

大型越波排水路付護岸前面のブロック移動限界予測への MPS 法の応用

Application of the MPS Method for Prediction of Armor-Block
Stability in front of Stepped Seawall with Drainage

後藤仁志¹・五十里洋行²・村元茂則³・安岡恒人³・高橋和秀⁴

Hitoshi GOTOH, Hiroyuki IKARI, Shigenori MURAMOTO
Tsunehito YASUOKA and Kazuhide TAKAHASHI

At a low crown caisson seawall with a large-size wave overtopping drainage, overtopping water lump collides with a wall of drainage and the resultant return flow falls down to blocks in front of seawall. This falling water can pick blocks up, however, the velocity measurement around the blocks is difficult in a hydraulic experiment. In this study, using the MPS method, which is suitable to analyse wave overtopping process in a complicated setup of seawall, the velocity field was calculated and compared with the critical velocity of blocks based on CERC formula. The pick-up condition of blocks predicted by the MPS method with CERC formula showed good agreement with ones in a hydraulic experiment.

1. はじめに

大型の越波排水路を備えた低天端ケーソン護岸においては、越波水塊の一部は排水路壁に衝突して戻り流れとなり、ケーソン天端からマウンド部へ落下する。この戻り流れによる落下流は、ケーソン前面の被覆ブロックの移動の原因となるので、被覆ブロックの安定性を検討する上で、落下流の存在下での流速場の把握が重要である。しかし、このような場では多量の混入気泡のために、水理実験による流速計測が困難である。

捨石マウンドの被覆材の安定性に関する既往の研究は数多く存在し、例えば谷本ら(1982)はハドソン式を用いて波高に基づいたブロックの安定重量の導出方法を確立しているが、本研究で扱う複雑な形状の護岸では護岸前面の波・流れ場が複雑化するため、既往の研究で適用された手法の有効性が確かではない。したがって、数値解析によって被覆ブロック周辺の流速場を算定し、それを基にブロックの安定性を議論する方法が有効である。松本ら(2001)や大熊ら(2003)は CADMAS-SURF(磯部ら, 1999)を用いて流速場を算定し、CERC の式(U. S. Army Coastal Engineering Research Center, 1973)からケーソン前面における被覆ブロックの安定性を議論する方法を提案している。しかし、これらの研究では単純なケーソン防波堤を対象としており、越波水塊の排水路面と

の衝突による戻り流れの影響が考慮された事例はない。

このような戻り流れを含めた一連のプロセスを解析するには、水塊の分裂・再合体に柔軟に対応できる MPS 法の使用が適している。後藤ら(2006a)は、本研究と同様の護岸形態における越波量評価に対する MPS 法の有効性を示したが、本研究では護岸前面の流速場の再現性とそれに基づくブロックの移動限界予測に対する有効性を検討する。

2. 水理実験の概要

(1) 実験装置と入射条件

使用した実験装置は、後藤らと同様の模型縮尺 1/60 の

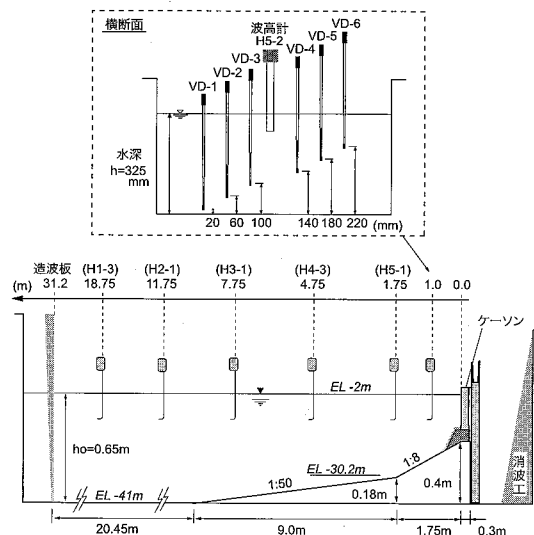


図-1 実験装置

- | | | | |
|---------|-----|---------------------|---------------|
| 1 正 会 員 | 工 博 | 京都大学准教授 | 工学研究科都市環境工学専攻 |
| 2 正 会 員 | 工 博 | (株)ニュージェック | |
| 3 正 会 員 | | 関西電力(株)電力技術研究所 | |
| 4 学生会員 | | 京都大学大学院修士課程都市環境工学専攻 | |

