

令和 2 年 5 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14734

研究課題名(和文)土砂トレーサーを利用した土砂動態-地形変動過程の理解と予測

研究課題名(英文) Understanding and predicting the sediment transport and morphodynamics using bedload tracer model

研究代表者

岩崎 理樹 (Iwasaki, Toshiki)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70727619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、従来の土砂移動・河床変動モデルでは表現が難しかった土砂の移動経路、時間、影響範囲を、土砂トレーサーモデルを用いることで直接的に扱う数値計算モデルを開発した。開発したモデルの土砂動態に対する予測可能性を室内実験、現地観測結果との比較を通じて議論し、これを通じて、砂州や蛇行等のリーチスケールの地形変動現象と土砂動態の関連性について明らかにするとともに、より広域な土砂動態を表現できる新たなフレームワークを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

流域内における土砂動態は、平常時の物質輸送に大きく影響することで自然環境中の生態系に寄与するとともに、洪水時には大量の土砂生産により下流域の大規模河床変動を誘発して河川災害の原因ともなる。一方、これら土砂動態は直接的に測定することは極めて困難であり、数値的に表現せざるを得ない。本研究で構築した土砂トレーサーモデルは、土砂動態を従来モデルよりも直接的にとらえることが可能であり、土砂動態・地形変動現象の理解を容易にし、上記のような現象を予測可能とすることで、その解決策の提案に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：This study propose a numerical model for directly simulating large-scale sediment dynamics, such as spatiotemporal scale of sediment transport and its effect on the morphodynamics, using bedload tracer transport model. The proposed model has been verified using laboratory and field-scale experiments regarding the tracer advection-dispersion, showing generally reasonable performance to reproduce both morphodynamic process and tracer transport dynamics. We discuss the relation between the tracer transport process and morphological changes of river bed, for instance, sandbar formation, bank erosion and meandering, in detail using the proposed model. The proposed model and results contribute to new framework capturing large-scale sediment transport dynamics.

研究分野：水工学

キーワード：土砂動態 地形変動 土砂トレーサー 掃流砂 蛇行 砂州 河岸侵食

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年進行中であると考えられている地球温暖化に起因し、台風の経路等の気象パターンが変化しつつあり、それに伴う降雨形態の急激な変化により、これまでに経験のない局地的、かつ継続時間長い豪雨が発生することで、新たな人的経済的な損失リスクが顕在化し始めている(例えば2016年8月北海道豪雨災害など)。特に山地流域における急激かつ連続的な地形性豪雨の発生により、地盤の保水能力を超える状態が長期間継続することで大規模かつ広範囲にわたり地滑り・斜面崩壊が生じ、大量の土砂が生産されると同時に、これに起因する洪水流が、河道・河床の形状を著しく変形させたり、基盤岩盤上の沖積層を根こそぎはぎ取ることにより河道内で更なる土砂を生産し下流域へと影響する。このような上流域や河道内の土砂生産と、下流域の流砂特性の変化、並びにそれに伴う河床-河道変動パターン変化の因果関係といった流域規模の土砂動態を明らかにすることは、将来予期される局地性豪雨の更なる増加に伴う土砂生産量の増加が流域全体のリスクへ及ぼす影響評価、並びに従来重要と指摘されている流域から海域に渡る一貫した総合土砂管理を行う上で極めて重要となる。一方、流域全体にわたる土砂動態は、近年斜面-河道を連結する水-土砂輸送モデルから計算される流砂量や地形変動量、またICタグや同位体を用いたトレーサー観測によって推定されている。しかしながら、長期間・広領域に渡る土砂動態は、斜面・河床・河道といった異なる起源から発生する土砂が、掃流砂・浮遊砂・河岸浸食といった異なる形態・経路で輸送されることで決定されており、従来のように流砂量測定、地形変動量による推定、トレーサーによる観測を個々に積み上げることでは全体像を把握することは困難である。これを克服するためには、土砂移動時間・経路・分布範囲を含む土砂の移動過程と河床・河道等の流域地形の変動を同時に把握する必要があるが、このような目的に資する実用的なモデルを構築しようとする研究は行われていない。

2. 研究の目的

本研究は、異常気象に端を発する豪雨により生じる流域の地滑りや斜面崩壊、またそれと同時に発生する洪水流に起因する上中流河川における大規模河岸浸食、河床変動により下流域に放出される大量の土砂が流域内に再分配される過程を土砂トレーサー技術によって見える化するモデルを開発し、以下のタスクを遂行することで流域全体の土砂管理に資する土砂動態の予測法を確立するものである。

