

2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D への不等間隔格子と 複数物体解析法の導入について

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

名古屋大学工学部 学生会員 ○ 小木曾圭祐

1. はじめに

沿岸域での海象は、固相・気相・液相の多相場が複雑に絡み合って形成している。このような複雑な多相流場を高精度に数値解析することを目的に、これまで、著者らは、CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法と拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) を駆使しながら、Smagorinsky モデルに基づく乱流モデル LES (Large Eddy Simulation) を導入した 2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic Interactions-2 Dimension version) を構築してきた (例えば、川崎ら(2001), 川崎・袴田(2005))。そして、固定・非固定状態にある矩形物体に段波が衝突した際の物体の作用波力・波圧特性を水理実験と数値解析により検討した。その結果、時々刻々変化する作用波力・波圧の諸特性を明らかにするとともに、モデルの妥当性を定性的・定量的に検証した。しかしながら、これまでの DOLPHIN-2D モデルは等間隔格子のみを取り扱っていたため、現象の細部構造まで解明しようとすると、計算領域全体の格子間隔を細かく設定する必要がある、膨大な計算時間を要するといった計算負荷上の欠点があった。また、同モデルは、単数物体のみで、複数物体の運動解析を行うことができなかった。

上述した背景に基づき、本研究では、これまで構築してきた 2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D に、不等間隔格子を導入するとともに、複数物体の運動解析を行うことができるようにモデルを改良し、その有用性を検証することを目的としている。

2. 2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の概要

2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D 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), 異相間の割合を表す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)から構成されている。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \frac{\mu}{\rho} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f} \quad (2)$$

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

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

ここで、 ρ は流体の密度、 $\mathbf{u}$ は流速ベクトル (u, w)、 p は圧力である。そして、 μ は粘性係数、 C_s は局所音速、 $\mathbf{f}$ は重力、表面張力、LES モデルの SGS (SubGrid Scale) 応力を含む外力項、 t は時間を表している。密度関数 ϕ_I ($I=1 \sim 3$; ϕ_1 は固相、 ϕ_2 は液相、 ϕ_3 は気相) は $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_i \leq 1$) である。

本モデルでは、時間分離解法により、基礎方程式(1)~(3)を移流段階と非移流段階に分割して数値解析を行う。まず初期条件と境界条件を設定した後、各物理量の移流段階を高精度に計算可能な CIP 法で算定する。一方、非移流段階に関しては、非圧縮性流体のみならず圧縮性流体まで解析できるように展開した拡張 SMAC 法(川崎ら, 2001)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) モデルにより評価した。非移流段階計算後、後述するように、固相の運動解析を行う。その後、全ての密度関数 ϕ_I を CIP 法により解析する。最終的に各物理量を更新し、次の時間ステップへ移行する。

本研究で取り扱う固相の運動解析では、固相群は剛体であり、運動形態は並進と回転の両方から構成されると仮定する。その運動解析方法としては、固相を高粘性流体と考え、全相に対して前述した流動解析を行う。そして、得られた固相の内部圧力と密度関数を用いて剛体の重心における並進速度 $\mathbf{V}$ と角速度 ω を求め、

剛体形状を保持するように固相に対してのみ相対的位置を修正する。

3. 計算結果および考察

2次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D を水柱崩壊に伴う段波と2個の浮体構造物の衝突問題に適用した。図-1に同問題の計算結果を示す。計算領域を x 方向に 1.15m, z 方向に 0.5m とし, x, z 方向の不等間隔格子は, 図-1の $t=0.000s$ に示すとおり, 固相領域を高精度に解析するためにその周辺の計算格子を細かく設定した。計算格子の総数は x 方向に 165, z 方向に 70 である。固相, 気相, 液相の密度はそれぞれ $\rho_s=800\text{kg/m}^3$, $\rho_g=1.2\text{kg/m}^3$, $\rho_l=1000\text{kg/m}^3$ とした。初期状態の静水深は 0.14m, 水柱の高さと幅はそれぞれ 0.24m, 0.2m であり, 構造物の形状は五角形物体と四角形物体の2種類とした。図-1より, 水柱崩壊に伴って発生した段波は, 五角形物体に衝突した際, 砕波するとともに, その周辺の気相場では反時計回りの大きな渦が形成されていることがわかる。その後, 五角形物体は段波の影響により右方向へ移動し, 四角形物体との間隔が狭くなりながら水位が急激に上昇している。段波が右壁に衝突した後では, 水位変動が複雑になり, 2つの物体は個々に並進・回転運動している。このように, 不等間隔格子と複数物体の運動解析法を導入した2次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D は安定して計算することができ, その有用性が確認できる。

