

第II部門

DEM-MPS 法による砕波帯底質輸送の数値シミュレーション

京都大学工学部 学生員 ○居村 光孝
 京都大学工学研究科 正会員 原田 英治
 京都大学工学研究科 正会員 五十里 洋行
 京都大学工学研究科 正会員 後藤 仁志

1. はじめに

砕波による大規模な乱流渦構造により、大量の底質土砂が輸送される。これまで実験や数値シミュレーションにより、漂砂機構の理解に向けた研究が数多く実施されてきたが、いまだ十分な理解には至っていない。本研究においては、複雑な水面変動を伴う流れ場の数値解析に用いられる粒子法のうちの MPS 法(Moving Particles Semi-implicit method)と、移動床解析手法として DEM(Distinct Element method)をカップリングした固液混相流モデルを採用することにより、砕波帯漂砂解析を行う。

2. 数値解析手法

本研究においては先述のMPS法に、高精度モデルを導入したMPS-HS-HL-ECS-GC-DS法³⁾⁴⁾を採用する。DEMカップリングモデルについては液相である流体粒子に対する掃流粒子群 (DEM粒子) の体積占有率に配慮して固液間相互作用力を考慮するモデル (後藤ら²⁾) を採用した。さらに、乱流モデルとして標準 $k-\varepsilon$ モデルを採用する。微細土砂の移流拡散については、以下の濃度の移流拡散方程式

$$\frac{DC}{Dt} = -\mathbf{u}_s \cdot \nabla C + \nabla(D_{diff} \nabla C) \quad (1)$$

を解いて評価する。拡散係数 D_{diff} は、標準 $k-\varepsilon$ モデルから計算される ν_t をシュミット数で除して与えた。

3. 数値解析結果

3-1 移動床による数値解析

図-1 に計算領域を示す。一様水深部水深 $h=2.5\text{cm}$ 、一様水深部波高 $H=1\text{cm}$ 、周期 $T=2\text{s}$ の波を計算領域左側より与え、初期濃度は移動床全体に $C=0.62$ を与え、底質粒径は細砂を対象に $D=0.15\text{mm}$ とした。粒径 1mm の水粒子 17,243 個、同粒径の DEM 粒子 4,952 個を用いて数値解析を行った。

図-2 に 5 周期目における砕波帯での乱れエネルギー・濃度・掃流粒子 (DEM 粒子) 水平速度分布を連続的に示す。図中(a) : 時刻 $t=8.58\text{s}$ では遡上波と戻り流れの衝突によって生じる back wash vortex の発達によって巻き上げられた浮遊粒子が、冲向き方向に運動する掃流粒子が斜面上に確認できる。

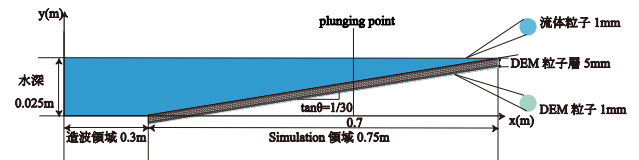


図-1 移動床の計算領域

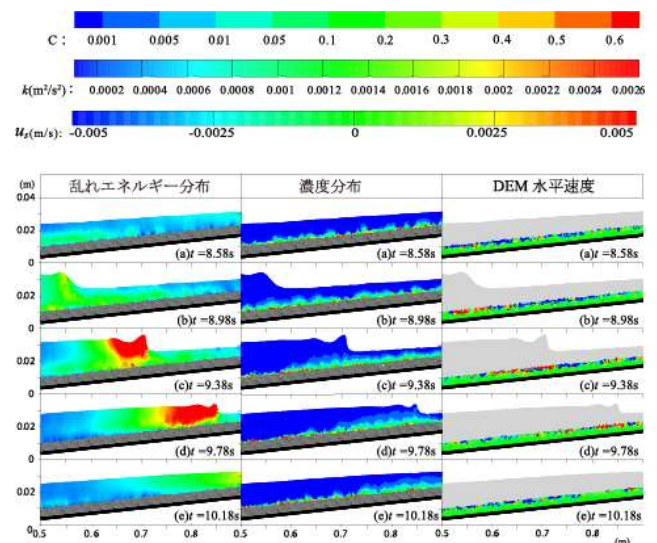


図-2 砕波帯乱れエネルギー・濃度・掃流粒子速度分布 (5 波目)

