

Explicit-MPS 法による静水域を遡上する津波の数値解析

東北工業大学 学生会員 ○ 高橋哲也

東北工業大学 正会員 菅原景一・高橋敏彦

1. はじめに

河川遡上津波は、陸地の津波と比べ発生頻度は低いが伝播速度が速く甚大な被害をもたらすことがある。さらに、現地での観測も難しいため観測データが少ない¹⁾。そのため河川遡上津波の研究は主に数値解析で行われている。流体の数値解析には幾つかの手法があるが、粒子法は河川遡上津波のようなダイナミックな流動を再現するには計算ポイントを格子に固定しないという点で利点がある。粒子法の中でも比較的计算精度の高い MPS 法(半陰解法)は計算時間が長く時間のコストが高い。そこで並列化処理など計算時間を短縮できる Explicit-MPS 法²⁾(陽解法)を用いて静水域を遡上する津波の数値解析を行い、実験水路での結果と比較することで解析精度の検証を行った。

2. 解析のアルゴリズム

(1) 支配方程式

E-MPS 法の流体の支配方程式は連続の式とナビエ・ストークス方程式の 2 つとなる³⁾。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

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

ここで、 ρ : 密度、 $\mathbf{u}$: 速度、 P : 圧力、 ν : 動粘性係数、 $\mathbf{g}$: 重力加速度である。

(2) 重み関数

E-MPS 法で用いる重み関数は山田ら⁴⁾にならい以下のものを用いた。

$$w_{grad}(r) = \frac{r_e}{r} - \frac{r}{r_e} \quad (5)$$

$$w(r) = \frac{r_e}{r} + \frac{r}{r_e} - 2 \quad (6)$$

ここで、 r と r_e はそれぞれ粒子間距離と影響半径である。また、E-MPS 法の w_{grad} と w はそれぞれ圧力勾配項とそれ以外に用いる重み関数であり、初期粒子数密度も同様に異なるものを用いる⁴⁾。

3. 解析の実際

計算水路の模式図を図 1 に示した。水路は長さ 10[m]、高さ 0.4[m]の 2 次元平面とした。解析は、初期水深 $h=0.04$ [m]、貯留水深 $H_u=0.4$ [m]の水理条件に対して粒子間距離 2.0×10^{-2} [m]、時間刻み幅 1.0×10^{-4} [m]とし、音速を 100~200[m/s]、影響半径を 2.1~3.0 の範囲で変更し波高の再現を試みた。尚、波高の再現性は図中 No.2 と No.4 の地点における計算水位を実験結果と比較することで確認した。

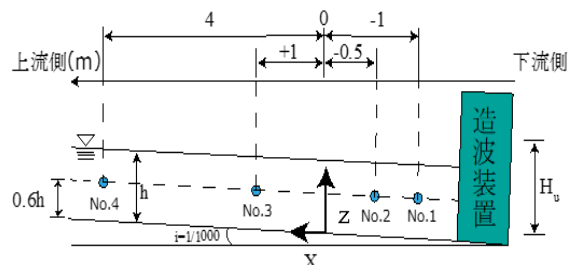


図 1 計算水路の模式図

表 1 E-MPS 法の解析条件

総粒子数	4115
粒子間距離	2.0×10^{-2} [m]
時間刻み幅	1.0×10^{-4} [s]
密度	1000[kg/m ³]
重力加速度	9.8[m/s ²]
動粘性係数	1.0×10^{-6} [m ² /s]

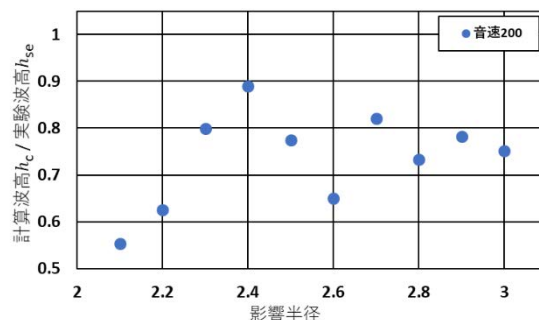


図 2 影響半径による最大波高の変化 (No. 4 地点)

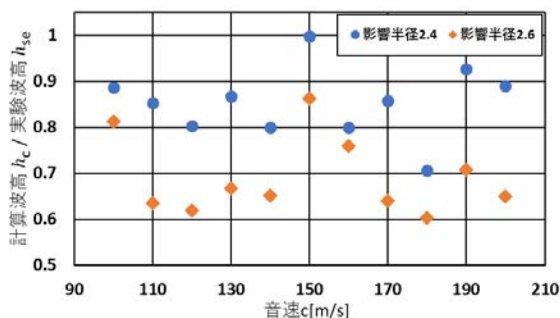


図 3 音速による最大波高の変化 (No. 4 地点)

キーワード：粒子法、Explicit-MPS 法(陽解法)、遡上津波、圧力、音速

〒982-8577 宮城県仙台市太白区八木山香澄町 35-1 東北工業大学 都市マネジメント学科 TEL：022-305-3550

4. 静水域を遡上する津波の解析

(1) 影響半径と音速による波高の再現

遡上津波波高を再現するにあたり、造波装置から遠く波高の再現性に問題がある No.4 地点の最大波高と実験結果を比較することで検討を進めた。図 2 は影響半径と最大波高比(h_c/h_{ex})の関係を示したものである。同図から影響半径が 2.4 の時に再現性が高くなっていることが分かる。そこで影響半径を 2.4 と 2.6 の場合に対して音速が再現波高に及ぼす影響を比較した。その結果を示した図 3 によると今回検討した範囲の中で実験結果に一番近い再現をしていたのは影響半径 2.4 と音速 150[m/s]となった。

