

高精度粒子法の港湾施設設計への適用研究

後藤仁志*

1. 研究の目的

粒子法¹⁾は、計算点の移動を伴う Lagrange 型解析手法であるので、飛沫が頻発するような水塊の激しい分裂・再合体の記述が容易であり、これまでにも粒子法を用いた砕波・越波に関連する数値シミュレーションが多数実施されてきた（例えば、Gotoh ら²⁾、Gotoh and Khayyer³⁾）。本研究では、著者の研究チームで開発してきた高精度粒子法を港湾施設設計に適用するための技術開発を目的とする。

特に本年度は、計算コストの低減を目的として、粒子法による越波シミュレーションの効率的な実施方法を検討する。従来の粒子法による越波計算と異なる点は主に 2 点あり、第 1 は造波方法として Wavy Interface⁴⁾を適用すること、第 2 はネスティング計算⁵⁾の導入である。最終的な目標は不規則波を用いた越波計算への適用であるが、規則波では 1 波あたりの越波量がほぼ一定となるため、計算中の越波量の変動がわかりやすい。そこで、本研究では、規則波を用いた越波計算を比較的長時間実施し、水槽内の水位変動や越波量の時間的推移などから、本研究で提案する数値モデルの妥当性を検証する。

2. 研究の方法

支配方程式は、連続式および Navier-Stokes 式である。本研究では、MPS 法¹⁾をベースとした離散化モデルを用いて計算を実施するが、高精度計算を行うために、5 種類の高精度化スキームを導入した MPS-HS-HL-ECS-GC-IDS 法^{1),7)}を用いた。HS 法¹⁾は、圧力の Poisson 方程式の生成項の離散化精度を改善する方法であり、HL 法¹⁾は従来経験的にモデル化されてきた Laplacian において勾配・発散モデルとの数学的一貫性を担保させたモデルである。ECS¹⁾は圧力の Poisson 方程式の生成項の誤差を縮小するスキーム、GC 法¹⁾は高精度勾配モデルである。IDS 法⁷⁾は計算安定化のために微弱的な人工圧力を付与する DS 法¹⁾の改良版である。これらの高精度法はすべて、著者の研究チームが提案してきたものであり、多数の国際学術誌にて公表済みであるが、誌面の都合上、日本語での解説書¹⁾を引用文献として記述した。さらに、本研究では、これらの高精度粒子法と併用することで高いエネルギー保存性が得られる修正アルゴリズム⁶⁾を適用した。

本研究ではまず、提案モデル（ネスティング計算⁵⁾の付きの MPS-HS-HL-ECS-GC-IDS 法^{1),7)}の造波・伝播性能を検証するために、水深一定の数値造波水槽を波浪の進行方向に向かって空間解像度の異なる複数の領域に分割し、Wavy Interface を用いて造波した規則波を伝播させるテストを行った。次に、提案モデルを用いて海岸堤防を対象とした越波計算を実施した。計算対象とした数値造波水槽では、沖側に設定した造波位置から堤防に向かって徐々に空間解像度を高く設定した。提案モデルの計算結果を、Wavy Interface を適用せずに従来の造波板を用いた手法による計算結果と比較することで、提案モデルの優位性を示す。

3. 得られた成果

波浪計算では、空間解像度が異なる領域が岸沖方向に並んでおり、流体が解像度境界を周期的に横断する。それに伴って、ネスティング計算⁵⁾では粒子の生成・消去が頻繁に行われることから、体積保存性に欠陥が生じることが懸念された。しかし、長時間造波を継続した計算においても流体体積はほぼ一定に維持され、提案モデルの波浪伝播計算における高い体積保存性が確認された。また、複数の空間解像度領域にまたがった波浪伝播においても、顕著な波浪減衰が発生しないことが

* 京都大学・教授

確認された。次に、越波計算の瞬間像の一例を示す（図-1）。越波計算においては、越波が発生するたびに水槽内の流体が減少するため、越波量を適切に維持しながら長時間の計算を行うには水槽内の流体の補充が必要となる。しかし、従来の造波板を用いた計算では水面を乱さずに流体を補充することが不可能であるため、流体を補充せずに計算を継続せざるを得ず、顕著な水位低下が発生する。これについては、柔軟な粒子補充が容易な Wavy Interface の導入によって水位の維持が可能なことが、計算過程における平均水位追跡の結果から確認された。

また、図-2 に示す累積越波量を見ると、造波板を用いた場合では、水位低下による越波量の減少が確認できる。一方、Wavy Interface を適用した場合は、越波量の減少現象は生じなかった。また、図にはネスティング計算で使用した粒子の中で最も高解像度の粒子（最小粒径粒子）のみを用いて計算した結果も併示したが、ネスティング計算から得られる越波量との相違は僅かであった。一方、ネスティング計算を適用した場合の 100 秒間のシミュレーションに要した計算時間は、単一解像度の場合の約 56% 程度である。つまり、ネスティング計算が、計算精度を保ちつつ、計算負荷を大幅に低減できることが明らかとなった。以上のように、提案モデルは、効率的な越波計算の実施に有効であることが示された。

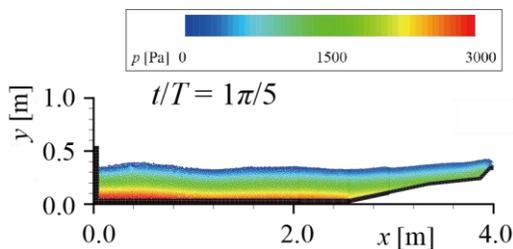


図-1 越波計算の瞬間像

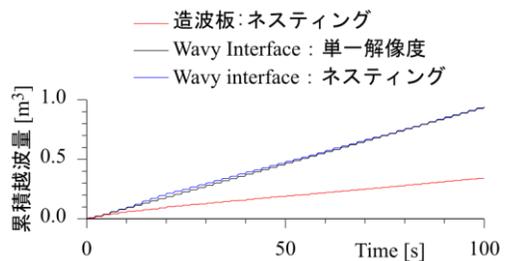


図-2 累積越波量

4. 謝 辞

本研究は、株式会社ニュージェックから委託を受けて実施されたものであり、関係各位に謝意を表したい。

発 表 論 文

現時点で発表は行っていないが、今後の進展も併せて国際学術誌への投稿を検討したい。

参 考 文 献

- 1) 後藤仁志：粒子法 連続体・混相流・粒状体のための計算科学，森北出版，289p，2018.
- 2) Gotoh, H., Ikari, H., Memita, T. and Sakai, T.: Lagrangian particle method for simulation of wave overtopping on a vertical seawall, Coastal Eng. J., 47(2-3), 157-181, 2005.
- 3) Gotoh, H. and Khayyer, A.: On the state-of-the-art of particle methods for coastal and ocean engineering. Coastal Eng. J. 60(1): 79-103, 2018.
- 4) Tsuruta, N., Khayyer, A., Gotoh, H. and Suzuki, K.: Development of Wavy Interface model for wave generation by the projection-based particle methods, Coastal Eng. J., 165, 103861, 2021.
- 5) 五十里洋行，後藤仁志，久岡勇登：粒子法による空間分離型複数解像度計算手法の開発と砕波計算への応用，第 69 回海岸工学講演会，2022.
- 6) 五十里洋行，後藤仁志，脇嶋可成：MPS 法におけるエネルギー保存性の改善と不規則波伝播計算への適用性，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，78(2)，I_43-I_48，2022.
- 7) Tsuruta, N., Khayyer, A. and Gotoh, H.: Enhancement of accuracy of stabilizer for projection-based particle method. Proc. 13th international SPHERIC workshop, 9-15, 2018.