

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04612

研究課題名(和文)河床環境-河床変動統合解析による石礫床河川の生息場時空間動態の解明

研究課題名(英文)Spatio-temporal dynamics of physical habitat of gravel rivers - Integrated simulation model of riverbed environment -

研究代表者

原田 守啓 (Harada, Morihito)

岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授

研究者番号：00647042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、幅広い粒径の土砂が地形を形成し、流量の変動に応じた粒径集団の土砂が輸送されることによって河川環境が形成されている河川中上流域において、生産性が高く水生生物の生息基盤となる瀬の“河床の環境”が、流量の増減に応じてどのように変化するかを、水路実験、現地調査等により明らかにした。また、これらの知見をもとに、河床変動と河床環境を同時にシミュレーション可能な「河床変動-河床環境統合モデル」を改良した。さらに、河川区間ごとに流量を指標とした河川環境変化の指標である「流量ステージ」概念を提案した。河床環境-河床変動統合解析モデルの応用例として、アユの産卵場の適地評価手法へと適用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、河川管理において治水と河川環境保全を両立することに資する。近年極端な豪雨が増加する中で、河道内の土砂を掘削して河川断面を大きくするなどの工事が増加しつつある中で、例えば、保全対象とするアユの産卵場がどこに存在するのかを、シミュレーションにより抽出することができる。また、河川区間ごとに、どの程度の規模の洪水の際に河道内で生じる変化の指標となる「流量ステージ」を用いることで、洪水後に河川環境に生じている変化を予測することができ、治水と環境を両立した河川管理への応用が可能である。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on the middle and upper reaches of rivers, where sediments of a wide range of grain sizes form the topography and the river environment is shaped by the transport of sediments in grain size clusters in response to flow fluctuations. This study clarified how the "riverbed environment" of rapids, which are highly productive habitats for aquatic organisms, changes in response to increases or decreases in stream flow, through flume experiments and field surveys. Based on these findings, the "Integrated simulation model of riverbed environment" was improved to simulate both riverbed fluctuations and the riverbed environment simultaneously. Furthermore, we proposed the concept of "flow stage," which is an indicator of riverine environmental change based on flow rate for each river section. As an example of application of the integrated model, the model was applied to a method for evaluating suitable spawning habitat for ayu *Plecoglossus altivelis*.

研究分野：水工学

キーワード：河床環境 河床変動 生息場寿命 石礫床河川 砂州 Physical habitat

1. 研究開始当初の背景

河川中上流域の河川地形は、幅広い粒径の土砂から構成されており、主に中規模河床形態に対応して分布する早瀬・淵・平瀬といった河川地形、これに対応した土砂の分級現象と、これらに応じた表流水・伏流水の流れが、植物・魚類・底生生物・付着藻類等の生物に多様な生息場を提供している。土砂水理学的見地からこの場を見れば、幅広い混合粒径条件下における移動床であり、複雑な境界面形状と比較的大きい粗度を有した開水路流れでもある。

近年、河川工学と河川生態学の学際領域では、主に早瀬で平水時にゆっくりと進む粗粒化、緩やかな侵食・堆積、相対的に小さい径の土砂移動による河床空隙の増減等が、河床の生息場としての質や水質形成機能を大きく変化させていることが報告されてきている。すなわち、石礫床河川の河床の物理環境の変化が、生態的機能にもたらしている“質的な変化”あるいは好適な生息場が劣化していく“生息場の寿命”ともいうべき現象が観測されており、必ずしも大出水時の地形変化のみによらない河床環境の時空間動態の重要性が明らかになりつつある。一方、工学分野では、主に河川管理の観点から、河床の骨格をなす大径礫が移動するような大出水時の河床変動や土砂輸送に着目した実用的な河床変動解析が多くなされてきており、平水時から中小出水時に生じる河床の緩やかな変化は、河川地形の変化として認識されにくいため、重要な研究対象とはされてこなかった。近年、ダム堆砂の土砂還元や、礫床河川の河道内植生の繁茂要因として径が小さい粒径集団の挙動に着目されつつあるものの、石礫床河川の広い流況下で生じている諸現象を土砂水理学的な観点から記述し、生態学的知見との統合を果たすには、未だ至っていない。そこで、本研究は、以下の問いを設定した。

