

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2017～2020  
課題番号：17K06573  
研究課題名(和文) 移動床流れへのハイブリッド・アプローチ：土砂混入による変調現象の理解を目指して  
  
研究課題名(英文) A hybrid approach to alluvial streams: towards understanding turbulence modulation by particles  
  
研究代表者  
横嶋 哲 (YOKOJIMA, Satoshi)  
  
静岡大学・工学部・准教授  
  
研究者番号：80432194  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：移動床流れの高精度・高効率な予測法に必要な要素として、特に以下の4点、(i)移動床流れのベースをうまく捉えるための非定常3次元乱流シミュレータの開発、(ii)自由表面の大変形を精度良く表現できる界面捕獲法の選択、(iii)浮遊砂挙動をより合理的に扱うためのオイラー・ラグランジュ法の導入、(iv)掃流砂による流路変動を高精度に再現可能な巨視的予測法の確立、に注目し、それぞれについてコストパフォーマンスの観点で優れた手法を選択/模索/実装し、その基本性能を評価した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、流路の大きな変動を伴う河川災害が多発しており、そのような現象をより正確かつ効率的に予測可能な手法の確立がますます強く求められている。本研究はその一端を担うもので、最先端の計算流体力学的知見を導入することで上述の問題点の解消を試みた。本研究の成果は、同様の課題に取り組む他研究者に有用な知見を提供し、より高精度で高効率な移動床流れ予測法の確立に向けた新たな枠組みを提示している。

研究成果の概要(英文)：We have worked on (i) development of an unsteady, three-dimensional turbulent flow simulator to reproduce the base flow characteristics of alluvial streams, (ii) pursuit of an accurate interface capturing method to track large surface deformations accurately, (iii) introduction of an Euler-Lagrange approach to particle-laden flows to treat the suspended sediment behavior more reasonably, and (iv) development of an accurate erodible-bed flow simulator by bed-load transport, and have demonstrated the basic capabilities of the methods.

研究分野：環境流体力学

キーワード：移動床流れ 界面捕獲法 オイラー・ラグランジュ法 パセット履歴力 2wayカップリング 埋め込み境界法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

近年、集中豪雨によって流路の大きな変動を伴う河川災害が多発しており、そのような現象をより正確かつ効率的に予測可能な手法の確立がますます強く求められている。他方で既存の試みの大半は特に土砂輸送に関して半経験的な巨視的モデルに強く根差しており、改善の余地は大きい。近年では計算機性能の向上に伴い、個々の粒子形状やその周囲の流動を正確に捉え、移動床流れを微視的に再現する試みも認められるものの、工学的には許容できない負荷を伴うため、その利用はあくまでも現象理解やモデル開発、性能評価等の基礎研究に限られる。

## 2. 研究の目的

本研究では移動床流れの巨視的予測手法に最先端の計算流体力学的知見を導入することで上述の問題点を解消し、より高精度で高効率な移動床流れ予測法の確立に向けた新たな枠組みを示すことを目指した。

## 3. 研究の方法

本研究では、移動床流れの高精度・高効率な予測法の確立を目指すために必要な要素として、特に以下の4点、(i)移動床流れのベースをうまく捉えるための非定常3次元乱流シミュレータの開発、(ii)自由水面の大変形を精度良く表現できる界面捕獲法の選択、(iii)浮遊砂挙動をより合理的に扱うためのオイラー・ラグランジュ法の導入、(iv)掃流砂による流路変動を高精度に再現可能な巨視的予測法の確立、に注目し、それぞれについてコストパフォーマンスの観点で優れた手法を選択/模索/実装し、その基本性能を評価した。

## 4. 研究成果

(i)について、従来は時々刻々と変化する河床形状に合わせて計算格子を生成する移動境界適合格子が利用されてきたものの、その計算負荷は非常に高い。本研究ではコストパフォーマンスの観点から、デカルト格子上で任意の移動固体境界問題を容易に扱えるアプローチとして近年さまざまな分野で活用されている埋め込み境界法に注目した。ここでは固定河床波を過ぎる流れを対象としてその基本性能を検討し、等間隔な計算格子上で(すなわち、計算格子点を河床近辺に特別に集中させなくても)平均流速やレイノルズ応力分布を極めて精度良く再現できることを確認した。この特徴は、本アプローチの河床変動問題への有用性を支持するもので、非常に重要な知見と言える。

