

3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の高度化に関する一検討

名古屋大学大学院工学研究科 学生会員 ○ 小木曾圭祐
 名古屋大学大学院工学研究科 正会員 川崎 浩司

1. はじめに

沿岸域は、複雑な海底地形や海岸線により形成されている。さらに、津波や高潮・高波災害時には、波浪、構造物、風などが複雑に絡み合った3次元性の卓越した物理環境場となる。近年、計算機の性能や数値計算技術の向上に伴い、3次元場を対象とした数値解析が可能となってきている。川崎・袴田(2007)は、3次元多相乱流場を精緻に解析可能なモデルとして、高精度な乱流モデル DTM (Dynamic Two-parameter Mixed model) を導入した3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D (Dynamic numerical model Of muLti-Phase flow with Hydrodynamic INteractions-3 Dimension version) を開発するとともに、水理模型実験との比較より、モデルの妥当性・有用性を検証した。本研究では、海岸工学分野への実用化に向け、同モデルの計算精度や効率を向上させるために同モデルを改良するとともに、段波-複数剛体衝突問題に適用し、その有用性を検証する。

2. 3次元固気液多相乱流モデル DOLPHIN-3D の改良

本研究で改良する3次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D を構成する支配方程式は、圧縮性粘性流体に対する質量保存式、Navier-Stokes 方程式、圧力方程式、異相間の割合を表す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。本モデルでは、質量保存式、Navier-Stokes 方程式、圧力方程式を移流・非移流段階に分割して計算を行う。まず、移流段階計算では従来モデルで用いていた A 型 CIP (Constrained Interpolation Profile) 法に代わり、中央差分を用いた M 型 CIP 法を適用する。M 型 CIP 法とは、 x, y, z 各方向にそれぞれ1次元 CIP 法を適用し、多段階に移流計算を行う手法である。A 型 CIP 法と比較し、多次元に拡張する際に計算手順が簡明であるとともに、計算負荷が低減されるなどの特長を有する。そして、非移流段階には圧縮性・非圧縮性流体を同時に解析可能な拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法を適用し、物理量を算定する。ここで、非移流段階計算の際、高精度時間差分スキームである3次精度 Adams-Bashforth 法を新たに導入した。さらに、乱流量を DTM に基づく LES (Large Eddy Simulation) により算定し、気液界面で生じる表面張力の算定には CSF (Continuum Surface Force) モデルを適用する。また、複数剛体運動解析法では、まず、固相を高粘性流体と考え、前述した流動解析を行う。そして、得られた固相内部の圧力を用い、個々の剛体の重心における並進速度と回転速度を計算し、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。なお、本研究では、回転速度を算定する際、クォータニオンを用いた。クォータニオンとは4つの要素からなるベクトルであり、ある回転軸の方向と回転量により物体の回転を高精度に評価する手法である。従来の Euler 角による手法と比較して、特異点がない、計算誤差の蓄積がないといった特長を有する。上述した計算を繰り返すことにより3次元多相乱流場を精緻に数値解析することが可能となる。

3. 計算結果および考察

本研究で改良したモデルの有用性を検証するために、段波と複数浮体の衝突問題、段波と複数剛体柱の衝突問題に同モデルを適用した。計算条件はそれぞれ表-1、表-2に示されるとおりである。また、解析結果をそれぞれ図-1～図-4に図示する。なお、本解析では、計算負荷低減のため不等間隔格子を適用している。図-1から、解析開始と同時に図面左に設置された水柱が崩壊することにより段波が発生し、その後、右方向へ伝播する様子が認められる。そして、時刻 $t=0.52s$ では2つの浮体に段波が衝突し、両浮体とも回転運動を伴いながら漂流の様子が確認される。また、 $x-z$ 断面を示す図-2(a), (b)から、段波に起因する反時計回りの循環流が剛体上の気相部で発生している。その後、段波は右壁に衝突し、浮体の挙動や自由表面は複雑に変化する。つぎに、図-3をみると、水柱崩壊により生じる段波が右方向に伝播し、時刻 $t=0.6s, 0.9s$ においてそれぞれ円柱、四角柱の順に衝突の様子が認められる。時刻 $t=0.9s$ での剛体柱付近を拡大した図-4から、

段波が2つの剛体柱に衝突することにより、自由表面が3次元的に変動している様子が認められる。

4. おわりに

本研究では、3次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-3D の計算効率をさらに向上させることを目的に、移流段階計算に中央差分を用いた M 型 CIP 法を導入し、非移流段階の時間差分スキームに 3 次精度 Adams-Bashforth 法を導入した。さらに、剛体の回転運動解析にクォータニオンを採用し、回転運動解析の高精度化を図った。そして、同モデルを流体-構造物連成問題に適用した結果、同モデルは自由表面の複雑な変化を伴う異相間の相互作用を精度よく解析可能であることが定性的に示された。今後は、水理模型実験との比較検証により、モデルの定量的な精度検証を詳細に行う予定である。最後に、本研究の一部は科研基盤研究(B) (代表者：名大・水谷法美，課題番号：19360222) を受けていることを示し、深謝の意を表す。

[参考文献]

川崎浩司・袴田充哉(2007)：海岸工学論文集，第 54 巻，pp.31-35.

