

津波による塩水遡上現象を想定した3次元粒子法における物質輸送モデルの開発

Development of a substance transport model of three-dimensional particle method for saltwater intrusion caused by tsunami

寒地土木研究所 ○正員 阿部 孝章 (Takaaki Abe)
北見工業大学 正員 吉川 泰弘 (Yasuhiro Yoshikawa)
寒地土木研究所 正員 矢部 浩規 (Hiroki Yabe)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震津波は国内の多くの地域で河川津波を発生させ、河川周辺域に甚大な被害をもたらした。一方、構造物の顕著な被災は伴わずとも、一部の上下水道施設では津波遡上による被害を防ぐための緊急対応が必要となった。例として、新釧路川に設置された写真-1の愛国浄水場取水口では本川の津波による水位上昇に対応するため、取水停止を行ったことが報告されている¹⁾。尚、新釧路川本川では河口から11 km地点まで津波遡上が確認されている。津波発生時などの緊急時に適切な上下水道等の施設操作を行うためには、海域での津波伝播に加えて河道域や取水口等構造物周辺の塩水挙動を精度良く予測する手法の開発が必要である。

近年3次元数値解析モデルによる河川津波の予測や粒子法の枠組みにおける大規模かつ高解像度な数値計算法の開発や応用が様々な分野で進んでいるが、流れに輸送される物質を組み込んだ粒子法モデルの開発は一部²⁾を除きあまり進んでいない。本研究では、構造物周辺における津波・塩水の同時遡上の予測を想定し、塩分輸送を考慮可能な3次元粒子法モデルを開発し、水理実験との比較によりモデルの適用性を検証することとした。

2. 水理実験及び数値解析モデルの構築

まず、比較のための水理実験概要について述べる。実験は図-1に示すような延長9 m、幅20 cm、勾配0の亚克力製水路を使用した。塩水塊部は30 PSUの塩水、河道域を想定した部分は淡水とし、塩水塊部分の高さ $H_0 = 10, 15$ cm、淡水部水深 $h_0 = 5$ cmとした。ゲート急開により塩水を伴うダムブレイク型の津波を発生させた。塩水部にはトレーサーとしてHP20粒子を混合し、淡水



写真-1 愛国浄水場取水口（河口から8.8 km）

部は塗料で着色し、側方からの撮影動画から界面部を読み取り可能なようにした。

本稿では、3次元的な数値解析手法として、並列計算などへの移植が容易な陽解法型 MPS (Moving Particle Simulation) 法³⁾を基本的解析手法として採用した。支配方程式は以下の連続式と運動方程式である。

$$\frac{Dp}{D\rho} = c_0^2 \quad (1)$$

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

但し、 p は流体の圧力[N/m²]、 ρ は密度[kg/m³]、 c_0 は流体内部の音速に関係する数値計算上のパラメータ (= 22.0 m/s)、 $\mathbf{u}$ は流速[m/s]、 ν は動粘性係数[m²/s]、 $\mathbf{g}$ は重力加速度[m/s²]である。上の式で微分演算子を含む各項は MPS 法独自の粒子間相互作用モデルを用いて離散化される。すなわち、圧力勾配項、粘性項はそれぞれ以下のように離散化される。

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{p_j - p_i}{r_{ij}^2} \mathbf{r}_{ij} w(r_{ij}) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \mathbf{u} \rangle_i = \frac{2D_s}{n_0 \lambda} \sum_{j \neq i} [\mathbf{u}_{ij} w(r_{ij})] \quad (4)$$

但し、 D_s は空間の次元数 (= 3)、 n_0 は基準粒子数密度、 $\mathbf{r}_{ij}$ は粒子 i の粒子 j に対する相対位置ベクトル、 $w(r)$ は MPS 法における重み関数である。

物質輸送モデルは既往研究で提案されている、温度場の輸送モデル⁴⁾の考え方を援用し、粒子 i が情報として有する塩水濃度を C_i とし濃度の時間的な拡散を

$$\frac{DC_i}{Dt} = \gamma \nabla^2 C_i \quad (5)$$

によって解くこととした。右辺は粘性項と同様に MPS 法標準の Laplacian モデルで離散化した。式中の拡散係数 γ は数値解析上のパラメータであり、合理的に決定することは難しい。本研究では実験との比較により、妥当な値を設定することとし、本稿では試行錯誤の上 $\gamma =$