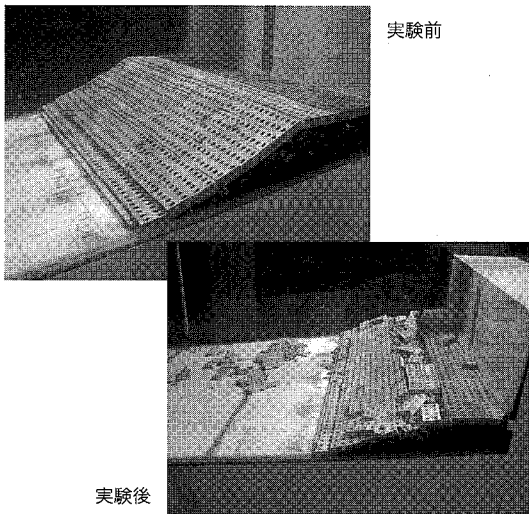


図-2 実験前後の被覆ブロック

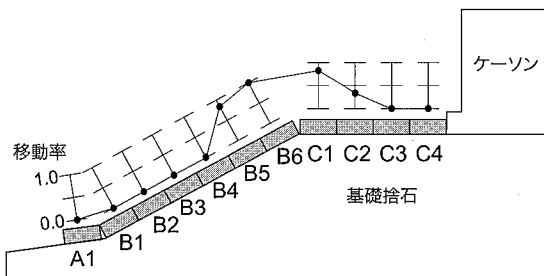


図-3 被覆ブロックの移動率

二次元造波水路である。図-1に実験装置の全体図および流速計設置地点の横断面図を示す。流速計(電磁流速計)は、波高計(容量式波高計)H5-2の設置地点と同様の、ケーソン前面から1.0m沖側の地点に、底面から20.0mm (VD-1), 60.0mm (VD-2), 100.0mm (VD-3), 140.0mm (VD-4), 180.0mm (VD-5), 220.0mm (VD-6)の高さの6箇所に設置した。入射条件は、沖波波高(波高計H1-3で測定された波高) $H=15.0$ cm, 周期 $T=1.9$ sの規則波である。

(2) 被覆ブロックの移動

水理実験前後の被覆ブロックの写真を図-2に示す。各被覆ブロックの名称と移動率を図-3に示す。移動率 D は以下のように定義した。

$$D = \frac{n}{N} \quad (1)$$

ここに、 N : 各列の被覆ブロックの総数(個), n : 各列で移動した被覆ブロック総数(個)である。図-2および図-3からわかるように、マウンドの法肩部(B5, B6)およびマウンド天端部の沖側端部(C1)のブロック

の移動率は高く、1.0に近い。また、天端部の沖側端部から2つめのブロック(C2)も一部ではあるが、移動していることが確認できる。

3. 数値解析の概要

本研究では、MPS-Boussinesq カップリングモデル(後藤ら, 2006b)を用いた。

Boussinesq 方程式の基礎式は、分散特性を補正した修正 Boussinesq 方程式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ - v_t \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) + \varepsilon P + \frac{f}{2D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned}$$

$$= \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) \quad (3)$$

$$+ Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right)$$

$$+ h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} \right)$$

$$+ Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\}$$

である(y 方向の運動方程式は省略)。ここに、 x, y : 平面座標, t : 時間, h : 水位, P, Q : x, y 方向の線流量, g : 重力加速度, D : 全水深($D=h+\eta$), f : 底面摩擦係数, v_t : 渦動粘性係数(碎波による乱れに起因する運動量混合を表現), ε : エネルギー吸収帯の吸収係数, B : 分散特性に関する補正係数($=1/15$)である(平山, 2002)。

一方、MPS法(Koshizukaら, 1995)の基礎式の離散化については、影響円内に存在する近傍粒子との粒子間相互作用モデル(越塚, 2005)を通じて行われ、粒子数密度を常に一定に保つことで非圧縮条件が満足される。運動方程式は、表面張力項を導入したNavier-Stokes式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} + \frac{\sigma \kappa \delta}{\rho} \mathbf{n} \quad (4)$$

