

粒子による物体の動的解析法を用いた 2 次元多相乱流数値モデルの開発

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 ○ 小木曾圭祐

1. はじめに

沿岸域の海象現象は、風、波浪、流れ、漂砂、構造物といった気相・液相・固相の複雑な相互作用によって形成されている。近年、複雑な沿岸域の物理環境場を詳細に解明することを目的に、様々な数値モデルが開発されている。これまで、著者らは CIP (Cubic Interpolated Propagation) 法と拡張 SMAC (Simplified Marker And Cell) 法に基づき、乱流モデル LES (Large Eddy Simulation) を導入した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 (川崎ら, 2001; 川崎・袴田, 2005)。そして、川崎ら(2006)は段波が衝突した際の固定・漂流物体への作用波力・波圧特性を水理実験と比較検討することにより、同モデルの定量的な精度検証を行った。さらに、計算負荷の低減、モデルの汎用性の向上を目的として、川崎ら(2007)は同モデルに不等間隔格子、複数剛体の運動解析法を導入した。しかし、同モデルは、物体が回転・並進を伴う複雑な挙動を示す際、固相の剛体形状の維持に若干の問題が確認された。そこで、本研究では、粒子による Lagrange 解析法を多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D に導入することにより、固相の剛体解析の高精度化を図ることを主たる目的とする。

2. 新たな 2 次元固気液多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の開発

本研究で扱う 2 次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D の基礎方程式は、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、異相間の割合を示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から構成される。本モデルでは、時間分離解法により、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。そして、移流段階には各物理量の移流を高精度に解析可能な数値スキームである CIP 法、非移流段階には非圧縮性・圧縮性流体の同時解析が可能な拡張 SMAC 法を適用し、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および乱流の影響はそれぞれ CSF (Continuum Surface Force) モデル、Smagorinsky モデルに基づく LES により評価した。また、固相の剛体運動解析法としては、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て個々の剛体の重心における並進速度・角速度を求め、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。本研究では、固相の剛体解析の高精度化を図るために、固相内部にのみ粒子を配置した。そして、図-1、図-2 に示すように粒子の Lagrange 解析により固相の形状を修正する新たな計算アルゴリズムを構築した。具体的には、非移流段階の計算後、計算メッシュ上の物理量を最小二乗法により計算粒子に内挿補間する。その後、剛体形状を保持するように粒子による Lagrange 解析を行う。ここで、固相の密度関数は 1 つの計算格子内に存在する粒子の総面積と計算格子の面積の割合によって算定した。

3. 計算結果および考察

本モデルにおける剛体解析の精度を確認するため、波作用下での漂流物の動的解析のひとつであるピストン型造波による浮体の動揺問題に本モデルを適用し、従来の DOLPHIN-2D との比較検証を行う。本解析では、高さ 0.75m、幅 0.2m の造波板を流速 $0.5\sin(2\pi t)$ で周期的に強制振動させることにより、水深 0.5m の静水深状態から造波させた。なお、浮体の密度は $\rho_s=800\text{kg/m}^3$ であり、計算格子は $\Delta x=\Delta z=0.025\text{m}$ 、 240×80 の等間隔格子を用いた。また、図-3 に示されるように造波板には 1 メッシュあたり 4 個の粒子を計 960 個、浮体には 1 メッシュあたり 4 個の粒子を計 504 個配置した。また、初期状態における造波板から浮体までの距離は 2.5m に設定した。図-4 に解析結果を示す。本モデル、従来モデルともに、造波板により発生した波が右方向に伝播し、右壁・浮体による反射波の影響などにより複雑な水面変動を示していること、さらには、気相領域では波峰付近に強い反時計回りの循環流が卓越している様子が確認できる。図-4(a)から確認できるように、従

来モデルでは隅角部付近が丸みを帯びるといった構造物の形状保持に若干の問題が生じていた．一方，図-4(b)，図-5に示すように，本モデルでは，浮体が回転・並進運動を伴い複雑に挙動する場合においても，剛体形状が高精度に保持されている．加えて，両モデルの解析結果を比較すると，気液相の様子には若干の相違がみられるが，概ね一致していることがわかる．

