

京都大学工学部	学生員	市川 陽一
京都大学大学院工学研究科	正会員	後藤 仁志
京都大学大学院工学研究科	正会員	五十里 洋行
京都大学大学院工学研究科	学生員	堀 智恵実

1. はじめに

ケーソン防波堤では、マウンドの被覆ブロックが波の影響で崩壊する問題が生じている。この問題を解決するために、本研究では、防波堤前面波浪場の数値解析をMPS(Moving Particle Semi-implicit)法¹⁾で行う。ただし、計算負荷を低減させるために、本研究ではBoussinesq-MPSカップリングモデル²⁾で数値解析を行い、水理実験結果と比較する。また、本研究ではGPUコンピューティングを導入し、計算時間の短縮を図り、更に標準MPS法を拡張したCMPS(Corrected MPS)法³⁾を用いて計算を行い、標準MPS法と比較してGPUコンピューティングやCMPS法の有用性を確認する。

2. 数値解析の概要

(1) Boussinesq-MPS カップリング

本研究で使用したカップリングモデルはMPS法からBoussinesqモデルへのフィードバックを考慮しない one-way カップリングを採用する。すなわち、Boussinesqモデルによる計算結果から得られた水理条件(水位、流速)を入力値として、MPS法の造波境界(移動壁)を運動させる。造波壁の移動速度は、造波壁(座標 x_{wall} 、速度 v_{wall})がBoussinesqモデルの計算点(x_{Boff} 、 x_{Bon})の間に存在する状況を考え、Boussinesqモデルの計算点における速度を内挿して

$$v_{wall} = \frac{|x_{Bon} - x_{wall}|}{|x_{Bon} - x_{Boff}|} v_{Boff} + \frac{|x_{wall} - x_{Boff}|}{|x_{Bon} - x_{Boff}|} v_{Bon} \quad (1)$$

で与える。また、造波壁の高さを

$$h_{wall} = \frac{|x_{Bon} - x_{wall}|}{|x_{Bon} - x_{Boff}|} h_{Boff} + \frac{|x_{wall} - x_{Boff}|}{|x_{Bon} - x_{Boff}|} h_{Bon} - h_{of} \quad (2)$$

とする。1 ストローク通して、造波壁天端は継続して水没状態が維持される。 h_{of} は、越流を促進し、造波壁前面に位置する観測点における水位をBoussinesqモデルの計算値に近づけるための調整値である。この現象を放置すれば、計算対象内の水の体積が減少してしまうので本研究では、造

波壁天端を越えた累積粒子数が 20000 個に達した時点で造波壁前面から岸側に向かって水面に粒子を再配置する。

(2) CMPS 法の概要

標準 MPS 法では、粒子 j に粒子 i から作用する圧力勾配力は、

$$A_{j \rightarrow i}^p = -\frac{mD_s}{\rho n_0} \frac{p_j - \hat{p}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (3)$$

と書ける (m : 粒子 1 個あたりの質量)。一方、粒子 i に粒子 j から作用する圧力勾配力は、

$$A_{i \rightarrow j}^p = -\frac{mD_s}{\rho n_0} \frac{p_i - \hat{p}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) w(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|) \quad (4)$$

と書けて、

$$A_{i \rightarrow j}^p \neq -A_{j \rightarrow i}^p \quad (5)$$

となり、圧力勾配項が anti-symmetric とならないので、運動量が保存されない。CMPS 法では、粒子 i, j 間の圧力勾配の評価に、粒子 i, j の中点に仮想的圧力定義点を設けて、この点を媒介とした局所圧力勾配評価を行うことにより、標準 MPS 法の圧力勾配モデル

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \frac{p_j - \hat{p}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \quad (6)$$

を変形し、

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{(p_i + p_j) - 2\hat{p}_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right\} \quad (7)$$

を導出する。さらに圧力の局所(影響円内)最小値の対称性を保証するため、 \hat{p}_i を $(\hat{p}_i + \hat{p}_j)/2$ で置換した

$$\langle \nabla p \rangle_i = \frac{D_s}{n_0} \sum_{j \neq i} \left\{ \frac{(p_i + p_j) - (\hat{p}_i + \hat{p}_j)}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|) \right\} \quad (8)$$

を式(6)に代わる圧力勾配評価式として用いることにより、運動量保存性が確保される。

3. 防波堤前面波浪場の数値解析

(1) 水理実験

図-1 および図-2 に水理実験の概要図を示す．数値シミュレーションと水理実験との比較は，水位時系列は，H5-1，H6-1，H6-2 で比較を行い，流速時系列は，VD-1X からVD-3X で水平方向(岸向きが正)の流速を，VD-5Z で鉛直方向(鉛直上向きが正)の流速を比較する．