である(ここに、 $\mathbf{u}$: 流速ベクトル, p : 圧力, ρ : 流体の密度, $\mathbf{g}$: 重力加速度ベクトル, ν : 動粘性係数, σ : 表面張力係数, κ : 表面曲率, δ : デルタ関数, $\mathbf{n}$: 法線方向の単位ベクトル)。表面張力項に関しては、表面張力モデル(Nomuraら, 2001)を適用して計算を行う。

本モデルでは、水面変動の穏やかな沖側の領域をBoussinesq方程式で解き、碎波・越波を伴う岸側をMPS法で解く。図-4に計算領域を示す。用いた数値造波水槽は実験と同様のスケールである。両者の接続点は、ケーソン前面から2.56m沖側に設けた。境界の接続方

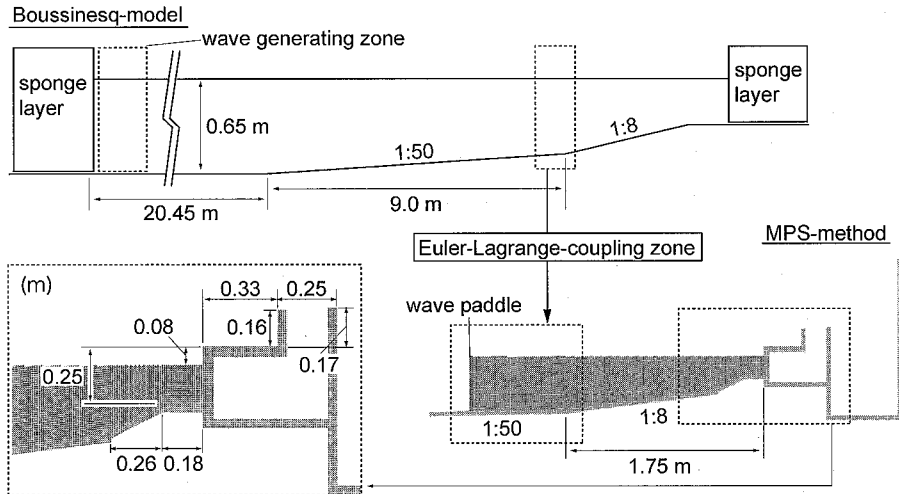


図-4 計算領域

法は、Boussinesq モデルの計算点における解（水深、流速）の内挿値

$$v_{wall} = \frac{x_{Bon} - x_{wall}}{x_{Bon} - x_{Boff}} v_{Boff} + \frac{x_{wall} - x_{Boff}}{x_{Bon} - x_{Boff}} v_{Bon} \quad (5)$$

$$h_{wall} = \frac{x_{Bon} - x_{wall}}{x_{Bon} - x_{Boff}} h_{Boff} + \frac{x_{wall} - x_{Boff}}{x_{Bon} - x_{Boff}} h_{Bon} - h_{of} \quad (6)$$

（ここに、 x_{wall} ：造波板の位置座標、 x_{Bon} 、 x_{Boff} ：造波板前後に存在する Boussinesq 計算点の位置座標、 v_{Bon} 、 v_{Boff} ：Boussinesq 計算点における速度、 h_{Bon} 、 h_{Boff} ：Boussinesq 計算点における水深、 h_{of} ：反射波による造波板前面での水位上昇を抑制するための天端調整）を MPS 法の造波板の移動速度および高さとして与え、造波板を強制移動させることで MPS 計算領域での造波を行う（後藤ら、2006b）。Boussinesq モデルの計算における格子幅は 0.1 m、MPS 計算に用いる粒子径は 0.01 m に設定した。

4. 被覆ブロックの移動限界予測

(1) 護岸前面流速場

本研究では、護岸前面マウンド部の被覆ブロックの安定性に関する検討を被覆ブロック周辺の流速場に基づいて行う。しかし、護岸前面は越波水塊の戻り流れによる落下流や碎波に伴う混入気泡の存在によって水理実験での流速の計測は困難である。また、後藤ら（2006a）は、越波量や水面形に対する本シミュレーション手法の再現性は確認したが、流速場については未確認であった。そこでまず、水理実験でも流速計測の可能な地点 H5-2 において計算値と実験値との比較を行い、本計算手法の流速場に対する再現性を確認する。