3. 研究の方法

研究期間内に以下のタスクを遂行することで、これまで把握することができなかった土砂の移動時間・経路・分散範囲を土砂トレーサーにより可視化できる新たなモデルを開発し、その予測可能性を流域内地形の変動をも含めた実測データにより検証するとともに、流域内の土砂動態について明らかにする。

【タスク1】流砂論に基づいた土砂トレーサー移動分散過程のモデル化

パッシブトレーサーとして扱う土砂トレーサーの運動をモデル化するためには、複雑な土粒子運動の素過程を適切に表現する必要があるが、これらを完全に再現・検証することは計測学的、数値力学的に極めて困難である。ここでは、既に開発済みである決定論的流砂モデルを基としたトレーサー輸送モデルに対して、流砂運動並びに河床との交換過程を確率的に扱うモデルを導入し、複雑な土砂運動に起因するトレーサーの移動・分散過程を合理的に扱うモデルを構築する。

【タスク2】大規模河床、河岸変動予測モデルとトレーサー輸送モデルのカップリング

粗視的な土砂動態は、土粒子個々の運動だけでなく河床・河岸変動に起因する土砂フラックスにも支配されるため、流砂モデルと地形変動モデルのカップリングによりこれを再現・予測する。既に構築済みである河床変動モデルに、【タスク1】で構築・検証される流砂輸送・トレーサーモデルを新たに導入し、動的なトレーサー移動・地形変動を同時に評価するモデルを開発する。

【タスク3】多様な流砂シナリオ・河道特性における土砂動態の特徴化

【タスク1及び2】においてその予測可能性が示されるトレーサー・地形変動モデルによって、河床形態の有無など、多様な流砂・河床変動・河道変動特性下における土砂トレーサーの移動・分散過程を可視化し、河床変動特性と土砂動態の関係性を特徴化する。

【総合研究】流域型土砂動態予測モデルの開発と適用

構築したモデルをもとにして、流域規模までその空間スケールを拡大し、物理的かつ実用的に利用可能な流域型土砂動態予測モデルを提案する。

4. 研究成果

【タスク1】トレーサーの移流分散過程を再現するモデルについて明らかにするために、交換層の概念を導入した上で、掃流砂モデルとしてよく用いられるフラックス形式と連行形式の土砂保存則をベースとした土砂トレーサー輸送モデルの性能について比較した。両者を河床変動のない動的平衡状態を仮定した一次元場に適用することで、フラックスモデルではトレーサー粒子の流下方向分散を一切再現出来ないこと、連行形式モデルでは、土砂の堆積分布を表現するステップレングスの確率密度関数を通じて流下方向のトレーサーの分散を適切に表現出来ることを明らかにした。また、従来よく用いられている交換層モデルをベースとしたトレーサー輸送モデルに、新たに交換層以下の層とのトレーサー交換モデルを導入し、そのモデル性能について検

討した。交換層モデルでは、河床変動が生じない限り、下層との土砂交換は生じず、下流側に輸送されるのみであるが、実際には土砂は交換層以下の土砂とも混合しながら、移流分散する。この土砂輸送過程をモデルに新たに導入し、室内実験結果と比較したところ、鉛直方向の土砂輸送を考慮した方が、実験結果を再現出来ることを明らかにした。すなわち、顕著な河床形態がないような比較的平坦な場においては、トレーサの分散は土粒子移動のランダム性に起因する粒子スケールの分散の影響を合理的に考慮することが、トレーサ移動—分散過程を再現するために必要であることを明らかにした。

【タスク 2】

上記で構築したフラックス形式のトレーサモデルを二次元河床変動モデルにカップリングし、砂州の移動や河岸侵食を伴う流路変動場に適用した。実験では、河岸から供給される土砂を着色しており、トレーサの移動・分散作用を可視化している。計算結果は、河床変動、河岸侵食、流路変動の相互作用をよく再現出来るだけでなく、それに伴う土砂トレーサの分布まで定性的に再現出来ることが明らかとなった(図1)。特に、固定砂州のような静的な河床形態が存在する場合、トレーサは砂州に取り込まれることで長時間河床に停止し、流路変動等の大規模な地形変動に伴いゆっくりと下流に移動分散することがわかった。このようなトレーサの移動を可視化することにより、土砂動態と地形変動の関連性が明確となり、河岸から供給された土砂はその直下流の砂州にほぼすべてが取り込まれることがわかった。これにより、河岸から供給される土砂は河道内の砂州を大規模化がさせることにつながり、この大規模化した砂州がさらなる河岸侵食を誘発することを示した。

