

固液混相乱流モデルによるブロック群の沈降・堆積過程の数値シミュレーション

Numerical Simulation for Settlement Process of Blocks by Particle-Laden Turbulence Flow Model

原田英治¹・後藤仁志²・鶴田修己³

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOH and Naoki TSURUTA

A solver of a high accuracy and a high resolution for a solid-liquid two-phase flow model is required to predict a settlement process of dumped blocks in a construction of a block mound. Because, a settlement of blocks leads to a sediment cloud composed by suspended sediment due to turbulence near sea bottom, and a sediment cloud brings a problem of turbidity water. In the present study, numerical simulation for a settlement process of blocks in a still water has been performed by using the newly developed solid-liquid two-phase flow model including LES, which can calculate turbulent flow in detail. A flow structure around settling blocks has been shown computationally.

1. はじめに

人工漁場や埋立地の造成では、バージ船からブロック群が投入されるが、工費削減のための迅速な施工を大水深で実施するには、ブロックの堆積形状の予測が重要となる。また、施工後のブロックマウンドによる海底水の上昇あるいは、時化の際のブロック底部からの底質の巻き上がりについての予測も環境影響を検討する上では重要な事項となる。これらの予測には、高精度かつ高解像度にブロック周りの流れをシミュレーションできることが鍵となる。この種のシミュレーションを実施するためには、牛島ら (2003, 2006) によるMICSや梶島ら (2000) による粒子流解析といった直接数値シミュレーションをベースとした計算手法が適していると考えられる。このような観点から、前報 (原田ら, 2008) では、高解像度型の固液混相乱流モデルを用いてブロック群の沈降・堆積過程を対象とした数値シミュレーションを実施した。ただし、高精度予測には不可欠な乱流の評価については具体的なサブモデルを導入しなかった。マウンド付近が乱流状態であることを考慮すると、底部からの海水上昇や底質の巻き上げの予測には、乱流モデルの導入は必須である。本研究では、原田ら (2008) のモデルに乱流モデルを組み込み、高解像度での解析が可能な固液混相乱流モデルを開発した。まず、単一ブロックの沈降過程を対象として水理実験と数値シミュレーションを実施し、開

発した数値モデルの再現性をブロック沈降挙動から確認した。さらに、多数ブロック群の沈降・堆積過程の数値シミュレーションを実施し、乱れや底面流速の観点からブロック周りの流れ場を詳細に検討した。

2. 固液混相乱流モデル

(1) 固液混合系流れ

固液混合系流れは、計算格子スケールで平滑化した連続式およびNavier-Stokes式によって記述される。固体のブロック構成要素と流体が共存する計算格子では、計算格子における各相の占有率で重み付けした物性値を用い、ブロック構成要素内部での固液混合径系の粘性係数およびせん断歪みはゼロの取扱とした。以下に基礎方程式を示す。なお、乱流モデルとして、0方程式モデルのLES (Smagorinskyモデル) を導入した。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 (2\mathbf{S}:\mathbf{S})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \phi_p \rho_p + (1 - \phi_p) \rho_l \\ \mu &= \phi_p \mu_p + (1 - \phi_p) \mu_l \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{u} &= \phi_p \mathbf{u}_p + (1 - \phi_p) \mathbf{u}_l \\ \mathbf{S} &= \frac{1}{2} \{\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、固液混合系流れに対して、 \mathbf{u} : 流速ベクトル、 ρ : 密度、 P : 圧力、 \mathbf{g} : 重力加速度、 μ : 粘性係数、 ν_t : SGS乱流粘性係数、 \mathbf{S} : 歪み速度テンソル、 C_s : Smagorinsky定数、 Δ : 計算格子幅、 ϕ_p : 各計算格子に含まれるブロック構成要素の体積占有率である。なお、こ

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 工学研究科都市環境工学専攻
2 正会員 博(工) 京都大学教授 工学研究科都市環境工学専攻
3 学生会員 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

れら式の中の下付き添え字 p , l はそれぞれ、ブロック構成要素および流体が占有する領域における物性値や物理量を示す。また、本研究では、Smagorinsky 定数 C_s の値は 0.1 を採用した。

