

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04366

研究課題名(和文) Lagrangeモデルによる砕波帯移動床の輸送機構の計算力学的検討

研究課題名(英文) Computational investigation for sediment transport mechanism with wave breaking using Lagrangian model

研究代表者

原田 英治 (Eiji, Harada)

京都大学・地球環境学堂・准教授

研究者番号：00362450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高精度粒子法を用いた流体解析と個別要素法を用いた移動床解析による三次元のDEM-MPSを開発した。また、二次元造波水路および振動台を用いて、自由水面の変動を伴う複数の移動床実験との比較から、開発したDEM-MPSの再現性を確認した。砕波を含む激流条件における底質輸送機構を移動床構成材料スケールから検討した結果、底質輸送に対して、慣性力は抗力と同程度に寄与することが示され、自由水面追跡精度が底質輸送の予測に対して重要であることが示された。また、強い間隙流速を示す領域では、底質輸送も活発であることが確認され、移動床表面近傍での組織的な渦構造が移動床表面の間隙流速に関与することが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

砕波を含む激流条件下での底質輸送過程の検討は、それが非線形性の強い固液混相乱流現象であることから、観測や実験計測および数値シミュレーションの実施が困難である。本研究では、激しい自由水面変動を伴う条件におけるripple形成機構の一端を、水理実験およびDEM-MPSを用いた数値シミュレーションから検討した。砕波帯から波打ち帯で観察される土砂輸送機構を詳細に明らかにすることは、海浜変形計算の境界条件となる汀線付近の粗度予測に寄与する。したがって、海浜変形過程の予測精度の向上に役立つと期待される。

研究成果の概要(英文)：A 3D DEM-MPS was developed based on fluid CFD analysis using the enhanced particle method and movable bed simulation using the discrete element method. The reproducibility of the developed DEM-MPS was confirmed by comparison with several moving bed experiments with free water surface fluctuation using a 2D wave-making channel and an oscillatory table. The numerical simulation results show that the inertia force contributes to the sediment transport as much as the drag force, and the accuracy of free water surface tracking is important for the prediction of sediment transport. In addition, it was confirmed that sediment transport was also active in the region of strong pore velocity, suggesting that the organized eddy structure near the surface of the movable bed is related to the pore velocity in the surface layer of the mobile bed.

研究分野：流砂水理学

キーワード：数値移動床 砕波

## 1. 研究開始当初の背景

砕破帯から波打ち帯の漂砂機構およびそれに伴う地形変化予測は、土砂管理の観点から工学的需要が高い。これまでに水理実験や現地観測を対象とした多くの研究が国内外で実施され、一定の理解が示されてきた。砕破帯から波打ち帯では、波の浅水変形や寄せ波と引き波の干渉によって砕波が確認される。砕波後のジェット突入は、底質へ衝撃力を与え、大量の底質輸送とともに、移動床表層に浸透流をもたらす。また、遡上波の打ち上げ過程では、ドライベッド上での底面シアアの急変をもたらすため、砕破帯から波打ち帯では複雑な流れ場の下で海岸地形が形成される。底質輸送の結果、砕破帯から波打ち帯にかけて、特徴的な海岸地形である砂漣が発達する。砂漣の波長は境界層での水粒子軌道に関係し、波高は底面粗度として底面摩擦係数に関係する。砂漣のクレストの発達過程は、境界層の乱流構造や浸透・滲出流にも関連している。このように一定の理解は得られているが、激流下の実験計測の困難さから土砂輸送機構に関する力学的な考察は十分ではなく、また、数値シミュレーションによるアプローチも、砕波を含む土砂輸送が非線形性の強い固液混相乱流現象であるため容易ではない。激流条件のシミュレーションでは、自由水面をシャープに捕捉可能な流体の数値シミュレーション手法(CFD)の選択と、高濃度土砂輸送形態が移動床表層付近に観察されるため、固相と液相間の相互作用だけでなく固相間(粒子間)の衝突による相互作用の記述が重要である。自由水面の追跡に対して、既往の流体の数値シミュレーションでは Euler 型の CFD である VOF 法を用いた自由水面境界の追跡が実施されているが、移流項の離散化に伴う数値拡散のため自由水面を精度よく捉えることが難しい。一方、Lagrange 型の CFD である粒子法は、Euler 型の CFD に見られる数値拡散はなく自由水面をシャープに捉えることが可能である。また、従来指摘されていた、粒子法特有の非物理的な圧力擾乱は、近年の粒子法の高精度化によって大きく改善され、激流下の混相流現象の理解に対して粒子法の貢献が期待されている。

