

ブロック群沈降・堆積予測のための3次元固液混相乱流モデルの構築

3D Solid-Liquid Two-Phase-Flow Model for Turbulent Flows Driven by Sedimentation Block

原田英治¹・後藤仁志²・鶴田修己³

Eiji HARADA, Hitoshi GOTOH and Naoki TSURUTA

For a cost reduction of block-mound construction, an accurate prediction of sedimentation of blocks is essential. In this study, high-resolution calculations by using computational grids as fine as a few tenth of block length are performed. A hybrid turbulence model, such as the Detached Eddy Simulation (DES) is introduced to describe details of turbulent flow fields around blocks. The developed numerical code is verified by comparing its results with the experiment of sedimentation of a single block. Then, numerical simulation of sedimentation of multiple blocks is performed to show some parts of characteristics of turbulent flow structure.

1. はじめに

底開バージから投入された捨石の正確な堆積予測は多くの海洋工事における施工計画および施工管理に不可欠であり、従来より多数の研究が実施されてきた(例えば、小田ら, 1992; 松見ら, 1992; 重松ら, 2001; 後藤ら, 2003)。

予測精度を高めるには、固体粒子群の離散的な沈降挙動およびそれによって誘起される混相乱流場を考慮した数値シミュレーションの実施が重要であることに疑念はなく、これまで著者ら(原田ら, 2009, 2010)は、代表的な固体粒子スケールよりも細かい計算格子を用いて高い解像度に粒子周りの流れ場を捉える固液混相乱流モデルの枠組を示すとともに、粒子やブロックの沈降過程を対象とした実験との比較を通じてその再現性を検討してきた。しかしながら、2次元LESであったため乱流の本質と言える3次元特性については不十分な検討であった。

本研究では、3次元固液混相乱流モデルを構築し、単一ブロックの水中沈降過程を対象とした実験と数値シミュレーション結果の比較から、構築した3次元モデルの再現性を確認した後、多数ブロック群沈降堆積過程の数値シミュレーションを実施し、ブロック沈降によって誘起されたブロック周りの複雑な流れ場構造を推定する。

2. 数値モデル

(1) 固液混相乱流モデル

固液混相流れは、レイノルズ平均あるいは計算格子スケールで平滑化した非圧縮性Newton流体の連続式と運動

方程式を基礎とする。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{D\bar{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\rho - \rho_w}{\rho} g_i \quad \dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu &= (1 - \phi_s) \mu \\ \nu_t &= (1 - \phi_s) \nu_t \\ \rho &= \phi_s \rho_s + (1 - \phi_s) \rho_w \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - 2\nu_t \bar{S}_{ij}, \bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 $\bar{u}_i$: 流速ベクトル成分、 t : 時間、 ρ : 流体密度、 $\bar{p}$: 圧力、 μ : 粘性係数、 τ_{ij} : レイノルズ応力成分、 ρ_w : 水の密度、 ρ_s : ブロック密度、 g_i : 重力加速度ベクトル成分、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ成分、 k : 乱れエネルギー、 ν_t : 渦動粘性係数、 S_{ij} : 歪み速度テンソル成分、 ϕ_s : 各計算格子に含まれるブロック占有率である。なお、直交座標系 x_i ($i=1,2,3$) とする。

(2) 乱流モデル

乱流モデルとしてDES (Detached Eddy Simulation; Nikitinら, 2000) を適用し、以下の基礎方程式を用いて渦動粘性係数を評価した。

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{D\tilde{\nu}}{Dt} &= C_{b1} \bar{S} \tilde{\nu} - C_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 \\ &+ \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{w2} \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{S} &= |\bar{S}_{ij}| + \frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2 \bar{d}^2} f_{v2}, f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}} \\ f_w &= g_D \left(\frac{1 + C_{w3}^6}{g_D^6 + C_{w3}^6} \right)^{1/6}, g_D = r_D + C_{w2} (r_D^6 - r_D) \\ r &\equiv \frac{\tilde{\nu}}{S \kappa^2 \bar{d}^2}, \bar{d} = \min(d_{\min}, 0.65 d_{cell}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (7)$$

