

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02262

研究課題名(和文)粘土から大礫までの材料からなる河床上の流砂モデルの再構築と数値予測手法の開発

研究課題名(英文) Construction of a unified sediment transport model and development of a numerical prediction technique on a riverbed consisting of materials ranging from clay to large gravel.

研究代表者

関根 正人 (Sekine, Masato)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：60187854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「大礫から礫・砂・シルトならびに粘土まで」のこれまでにない幅広い粒度分布をもつ河川地形上で発生する流砂現象を対象とし、従来は未着手あるいは不十分な取り扱いにとどまってきた二つの重要な現象を取り扱いました。具体的には、(1)砂礫の流砂過程に及ぼす「大礫」あるいは「粘土」の影響を明らかにし、そのメカニズムを探ることと、(2)Bed material loadとしての砂礫の移動プロセスを合理的かつ統一的に捉える新たな枠組みを構築すること、の二つを目的に研究を行ない、必要な知見を見出すことができました。さらに、これらの成果を踏まえて、現象を数値計算により再現する手法の開発を行いました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、「大礫」ならびに「粘土」の存在が河床上で生じる砂礫の輸送に及ぼす影響を定量的に明らかにしており、あわせてこのような現象を特徴付ける「遮蔽係数」などのパラメータの評価式を導き出しました。さらに、このような幅広い粒度分布を有する河川地形の変形プロセスを数値計算により再現する手法の開発しました。これらは、流砂現象の理解を大きく広げるものであり、従来であれば計算できなかった河床の変動などのプロセスを科学的根拠に基づいて予測できるようになったという意味で、学術的に大きな進展と捉えることができます。また、Bed material loadに関しては、新たな扉を開く可能性のある研究と言えます。

研究成果の概要(英文)：In this study, we focus on two important phenomena that have not yet been addressed or have been treated insufficiently in the past. Specifically, we have conducted research with two objectives: (1) to clarify the influence of "large gravel" or "clay" on the sediment transport process of sand and gravel, and to investigate their mechanisms, and (2) to construct a new framework to reasonably treat as a bed material load as one unified sediment transport process. We have found the necessary findings. Based on these results, we developed a method to reproduce the phenomena by numerical simulation.

研究分野：移動床水理学、河川工学、水工水理学

キーワード：移動床水理学 流砂 河川工学 水工水理学

1. 研究開始当初の背景

移動床水理学の中核をなす「流砂」の研究は、1980年代を中心に飛躍的な発展を遂げて以降、しばらく停滞期に入ることになった。この期間に、コンピュータの汎用化や高速化が進み、研究手法の一つとして数値計算が大きな位置を占めることになっていったが、流砂のメカニズムに関わる核心部分の解明に手が付けられることは少なく、従来研究の成果を体系化することに専念するにとどまっていたということができるとはならない。ところが、計算技術が高まるにつれて、従来の知見の適用範囲外の現象にまでこれをあてはめ、計算によって得られた結果を踏まえて、不確かな議論・検討がなされている恐れまでであると懸念される。一方、極めて幸いなことに、計測技術の飛躍的な発展と製品の価格の低下の恩恵を受けることができるようになり、かつてであれば到底計測することができなかつたようなものまで測ることができるようになった。こうした状況を踏まえて、「2.」で記す三つの基礎的な移動床水理実験を行い、新たな観点から流砂現象を捉え直し、流砂の移動のメカニズムを明らかにする研究に挑んでいる。

具体的に説明を加えると、本研究では、河床材料がこれまでよりも「遥かに広い粒度の幅」をもつ条件下で生じる流砂現象を対象にしており、そこには移動することのない大礫からシルト・粘土までが含有されている。特に、粘土が含有されるとその粘着力ゆえに地形の浸食などの変動のプロセスが顕著に変化することになるが、本研究開始時にこのような現象に着目した実験は、筆者を除いてあまり行われてこなかった。さらに、「Bed material load」として知られる砂礫の移動は、典型的な掃流砂と浮遊砂に分けられて研究が進められてきた歴史がある。ところが、実は両者は一連の移動プロセスの中の一形態に過ぎないことなどから、たとえば基準面濃度を精度よく評価することは期待できない、などという本質的な問題が指摘されてきていた。こうしたことから、問題解決のためには、従来の枠組みを超えた大胆な発想の転換と新たな手法によるアプローチが必要な時期に来ていた。

