

3次元多相乱流数値モデルによる剛体構造物の動揺運動解析に関する一考察

名古屋大学大学院 正 会 員 川崎 浩司
 名古屋大学大学院 学生会員 ○袴田 充哉

1. はじめに

津波や越波による災害をはじめとする沿岸域で発生する自然災害への対策を講じるためには、現象を定性的・定量的に評価し、詳細なメカニズムを解明する必要がある。近年、そのような複雑な現象を解明する手段として、固相・気相・液相の多相流体場を取り扱う数値流体モデルが提案されている。川崎・袴田(2005)は2次元多相流体場を高精度に解析可能なモデルとして、乱流モデル LES (Large Eddy Simulation) の導入と密度関数の取り扱いの変更による新たな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) を構築した。さらに、川崎ら(2006)は段波と矩形物体の衝突・漂流時の作用波圧について、実験結果と同数値モデルによる計算結果を比較することにより、モデルの妥当性を確認している。本研究では、実現象に沿って様々な3次元現象を解析・検証するために、同数値モデルを3次元場に拡張・展開し、段波による剛体構造物の動揺運動解析を行うことで、3次元多相乱流数値モデル (DOLPHIN-3D) の有用性について検討する。

2. 3次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の概要と計算方法

3次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の基礎方程式は、以下の3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、密度関数の移流方程式、バロトロピー流体に対する状態方程式である。

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

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

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

ここで、 ρ は流体の密度、 \mathbf{u} は流速ベクトル(u, v, w)、 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、LES モデルの 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) の密度関数であり、 $\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 1$ ($0 \leq \phi_I \leq 1$) の関係を満たす。

本数値モデルでは、基礎方程式(1)~(3)を移流段階と非移流段階に分割して計算を行う。移流段階では、移流方程式を高精度に解くことが可能な CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法を用いて計算する。非移流段階に対しては、圧縮性流体と非圧縮性流体を統一的に解析可能な拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法を用い、次の時間ステップにおける各物理量を算定する。また、運動方程式の外力項のひとつである、気液界面における表面張力の影響を、CSF (Continuum Surface Force) モデルにより評価する。

固相の取り扱いに関しては、固相を剛体とし、その運動は並進運動と回転運動からなると仮定して解析を行う。具体的には、はじめに固相を高粘性流体と考え、上述の流動解析を行う。そして、密度関数 ϕ_1 と算出された固相領域内の圧力を用いて剛体の重心における並進速度と角速度を算定し、剛体形状を保持するように固相のみ相対的位置を修正する。以上の計算過程を時間ステップ毎に繰り返すことにより、固相・気相・液相の相互干渉を考慮した多相流体場の高精度な解析が可能となる。

本数値モデル DOLPHIN-3D の有用性を検証するために、3次元場の水理現象として、段波による浮体構造物の動揺現象に適用した。計算領域は x, y, z 方向に 7m, 3m, 3m とし、メッシュサイズを $\Delta x = \Delta z = 0.05\text{m}$, $\Delta y = 0.20\text{m}$ と一定にした。初期条件として、計算領域全体を水深 1m の水域とし、領域左側に水深 2m, 幅 1m の水柱を設けた (図-1 の $t=0.0\text{s}$ の図を参照)。また、水柱前面から 1.5m 離れた位置に高さ 0.8m, 幅 0.8m, 奥行き 1.2m, 密度 $\rho_s = 800.0\text{kg/m}^3$ の剛体を配置した。そして、計算開始とともに水柱を崩壊させることにより

段波を発生させ、段波が浮体構造物に与える影響について考察を行った。

3. 計算結果と考察

解析結果の時間変化を示す図-1より、水柱の崩壊に伴い右方向に向かって段波が発生し、剛体が波に飲み込まれながら波とともに右方に漂流していく様子が認められる。このとき、剛体は時計回りの回転を伴いながら移動しており、剛体の運動が良好に解析できているといえる。ついで、図-2はy軸中心でのx-z断面上の水面変化と流速ベクトルを示している。同図から、 $t=1.0s$ では段波の発生に伴い、気相部の流速が反時計回りに発生し、その渦の中心は波の先端付近にみられる。また、水より密度の小さい剛体が気液相の影響を強く受けている様子が同図の流速分布から認められる。さらに、 $t=2.5s$ の図では、右壁に到達した波が左方向に移動し始めるために、全体の流速場が時計回りへと変化する。これらの考察から、段波による剛体の動揺運動が精度良く再現されていることが確認され、本計算手法の有用性が定性的に検証された。