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員 博(工) 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻
3 学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻

$$\left. \begin{aligned} C_{b1} &= 0.1355, \sigma = 2/3, C_{b2} = 0.622, \kappa = 0.41 \\ C_{u1} &= C_{b1}/\kappa^2 + (1 + C_{b2})/\sigma, C_{u2} = 0.3 \\ C_{u3} &= 2, C_{v1} = 7.1 \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

ここに、 $d_{\min}$ ：固相以外の計算格子の中央部から壁面あるいはブロック表面までの最短距離とした。このように、乱れ評価に関して、壁面あるいはブロック表面近傍では渦粘性に関するRANSとしてS-Aモデルを、そこから離れた領域ではLESとして1方程式型SGSモデルを用いる。

(3) ブロックモデルの概要

ブロックを含む計算領域 V_p の運動量を用いて、ブロックの並進および回転運動を下式を用いて評価した。

$$\frac{d(mv_{pi})}{dt} = \int_{V_p} \phi_s \rho_s \frac{D\bar{u}_i}{Dt} dV + f_{pi} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{d(I_{ij}\omega_{pi})}{dt} = \int_{V_p} r \times \phi_s \rho_s \frac{D\bar{u}_i}{Dt} dV + T_{pi} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 m ：ブロックの質量、 v_{pi} ：ブロックの並進移動速度ベクトル成分、 f_{pi} ：ブロック間相互作用力成分、 I_{ij} ：慣性テンソル、 ω_{pi} ：ブロックの回転角速度ベクトル成分、 r ：ブロック重心座標から粒子を含む計算格子の中心への位置ベクトル、 T_{pi} ：ブロック間衝突に起因したトルクの成分である。ただし、完全に粒子で占有された計算格子では流体の歪みは生じないとして扱う。

(4) 数値解法

多層流体統一解法 (Xiaoら, 1999) を参考に、ブロックを含む多層流体場を求解するが、複数のブロック挙動を対象とした数値シミュレーションにおいてブロック間衝突が発生した場合には、DEMのスプリング・ダッシュポットモデル (後藤, 2004) によってブロック間衝突力を計算した。

3. 単一ブロックの沈降過程

(1) 水理実験

単一ブロック模型は、比重 $\sigma=2.23$ 、要素径 $d=0.02\text{m}$ の3つの球形要素をそれらの中心点が同一直線上に並ぶように連結したものである。ここで、代表ブロック長 $L=3d$ として定義する。高さ $z=0.5\text{m}$ 、水平断面 0.15m 四方 ($x \times y=0.15\text{m} \times 0.15\text{m}$) のアクリル水槽中の水深 0.48m 静水中に、水面変動をできるだけ発生させないように水面の中央付近からブロック模型を静かに水中に放して落下させる。このブロック模型の水中沈降過程を水槽の側方から高速度カメラを用いて撮影する。同一条件の実験を10回実施した。