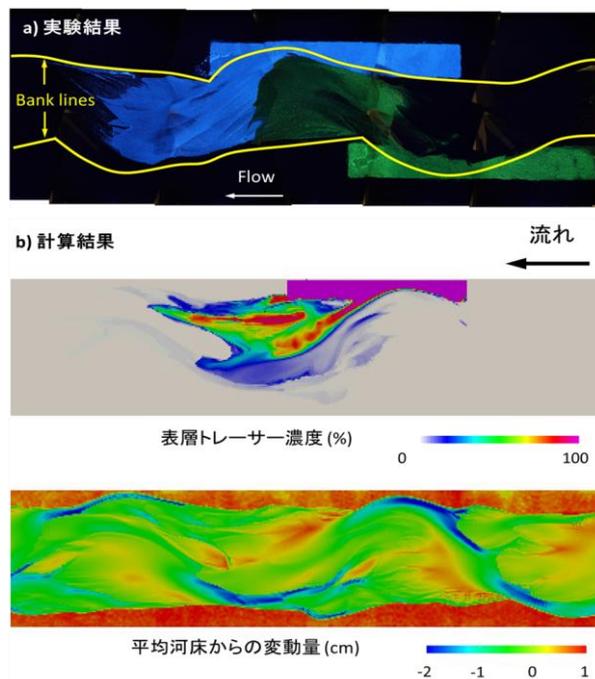


図1 河岸侵食を伴う河床変動場におけるモデルの適用性. a) 実験により可視化されたトレーサの移動, b) 提案する河床変動—トレーサモデルによる地形変動とトレーサ移動の再現結果.

【タスク 3】

【タスク 1, 2】により構築されたモデルを顕著な動的河床形態である自由砂州が存在する場に適用し、流砂モデルとしてフラックス形式、連行形式のモデルによる比較を行った。その結果、巨視的にはどちらのモデルもトレーサの移動に対して、同程度の流下方向分散を示すことが明らかとなった。これは形状や移動速度にある程度のランダム性を持つ自由砂州が、土砂トレーサを分散させる作用を持っており、かつこの河床形態による分散作用が粒子運動固有のランダム性であるステップレングスのばらつきに起因する分散作用よりもかなり大きいためである。この検討より、顕著な河床変動がある場合にはどちらのモデルを用いてもトレーサの移流分散を表現出来ることが明らかとなった。

さらに、豊平川における置き土に関する現地観測を行い、数値計算モデルの現地条件に対する予測可能性について検討した。まず豊平川における礫トレーサ移動分散に関する現地観測を行い、一出水において礫が移動しうる範囲について特徴化すると同時に、これを数値計算モデルにより再現した。その結果、上記単純場と同様に、粒子固有の移動特性を考慮しなくとも、観測された礫トレーサの移動特性を定性的に表現できることが分かった。すなわち、河床形態が顕著な場合は、これらが土砂を貯留する役目を果たすことから、河床形態の移動が土砂動態の時間スケールに大きく影響することが明らかとなった。

【総合研究】

上記で明らかとなったリーチスケールの河床変動、土砂動態をより広域現象の解析へと適用するために適合細分化格子法の一つである Adaptive Mesh Refinement (AMR) を構築した数値計算モデルに導入し、広域土砂輸送モデルに関する検討を実施し、AMR 法を利用した新たな広域土砂輸送モデルとして構築することができ、本研究の目標である広域土砂移動の理解について大きく貢献できるフレームワークを構築できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 濱木道大・岩崎理樹・井上卓也・清水康行	4. 巻 25
2. 論文標題 現地河川におけるICタグ技術を用いた置き土追跡調査と数値解析による土砂移動状況の再現計算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 741-746
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 岩崎理樹・矢部浩規	4. 巻 75
2. 論文標題 上流移動する砂州について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 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 井上卓也・岩崎理樹・矢部浩規	4. 巻 75
2. 論文標題 三角波形成時の河床・水面形状と内部流況の計測	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_451 - I_456
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 舩屋繁和・井上卓也・岩崎理樹・清水康行	4. 巻 75
2. 論文標題 実河川スケールでの蛇行発達に関する数値計算	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_1015 - I_1020
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 Zhang Li, Iwasaki Toshiki, Li Tiejian, Fu Xudong, Wang Guangqian, Parker Gary	4. 巻 9
2. 論文標題 Bedrock-alluvial streams with knickpoint and plunge pool that migrate upstream with permanent form	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1038/s41598-019-42389-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shimizu Yasuyuki, Nelson Jonathan, Arnez Ferrel Kattia, Asahi Kazutake, Giri Sanjay, Inoue Takuya, Iwasaki Toshiki, Jang Chang Lae, Kang Taeun, Kimura Ichiro, Kyuka Tomoko, Mishra Jagriti, Nabi Mohamed, Patsinghasanee Supapap, Yamaguchi Satomi	4. 巻 45
2. 論文標題 Advances in computational morphodynamics using the International River Interface Cooperative (iRIC) software	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth Surface Processes and Landforms	6. 最初と最後の頁 11 - 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/esp.4653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Iwasaki Toshiki, Parker Gary	4. 巻 117
2. 論文標題 The role of saltwater and waves in continental shelf formation with seaward migrating clinoform	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 1266 - 1273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1073/pnas.1909572117	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 該当する

