

|      |         |    |       |
|------|---------|----|-------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 田崎 拓海 |
|------|---------|----|-------|

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| 論文題目 | 粒子法に基づく固液混相乱流モデルによる砕波帯内の漂砂動力学に関する研究 |
|------|-------------------------------------|

(論文内容の要旨)

海岸・河川構造物の建設がもたらす漂砂量収支の不均衡は海岸侵食の主要因である。構造物建設の海浜変形への影響評価のために用いられる海浜変形予測モデルの精度の向上には、広範囲の条件に適用可能で、高精度な漂砂量式が必要不可欠である。これまでに多くの漂砂量式が水理実験に基づき半経験的に提案されてきたが、漂砂機構に基づいた漂砂量式を得るには、砂粒子スケールすなわち底面凹凸程度の空間スケールと波の周期よりも短い時間スケールから移動床過程を解像する必要がある。

近年の計算機性能や数値計算技術の向上は、限定された計算領域ではあるものの砂粒子スケールからの砕波帯漂砂機構の検討を可能にしている。砕波点以浅の領域では、非線形性の強い波浪場が形成される。水面捕捉のために移流方程式を解く手法では非線形項の離散化に伴う数値拡散の影響を避けることができないが、粒子法の一つである MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法は、移流項の離散化を回避でき、水面の大変形問題への高い適用性を有する。また、個別要素法 (DEM) は底質材料に作用する流体力や底質間相互作用力の評価を通じて個々の底質の追跡が可能であり、素過程から移動床現象をとらえることができる。

このような背景から、本論文では激しい水面変形を伴う浅海域の漂砂過程を底質粒子スケールでとらえるため、Lagrange 型の数値解析手法である MPS 法と個別要素法の連成手法である DEM-MPS 法を用いて、砕波帯内の漂砂機構について計算力学的観点から検討している。水理実験の実施、また既往実験との比較を通じて数値解析結果の検証を慎重に行いつつ、平均流と乱れと漂砂の三者相互作用に注目した砕波帯内の漂砂機構を議論しており、以下に示す 7 章から構成されている。

第 1 章では、本論文の研究背景、対象、位置づけおよび本論文の構成を述べている。

第 2 章では、砕波帯漂砂機構の理解に貢献してきた現地観測や室内実験に関する既往研究をレビューしている。これまで蓄積されてきた砕波帯内の水理特性や漂砂に関する知見について、特に波周期程度の時間スケール規模の現象に注目して整理している。また、砕波帯と波打ち帯がそれぞれ独自の水理特性を持つことから、漂砂機構の検討もこれらの 2 領域に分けて行う必要性を述べている。その上で、砕波帯内特有の流体運動が漂砂量や海浜変形に強く影響することを述べ、素過程から漂砂機構を理解することの重要性を示している。

第 3 章は、本論文の第 4 章から第 7 章で用いる DEM-MPS 法についての記述であり、流体解析に用いた MPS 法と移動床解析に用いた個別要素法、両者の連成に関する定式化について詳述している。さらに、定常流下の流砂過程および振動流下の漂砂過程の数値解析における流砂・漂砂量を既存の流砂・漂砂量式と比較し、モデルの漂砂過程解析への適用性について予め論じている。なお、粗視化された支配方程式の導出過程は、付録に詳細に記されている。

第 4 章では、不飽和領域を含む波打ち帯を対象に、規則波下の漂砂過程の解析を行っている。不飽和領域への流体の流出入時の体積保存性を向上させるためサブモデルを組み込んだ体積保存型の DEM-MPS 法を用いた 2 次元解析を実施している。これまで