表-1 計算条件 (段波と複数浮体の衝突問題)

計算領域	1.3m×0.45m×0.5m
計算メッシュ数	105×45×45
計算メッシュサイズ	0.02m or 0.01m
L 型剛体の密度	700.0kg/m ³
六角形剛体の密度	500.0kg/m ³
水の密度	1000.0kg/m ³
静水深	0.2m
水柱サイズ	0.2m×0.45m×0.35m

表-2 計算条件 (段波と複数剛体柱の衝突問題)

計算領域	3.0m×1.0m×1.2m
計算メッシュ数	90×40×40
計算メッシュサイズ	0.05m or 0.025m
円柱の密度	800.0kg/m ³
四角柱の密度	800.0kg/m ³
水の密度	1000.0kg/m ³
静水深	0.15m
水柱サイズ	0.5m×1.0m×0.75m

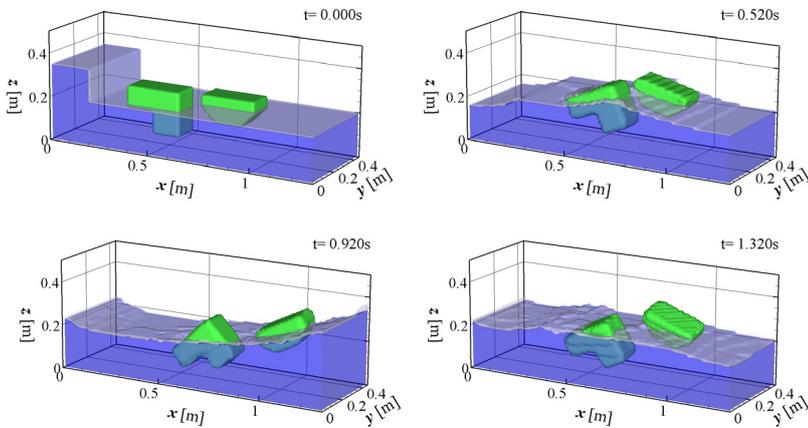


図-1 段波と複数浮体の衝突問題

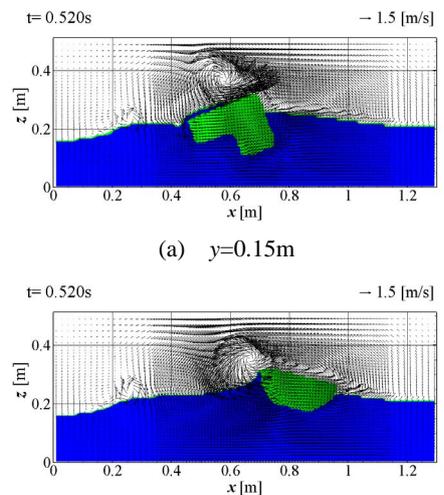


図-2 段波-複数浮体衝突問題 (x-z 平面)

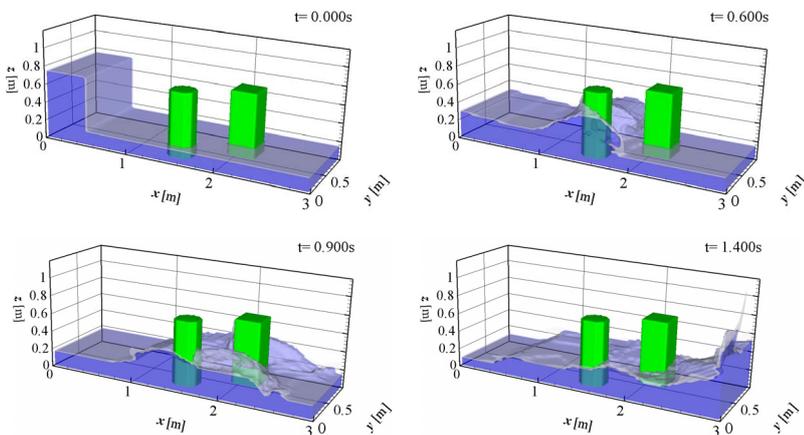


図-3 段波と複数剛体柱の衝突問題

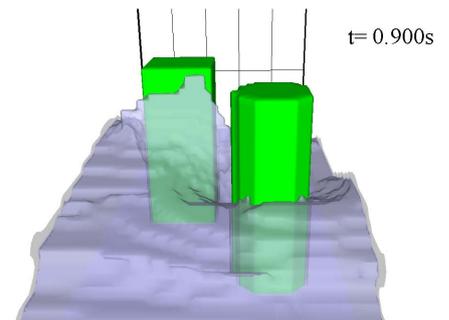


図-4 段波-複数剛体柱衝突問題 (拡大図)