## 2. 研究の目的

これまで、実験によって振動流と発達した砂漣の幾何学形状に関する次元解析的検討は多く実施されているが、砕波による自由表面からの運動量供給や浸透流効果など移動床内部構造を含めて力学的な観点から砂漣の形成機構についてアプローチした研究は見当たらない。また、多くの実験は、閉管路を用いた振動流条件下で実施されており、自由水面を有した進行波の条件で実施された例は少ない。さらに、進行波の実験であっても水平移動床で生じる砂漣の検討が多く、波の非対称性が顕在化する砕破帯での斜面上での砂漣を含めて移動床発達過程を検討した例はほとんど見当たらない。以上の状況を踏まえ、本研究では、砕破帯から波打ち帯での土砂輸送機構を計算力学的に明らかにすることを目的とし、Lagrange 型の固液混相流モデル(DEM-MPS)を用いた移動床シミュレーションによって、砕破帯から波打ち帯での移動床過程を模擬する。数値シミュレーション結果から、砕波による移動床表層での組織的な渦構造と移動床内部の間隙水圧の空間分布や流速波形を検討し、移動床機構を数値漂砂力学的観点から明らかにすることが目的である。

## 3. 研究の方法

砕破帯から波打ち帯での移動床機構を検討するため、DEM-MPS 計算による Lagrange 型の固液混相流モデルを用いた数値シミュレーションを実施した。また、DEM-MPS 計算の再現性を確認するため、二次元造波水路および振動台を用いた移動床を対象とした水理実験を実施しつつ、移動床機構を計算力学的に検討した。

(1) DEM-MPS 計算による固液混相流モデルの開発：砕破帯から波打ち帯における激流条件での底質輸送機構を計算力学観点から検討するため、Lagrange 型の流体解析手法として粒子法の一つである高精度化された MPS 法を採用し、高精度に自由水面を追跡した。また、移動床境界の追跡には、粒子間相互作用力の評価が可能な個別要素法(DEM)を基礎とした数値モデルを採用し、混相流モデルを開発した。激流下における土砂輸送機構と土砂輸送による移動床表層の発達過程を DEM-MPS 計算を用いて評価し、底面境界層のシアアだけでなく砕波による運動量輸送および間隙流速の効果を含めて、底質輸送について考察できる枠組みを整備した。

(2) 二次元造波水路を用いた水理実験：二次元造波水路を用いた砕破帯から波打ち帯の漂砂過程を対象に水理実験を実施した。水理実験と数値シミュレーション条件を対応させるため、小規模二次元造波水路を用いた水理実験を実施し、同スケールのシミュレーション結果と比較した。具体的には、砕破帯での底質移動速度を比較したが、水理実験結果はハイスピードデジタルビデオカメラを用いた撮影画像の PIV 解析から抽出し、DEM-MPS 計算の結果と定量比較した。また、砕破帯では組織的な大規模渦構造が観察されるが、本研究ではビデオカメラで撮影された砕破帯ジェットによる気泡連行の様子と底質の巻き上がりから斜降渦が底質輸送に及ぼす影響を考察し、DEM-MPS 計算の結果と合わせて、組織的な渦構造と移動床の発達過程との関連性を多角

的に検討した。

(3) 振動台を用いた水理実験：小規模砕波を伴う水面下の移動床表層に形成される ripple の基本的な形成機構を検討するため、振動台上に固定設置した水槽内の移動床表層に生じる強制振動下条件での ripple を対象に水理実験を実施した。振動台実験は三種類：(A) 粒径 1mm、比重 2.65 の均一の移動床構成材料；(B) 粒径 1mm、2mm、比重 2.65 の混合粒径材料；(C) 粒径 0.5cm、1.0cm、1.5cm、比重 1.318 の混合粒径材料を実施した。なお、各実験に対応した DEM-MPS 計算の MPS 粒子スケールは、それぞれ(A) 0.5mm、(B) 1mm、(C) 0.5cm とした。なお、ripple 形成機構の検討には、DEM 粒子スケール以下の渦構造が重要であると考えられるため(A)の DEM-MPS 計算では DEM 粒子径の半分の値を MPS 粒子径に設定した。また、(A)の水理実験では、移動床内部の間隙流挙動を確認するため、移動床の堆積層内部に注入した染料挙動を記録し、ripple 表層凹凸と間隙流の関連を検討した。(B)および(C)では混合粒径粒子を KC 数の異なる条件での分級現象を対象とした。

#### 4. 研究成果

(1) 高精度粒子法を用いた流体解析と個別要素法を用いた移動床解析のカップリングによる三次元の DEM-MPS を開発した。複数の水理実験との比較から、開発した DEM-MPS の再現性が確認された。砕波を含む激流条件下における底質輸送機構について、移動床構成材料スケールからの検討が可能な枠組みを構築した。

(2) 二次元造波水路を用いた砕波帯を対象とした水理実験から観察された斜降渦が、DEM-MPS 計算からも確認された。斜降渦によって移動床表層に圧力勾配力の急変が確認され、また同時に配位数の減少による移動床粒子の運動が示され、数値漂砂力学的観点から砕波帯の底質輸送機構が検討された。