(2) ブロック移動追跡モデル

ブロックは、複数の円形要素を剛体連結して構成した。個々のブロック構成要素の運動は、個別要素法を用いて追跡される。ブロック構成要素の駆動力は、流体力、物体力、要素間相互作用力から構成し下式を用いて記述される。

$$\frac{dm_p v_p}{dt} = F_{flow} + F_{pint} + g \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{d(I_p \omega_p)}{dt} = T_{flow} + T_{pint} \dots\dots\dots (8)$$

$$f_p = \phi_p \rho_p \left(\frac{Du}{Dt} - g \right) \dots\dots\dots (9)$$

$$F_{flow} = \int_{V_p} f_p dV \dots\dots\dots (10)$$

$$T_{flow} = \int_{V_p} r_c \times f_p dV \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 m_p ：ブロック構成要素の質量、 v_p ：ブロック構成要素の移動速度ベクトル、 f_p ：計算格子におけるブロック構成要素に作用する流体力、 V_p ：ブロック構成要素を含む領域、 F_{flow} ：ブロック構成要素に作用する流体力、 F_{pint} ：要素間相互作用力ベクトル、 I_p ：慣性テンソル、 ω_p ：粒子の角速度ベクトル、 T_{flow} ：流体力に起因するトルク、 T_{pint} ：要素間力に起因するトルクである。なお、 F_{flow} はブロック構成要素を含む計算格子における f_p の総和によって算定し、 T_{flow} はブロック構成要素の境界を含む計算格子に対する f_p とブロック構成要素の中心座標から計算格子中心座標までの相対位置ベクトル r_c からモーメントを算定し評価した。要素間相互作用力ベクトル F_{pint} は、接触粒子間の法線および接線方向に配置された弾性スプリングおよび粘性ダッシュポットによって評価される (図-1 参照)。また、非粘性材料を対象として、法線方向には引っ張りに抵抗しないジョイントを、接線方向には一定の力が作用すると滑動するジョイントをそれぞれ配置した (後藤ら, 1995)。なお、弾性スプリングおよび粘性ダッシュポットは、ヘルツの弾性接触理論を準用して設定した。

個別要素法によるブロック構成要素運動追跡後に、Koshizuka ら (1998) の Passively Moving Solid Model を用いて、ブロック構成要素の重心周りの並進と回転の運動量が保存されるように下式を用いて座標修正を施し、ブロックの剛体挙動を模擬した。

$$x_g = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \dots\dots\dots (12)$$

$$v_g = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n v_k \dots\dots\dots (13)$$

$$\omega_g = I_g^{-1} \sum_{k=1}^n (x_i - x_g) \times v_k \dots\dots\dots (14)$$

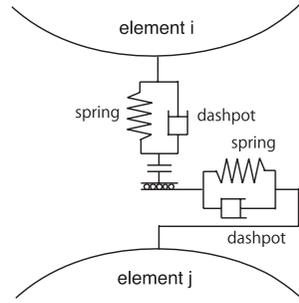


図-1 スプリング-ダッシュポットシステム

$$x_k = x_{k,pre} + \{ \omega_g \times (x_i - x_g) \} \Delta t_{DEM} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 x_g ：ブロック重心の位置ベクトル、 n ：ブロック構成要素数、 v_g ：ブロック重心の速度ベクトル、 ω_g ：ブロック重心周りの角速度ベクトル、 I_g ：ブロック重心周りの慣性テンソル、 pre ：1ステップ前の諸量を示す添え字である。

(3) 数値解法

最初に、与えられた初期計算条件の下で、CIP-CUP法 (Yabe ら, 1991) により固液混合系流れを求める。その後、ブロック構成要素に作用する流体力を式 (9)、式 (10)、式 (11) から計算し、個別要素法によるブロック構成要素運動の計算、Passively Moving Solid Model によるブロック構成要素の座標修正を順次行う。ブロック構成要素の移動追跡後に得られたブロック構成要素の位置および速度ベクトルに応じて、各計算格子での粒子占有率を修正し、粒子を含むセルにおける流れ場については、