(2) 計算結果

図-3 に水位時系列の比較を，図-4 に流速時系列の比較を示す．両者とも良好な一致が見られ，一定の再現性が得られていると思われる．次に標準 MPS 法と CMPS 法の水面形の比較を図-5 に示す．標準 MPS 法は水面形がばらついてのに対し CMPS 法は滑らかな水面形が得られている．また飛沫の上がり方に不一致が見られるが，波形が実験結果と良く一致しているのは CMPS 法のほうであった．運動量が保存されたことで効果的に圧力擾乱が抑制されたことが原因であると考えられる．GPU コンピューティングの導入による計算時間の短縮については，テキストファイルへの出力を除いた計算実行総時間は約 7 時間であり，一方，すべて CPU で行った計算は約 42 時間であったので，約 6 倍の時間短縮が達成された．

4. 結論

本稿では，防波堤前面波浪場の数値解析を，GPU コンピューティングを導入し，CMPS 法を用いて行った．計算結果は実験結果と良好に一致しており，また CMPS 法の有用性も示された．また GPU コンピューティングによる時間短縮も達成された．今後はこの計算結果を用いて，被覆ブロックの移動計算につなげたい．

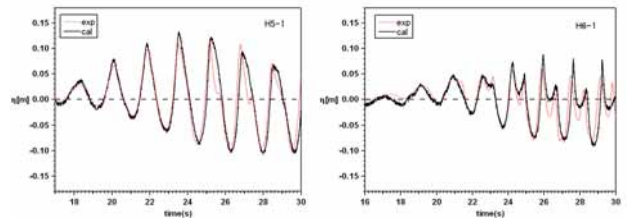


図-3 水位時系列比較

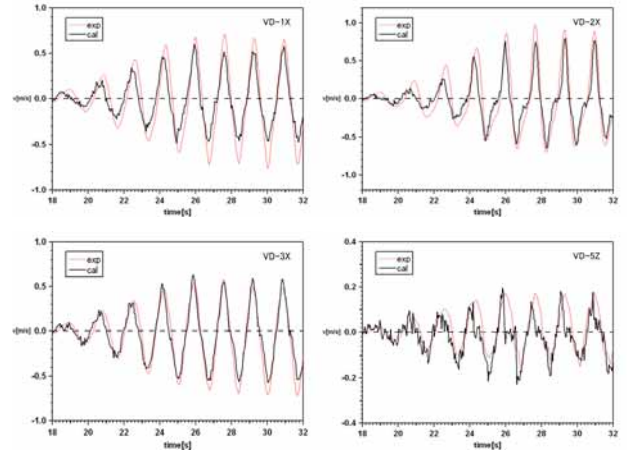


図-4 流速時系列比較

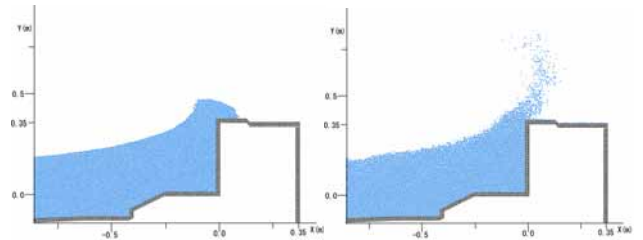


図-5 水面形比較(左:CMPS法,右:標準 MPS法)

参考文献

- 1) 越塚誠一：粒子法，丸善，144p,2005.
- 2) 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥田一弘：粒子法と Boussinesq モデルのハイブリッド化に関する基礎的研究，水工学論文集，第 50 巻，pp.1453-1458,2006
- 3) Khayer,A.and H.Gotoh：Development of CMPS method for accurate water-surface tracking in breaking waves,Coastal Eng. Jour.,Vol.50,No.2, pp.179-207,2008.

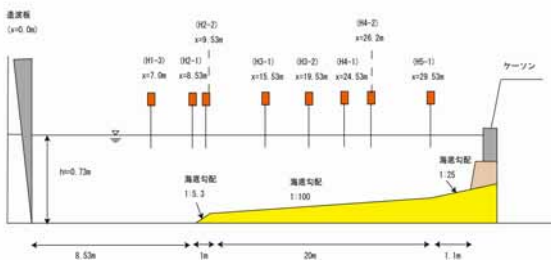


図-1 水理実験概要図

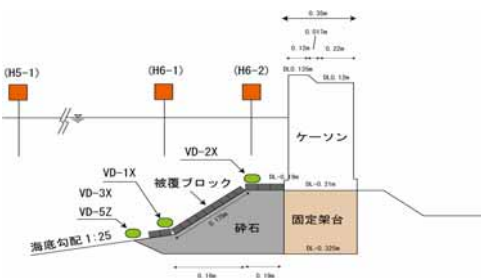


図-2 ケーソン前詳細図