や形状を変えた場合、衝突後の剛体の挙動や液相の流動特性は図-3 と異なる結果が得られた．以上より、本モデルは水塊が剛体に衝突したときの回転を伴う剛体の移動および気液界面の動的挙動を良好に解析していると判断される．

4．結論

本研究では、CIP 法と拡張 SMAC 法に基づく数値モデルに LES 乱流モデルを組み込むとともに、密度関数の取り扱い方を変更し、より精度の高い固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を構築した．そして、静水面への水滴の落下現象、静水面上の構造物の振動現象、剛体と水塊の衝突問題に適用した結果、本モデルが多相流動場の相互干渉を精度良く解析可能であることを確認した．

【参考文献】

川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二(2001): 固気液多相共存場に対する統一数値解析の構築と複雑水理現象への応用, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1026-1030 .

Brackbill, J.U., D.B. Kothe, and C. Zemach(1992): A Continuum Method for Modeling Surface Tension, J. Computational Physics, Vol.100, pp.335-354.

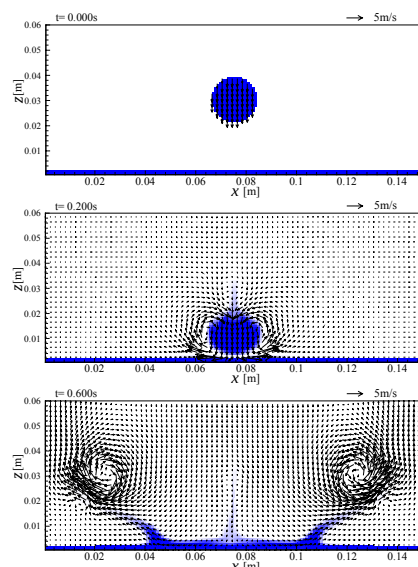


図-1 静水面への水滴の自由落下

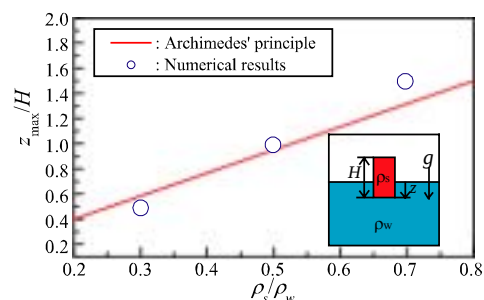


図-2 剛体の自由水面での振動

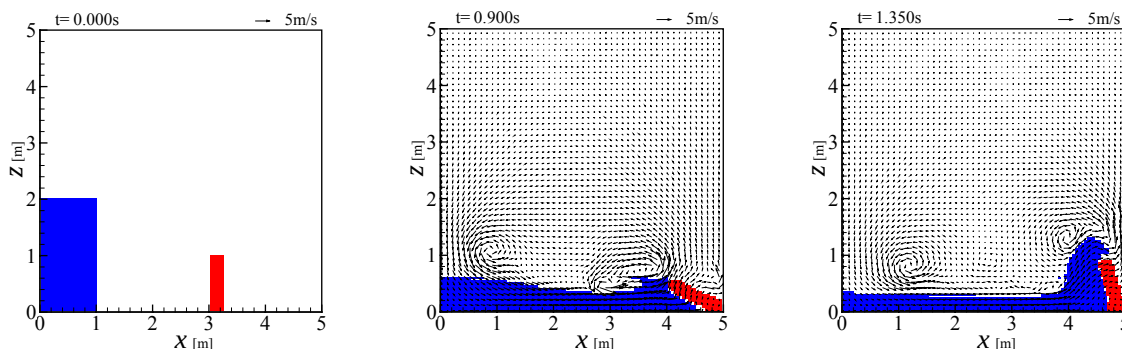


図-3 段波の剛体構造物への衝突