(2) 数値シミュレーション

水理実験と同様の条件の数値シミュレーションを実施した。実験観察における水面変動は極僅かであったので、

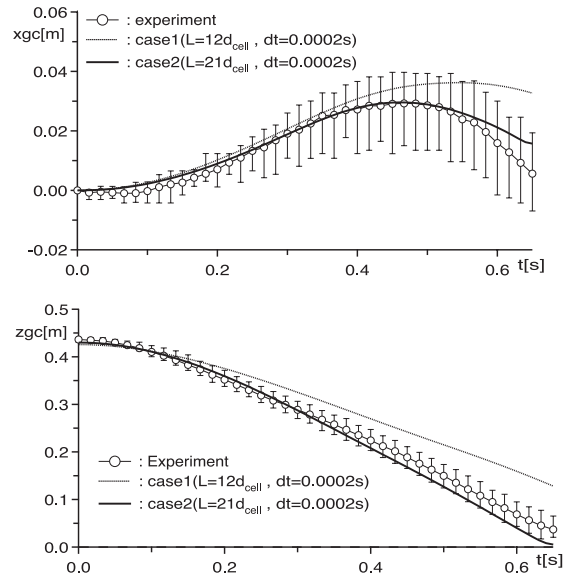


図-1 濃度重心の時系列

本研究の数値シミュレーションでは自由水表面の影響は考慮しないこととした。流体計算の格子スケール d_{cell} をパラメータ (時間刻み dt は同一) とする2ケースのシミュレーション (case1: $L=12d_{\text{cell}}$, $dt=0.0002\text{s}$; case2: $L=21d_{\text{cell}}$, $dt=0.0002\text{s}$) を実施し、水理実験の結果と比較した。なお、水槽壁面およびブロック表面では滑り無し条件を適用し、水面は開放条件を与えた。

(3) 再現性の検証

この種の沈降現象を特徴付ける leaf motion の再現性について検討するため、図-1に水平 (x 軸) 方向および鉛直 (z 軸) 方向のブロック重心の時系列を示す。図中には、実験結果は10回分のデータの平均値と最大および最小値をエラーバーを用いて表示した。case1と比較して空間解像度の高いcase2の数値シミュレーションは、実験で観測されたブロックの leaf motion を良好に再現することが分かる。なお、奥行き (y 軸) 方向へのブロック重心の移動は実験、数値シミュレーションの双方とも無視できるほど僅かであった。

case2の沈降中のブロック姿勢の水理実験結果に対する再現性を検討するため、図-2に単一ブロックの水中沈降過程の実験画像 (試行回数10回の実験の中で10回平均の単一ブロック沈降挙動に最も近い実験結果の画像) およびcase2の数値シミュレーションのスナップショットを示す。時刻 $t=0.36\text{s}$ および時刻 $t=0.48\text{s}$ でのブロック姿勢は、実験画像と比較して数値シミュレーションのブロックの傾きが小さくなるものの、case2の数値シミュレーション結果は水理実験でされたブロックの沈降過程中的姿勢の時系列変化を概ね良好に再現している。