図-5 に、瞬間像を示す。来襲波はケーソン前面に衝突し、ケーソンに乗り上げる ($t/T=0.0$)。そして、排水路壁に衝突して小さく真上に飛沫を上げた後 ($t/T=0.263$)、戻り流れとなってケーソン前面へ流下し、落下流は被覆ブロックに衝突する ($t/T=0.631$)。

図-6 に、波高計 H5-1 および H5-2 での水位時系列を示す。波高計 H5-2 の地点で、波の峯における計算値が実験値と比較して若干高いが、概ね良好に対応している。

図-7 に、流速計 VD-1 ～ 6 における水平方向の流速時系列（岸向きを正）を示す。最も水底に近い VD-1 では計算値が実験値よりも若干高いが、その他は概ね良好に対応している。また、全 6 箇所でも実験値と計算値との間に位相のずれが見られるが、最大値と最小値については概ね良好に対応している。流速計 VD-1 の地点における両者の差は、流速計 VD-1 の設置位置が実験水路の側面と底面の二面に近接しており、その壁面の影響を受けたことが一因であると考えられる。数値シミュレーションは二次元計算であるため、側面の影響は現れない。

(2) 被覆ブロックの安定性に関する検討

前節より、本計算手法の流速場に関する再現性は確認された。本節では、計算から得られた流速場を用い、被覆ブロックの移動限界流速との比較を行うことでブロックの安定性を議論する。ブロックの移動限界流速の算出には、以下の CERC の式を用いる。

$$W = \frac{\pi \rho_r U^6}{48 g^3 y^6 \left(\frac{\rho_r}{\rho} - 1 \right)^3 (\cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (7)$$

ここに、 W ：マウンド被覆材の所要質量（ $=0.106 \text{ kg}$ ）、 ρ_r ：マウンド被覆材の密度（ $=2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）、 U ：ブロック上面における流速、 y ：イスパッシュ定数、 θ ：

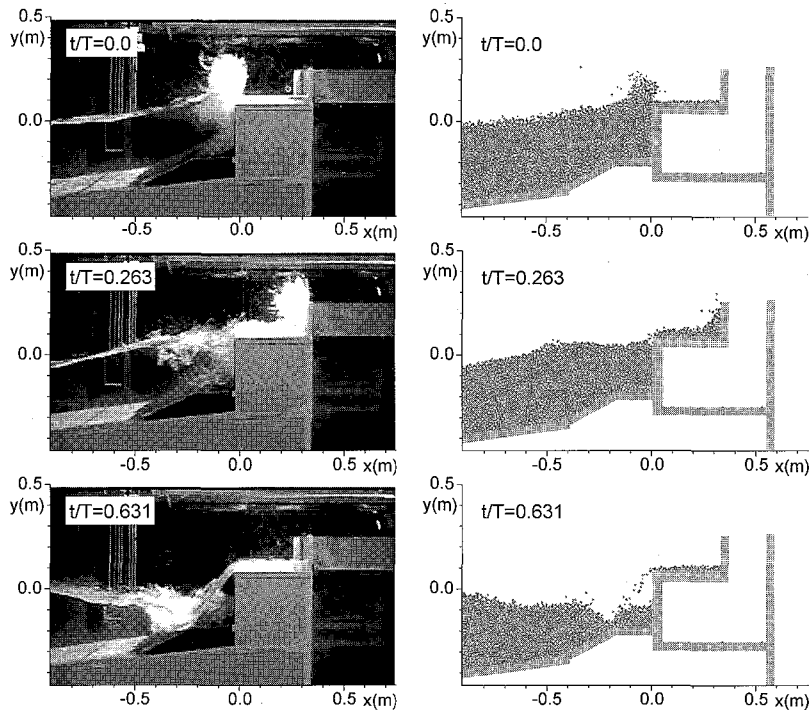


図-5 瞬間像 (左: 実験, 右: 計算)