図中(b) : 時刻 $t=8.98\text{s}$ では入射波の浅水変形と戻り流れの衝突によって成長したクレストが存在する。このクレストは、(c) : 時刻 $t=9.38\text{s}$ 以降、砕波によって bore 状に変形するが bore クレスト近傍には水深スケールの大規模組織渦が発生しており、図中 $x=0.75\text{m} \sim 0.85\text{m}$ の範囲に表示された強い乱れエネルギーと対応している。この大規模渦により大量の底質が巻き上げられ、浮遊濃度は水深方向に拡大する。クレスト直下の掃流粒子群移動速度分布からは層状に高速で移動する様子が確認でき、シートフロー状の粒子移動形態であることが伺える。

図-3 に砕波帯付近 ($x=0.7\text{m}$) での水位、底質乱れエネルギー・水平漂砂量 (浮遊・掃流) の時系列分布を示す。グラフ中の(a)~(e)は図-5 のそれらに対応する。クレスト通過時刻(c) : $t=9.38\text{s}$ はスパイク上の強い乱れエネルギーが得られる。クレスト通過後の時刻でも時刻(c) : $t=9.38\text{s}$ での乱れエネルギーの値から減少するが、他の位相と比較して高レベルの乱れエネルギー

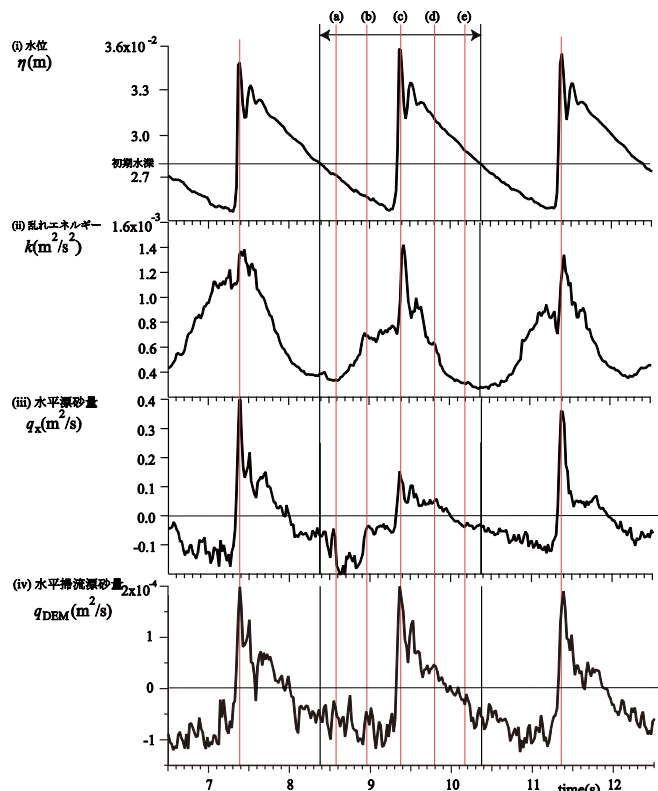


図-3 水位・乱れエネルギー・漂砂量の時系列

表-1 佐藤¹⁾による実験との条件比較

	周期 T (s)	一様水深 h_1 (cm)	一様水深部波高 h (cm)	波長 L (m)	F_r (造波領域)	粒径 D (mm)	ξ
佐藤 ¹⁾	3.45	38.5	6.8	6.56	0.09	0.18	0.49
Simulation	1.5	5.0	1.0	1.03	0.10	0.18	0.50

が得られている。本モデルを3次元に適用すれば、クレスト背部にスポット的に形成される斜降渦に関連した議論への展開が期待される。漂砂量に関して、クレスト通過時刻(c): $t=9.38s$ 以前は沖合方向の漂砂量が得られ、クレスト通過時刻にさしかかると岸方向に漂砂量が急変することが確認できる。