|  |         |    |       |
|--|---------|----|-------|
| 京都大学   | 博士 (工学) | 氏名 | 田崎 拓海 |
| <p>十分な検討が行われてこなかった移動床内部の骨格構造と遡上波下の乱れに注目して漂砂機構を検討し、引き波時に生じる底質粒子間の締固めが底質の冲向き輸送の低減に、遡上波中の乱れが岸向きの掃流力の増加にそれぞれ寄与することを示している。</p> <p>第 5 章では、第 4 章で使用した体積保存型の DEM-MPS 法を 3 次元解析へと拡張し、孤立遡上波下の漂砂過程の解析を、既往の水理実験と対応した条件で実施している。実験計測値との比較から解析結果の妥当性を波浪場・漂砂量の双方について示した後、漂砂機構を静水位付近と遡上域に分けて検討している。水深の低下に伴い移動床へ接近する水平渦や底質を押さえる向きに作用する圧力勾配力の底質輸送を妨げる働きを示すとともに、奥行き幅以下の乱れの底質輸送への影響についても検討している。</p> <p>第 6 章では、砕波下の漂砂過程を対象に小型造波水路を用いた水理実験および DEM-MPS 法による大規模砕波を伴う 3 次元移動床解析を実施している。PIV 計測した流速場データとの比較から砕波過程の解析結果を検証した後、数値解析から可視化された砕波下に発生した斜降渦の周囲において、低周波数帯と高周波数帯間でエネルギーの双方向の交換が生じていることを示している。また、固液相間の相互作用力の分布から底面せん断力を推定し、低圧の渦がもたらす圧力勾配力が底質の冲向きの輸送に寄与することを示している。</p> <p>第 7 章では、第 6 章で扱った条件よりも強い砕波下の底質巻き上げ過程を対象とした漂砂機構について述べている。PIV 解析を底質輸送速度の計測に援用し、造波水槽を用いた実験計測値との比較から、DEM-MPS 法による解析結果の底質移動速度の再現性を示している。また、圧力の極小値を伴う渦が移動床に衝突することにより底質に作用する圧力勾配力が、水平・鉛直の双方向から底質の巻き上げに寄与することを、第 6 章で扱った漂砂過程における斜降渦の役割と比較しつつ確認している。</p> <p>第 8 章では、固相粒子よりも小さいスケールの流体運動と固相粒子の運動が相互に及ぼす影響を、ビーズ群水中沈降過程で発現する混相乱流を対象に検討している。屈折率整合技術を導入した PIV 計測により、水中を非定常に沈降するビーズ群の周囲や内部の流速場データを取得し、ビーズ群によって誘起される鉛直方向の流体伸張が乱れの生成に支配的であることを示している。また、LES 型の乱流モデルの a priori testing からスケール相似則モデルを基にする非線形モデルが SGS 応力を良好に再現することを示した後、PIV 計測で同化した乱流モデルを高解像度型の DEM-MPS 法に適用したビーズ群沈降過程の数値解析を実施し、乱流応力のビーズ群沈降過程への影響を示すとともに、粒子流解析において妥当な乱流モデルの導入の重要性を明示している。</p> <p>第 9 章は結論であり、本論文の中で得られた成果について要約している。</p> |         |    |       |

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、Lagrange 型固液混相乱流モデルを用い、砕波帯内の漂砂機構を底質粒子スケールから計算力学的に検討し、その成果をまとめたものである。非線形性の強い砕波帯内の解析では、激しく変形する水面を精度よく追跡することが不可欠であるが、流体解析に高精度粒子法を採用し、底質輸送追跡に個別要素法を用いた数値計算結果には、底質輸送と流体運動の双方に計測結果との良好な対応が確認できる。また、砕波帯・波打ち帯のそれぞれ領域において、渦や乱れと関連付けた漂砂機構の考察を展開している。さらに、固相粒子径以下のスケールでの固体粒子と流れ場の相互作用に注目し、多数粒子の非定常沈降過程を対象とした PIV 計測を通じて LES 型の乱流モデルの検証を実施している。得られた主な成果は次の通りである。

1. 波打ち帯の漂砂過程を対象に、2次元・3次元の数値解析を実施し、既往実験結果との比較から解析結果の信頼性を示した上で、移動床内部の骨格構造の変化や水面で形成される渦が底質輸送に与える影響を示し、遡上域における乱流が漂砂量の見積もりに必要な掃流力の評価に強く影響することを示している。
2. 砕波による底質巻き上げ機構について、3次元シミュレーション及び水理実験による PIV 計測の双方の結果から斜降渦の形成過程や乱れの空間構造を示している。また、圧力の極小値がもたらす圧力勾配が底質の冲向きの輸送に寄与することを底面せん断力や底質への作用力の観点から計算力学的に示している。
3. 水中投入粒子群の非定常沈降過程によって生じる混相乱流の空間構造を、屈折率整合技術を用いた PIV 計測から示している。さらに計測データを活用した既往の LES 型乱流モデルの a priori testing を実施し、検証した乱流モデルを高解像度型の DEM-MPS 法に組み込むことにより、粒子群沈降過程における乱流応力の効果を明らかにしている。

本論文は、底質粒子スケールからの検討が不十分であった砕波帯内の漂砂機構について、Lagrange 型モデルによる 3次元固液混相流解析を中心に検討したものであり、得られた成果は今後の漂砂力学の進展に対して学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 1 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。