(ii)に関して、本研究ではデカルト格子上でトポロジー変化も伴うような自由表面の大変形問題を効率的に扱う手法として界面捕獲法に注目した。この範疇では一般にレベルセット法とVOF法が最もよく利用されるものの、客観的立場から両者を同一問題に適用してその性能や特徴を比較した例はほとんど存在しない。そこで本研究ではレベルセット法系統のACLS法とVOF法系統のCICSAM法に特に注目し、その基本性能を評価した。さまざまな検証の結果、同一条件下ではACLS法が高い精度を示した反面、CICSAM法はCFL数の制約が厳しいものの、低CFL数条件下ではACLS法に匹敵する結果を得た。VOF法は界面法線や曲率の算出精度に難があり、表面張力が重要な問題では曲率評価法の精緻化が必要となる。他方でACLS法は2種類の界面識別関数の保持、およびVOF法では不要な再初期化操作が必要であり、CICSAM法よりも実装の難易度と計算負荷は高い。界面捕獲法の選択においては、これらの要素を総合的に判断することが必要であるとの知見を得た。

(iii)に関して、従来は浮遊砂の挙動をその濃度分布でオイラー的に表現することがほとんどであったのに対して、本研究では流体運動はオイラー的に、粒子挙動はラグランジュ的に扱う、オイラー・ラグランジュ法に注目し、微小粒子のモデル運動方程式であるMaxey-Riley方程式の活用を試みた。後者のメリットは個々の粒子の振る舞いを運動方程式ベースで捉えることによって、粒子-流体間の相互作用や粒子間相互作用(衝突や凝集など)を陽に考慮でき、それに伴う粒径の変化や流動変調といった現象も自然に扱える点にある。本研究では特に、微小粒子の乱流中でのクラスター特性や衝突特性の解明、Maxey-Riley方程式中で最も計算負荷が大きく、その役割の理解や効率的な評価法の確立が遅れているバセット履歴力の近似法の基本性能評価とクラスター特性への影響の理解、さらには粒子混入による乱流変調現象の再現性について検討し、その有用性を確認した。

(iv)について、本研究では密度関数法とポーラスメディア法を導入することで表面流と浸透流を同時に予測できる3次元流動モデルと、土砂輸送に対する平衡流砂モデルを組み合わせることで、交互砂州形成と河岸侵食を伴う流路変動問題を正確に予測可能な巨視的移動床解析手法を構築し、その基本性能を確認した。