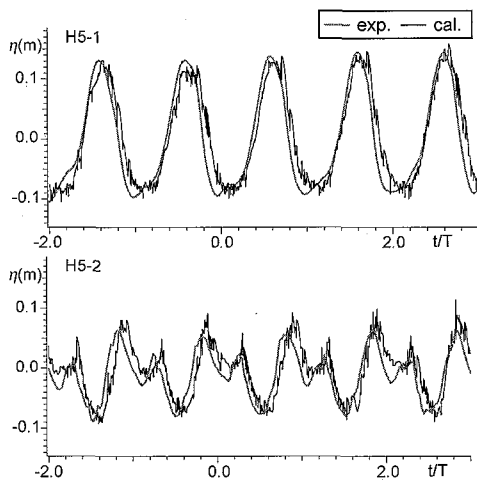


図-6 水位時系列

斜面勾配である。イスバッシュ定数は、埋め込んだ石の場合 $y=1.20$ 、露出した石の場合 $y=0.86$ が提案されている (日本港湾協会, 1999)。今回の実験では、隣接ブロックの押さえの影響が少ない法肩から移動しているため、露出した石とほぼ同条件であると判断し $y=0.86$ とした。式 (7) から逆算して各被覆ブロックの移動限界流速を求めると、マウンド天端部分 (C1 ~ C4) では 0.916 m/s 、 $1/2$ 勾配のマウンド斜面部分 (B1 ~ B6)

では 0.613 m/s 、 $1/8$ 勾配のマウンド法先部分 (A1) では 0.854 m/s となる。

図-8 に、計算における被覆ブロック直上の流速値と移動限界流速を比較して示す。A1, B1 ~ B6 は斜面上に位置するため、被覆ブロックの移動には冲向き方向の流速が影響すると考え、冲向き水平方向流速の最大値をとった。C1 ~ C4 は水平面上に位置するため、冲向き、岸向きに関わらず水平方向流速の最大値をとっている。また、計算値は全計算時間を通しての最大値と、周期ごとの最大値の平均値を併記した。図-2 に示す水理実験終了後の被覆ブロックの写真からわかるように、ブロックの移動は法肩周辺で集中的に生じているが、計算においても流速は法肩でピークを示し、被覆ブロック B6 および C1 近傍において、特に最大流速値は限界流速値を大きく上回り、水理実験で確認されたブロックの移動範囲と良好に対応している。

5. おわりに

本研究では、大型越波排水路付低天端ケーソン護岸におけるケーソン前面の被覆ブロックの安定性の問題について、ブロックの移動限界流速に基づいて議論を行った。ケーソン前面は越波水塊の戻り流れの影響が顕著な複雑な波・流れ場であるので、水理実験による流速の計測が不可能であった。そこで、代替手段として MPS-Boussinesq カップリ