3-2 実験結果との比較

図-4に計算領域を示す。一様水深部水深 $h=5cm$ 、一様水深部波高 $H=1cm$ 、周期 $T=1.5s$ の波を計算領域左側より与え、初期濃度は移動床全体に $C=0.62$ を与え、底質粒径は $D=0.18mm$ とした。粒径 $1mm$ の水粒子 32,856 個、同粒径の DEM 粒子 374 個を用いて数値解析を行った。佐藤¹⁾による実験と砕波帯での濃度分布を比較する。計算コストの関係から、幾何スケール(砕波帯相似パラメータ ξ 、造波領域での Froude 数)を合わせて計算を行った。表-1に計算条件を示す。

図-5に砕波領域において、15波分の周期平均をとった濃度の等高線分布を示す。なお、数値解析結果を実験結果のスケールに合わせる形で表示している。図-5より、佐藤¹⁾による実験は水表面付近までの底質拡散が見られるものの、本数値計算は見られなかった。さらに、数値解析結果の濃度の等高線は、佐藤¹⁾の実験結果のような、斜面平行方向の勾配があまり確認されず、岸沖方向の強い勾配が確認される。

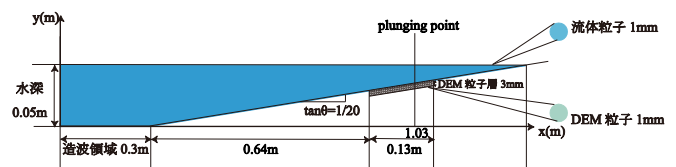


図-4 実験比較のための計算領域

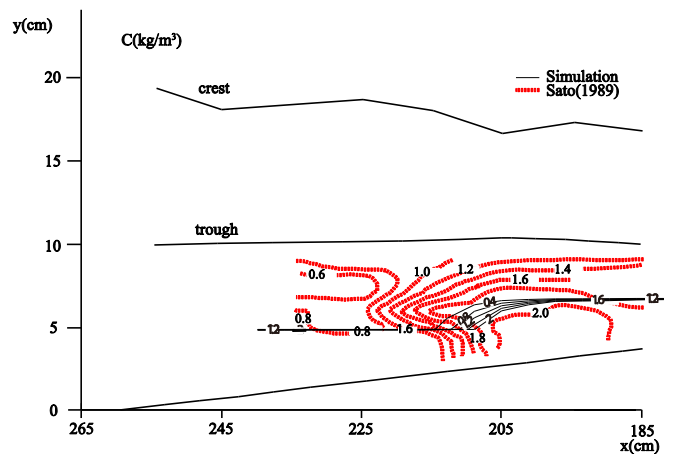


図-5 砕波帯での濃度分布 (15 波分)

この原因として、実験と本数値計算での Shields 数が一致していないことが考えられる。本数値計算では佐藤¹⁾の実験と、幾何スケールを合わせる形で実施したが、粒径は佐藤¹⁾の実験と同一のものをを用いているため、実験結果ほど底質が拡散しなかったことが推測される。

4. おわりに

本研究では、砕波帯での底質輸送機構を検討するため、DEM-MPS 法による数値計算を実施した。砕波に伴う大規模な渦による底質の巻き上げ挙動を再現することができた。ただし、2次元計算であるため砕波帯漂砂機構で重要となる斜降渦などの議論はできていない。今後、3次元計算を検討するとともに、SPS 乱流モデルの導入を視野に計算粒子スケール以下の乱れの効果を考慮した数値モデルへと展開したい。

参考文献

- 1) 佐藤慎司, 本間基一, 柴山知也: 砕波による低質巻き上げ量の評価に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 279-283, 1989
- 2) 後藤仁志, 鶴田修己, 原田英治, 五十里洋行, 久保田博貴: 固液混相流解析のための DEM-MPS 連成手法の提案, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.21-25, 2012
- 3) A. Khayyer, H. Gotoh: Enhancement of stability and accuracy of the moving particle semi-implicit method, *Journal of Computational Physics.*, Vol.230, pp.3093-3118, 2011
- 4) N. Tsuruta, A. Khayyer, H. Gotoh: A short note on Dynamic Stabilization of Moving Particles Semi-implicit method, *Computers & Fluids*, Vol.82, pp.158-164, 2013