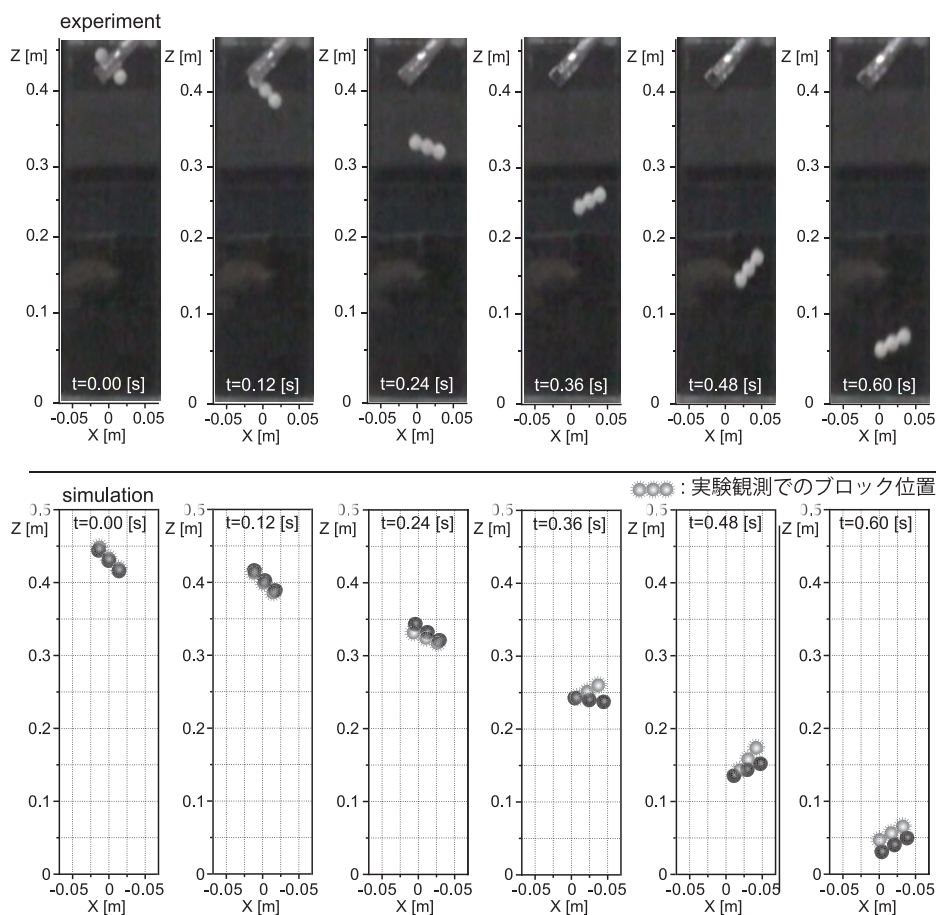


図-2 ビデオ画像とcase2のスナップショット

4. 多数ブロック群沈降・堆積過程

(1) 沈降・堆積過程

多数ブロック群の水中での沈降・堆積過程の数値シミュレーションを実施した。数値シミュレーションの水理条件および個々のブロックの条件は、単一ブロックの沈降過程で述べた条件と同様である。図-3に示すように1つの層(xy平面)に6個(x方向に2個, y方向に3個)として0.01mの等間隔で6層に積み上げた状態を36個のブロック群の初期配置とした(図-4の時刻 $t=0.00$ s参照)。図-4に多数ブロック群の沈降・堆積過程のスナップショットを示す。y=0.00mのxz平面付近に配置されたブロック群(図-3に示したブロック群C)は、x軸やy軸方向にほとんど移動することなく沈降し床面($z=0.00$ m)に到達し堆積する。また、ブロック群LおよびRは、計算開始とともに側壁方向に進行しつつ沈降し(時刻 $t=0.30$ s参照)、壁面に衝突した後は側壁から水槽内側に向う(時刻 $t=0.05$ sおよび時刻 $t=0.60$ s)。時刻 $t=0.60$ s付近では、ブロック群LおよびRはブロック群Cを挟んで衝突し、続

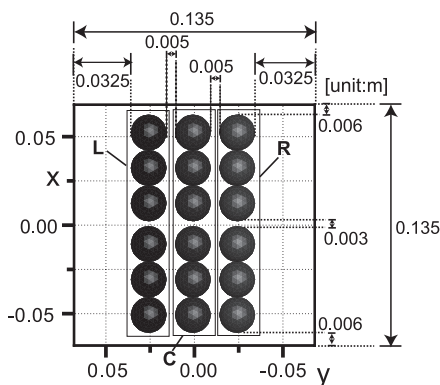


図-3 各層のブロック配置

いて畳み込まれるようにして床面に堆積する(時刻 $t=2.00$ s)。スナップショットからブロック群は概ね $y=0.00$ mのxz平面を対称面として沈降・堆積するが確認される。