$$u_p = v_p + \omega_p \times r_c \dots\dots\dots (16)$$

によって修正する。そして、この境界条件の下で上記に示した一連のプロセスを、所定の計算ステップまで繰り返す。

3. 単一ブロックの沈降過程

(1) 実験装置の概要

開発した固液混相乱流モデルの基本的な再現性を確認するために、単一ブロックの水中沈降過程を対象とした水理実験を実施した。図-2 に実験装置の概略図を示すが、実験で用いたのは、ビデオカメラ、水槽、小型の compressor、ブロックを吸着させるためのチューブ、球形要素を接着した人工粒子 (ブロック模型) である。実験手順は以下の通りである。i) 小型の compressor の吸引力によってブロック模型をチューブの先端に吸着させた状態に保ち、水を張った水槽に、水面から静かに吸引ホースの先端部とブロック模型を挿入する。ii) 水面変動が落ち着いたことを確認した後に、吸引を止めて、ブロック模型を吸引ホースから離脱させると同時に、iii) プ

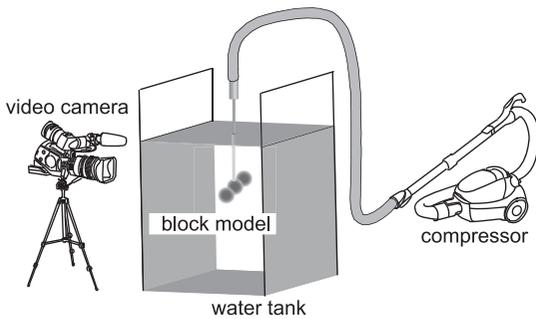


図-2 実験装置の概略図

ロック模型が水中で沈降する過程を水槽の側方部からビデオカメラで撮影する。なお、ブロックを吸着させるチューブには複数の吸気口を設け、小型のcompressorへの負荷低減に配慮した。

(2) 数値シミュレーションと実験結果の比較

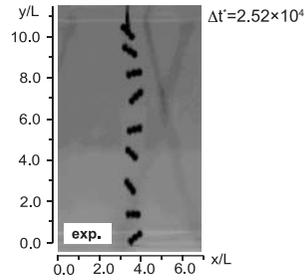
実験と数値シミュレーションで得られた、ブロックの水中沈降軌跡の連続画像を図-3に示す。数値シミュレーションが2次元計算であるため、ブロックの沈降速度に関する直接比較はできないが、実験結果を特徴付ける左右交互にブロックが傾きつつ沈降する過程（いわゆる、leaf motion）がシミュレーション結果にも明瞭に確認でき、開発したシミュレーションモデルの一定の再現性が確認できた。また、乱流モデル導入の効果が、 $y/L < 3.0$ 付近のブロック軌跡の違いから見て取れる。なお、図中の Δt^* は連続画像の時間間隔を示しており、時間は次元解析から得られるブロックの沈降速度に関する諸量と代表長さスケール（ブロック長 L ）を用いて無次元化し、表示した。

(3) 乱流モデルの導入効果

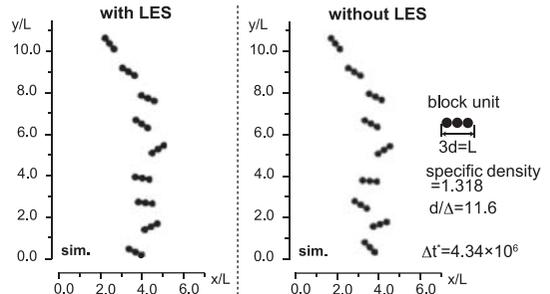
LES (Smagorinskyモデル) 導入の効果を示すため、図-4にSmagorinskyモデルの有無による双方のシミュレーションから得られた、計算領域全体で空間平均したグリッドスケール(GS)の歪み速度テンソルの大きさのスペクトルを示す。Smagorinskyモデルを導入したケースでは、導入しない場合と比較して、高周波成分が顕著に増加しており、エネルギー散逸の増加がうかがえる。ここから、サブグリッドスケール(SGS)の乱れの評価におけるSmagorinskyモデルの役割が確認される。