4. おわりに

本研究では、固相・気相・液相の多相流体場を高精度に解析可能な2次元多相乱流数値モデルを3次元に拡張・展開し、段波による剛体構造物の動揺運動解析を行った。その結果、水塊の流動特性や剛体の回転を伴う移動状況が良好に計算されていることが確認できた。よって、本数値モデルは、固相を含む3次元多相流動場の相互作用を精度良く解析可能であることが実証された。今後は、固相や液相が相互に影響し合うより複雑な現象に適用し、実験結果との比較から本数値モデルの定量的な検証を試みる予定である。

[参考文献]

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.726-730。
 川崎浩司・山口 聡・袴田充哉・水谷法美・宮島正悟(2006)：段波と矩形物体の衝突・漂流過程における作用波圧特性，海岸工学論文集，第53巻，pp.786-790。

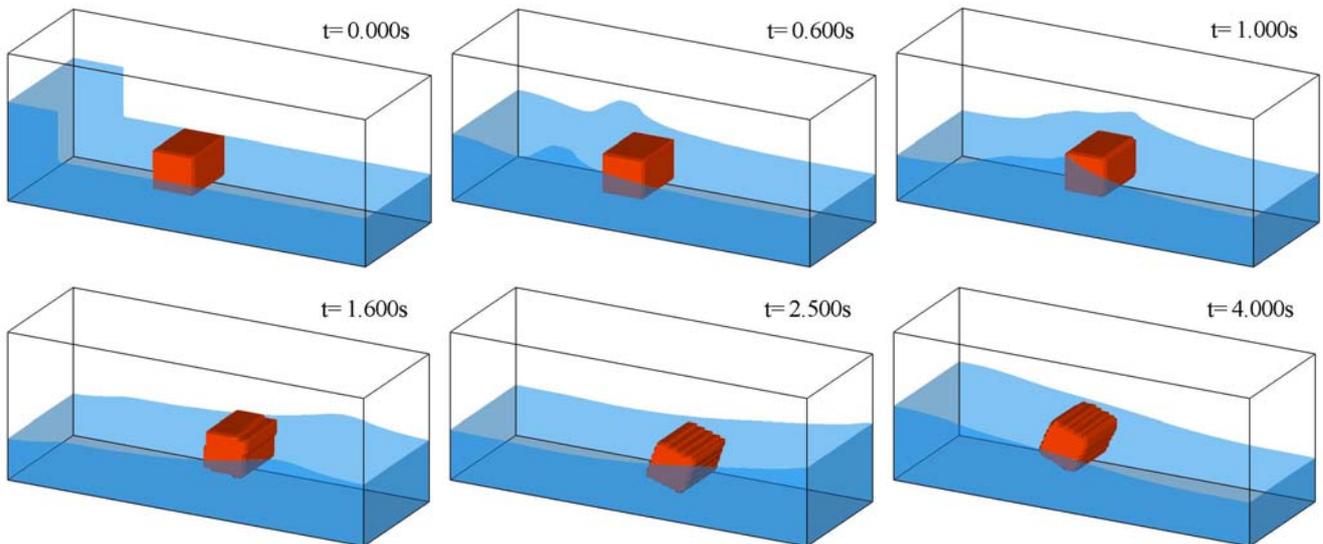


図-1 3次元剛体構造物の動揺解析結果

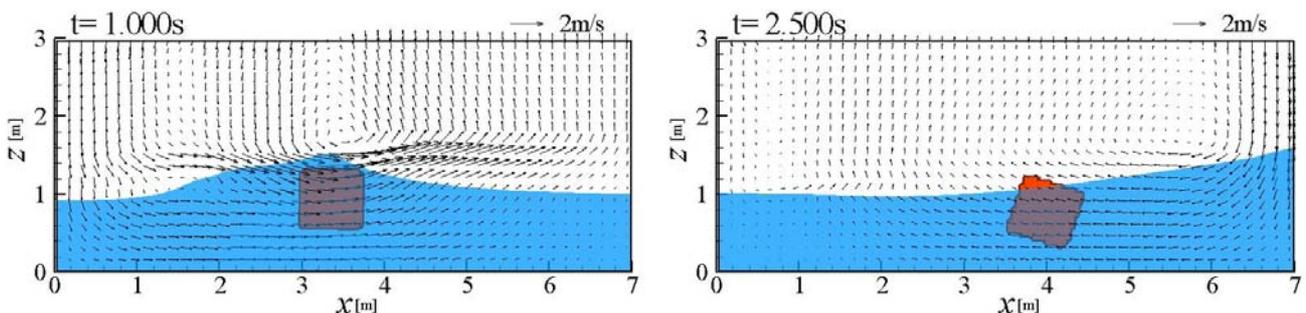


図-2 水面変化と流速ベクトルのx-z断面図