(2) 内部構造

多数ブロック群の沈降・堆積過程における流れ場の構

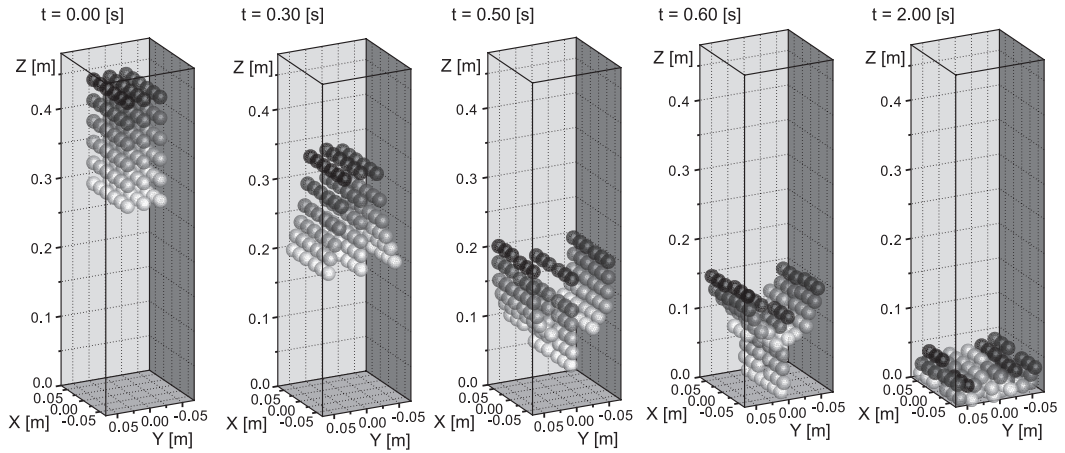
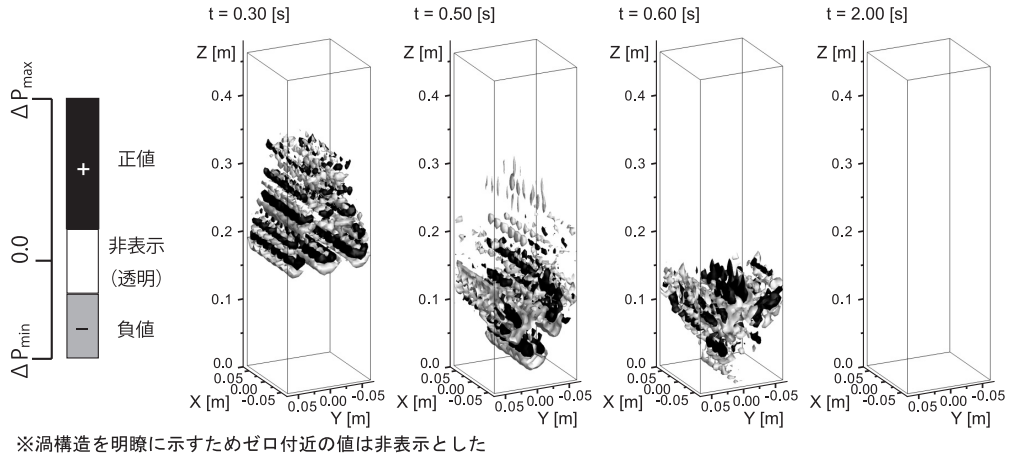