(4) ブロック周りの乱れ構造

ブロック周りの乱れ構造の時間発達過程を、図-5に示す。この図は、計算領域（総計97,686個の計算格子）のSGS乱れエネルギー生成率(P_{kSGS})の分布(図-5上図)から、各計算格子でどの程度の乱れエネルギーが生成されているかを存在率で示した図(図-5下図)である。leaf motionを伴ったブロック沈降による乱れエネルギー生成率の変動が、存在率の変化および瞬間画像の乱れエ



(a) 実験



(b) シミュレーション

図-3 単一ブロックの沈降軌跡

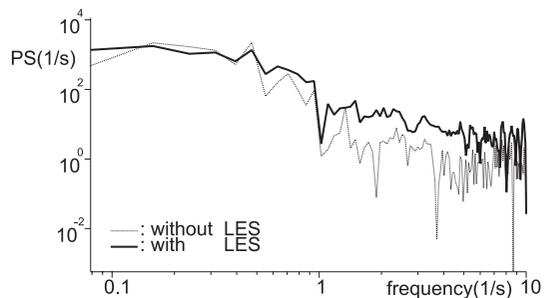


図-4 GS歪み速度テンソルの大きさのパワースペクトル

ネルギー生成率分布の変化の双方から確認できる。

4. 多数ブロック群の沈降・堆積過程

(1) 瞬間画像および乱れエネルギー

開発したモデルの応用例として、多数ブロック群の沈降・堆積過程の数値シミュレーションを実施した。代表的なスナップショットをSGS乱れエネルギー生成の分布と併せて図-6に示す。ブロックの沈降に伴い、ブロック間やブロックの端部に沿って顕著な乱れの生成が見取れる。また、瞬間画像からでは判別し難いが、計算結果をアニメーションにして再生したところ、ブロック群の堆積によって計算領域下層部から上昇する乱れの分布の拡散過程が確認できた。ブロック周囲の乱れ構造の計測が困難であることから、ブロック投入に伴う海底砂の巻き上げやマウンド漁礁による栄養塩の拡散の評価に対し