4. おわりに

本研究では，剛体形状をより高精度に保持するために，固相内部にのみ配置した粒子の Lagrange 解析アルゴリズムを構築し，従来の2次元多相乱流数値モデル DOLPHIN-2D に導入することで，新たな DOLPHIN-2D を開発した．そして，ピストン型造波による浮体の動揺運動を解析した結果，剛体形状を精緻に保持しつつ，物体の動的挙動と水面変動を高精度に再現可能であることが確認された．今後，モデルのさらなる高精度化を図るとともに，水理模型実験との比較より，モデルの妥当性を定量的に評価する予定である．

[参考文献]

- 1) 川崎浩司・大谷知樹・中辻啓二(2001)：海岸工学論文集，第48巻，pp.1026-1030. 2) 川崎浩司・袴田充哉(2005)：海岸工学論文集，第52巻，pp.731-735. 3) 川崎浩司・袴田充哉・小木曾圭祐(2007)：海洋開発論文集，第23巻，pp.207-212. 4) 川崎浩司・山口 聡・袴田充哉・水谷法美・宮島正悟(2006)：海岸工学論文集，第53巻，pp.786-790.

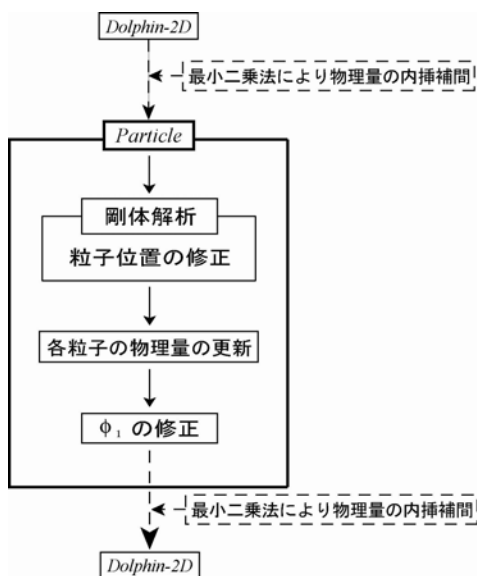


図-1 粒子による固相の計算アルゴリズム

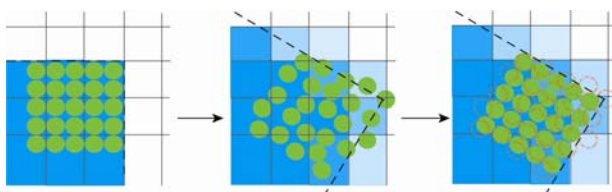
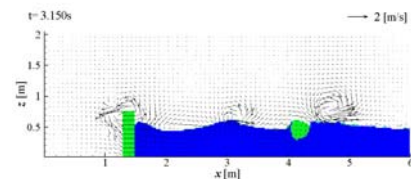
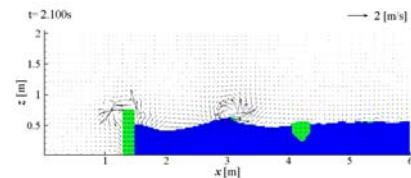


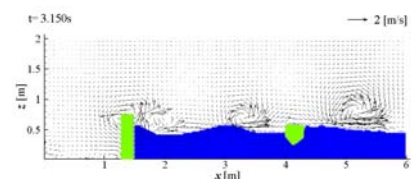
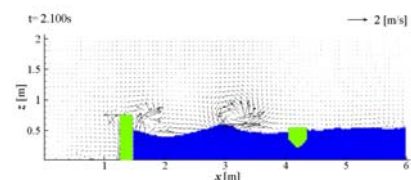
図-2 粒子による固相の修正



図-3 初期状態



(a)従来モデル



(b)本モデル

図-4 ピストン型造波による浮体の動揺解析結果の比較

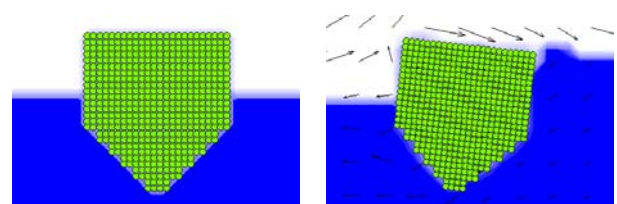


図-5 浮体の拡大図：(左図)t=0.000s, (右図)t=3.150s