(3) 粒径 1mm、比重 2.65 の均一の移動床構成材料を対象とした振動台実験および数値シミュレーション結果は、ripple 形成に密接に関係する移動床表層の交換層から堆積層内部に向かう領域での有意な間隙流速の分布の存在を示した。また、ripple 表層粒子を対象に ripple 形成に関与した DEM 粒子の初期存在域を示し、それら DEM 粒子に作用する流体力の数値情報から、抗力と圧力勾配力は同程度に ripple の形成に貢献することを示した。

(4) 粒径 1mm、比重 2.65 の均一の移動床構成材料を対象とした振動台実験および数値シミュレーション結果から、移動床表層の間隙流速と DEM 粒子の運動エネルギーには強い相関があることが示された。また、移動床表層の間隙流速と浸透・滲出を示す領域付近の乱流応力の四象限区分との比較から、移動床表層近傍での組織的な渦構造が移動床表層の間隙流速に関係することが示唆され、組織的渦構造の ripple 形成への関与の可能性が DEM-MPS 計算結果から考察された。

(5) 粒径 1mm、2mm、比重 2.65 の混合粒径材料を対象とした振動台実験および数値シミュレーション結果から、小粒子移動後に粗大粒子が移動し、粗大粒子の移動によって現れる隙間に小粒子が埋まり、分級が進行することが確認された。また、分級によって移動床表層に形成される ripple の峰付近の領域が粗大粒子で主に形成されることを示した。さらに、分級後の移動床表層付近の平均流速および粒子移動速度は分級前と比較して強まること、また、Reynolds 応力および乱れエネルギー生成率の大きさが強化され、運動量交換が顕在化することを DEM-MPS 計算結果から示した。

(6) 粒径 0.5cm、1.0cm、1.5cm、比重 1.318 の混合粒径材料を対象とした振動台実験および数値シミュレーションでは、実験の初期粒子配置と数値シミュレーションのそれをできるだけ合わせて検討したが、分級過程には粒子配置の観点から良好な一致が確認され、激流条件下の底質輸送の問題に対して、開発した DEM-MPS の高い再現性が確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Eiji Harada, Hiroyuki Ikari, Yuma Shimizu, Hitoshi Gotoh	4. 巻 APAC 2019
2. 論文標題 Numerical simulation for sediment transport in sheetflow regime using DEM-MPS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Conference on Asian and Pacific Coasts	6. 最初と最後の頁 463-470
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-0291-0_64	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Eiji Harada, Hitoshi Gotoh, Hiroyuki Ikari, Abbas Khayyer	4. 巻 129
2. 論文標題 Numerical simulation for sediment transport using MPS-DEM coupling model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ADVANCES IN WATER RESOURCES	6. 最初と最後の頁 354-364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.advwatres.2017.08.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Eiji Harada, Hiroyuki Ikari, Abbas Khayyer, Hitoshi Gotoh	4. 巻 61(1)
2. 論文標題 Numerical simulation for swash morphodynamics by DEM-MPS coupling model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 2-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2018.1554203	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 原田英治, 田崎拓海, 後藤仁志, 河野眞	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 3次元DEM-MPS法による初期ripple形成過程の計算力学的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_475-I_480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_475	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Eiji Harada, Takumi Tazaki, Hitoshi Gotoh	4. 巻 32
2. 論文標題 Numerical investigation of ripple in oscillating water tank by DEM-MPS coupled solid-liquid two-phase flow model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Hydro-environment Research	6. 最初と最後の頁 26-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jher.2020.07.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takumi Tazaki, Eiji Harada, Hitoshi Gotoh	4. 巻 165
2. 論文標題 Vertical sorting process in oscillating water tank using DEM-MPS coupling model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Coastal Engineering	6. 最初と最後の頁 103765
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.coastaleng.2020.103765	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 田崎拓海
2. 発表標題 振動水槽を用いたリップル形成過程の数値シミュレーション
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原田英治
2. 発表標題 振動水槽内 ripple 形成過程の計算力学的検討
3. 学会等名 第66回海岸工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野真
2. 発表標題 高精度粒子法による振動流下リップル初期形成過程の検討
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤澤大雅
2. 発表標題 リップル形成に対する間隙流の影響
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田真明
2. 発表標題 振動流下混合粒子群の分級を伴うリップル形成機構の検討
3. 学会等名 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田英治
2. 発表標題 移動床表層の間隙流がripple形成に及ぼす影響
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田真明
2. 発表標題 振動流下における二粒径混合粒子のripple形成機構の検討
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田崎拓海
2. 発表標題 3次元DEM-MPS法による砕波帯底質輸送機構の計算力学的検討
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関