図-4 多数ブロック群の沈降・堆積過程



※渦構造を明瞭に示すためゼロ付近の値は非表示とした

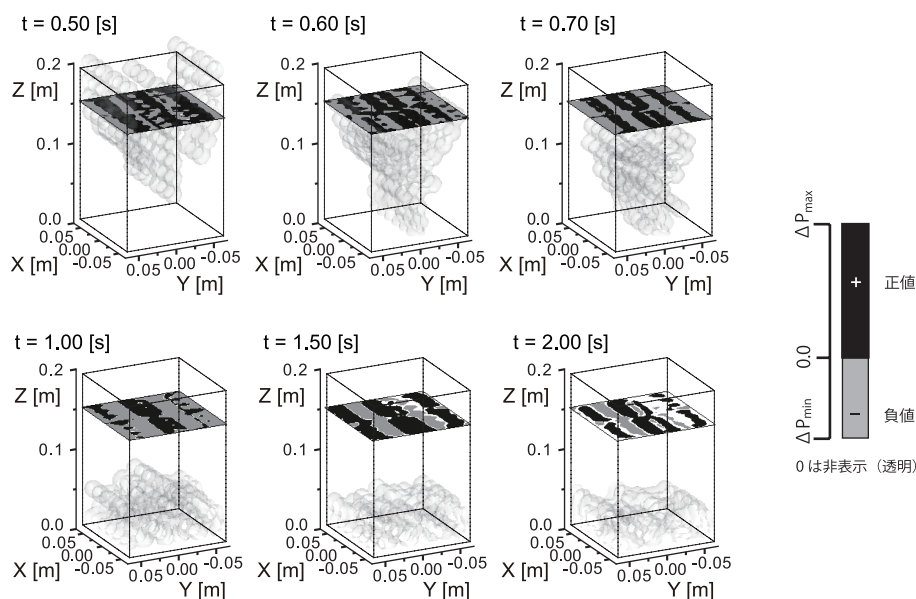
図-5 多数ブロック群の沈降・堆積過程における渦構造

造を検討するため、圧力に関するラプラシアンの分布を図-5（ブロック群は非表示）に示す。なお、全ての渦を示すと、ブロック周りの渦が壁境界付近の渦と重なり不鮮明になるため、レベルの低い渦については非表示とした。ブロックの沈降方向に対してブロック正面には流体の伸縮（渦層；図中の灰色の表示、負値）が、ブロックの背後には流体の回転（渦管；図中の黒色の表示、正值）が支配的な構造が、時刻 $t=0.30$ sのブロックの初期沈降過程では示されている。ブロックの衝突が開始する時刻 $t=0.50$ s付近からは渦層と渦管が複雑に混在した極めた乱れた状態を呈することが確認できる。また、ブロックの堆積が開始する時刻 $t=0.60$ sのブロック群Cの最上部のブロック群の後流領域には発達した渦領域が確認される。また、 $z=0.15$ mの xy 平面の渦構造を図-6に示す。なお、堆積ブロック群の上部に形成される流れ場の構造とブロック沈降状況との対応を浮き彫りにするため、図-5で示

した渦構造の表示範囲を拡げて示す（圧力に関するラプラシアンがゼロの箇所のみ非表示）とともに、ブロック群は半透明に表示した。ブロック群が $z=0.15$ mの xy 平面を通過する時刻 $t=0.50$ sには、ブロック間の領域で渦が発達した渦層と渦管の縞構造が確認される。時間が経過するとこの縞の数は減少し、また、渦の発達領域は減衰する過程が示されている。

5. おわりに

本研究では、多層流体統一解法を基礎とした流体解析手法の基本的な枠組みに個別要素法による要素間接触力の評価手法およびDESによる乱流モデルを融合した3次元固液混相乱流モデルを構築した。単一ブロックの沈降過程を対象とした水理実験を実施し、数値シミュレーション結果との比較からモデルの良好な再現性を確認した。また、多数ブロック群の沈降・堆積過程を対象とし

図-6 xy 平面 ($z = 0.15\text{m}$) の渦構造

た数値シミュレーションを実施して、沈降ブロック群の周りの複雑な流れ場構造について検討した。今後、水理実験による乱流計測から本モデルの再現性についてより詳細に検討する予定である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：21760386，研究代表者：原田英治）による成果であり，ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 小田一紀・重松孝昌・大西信幸・井上雅夫（1992）：改良型 DEMAC 法による粒子群の沈降・分散挙動の解析，海岸工学論文集，第39巻，pp. 971-975。
 重松孝昌・廣瀬真由・錦織陽一・小田一紀（2001）：DEM法とVOF法を併用した三次元固液混相流解析モデルの開発とその適用例，海岸工学論文集，第48巻，pp. 6-10。

- 後藤仁志・林 稔・安藤 怜・酒井哲郎（2003）：固液混相流解析のためのDEM-MPS法の構築，水工学論文集，第47巻，pp. 547-552。
 後藤仁志（2004）：数値流砂水理学，森北出版，223p。
 原田英治・後藤仁志・鶴田修己（2009）：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，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.B2-65，No.1，pp. 896-900。
 原田英治・後藤仁志・鶴田修己（2010）：固液混相乱流モデルの捨石群の沈降・堆積過程計算への適用例，土木学会論文集B，Vol.66，No.1，pp. 25-34。
 松見吉晴・泉 一幸（1992）：底開式バージによる捨石群の堆積形状に関する予測モデル，海岸工学論文集，第39巻，pp. 966-971。
 Nikitin, N.V., Nicoud, F., Wasistho, B., Squires, D. and Spalart, P.R. (2000): An approach to wall modelling in large-eddy simulations, Physics of Fluids., Vol.12, No.7, pp. 1629-1632。
 Xiao, F. (1999): A computational model for suspended large rigid bodies in 3D unsteady viscous flows, J.Compt. Phys., Vol.155, pp. 348-379。