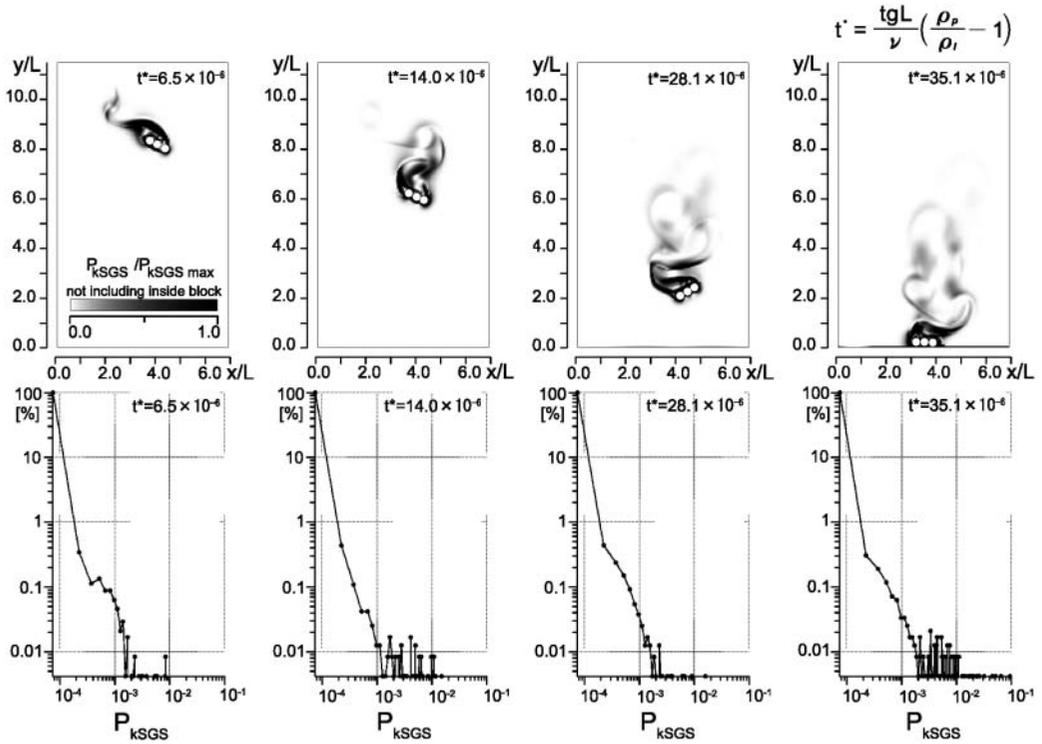


図-5 ブロック周りのSGS乱れエネルギーの生成の時間発達過程

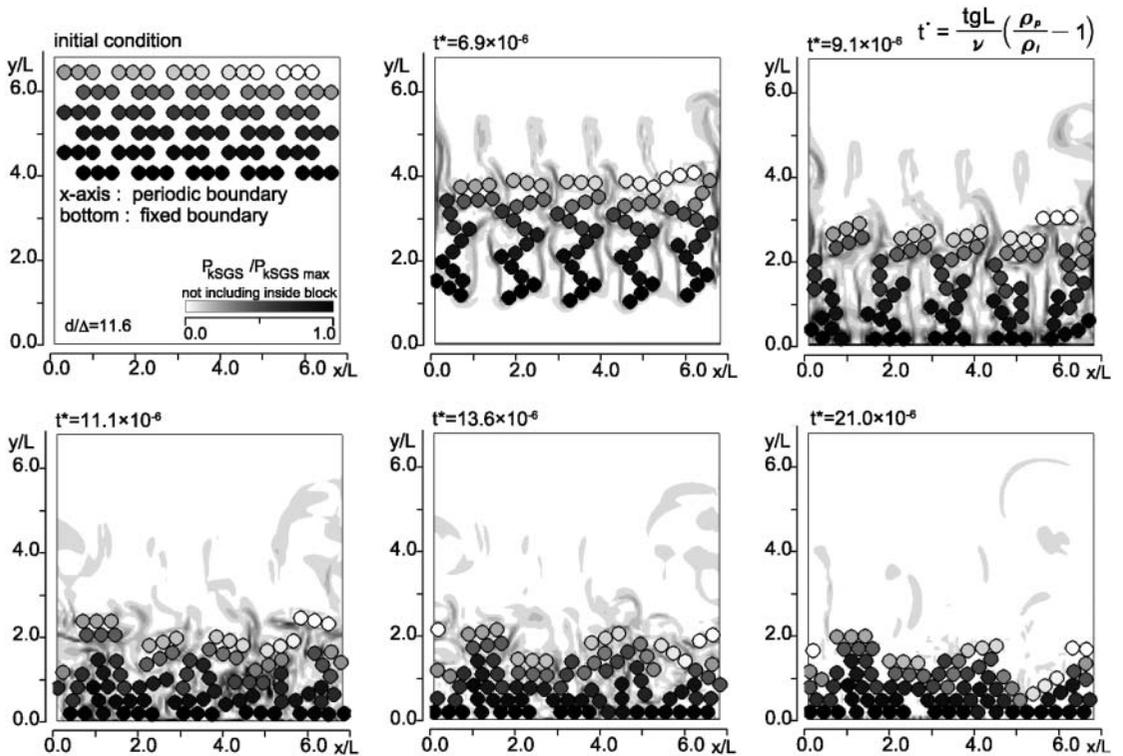


図-6 多数ブロック群の沈降・堆積過程

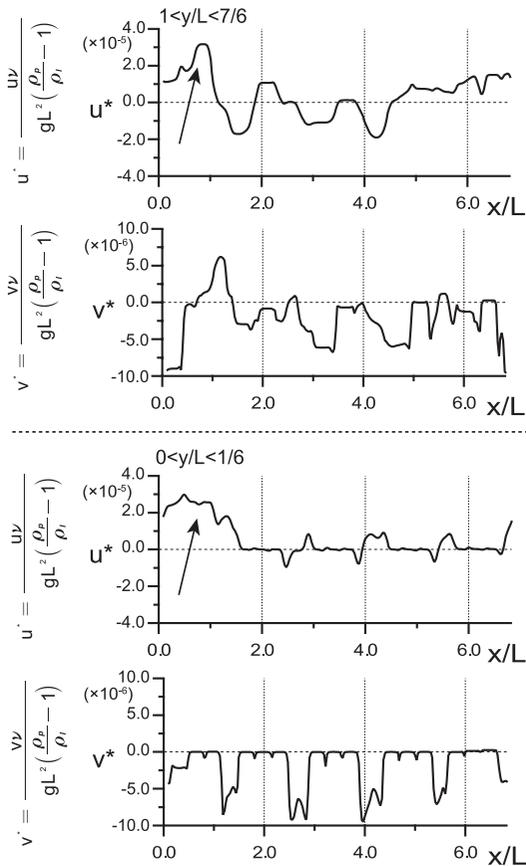


図-7 底層付近の流速の空間分布

て、この種の数値計算力学的なアプローチは有効であると考えられる。

(2) 底質および底層物質の移動予測

底質挙動や底層付近に滞留している物質の移動予測には、流速の時空間分布の情報が不可欠である。ブロック群の沈降・堆積過程によって生じる、図-6で示した時刻 $t^* = 9.1 \times 10^{-6}$ での底部付近の流速の空間分布を図-7に示す。なお、流速場はブロックの沈降によって誘起されるため、ここでは、次元解析から得られるブロックの沈降速度に関する諸量を用いて無次元化し、表示した。計測した底層付近の範囲においては、上方からのブロック群の供給によってブロックと底部との間に流体が封じ込められるため、鉛直方向の流速には、全体的に下方へ向かう流れの傾向が読み取れ、また、沈降過程で発生するブロック間空隙の増加箇所では局所流速の存在も確認され

る(図-7中の矢印参照)。なお、水平方向への流速値は鉛直方向のそれと比較して数倍程度の大きさを示していることから、仮に底質や物質が底部付近に存在しているとすると、水平方向への移流拡散が卓越した挙動が予測される。より詳細な底質や底層滞留物質の挙動予測には、拡散方程式あるいはLagrange型の浮遊砂粒子の運動追跡手法を用いた検討が必要である。

5. おわりに

高解像度固液混相流モデルにSmagorinskyモデルを導入した固液混相乱流モデルを用いて、ブロック群の沈降・堆積過程を計算力学的観点から検討した。開発した固液混相乱流モデルの再現性を単一ブロックの沈降過程を対象とした簡易実験との比較から確認した後、ブロック周りの乱れ構造の時間発達過程について検討した。また、応用例として多数ブロック群の沈降・堆積過程のシミュレーションを実施し、底質や底層物質の挙動に対しても触れた。今後、モデルの3次元化を進め、底質や底層物質の拡散過程の検討も含めて、より詳細にブロックマウンド周りの流れ環境を検討していきたい。