- 石礫床河川の早瀬で平水時から中小出水時に観測される河床の物理環境の緩やかな変化を、物理的な素過程に分解し、土砂水理学的なモデルとして記述することができるだろうか？
- また、このモデル（河床環境・河床変動統合解析モデルと呼ぶ）によって、実際の河川における生息場の時空間分布（例えば、アユの産卵場の時空間分布）を表現可能か？

2. 研究の目的

従来の河床変動解析モデルが、主に洪水時の河床変動の再現性に着目するのに対し、本研究はこれに加えて、平水時から中小出水時の河床の物理環境の変化の表現に優れた数値解析モデル（河床環境・河床変動統合解析モデル）を改良・発展させる。これにより、見た目では捉えづらい石礫床河川の河床環境の変化を数値解析モデルにより表現し、流量変動や流砂量変動によって変化する河床環境の時空間動態を記述・解明することによって、土砂水理学的知見と生態学的知見の統合を目指す。

そのためには、実際の河川で観測されている物理環境の変化を素過程に分解するとともに、生物生息場として重要な因子を抽出して、これらの土砂水理的な記述方法を探索する必要がある。本研究が着目する「平水時から中小出水時に生じる河床の質的な変化」に対する現時点での解釈を、図-1 左上に示す。また、この現象を記述するためのモデルに必要と考えられる要素を、図-1 右下に示している。

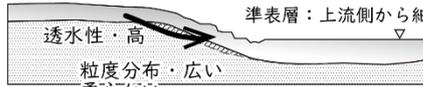
先行課題では、石礫床河川の現地調査や、生物生息場として河床環境を捉えた際に重要な因子の抽出などを踏まえて、平面二次元河床変動解析モデルの改良を行い、河床材料粒度分布—流水抵抗評価—河床空隙率評価の3要素を一体的に評価することが可能な改良によって、混合粒径

条件下における河床変動及び分級現象の再現性の向上が図られた。本研究は次なる目標として、石礫床河川の河床で生じている“河床の質的な変化”ともいえる現象に対する生態学的な観測結果を土砂水理学的アプローチから考察し、河床変動解析モデル内にそれらの素過程を物理的に記述する。また、移動床水理実験による検証を経て、実際河川における河床環境の時空間変動の再現問題、生息場評価（アユ産卵場の時空間分布予測）に挑戦するものである。