2. 研究の目的

本研究では、移動床水理学に関わる3つの現象を対象とした。第一に、河床表面に露出する石礫がその周辺に存在する粒径の小さな礫・砂・シルトの移動に及ぼす影響に注目し、その遮蔽の効果を従来とは異なる関係式によって評価できるようにすることを目指した。第二に、「粘土河床が砂礫河床へと遷移するプロセスならびにその逆のプロセス」に注目し、そのメカニズムを解明することに挑むことにした。たとえば河川感潮域では、干満の影響により海から運ばれてきた粘土が河床を覆い、粘土による河床となることがあるが、その一方で洪水時には上流から輸送されてくる砂礫の作用を受けて砂礫河床へと変わる。これら二つの現象は、掃流砂としての砂礫の輸送と密接に関わることから、条件を系統的に変化させた一連の移動床実験によりその本質を解明するとともに、これらの現象を数値計算により再現できるようにする手法の構築に挑むことにした。第三に、Bed material loadとしての砂礫の移動そのものを、基礎的な移動床実験と計測ならびに可視化の技術を使って改めて見直し、従来の掃流砂と浮遊砂に分けるやり方ではなく統一的に取り扱う「新たな枠組み」を提示することを目指した。

3. 研究の方法

本研究の特徴は、三つの実験施設を用いた移動床水理実験を行い、現象の本質を見極めようとしたことにある。この実験には、レーザ式変異センサやレーザシートならびに高速度カメラなどの最新の計測機器を導入しており、流砂ならびに地形変動という現象を可能な限り可視化することにより現象の背後に隠れたメカニズムに迫ることを目指した。ここでは、従来の移動床実験とは異なり、含有される粘土の影響についても注目しているため、粘土の含有比率を変えて小規模の模擬堤防をつくり、越流により堤防が決壊するプロセスならびにメカニズムを明らかにする実験も行っている。また、実験時に撮影された画像の解析にも当研究室独自のノウハウがあり、これを生かして考察を加え、結論を導き出している。

上記のような実験による検討に加えて、対象とした現象を数値計算により再現する試みも行っている。計算手法は、従来のものとは異なる「非平衡流砂過程」を再現できる筆者によるものをさらに拡充させることにより構築した。

4. 研究成果

本研究では、研究の目的として記した三つのテーマ毎に基礎実験を行い、その結果を踏まえて考察を加え検討を深めた。また、最終的には、テーマ毎に得られた結果をまとめつつ現象の本質に迫っていくことにした。また、数値計算により現象を再現する手法を開発した

第一ならびに第二のテーマに関する主要な成果は、以下の通りである。

- (1) 洪水時でも移動しないほど大きな石礫から、掃流砂として移動する砂礫、浮遊砂として移動する細砂・シルトまでを含有する材料によって河床が構成されている場を想定し、そこで生じる流砂現象に注目した実験を行い、そのメカニズムの解明に努めました。これは、材料の最大粒径から最小粒径までの粒度の幅が、従来研究よりはるかに広い河床上で生じる現象と

ことができます。この実験には、2020 年度に購入した PIV による流速計測システムが極めて有効であり、その威力を十分に引き出せるように留意しました。本研究を通じて、粒径の異なる個々の粒子に作用する掃流力が、材料の混合比率とその粒子の河床表面からの高さに応じて、どのように変化するのかという点が明らかになり、その評価式を誘導することができました。また、流れ場の詳細な計測を通じて、移動しない大きな石礫の周りの流れの構造を明らかにしました。上記の評価式は、このような流れ場の影響を受けて定まるものといえます。