謝辞：本研究に助成頂いた財団法人中部電力基礎技術研究所に感謝申し上げます。

参考文献

- 牛島 省・竹村雅樹・山田修三・禰津家久 (2003)：非圧縮性流体解析に基づく粒子-流体混合系の計算法 (MICS) の提案, 土木学会論文集, No. 740/II-64, pp. 121-130.
- 牛島 省・山田修三・藤岡 奨・禰津家久 (2006)：3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解析 (3D MICS) の提案と適用性の検討, 土木学会論文集, No. 810/II-74, pp. 79-89.
- 梶島岳夫・瀧口智志・浜崎洋至・三宅 裕 (2000)：渦放出を伴う粒子を含む鉛直平行平板間乱流の構造, 機会学会論文集B編, Vol. 66, No. 647, pp. 1734-1741.
- 後藤仁志・酒井哲郎 (1995)：表層せん断を受ける砂層の動的挙動の数値解析, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 101-112.
- 原田英治・後藤仁志 (2008)：高解像度固液混相流モデルを用いた水中投入ブロック群沈降・堆積過程の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 961-965.
- Koshizuka, S., A. Nobe and Y. Oka (1988): Numerical analysis of breaking waves using the moving particle semi-implicit method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Vol. 26, pp. 751-769.
- Yabe, T. and P. Y. Wang (1991): Unified Numerical Procedure for Compressible and Incompressible Fluid, J. Phys. Soc. Japan, Vol. 60, No. 7, pp. 2105-2108.