4. おわりに

本研究では2次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D に不等間隔格子を導入し, 浮体と段波の衝突の数値計算を行った。その結果, 固相付近や気液界面付近の計算格子を細かくすることにより, 固相の動的挙動, 固相境界面, 気液界面の挙動を精度良く解析できた。そして, 計算時間の短縮も可能となった。今後, 固相同士の衝突や破壊を含む固相が大変形する場合を解析可能とするなど, 更なるモデルの高精度化を図っていく。

[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法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.
- 川崎浩司・袴田充哉(2005): 2次元多相乱流数値モデルによる漂流剛体の衝撃波力解析, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.731-735.

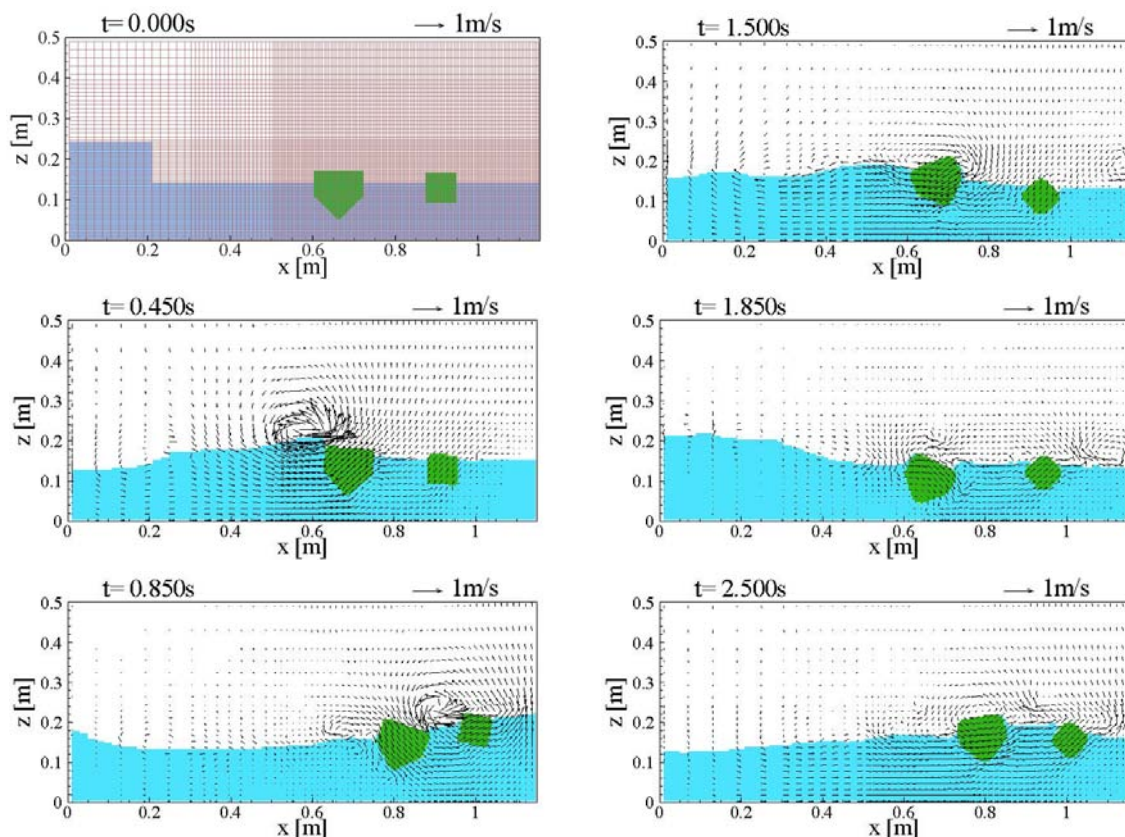


図-1 段波と複数物体の衝突シミュレーション結果