- (2) 粘土のみからなる河床を対象にして、それが水流の作用だけでなく、その上を移動する掃流砂礫の影響をも受ける場を想定した基礎実験を系統的に行いました。これにより、粘土河床がどのような浸食を受け、河床自体がどのように変化していくのかを明らかにしました。この変化のプロセスを整理すると次のようになります。砂礫の移動に伴い発生する砂礫と粘土の接触に伴い、粘土の浸食が促進される。ただし、この浸食は横断方向に一様に進行するわけではなく、水路の中心軸付近で生じる「溝状の浸食」という形で始まる。この溝の部分に砂礫が入り込み、ここでの移動が顕著となると、溝の側面を浸食すること（側方浸食）により溝の幅が広がり、浸食範囲が横断方向に拡大する。同時に溝の深さを増すように下方浸食も進行する。この浸食と同時に、移動してきた砂礫が粘土河床面下に入り込むように堆積し、河床表面の砂礫化が進む。ただし、この砂礫は、水流の作用を受けて離脱することもあり、砂礫自体は掃流砂礫と交換し、新たに堆積したものと入れ替わることもある。砂礫の輸送を伴う流れがさらに持続すると、河床は全面にわたって砂礫で覆われ、「砂礫河床」となる。ただし、砂礫が入り込んでいる層を「混合層」と呼ぶと、混合層は砂礫一層分の厚さを持つにすぎない。また、掃流砂礫の移動量を流れ場に見合った「平衡流砂量」以上に設定すると、過剰に供給された砂礫が上記の「混合層」の上面を覆うように堆積し、砂のみの層が形成されることになる。この状態まで進行してはじめて、「粘土河床」から「砂礫河床」への遷移が完了したことになる。
- (3) 一方、上記の「砂礫河床」の状態を初期条件として、砂礫の供給をせずに通水すると、表面に形成された「砂礫層」が消失し、混合層内の砂礫まで緩やかに浸食を受ける。この状態が維持されると、河床は再び「粘土河床」に回帰する。
- (4) 以上のように、粘土からなる河床を砂礫河床化するためには、その場の平衡流砂量を超える砂礫が供給されるという条件が持続的に満足される必要がある。粘土河床を砂礫で一時的に被覆してもそれが継続的なものでない限り、やがては元に戻ってしまうのである。
- (5) 関連する移動床実験として、異なる構成材料を用いて作成した模擬堤防の越流決壊実験を行ったところ、砂のみの堤防は、天端から発生した浸食が極めて短時間のうちに基礎地盤まで到達する「下方浸食」が卓越して決壊してしまう。砂に対して 9%の粘土を含有させた材料で作られた堤防は、砂のみよりも緩やかな決壊プロセスとなるほか、決壊前の段階の水みちに階段状のステップ地形が形成することがわかった。礫：砂：粘土の比率を 3：4：3 の材料の場合、礫のかみ合わせの効果と粘土の粘着性の効果によって、模擬堤防が決壊することはないという結果が得られている。この配合比率は、実務上経験的に推奨されてきた値に近く、極めて妥当な判断をしてきたことを裏付けるものと言える。
- (6) この現象を再現できるような数値計算手法の開発を行った。

次に、第三のテーマに関しては、次のような成果が得られている。

- (1) Bed material load として輸送される砂礫を、主として掃流砂として移動するガラス粒子と浮遊砂として移動するポリスチレン粒子で置き換え、異なる条件下で基礎実験を行った。実験時には、粒子群の移動を追跡できるように高速度カメラで動画を撮影するとともに、PIV 解析により水流の乱流構造を評価するための画像も同時に撮影した。これにより、粒子の運動に及ぼす流れの影響を定量的に評価することが可能となった。
- (2) 画像解析の結果から、ポリスチレン粒子が浮上する際には水流の上向きの組織渦が、急降下する際には下向きの組織渦が、それぞれ強く関わっていることが確認された。このことは、一部の実験や数値シミュレーションを通じて指摘されていたが、ここまで明確に捉えられた例はないと考えている。
- (3) 河床面上の粒子の体積濃度分布を求めたところ、河床面からの高さ z の位置での濃度 $C_s(z)$ が河床濃度 C_0 から上方に向かって単調に減少する指数関数型の連続した分布となることがわかった。このことは、典型的な掃流砂あるいは浮遊砂がそれぞれ卓越する掃流力条件下でも同様に成り立つことが確認された。河床濃度 C_0 は幾何学的に評価することのできる量であることから、従来研究において導入してきた基準面濃度を介在させることがなく、はるかに合理的な考え方ではないか。ただし、分布式中に現れる係数が掃流力などの関数になるはずであり、結果の一般化・普遍性の確認などは今後の課題として残されている。
- (4) 移動速度の z 方向分布についても同様の検討を行っており、従来指摘されてこなかった点が明らかになってきたほか、この分布 $u_s(z)$ が z の対数関数で表されることも示唆されている。
- (5) このような実験とあわせて、数値計算によりこの現象を再現できるような手法を開発し、再現計算を行った。

