

陽的アルゴリズムを導入した MPS 法による津波波形の再現に関する基礎的研究 A Fundamental Study on Reproduction of Tsunami Waveform with the Explicit - MPS Method

○福永勇太¹, 居駒知樹², 相田康洋², 増田光一²*Yuta Fukunaga¹, Tomoki Ikoma², Yasuhiro Aida², Masuda Koichi²

Abstract: The MPS method has the disadvantage that the calculation time increases as the number of particles increases. For this reason, a method has been developed to reduce the computation time by introducing an explicit algorithm. However, the MPS method using this explicit algorithm results in lower waveform storage due to pressure fluctuations. Therefore, in this study, it was clarified that the waveform preservation was improved by comparing the experimental value with the tsunami waveform reproduction calculation that changed the value of the influence radius, and setting the value of the influence radius appropriately.

1. 緒言

MPS 法 (Moving Particle Semi-implicit method) は Koshizuka^[1]らによって開発された非圧縮性流れのための粒子法であり, 格子生成を必要とせず自由表面の大変形を伴う現象を扱うことができる. そのため, 津波のような強非線形な現象を解析する有力な手法として多くの実績^{[2],[3]}がある. しかしながら, MPS 法は半陰解法であるから, 粒子数の増加に対して計算時間が幾何級数的に増加し, 問題が大規模化するにつれて莫大な計算時間を要するといった特徴を持つ. これに対して大地ら^[4]は陽的なアルゴリズムを導入した MPS 法を開発を行い, 従来の半陰的解法では粒子数の 1.5 乗で計算時間が増加することに対して陽的解法では 1.0 乗のオーダーで増加することを示した. また, 大地ら^[5]は圧力計算の部分について解析を行い, 圧力の値やその振動について半陰的解法による圧力計算との結果を比較している. その結果, 仮想的な音速を設定することにより半陰的解法と同等の計算結果を得られることを確認した. しかし, 陽的アルゴリズムを導入した MPS 法では従来の半陰的解法と同様に圧力振動が発生することにより, 波形の伝搬距離に対する保存性が低く津波波形の解析の際に問題となる. そこで, 本研究では陽的アルゴリズムを導入した MPS 法で発生する圧力振動の改善方法を明らかにし, 伝搬距離に応じた波形の保存性を向上させることを目的とする.

2. 研究手法

本研究の研究手法である MPS 法と陽的アルゴリズムの概要について以下に示す.

2. 1 MPS 法

非圧縮性流体の支配方程式を(1)式, (2)式に示す. (1)式は質量保存則である連続の式である. (1)式は密度の変化が 0 であり, 密度が時間に対して一定であること

を意味している. (2)式は運動量保存則より導かれるナビエーストークス方程式である. (2)式の第 1 項は圧力勾配項, 第 2 項は粘性項, 第 3 項は重力項を意味している.

$$\frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

ただし, ρ : 流体密度, t : 時間, \mathbf{u} : 速度ベクトル, P : 圧力, ν : 動粘性係数, \mathbf{g} : 重力加速度ベクトルとする.

2. 2 陽的アルゴリズムの導入

MPS における陽的アルゴリズムの導入については大地ら^[4]が提案したものをを用いる. 圧力は(3)式で計算する. また, 勾配モデルとして(4)式を用いる.

$$P_i = c^2 \frac{\rho_0}{n_0} (n_i - n_0) \quad (3)$$

$$\langle \nabla P \rangle_i = \frac{2d}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{P_j + P_i}{2} \frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|^2} w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|) \right] \quad (4)$$

ここで, P_{ij} : 圧力, c : 仮想的な音速, ρ_0 : 基準となる流体密度, n_0 : 基準となる粒子数密度, n_i : i 粒子の粒子数密度, d : 空間次元数, r_i : i 粒子の位置ベクトル, r_j : i 粒子の近傍粒子 j の位置ベクトルである. 陽的アルゴリズムを導入した MPS 法では計算の過程で微少な圧縮性を認めていることになるため, 流体の流速に対して音速があまり大きくないと圧力波の伝搬が遅くなり, 流体が圧縮する. 非圧縮性流体では音速の値が無有限大になることから本手法では音速をある程度大きな値として設定しなければ非圧縮性の近似にならない. ただし, 計算上音速は実際の物性値ではなく実際よりも小さな仮想的な値で与える. こうすることで, 粒子数密度の変化に対する圧力の変化の係数を仮想的に小

1: 日大理工・院(前)・海建, Department of Oceanic Architecture and Engineering, CST., Graduate School of Nihon University

2: 日大理工・教員・海建, Department of Oceanic Architecture and Engineering, CST., Nihon University