実河川で生じている河床構造の変化（兵藤ら 2013 を元に大幅追記）

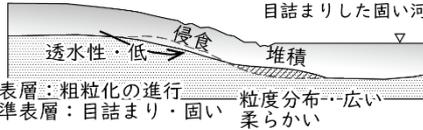
大・中規模出水で砂州前縁（早瀬）に土砂堆積
→その後、平水時の緩やかな土砂移動

平水時であっても石礫が少しずつ移動。少しずつ下流へ移動。
表層：相対的に小さい粒径の土砂が流れ徐々に粗粒化
準表層：上流側から細粒分による空隙閉塞の進行



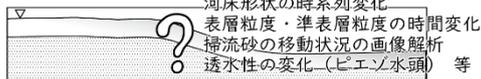
中小出水による掃流砂の移動

中小出水では、平水時に生じていた表層粗粒化・準表層空隙閉塞に加え
早瀬上流側から下流側への掃流砂量が増加し、上流側は侵食されて
目詰まりした固い河床が露出。



②再現

直線水路における瀬の移動床水理実験



①検証

アユ産卵場の空間分布評価

河床材料の好適範囲：○○～△△
礫が限界移動状態で産卵した卵が埋まる
それでも透水性が高く窒息しない…等

③評価試行
現地検証

河床環境 - 河床変動統合解析モデルの改良による河床物理環境の表現性の向上と再現性検証

【実装済み】 相対水深が小さい場での流水抵抗評価
【実装済み】 粒度分布に応じた空隙率評価 ◎河床変動・分級現象の再現性向上を達成

【改良】 河床表層の掃流砂の移動 > 粗粒化の表現
表層から準表層 / 準表層から準表層への細粒分の移動表現

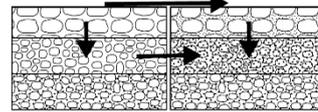


図-1 研究対象とする現象（左上）とこれに対する本研究のアプローチ

3. 研究の方法

河床材料の粒径の幅が広い河川中上流域（平野部の扇状地区間、山間地の谷底平野及び山地河川）を対象とし、以下の方法により課題に取り組んだ。

(1) 河床環境-河床変動統合解析モデルの改良

河床環境-河床変動統合解析モデルは、石礫床河川における河床の物理環境や平水時から出水時まで広く表現することを目的に、一般的な水深積分型平面二次元の河床変動解析モデル iRIC Nays2D ソルバーを元に、申請者が改良を行ったものである（投稿中）。河床表層の粒度分布と相対水深に基づく流水抵抗評価方法、河床の空隙率評価モデル（藤田ら 2008）の実装により、図-2 に示すとおり混合粒径の河床変動及び分級現象の再現性が大幅に向上している。本研究ではさらに、河床表層-準表層における土砂の取り扱いについて拡張を行い、移動床水理実験結果により、この性能を検証する。

(2) 早瀬で生じる流砂現象の観察とモデル検証のための移動床水理実験及び現地調査

石礫床河川の早瀬状の地形を直線水路に再現した、鉛直二次元的な場における河床表層・準表層の時間変化を捕捉可能な実験系を構築し、実河川において生態学者らによって報告されている事象の土砂水理的素過程を解明するとともに、河床環境-河床変動統合解析モデルの検証データを得る。岐阜大学水理実験棟に現存する水路長 8m、幅 30cm、側壁アクリル製・底面アルミ製の直線水路を本研究の目的に合わせて改修し、早瀬を模した混合粒径移動床条件下における実験を実施し、現象の考察及び移動床水理モデルの検証データを得る。

(3) 生息環境評価への適用／アユ産卵場の時空間分布評価の試行

瀬の河床環境の質的变化に深く依存することが兵藤・竹門ら（2013）によって報告されているアユの産卵場を対象とし、申請者らがアユの産卵状況についてデータを保有する木曽川水系長良川（岐阜県）を対象に、産卵場適地評価を行う。研究期間中の産卵期に現地調査を行い、アユの産卵状況や産卵が行われている／いない瀬の物理環境を計測する。主な対象地として木曽川水系長良川を対象とする。

4. 研究成果

本研究の主たる成果について、成果となる論文の概要とともに示す。

(1) 平面 2 次元河床変動計算における流水抵抗と空隙率の評価方法の導入（論文 1）

本論文では、石礫床河川の生態系の基盤である河床環境に着目し、河床環境の生息場の評価に必要な物理指標を包含した河床変動解析モデルの開発を目標とし、一般的な平面 2 次元河床変動計算モデルの一つである iRIC Nays2D ソルバーをベースに、平水時から出水時までの広い流況において流水抵抗が適切に評価され、河床材料の粒度分布、流水抵抗、空隙率の 3 要素を一体的に解析可能なモデルを構築した。蛇行水路における代表的な移動床実験の再現計算を行い、河床形状、平面流況、表層河床平均粒径等について検証を行った結果、流水抵抗評価モデルの修正によって分級現象の予測性能に改善が見られた。この要因として、流水抵抗評価モデルの変更により、表層河床材料粒径と相対水深に応じた掃流力分布が与えられた結果、河床形状及び分級現象の再現性が向上したと考えられた。本論文では、混合粒径条件下の流水抵抗及びその反作用である河床面せん断力の評価に、代表粒径に対する相対水深を考慮可能な抵抗則を導入することの効果、とくに Hey 式の有効性を示したが、Hey 式は適用範囲が限定された半理論式であることから、その後その他の抵抗則についても検討を行い、現在は Ferguson (2007) が提案した VPE 式が最も好適な抵抗則であると考えている。