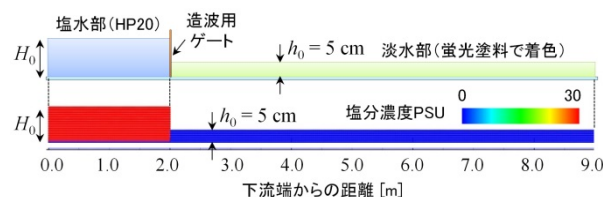
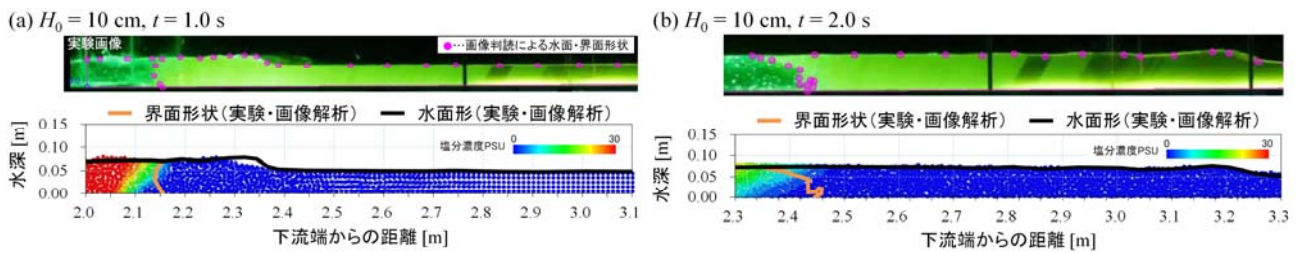
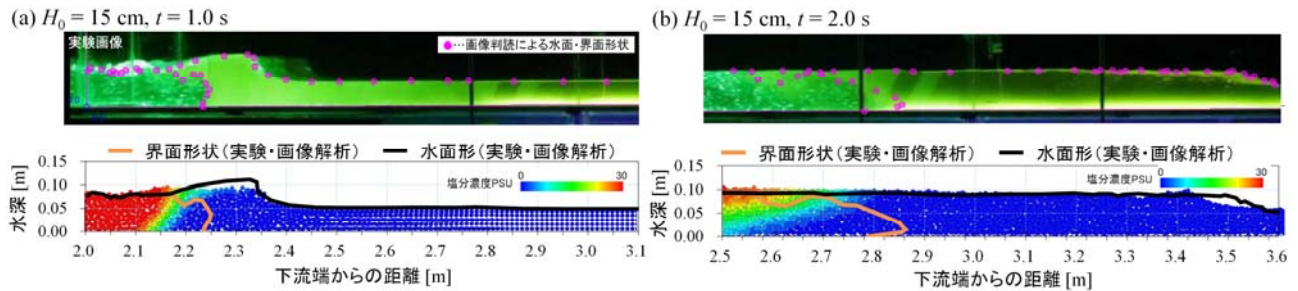


図-1 実験水路の概念図（上段）と計算の初期粒子配置（下段；流体粒子のみを側方から表示）

図-2 実験結果と数値計算結果の比較 ($H_0 = 10 \text{ cm}$, t は造波後の経過時間)図-3 実験結果と数値計算結果の比較 ($H_0 = 15 \text{ cm}$, t は造波後の経過時間)

0.001 と設定した。

実験の再現のため、実験水路の諸元に合わせ図-1 下部のような 3 次元モデルを作成した。計算粒子径 $d_0 = 1 \text{ cm}$ であり、 $H_0 = 10 \text{ cm}$ のケースでは総粒子数 15 万個、 $H_0 = 15 \text{ cm}$ のケースでは総粒子数 18 万個であった。また、実験水路が河床部・側壁ともアクリル材であることから、流体と壁面はフリースリップ境界条件とした。

3. 結果及び考察

図-2 に示したのは、 $H_0 = 10 \text{ cm}$ の場合の実験における流況と計算結果の側方からのスナップショットである。尚、実験においては画像解析により水面形及び塩淡水境界面を抽出し、計算結果においては計算粒子位置を塩分濃度と共に示している。図-2 (a)の造波 1 秒後について水面形及び塩水フロント位置は実験と概ね一致した。但し界面は実験では河床付近から先行して遡上するが計算結果では水面付近で遡上が速い。これは、数値解析モデルにおいては流速分布に連行されて塩分が輸送される効果が支配的であるのに対し、実験においては比重の相違によって塩分の進行と淡水下部への侵入が現れるものと考えられた。図-2 (b)の 2 秒後には実験の津波のフロントは下流端から 3.2 m 付近まで遡上し塩水フロント位置は 2.45 m 付近であるが、塩水部分のフロントという観点からすると、計算上も類似の結果が得られている。

図-3 は $H_0 = 15 \text{ cm}$ の場合で、図-3 (a)の 1 秒後では、水面形状は計算結果でも概ね良好に再現され、塩水遡上距離も概ね再現されている。しかし流動層内部での界面形状は実験と異なる結果となった。図-3 (b)の 2 秒後では、津波の先端位置は実験で概ね下流端から 3.6 m、計算で 3.5 m であり、塩水先端位置については、実験で約 2.9 m、計算で約 2.8 m となっている。計算結果の方がやや遅れる傾向はあるものの、波の水面形や塩水遡上距離という観点では概ね良好に再現された。尚、本計算は

3 次元領域で行っているが、水路横断方向の塩水濃度分布には大きな変化は確認されなかった。

4. まとめと今後の課題

本研究では、3 次元粒子法における物質輸送モデル開発の一環として、濃度拡散方程式を粒子場において離散化し、その上で完全 Lagrange 的に計算を行う塩水輸送モデルを開発した。実際の塩水及び淡水を使用した精緻な水理実験との比較により、提案したモデルが流況及び塩水遡上現象を定量的に概ね再現可能であることを確認した。一方で塩淡水境界面の再現性には課題が残っており、本稿のモデルで再現しきれない現象について更なる改良が必要である。また、数値解析上設定されるパラメータが 3 次元計算の場合と 2 次元計算の場合とでどのように異なるかなどの追加検討が肝要であると考えられる。

今後本モデルが実用化されれば、津波衝突を受ける取水口周辺解析など、局所急変流場における物質輸送・塩水遡上に関する大規模または高解像度計算への活用が期待される。

参考文献

- 1) 吉川泰弘, 阿部孝章, 中津川誠, 船木淳悟: 河川津波による塩水遡上現象に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71(2), pp.I_403-I_408, 2015.
- 2) 五十里洋行, 後藤仁志, 松島良太郎: 粒子法型濁質輸送モデルによる濁水の水面突入・拡散過程の数値解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72(),
- 3) 大地雅俊, 越塚誠一, 酒井幹夫, 自由表面流れ解析のための MPS 陽的アルゴリズムの開発, 計算工学会論文誌, No.20100013, 8 p., 2010.
- 4) Koshizuka, S., Ikeda, H. & Oka, Y.: Numerical analysis of fragmentation mechanisms in vapor explosions, Nuclear Engineering Design, Vol.189(1), pp.423-433, 1999.