さくすることができ、安定した計算が可能となる。従って、本研究では定式化上 c については仮想的な音速として定義する。

3. 圧力振動の発生要因とその改善方法

圧力振動の要因の1つとして水中で自由表面と誤判定される粒子の発生が挙げられる。静水圧計算において自由表面と誤判定された粒子を Figure1 に示す。

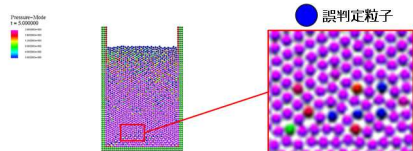


Figure 1. Particles misidentified as free surfaces

この粒子の周辺に注目すると自由表面と誤判定された粒子と近傍粒子との間に空間が発生していることが確認できる。これは、圧縮性が許容されていることにより流体粒子が圧縮、膨張を繰り返した時に粒子間に空間が発生するためであると考えられる。Figure1 のように粒子間に空間が発生する場合、粒子数密度が小さく計算され、自由表面と誤判定される粒子が発生する可能性がある。これに対して、粒子間の相互作用を考慮する空間的範囲を設定するためのパラメータ影響半径 r_e を大きく設定することで、粒子数密度が小さく計算されることをある程度防げると考えられる。そのため、経験的に粒子間距離の 2.1 倍と設定していた影響半径 r_e の値を変化させ、それぞれ比較を行った。

4. 津波波形の再現計算

本計算手法において影響半径を粒子間距離の 2.1 倍と設定した場合と 2.5 倍として設定した場合で津波波形の再現計算を行い、既存研究^[2]の実験値との比較を行った。実験値は日本大学理工学部が所有する 2 次元水槽実験施設で水柱崩壊を起こし Figure2 の赤枠に示す沖合と防潮堤上の計測点で水位変動及び流速を解析したものである。Table1 に計算実行条件を示す。

5. 結果および考察

Figure3~5 に結果の比較を示す。赤丸で示す影響半径を粒子間距離の 2.5 倍で設定した結果は、2.1 倍の場合に比べて流速、水位変動ともに比較的实验値を再現できていることが分かる。これは、影響半径を適切に設定することで自由表面と誤判定される粒子が減少し圧力計算が安定したためであると考えられる。

6. 結言

陽的アルゴリズムを導入した MPS 法では圧縮性が許容されることにより圧力振動が発生し、波形の保存性が低くなるが、影響半径を適切に設定することで自由表面と誤判定される粒子が減少し、圧力計算が安定

することで波形の保存性が向上することが明らかとなった。しかし、水柱崩壊だけでなく規則波や孤立波に対しても検証が必要であり、今後の課題である。

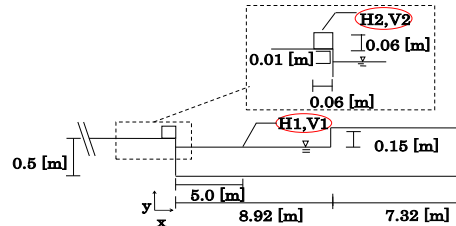


Figure 2. Long wave experiment setup with dam break

Table 1. Simulation conditions

	Case1	Case2
U_{max}/c	0.2	
代表速度 U_{max} [m/s]	2.42	
計算総時間 [s]	15.0	
計算時間刻み [s]	0.0001	
流体密度 ρ [kg/m ³]	1000.0	
粒子間距離 l_0 [m]	0.01	
影響半径 r_e	$2.1 l_0$	$2.5 l_0$

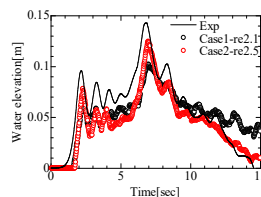


Figure 3. H1 (offshore) water elevation

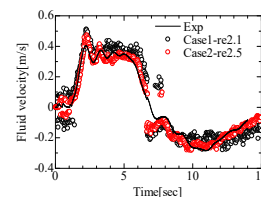


Figure 4. V1 (offshore) fluid velocity

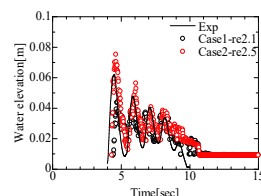


Figure 5. H2 (on seawall) water elevation

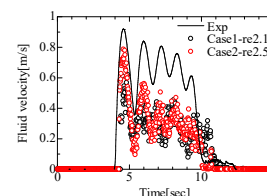


Figure 6. V2 (on seawall) fluid velocity

7. 参考文献

- [1] S. Koshizuka and Y. Oka, Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid. NuclSci.Eng, 123, pp421-434, 1996.
- [2] 増田光一, 相田康洋, 居駒知樹, 惠藤浩朗: 仮想弾性境界の有用性について津波漂流物と構造物の衝突問題への MPS 法の応用に関する研究その 1, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, NO.722, pp.813-823, 2016.
- [4] 相田康洋, 村田大地, 居駒知樹, 増田光一, 惠藤浩朗: 粒子法の弾性体モデルを適用した構造物の津波漂流物衝突時の応答解析に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 2019.9, pp55-56
- [5] 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫, 自由表面流れのための MPS 陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, No.20100013, 2010
- [6] 大地雅俊, 山田祥徳, 越塚誠一, 酒井幹夫, MPS 陽解法における圧力計算の検証, 日本計算工学会論文集, No.20110002, 2011