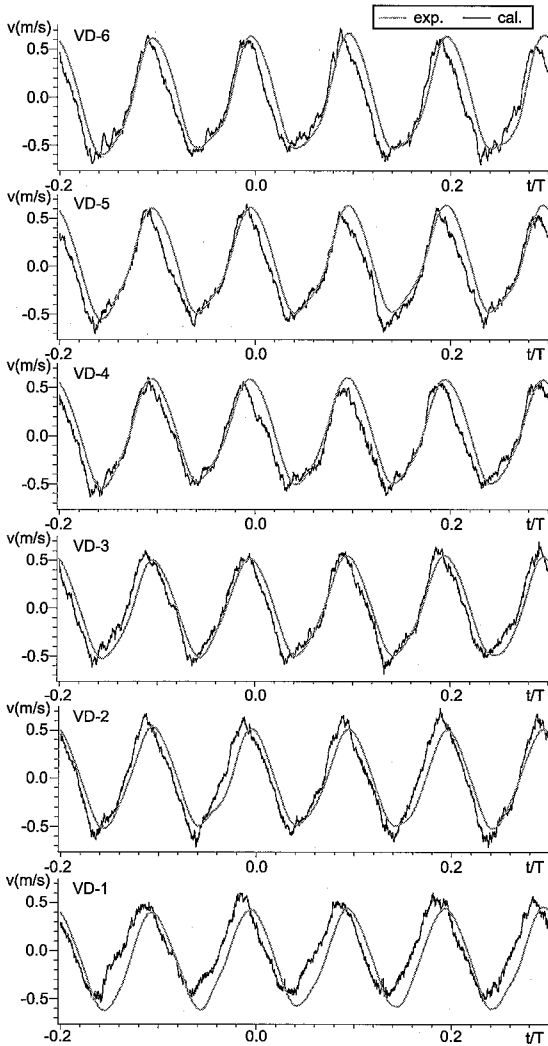


図-7 流速時系列

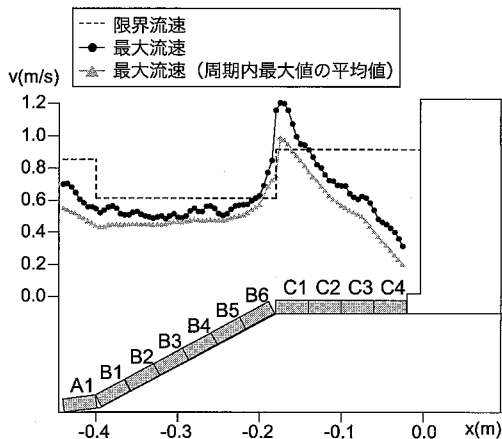


図-8 被覆ブロックの移動予測

ングモデルの適用性を検討するために、流速場に対する再現性の確認を実験で計測の可能な箇所において行い、その結果、計算によって得られた流速場は実験結果と良好に対応することが確認された。次いで、ブロックの移動限界流速の算出を CERC の式に基づいて行い、計算結果から得られたブロック上の流速値と移動限界流速値を比較してブロックの移動危険性を判定した。計算による流速値が移動限界流速値を超えた範囲は、水理実験において移動の確認されたブロックの範囲と良好に対応しており、本研究で用いた手法の有効性の一端が示された。

本計算手法の有効性を高めるために、今後の課題として以下の項目が挙げられる。一つは、イスバッシュ定数について、本稿では既往の研究で用いられた値をそのまま適用したが、本計算条件においてもそれが適切であるか検討が必要である。これについては、異なる水理条件で実験および計算を複数実施することで対応したい。もう一つは、底面付近の流速の差異についてであるが、この点も同様に、別途複数のケースを実施することで検討したい。

参考文献

- 磯部雅彦・高橋重雄・余 錫平・榊山 勉・藤間功司・蔣 勤・秋山 実・大山洋志(1999): 数値波動水路耐波設計への適用に関する研究 -VOF 法基本プログラムの作成-, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp. 321-326.
- 大熊義夫・興野俊也・柴崎尚史・安田勝則・中野 修(2003): 流速場における混成堤断面の被災状況の相違によるブロック安定性検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 751-755.
- 越塚誠一(2005): 粒子法, 丸善, 144p.
- 後藤仁志・五十里洋行・目見田哲・安岡恒人・望月貴文(2006a): 低天端護岸上部の大型排水路への越波過程に対する粒子法の適用性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 701-706.
- 後藤仁志・五十里洋行・酒井哲郎・奥田一弘(2006b): 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.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実(1982): 不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻 3 号, pp. 3-42.
- 日本港湾協会(編)(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 188p.
- 平山克也(2002): 非線形不規則波浪を用いた数値計算の港湾設計への活用に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No. 1036, 162p.
- 松本 朗・高橋重雄(2001): 流速場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 911-915.
- Koshizuka, S., H. Tamako and Y. Oka(1995): A particle method for incompressible viscous flow with fluid fragmentation, Comp. Fluid Dyn. J., Vol. 4, pp. 29-46.
- Nomura, K., S. Koshizuka, Y. Oka and H. Obata(2001): Numerical Analysis of Droplet Breakup Behavior using Particle Method, Jour. Nucl. Sci. and Tech., Vol. 38, No. 12, pp. 1057-1064.
- U.S. Army Coastal Engineering Research Center(1973): Shore Protection Manual, Vol. II, pp. 7-215.