1. 著者名 岩崎理樹・矢部浩規	4. 巻 794
2. 論文標題 混合砂河床における砂州の形態に関する一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 寒地土木研究所月報	6. 最初と最後の頁 20-29
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 無
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 岩崎理樹・井上卓也・音田慎一郎・矢部浩規	4. 巻 74
2. 論文標題 三次元反砂堆に関する数値計算	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_643, I_648
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 濱木道大・岩崎理樹・井上卓也・清水康行	4. 巻 74
2. 論文標題 土砂トレーサーの鉛直方向の分散を考慮した数値計算	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_955, I_960
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 Iwasaki Toshiki, Yamaguchi Satomi, Yabe Hiroki	4. 巻 40
2. 論文標題 Numerical simulation of bedload tracer transport associated with sand bar formation, bank erosion, and channel migration	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 E3S Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 02013 ~ 02013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184002013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okuda, J., Shimizu, Y., Kyuka, T., Iwasaki, T. and Ishida, Y.	4. 巻 2
2. 論文標題 A study on the 2016 August flood and levee breaches in the Sorachi River, Hokkaido, Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st IAHR-APD Congress 2018	6. 最初と最後の頁 1007, 1014
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 岩崎理樹・川村里実・矢部浩規	4. 巻 774
2. 論文標題 土砂トレーサー移動・分散のモデル化について	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 寒地土木技術研究	6. 最初と最後の頁 2~10
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 無
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 濱木道大・岩崎理樹・井上卓也・佐藤大介・サムナー圭希・清水康行	4. 巻 74
2. 論文標題 着色流砂実験によるトレーサーの移動分散現象に関する実験と数値計算	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_1033~I_1038
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 内山雄介・東 晃平・小谷瑳千花・岩崎理樹・津旨大輔・上平雄基・清水康行・恩田裕一	4. 巻 73
2. 論文標題 台風201326号出水に伴う新田川起源懸濁態放射性核種の沿岸域でのインベントリ解析	5. 発行年 2017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_685~I_690
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 Iwasaki Toshiki, Nelson Jonathan, Shimizu Yasuyuki, Parker Gary	4. 巻 122
2. 論文標題 Numerical simulation of large-scale bed load particle tracer advection-dispersion in rivers with free bars	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Earth Surface	6. 最初と最後の頁 847~874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2016JF003951	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 該当する

1. 著者名 Yan Qina, Iwasaki Toshiki, Stumpf Andrew, Belmont Patrick, Parker Gary, Kumar Praveen	4. 巻 43
2. 論文標題 Hydrogeomorphological differentiation between floodplains and terraces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Earth Surface Processes and Landforms	6. 最初と最後の頁 218 ~ 228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/esp.4234	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 該当する

1. 著者名 山口里実・久加朋子・清水康行・泉典洋・渡邊康玄・岩崎理樹	4. 巻 74
2. 論文標題 河道内の土砂動態と流路変動の関係	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_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 無
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 3件)

1. 発表者名 岩崎理樹
2. 発表標題 混合砂河床における砂州の数値計算に関する考察
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎理樹
2. 発表標題 高速流による高水敷侵食に関する水理実験
3. 学会等名 土木学会 第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎理樹
2. 発表標題 土砂トレーサーモデルによる河岸侵食土砂の追跡計算
3. 学会等名 第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩崎理樹
2. 発表標題 上流移動する交互砂州の数値計算
3. 学会等名 第21回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩崎理樹
2. 発表標題 三次元反砂堆に関する数値計算
3. 学会等名 第63回水工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiki Iwasaki
2. 発表標題 Numerical simulation of bedload tracer transport associated with sand bar formation, bank erosion, and channel migration
3. 学会等名 Ninth International Conference on Fluvial Hydraulics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiki Iwasaki
2. 発表標題 Autogenic subaqueous mechanism for continental shelf formation associated with clinoform migration: dissolved salt, gravity-driven and wave-supported turbidity currents
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiki Iwasaki, Takuya Inoue, Shinichiro Onda and Hiroki Yabe
2. 発表標題 Numerical simulation of the three-dimensional river antidunes
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2017 (国際学会)
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