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 鷺津明季・帆足拓海・関根正人	4. 巻 Vol.78, No.2
2. 論文標題 粒子追跡法およびPIV解析による流砂理論の再構築に向けた実験的検討	5. 発行年 2022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_973-I_978
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 関根正人・藤浦望諒	4. 巻 Vol.77, No.2
2. 論文標題 粘土河床上を移動する砂礫の被覆・離脱プロセス	5. 発行年 2021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_607 - I_612
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 関根正人・廣川萌恵・宮澤拓海	4. 巻 Vol.77, No.2
2. 論文標題 堤体を構成する材料や河床幅が模擬堤防の越流決壊プロセスに与える影響	5. 発行年 2021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_655 - I_660
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 関根正人・中間遼太・鷺津明季	4. 巻 Vol.77, No.2
2. 論文標題 PIV解析を用いた河床付近で生じる乱れの構造と流砂現象に関する実験的検討	5. 発行年 2021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_691 - I_696
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 関根正人・中間遼太	4. 巻 Vol.76, No.2
2. 論文標題 大礫の間隙に存在する大粒径砂礫が小さな砂に及ぼす遮蔽効果	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_1141 ~ I_1146
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 関根正人・石原 駿・藤浦望諤	4. 巻 Vol.76, No.2
2. 論文標題 掃流砂により引き起こされる粘土河床の浸食と混合層形成のプロセス	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_1153 ~ I_1158
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 関根正人・松浦泰地・廣川萌恵	4. 巻 Vol.76, No.2
2. 論文標題 堤防決壊プロセスと同時発生する河床変動に関わる移動床実験	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_1171 ~ I_1176
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 大内美佳・宮澤拓海・廣川萌恵・関根正人
2. 発表標題 表面被覆の状態の違いが河川堤防の決壊プロセスに及ぼす影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 因岳宏・藤浦望誇・齊藤駿・関根正人
2. 発表標題 砂礫の移動に伴う粘土河床の浸食と堆積した砂礫の再浸食のプロセス
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 帆足拓海・鷺津明季・中間遼太・関根正人
2. 発表標題 砂漣上の流れの乱流構造と浮遊砂の移動に関する実験的検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤浦望誇・関根正人・石原 駿
2. 発表標題 掃流砂の作用により形成される粘土河床上の混合層の形成・消失のプロセス
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鷺津明季・中間遼太・関根正人
2. 発表標題 比重の異なる同粒径粒子を用いたBed material loadの輸送メカニズムの解明に向けた実験的検討
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮澤拓海・廣川萌恵・松浦泰地・関根正人
2. 発表標題 砂と粘土からなる模擬河川堤防の越流決壊プロセスに及ぼす河道幅の影響
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤浦望諤・石原駿・吉川文崇・狩野莉子・関根正人
2. 発表標題 掃流砂として輸送される砂礫の作用による粘土河床上の混合層の形成プロセス
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中間遼太・本合弘樹・平松裕基・関根正人
2. 発表標題 大礫の間に位置する砂礫の移動に及ぼす遮蔽効果
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣川萌恵・松浦泰地・菅俊貴・関根正人
2. 発表標題 模擬堤防の越流決壊とこれに伴い生じる地形変動プロセス
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Sekine, Shun Ishihara, Noko Fujiura, Fumitaka Yoshikawa
2. 発表標題 PROCESS OF CLAY BED DEFORMATION DUE TO THE ACTION OF MOVING PARTICLES OF BEDLOAD
3. 学会等名 the 22nd IAHR-APD Congress in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Hiramatsu, Ryota Nakama, Koki Hongo, Masato Sekine
2. 発表標題 HIDING EFFECT AMONG SEDIMENT PARTICLES EXPOSED ON SURFACE OF RIVERBED WITH AN EXTREMELY WIDE RANGE OF SEDIMENT GRAIN SIZES
3. 学会等名 the 22nd IAHR-APD Congress in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Sekine, Taichi Matsuura, Moe Hirokawa, Toshiki Suga
2. 発表標題 INFLUENCE OF SEDIMENT COMPOSITION ON BREACHING PROCESS OF MODEL RIVER LEVEE INFLUENCE OF SEDIMENT COMPOSITION ON BREACHING PROCESS OF MODEL RIVER LEVEE
3. 学会等名 the 22nd IAHR-APD Congress in Sapporo (国際学会)
4. 発表年 2020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	平松 裕基 (Yuki Hiramatsu) (10731812)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所(寒地土木研究所)・研究員 (82114)	

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