(2) 波高の計算

影響半径 2.4、音速 150[m/s]で計算した E-MPS 法の結果に実験結果及び MPS 法の計算結果を重ねて図 4 に示した。図中では橙色が実験結果、青色が MPS 法、緑色が E-MPS 法を示している。No.2 地点では E-MPS 法の最大波高とその後の減衰傾向がよく再現できている。3~5s の間に波高が上下に分かれているがこれは水深 0.04[m]に対して粒子間距離 0.02[m]であり、静水深を 2 粒子で表現しているため波の乱れや山と谷の差が過剰に表現されているためと考えられる。また No.4 地点において E-MPS 法の最大波高は概ね再現できているが波の立ち上がりと減衰の再現性が低くなっている。

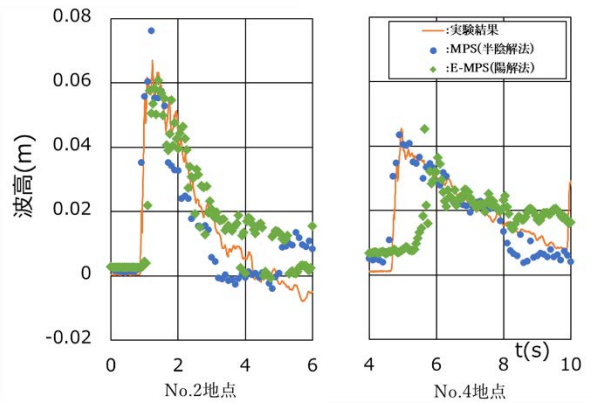


図 4 No. 2、No. 4 における再現波高

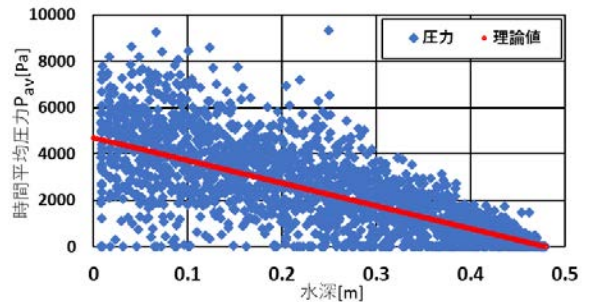


図 5 時間平均された圧力 P_{av} の分布

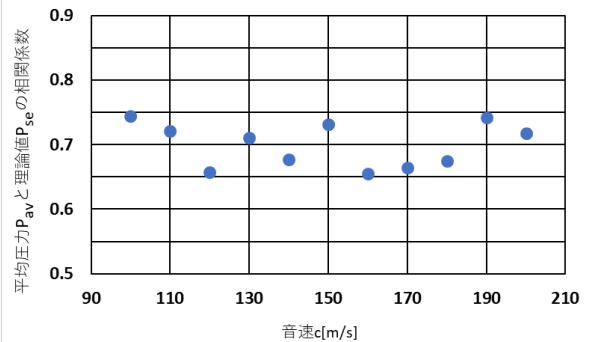


図 6 音速 c による平均圧力 P_{av} と

理論値 P_{se} の相関係数の変化

5. 圧力振動の検証

一般に音速を大きくすると圧力はばらつきが大きくなることが示唆されている。そこで本研究では波高再現のために、一般に非圧縮性流体の E-MPS 法で使用される音速 21.69[m/s] (マッハ数 $Ma=0.2$) よりも音速を大きく設定しているため、音速の変更が圧力計算結果に及ぼす影響について大地ら⁵⁾を参考に検証を行った。図 5 は音速 150[m/s] (マッハ数 $Ma=0.03$) での時間平均された圧力の分布を示している。圧力分布はばらつきが大きいものの全体的な傾向は静水圧の理論値に従っている。図 6 に圧力の理論値と計算結果の相関係数と音速の関係を示した。同図によると圧力のばらつきと音速には一義的な関係はなく、相関係数 0.65~0.75 の範囲で変化していることが確認できた。

6. おわりに

本研究では静水域を遡上する津波の E-MPS 法によるシミュレーションについて検証を行い、影響半径や音速を調整することで波高の再現性を向上させられることを確認した。その結果として造波装置に比較的近い No.2 地点は良好に再現できていることを確認した。一方、造波装置から離れている No.4 地点の再現性については波の立ち上がりや減衰の過程について課題が残された。圧力の振動については今回検討した範囲では音速の増加に伴ってばらつきが一義的に増加するという傾向は認められなかった。

以上のことから、波高の再現については影響半径と音速を適切に設定することで E-MPS 法によっても再現できるが、圧力についてはさらなる検討が必要であるといえる。

参考文献

- 1) 河川津波対策検討会(2011):河川への遡上津波対策に関する緊急提言, <https://www.mlit.go.jp/common/000163992.pdf>.
- 2) 越塚ら(2010):自由表面流れ解析のための MPS 陽的アルゴリズムの開発, 日本計算工学会論文集, 2010 巻 No.20100013
- 3) 越塚ら(著)(2014):粒子法入門, 丸善出版,
- 4) 山田ら(2011):Explicit-MPS 法による三次元自由液面流れの数値解析, 日本原子力学会和文論文誌, 10 巻 3 号 p. 185~193
- 5) 大地ら(2011):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, 2011 巻 No. 20110002