上述の(i)-(iv)のそれぞれにおいて、さらなる検討を要する点はもちろん残されているものの、それぞれで一定の成果が得られた。次のステップとしては、(i)-(iv)を組み合わせ、移動床流れに対してその総合力を評価する必要があり、今後の課題と言える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 横嶋 哲, 森 稜一	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 微小粒子の乱流中のクラスタ特性に対する2-wayカップリングの影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_979-I_984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 石川 秀平, 横嶋 哲, 久末 信幸, 早瀬川 拓馬	4. 巻 76(2)
2. 論文標題 レベルセット法とVOF法の特徴比較: ACLS法とCICSAM法を例として	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_439-I_449
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.76.2_I_439	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 横嶋 哲, 島田 佳昭	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 微小粒子の乱流中のクラスタ特性に対するパセット履歴力の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_595-I_600
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_I_595	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 音田 慎一郎, 稲葉 良也, 細田 尚	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 3次元反砂堆の形成過程に関する数値シミュレーション	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_1003-I_1008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.75.2_I_1003	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 横嶋 哲, 渡辺 滯, 藤原 勇太	4. 巻 74(5)
2. 論文標題 パセット履歴力の近似計算法の基本性能評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1 (水工学)	6. 最初と最後の頁 I_667-I_672
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_667	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 横嶋 哲, 浅田 英義	4. 巻 73(2)
2. 論文標題 粒子の沈降挙動に対する粒子形状効果	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_619-I_629
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.73.I_619	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 横嶋 哲, 島田 佳昭	4. 巻 74(1)
2. 論文標題 微小粒子の乱流中の衝突特性に対する比重の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 27-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74.27	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20件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 S. Yokojima, Y. Shimada, and K. Mukaiyama
2. 発表標題 Influence of Basset history force on preferential concentration of small particles and bubbles in turbulence
3. 学会等名 22nd IAHR-APD Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中澤 克成, 横嶋 哲, 石川 秀平, 久末 信幸
2. 発表標題 界面の大変形を伴う自由表面流れにおけるレベルセット法とVOF法の特徴比較
3. 学会等名 第24回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Yokojima, Y. Shimada, and Y. Fujiwara
2. 発表標題 Influence of Basset history force on preferential concentration of small particles in isotropic turbulence
3. 学会等名 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横嶋 哲, 島田 佳昭, 向山 和輝
2. 発表標題 微小粒子・気泡のクラスタ形成に対するバセット履歴力の影響について
3. 学会等名 日本機械学会 第97期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川 秀平, 横嶋 哲, 久末 信幸, 早瀬川 拓馬
2. 発表標題 レベルセット法とVOF法の界面捕獲性能の比較
3. 学会等名 日本機械学会 第97期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川 秀平, 横嶋 哲, 久末 信幸, 早瀬川 拓馬
2. 発表標題 レベルセット法とVOF法の比較検討
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部 第69期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横嶋 哲, 森 稜一
2. 発表標題 Maxey-Riley方程式に基づく微小粒子混相流予測手法の基本性能評価
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石川 秀平, 横嶋 哲, 久末 信幸, 早瀬川 拓馬
2. 発表標題 レベルセット法とVOF法の特徴比較
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横嶋 哲, 島田 佳昭
2. 発表標題 微小粒子のクラスタ形成に対するパセット履歴力の影響について
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会/第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横嶋 哲, 石川 秀平, 久末 信幸, 早瀬川 拓馬
2. 発表標題 レベルセット法とVOF法の移流精度の比較検討
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会/第22回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安庭 正晴, 音田 慎一郎, 細田 尚
2. 発表標題 3次元流れ解析モデルを用いた交互砂州形成の数値シミュレーション
3. 学会等名 土木学会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横嶋 哲, 立岩 伸吾, 音田 慎一郎
2. 発表標題 固定河床波上を過ぎる流れの数値シミュレーション
3. 学会等名 土木学会 第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横嶋 哲, 石川 秀平, 早瀬川 拓馬, 久末 信幸
2. 発表標題 レベルセット法の質量保存性について
3. 学会等名 土木学会 第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横嶋 哲, 渡辺 滯
2. 発表標題 パセット履歴項の効率的計算法の精度検証
3. 学会等名 土木学会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横嶋 哲, 石川 秀平, 早瀬川 拓馬, 久末 信幸
2. 発表標題 滑らかなヘヴィサイド関数に基づくレベルセット法の質量保存性について
3. 学会等名 土木学会 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yokojima, Y. Shimada, S. Fujii, and T. Miyahara
2. 発表標題 Influence of mass density ratio on preferential concentration of small particles in isotropic turbulence
3. 学会等名 6th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (ASCHT 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yokojima, and H. Asada
2. 発表標題 Particle shape effects on sedimentation of particles
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows (ICNMMF-III) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横嶋 哲, 島田 佳昭
2. 発表標題 一様等方乱流場における微小粒子の衝突特性に粒子比重が及ぼす影響
3. 学会等名 土木学会 第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横嶋 哲, 浅田 英義
2. 発表標題 粒子の沈降挙動に対する粒子形状効果
3. 学会等名 土木学会 第20回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 横嶋 哲, 島田 佳昭
2. 発表標題 粒子比重が乱流中の微小粒子の衝突特性に与える効果
3. 学会等名 土木学会 第20回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2017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
研究分担者	音田 慎一郎  (ONDA Shinichiro)  (50402970)	京都大学・工学研究科・准教授    (14301)	

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
---------	---------