(2) 早瀬における流砂現象に関する移動床水理実験及び現地調査による混合粒径条件下の土砂水理の検証（論文 3）

幅広い粒径の土砂からなる石礫床河川では、流量に応じて異なる粒径範囲の土砂移動が生じており、平水時であっても河床環境の変化が生じている。本研究は石礫床河川の早瀬において、平水時に生じている緩やかな土砂移動を河床変動解析モデルにより記述するための基礎的知見を得ることを目的に、移動床水理実験及び木曽川水系長良川扇状地砂州における現地調査を実施し、流水抵抗の評価方法及び河床面に作用する掃流力と河床表層粒度分布のバランスについて検討した。早瀬 6 箇所分、実験 3 ケースの合計 9 セットの観測値について、M-S 式、Hey 式、VPE の流水抵抗則の予測性能を確認した結果、既存の流水抵抗則の中では、M-S 式は U/U^* を過大評価（流水抵抗を過小評価）していることは明らかであった。Hey 式と VPE は同程度の値をとり、ともに観測値の傾向を良く表すことができた。水理実験では、河床表層の粗粒化が進行し、混合粒径河床の粒径別限界掃流力に漸近する形で静的平衡状態に至る過程が観測された。実河川の早瀬においても平衡状態に近い状況が観測されたが、流量変動等の要因により平衡状態が崩れ、河床環境の更新や劣化が生じるであろうことも示唆された。

(3) 平水時から大出水時までの河床環境の変化に着目した流量ステージ概念の提案（論文 2）

本論文は、研究過程において、「どれくらいの流量でどの程度の土砂輸送が生じるか」を工学

的かつ簡易に表現する手法を考案することの必要性から着想したものである土砂輸送の結果生じる河床地形の変化を工学的に扱う際には、各種の流砂量式を用いた河床変動解析によって検討されることが多いが、幅広い流量で生じる現象の解明と記述という点では不十分である。

以上に示したように、砂州全体の前進や変形を生じる規模の出水から、目に見える地形変化は生じないが瀬の河床環境に緩やかな変化が生じる平水時まで、砂州の動態は複雑である。しかしながら、流量変動に応じて砂州河道に生じる物理環境の変化を、その都度現地調査により把握することは困難であることもまた自明である。そこで、本論文では、砂州地形の動態と流量の関係性に着目し、砂州河道の順応的な管理に資する簡易な分析手法を提案した。砂州河道に対してあらかじめどのくらいの流量（あるいは水位）のときに、どのような事象が生じるかを「流量ステージ」として整理しておくことによって、砂州河道に生じる諸現象を把握しやすくする。また、木曾川水系長良川扇状地区間を対象に、手法の有効性を検討した。

(4) 開発したモデルのアユ産卵場適地評価への応用（論文 4，国際会議発表 1）

論文 1，2，3 の成果により、石礫床河川の砂州河道における土砂輸送及びこの結果生じる河床環境の変化について土砂水理的に記述するモデルや、河床環境に変化が生じる流量のレンジ（流量ステージ）等の要素が整った。これらの成果を研究計画当初より応用の対象として検討していた、アユの産卵環境の適地評価に応用した。アユの産卵環境は河床環境に強く依存していることはかねてより報告されてきたが、アユ産卵場に関係した 300 編以上の論文のレビューに基づいて、産卵場の物理環境条件についてとりまとめた。（論文 4）これは当初の研究計画には含まれていないが、信頼性の高いアユ産卵適地モデルを設定するため、アユの生態に造詣の深い研究協力者らとの協業によってレビュー論文がとりまとめられた。

提案する生息適地評価手法は、河川流量と土砂輸送の計算シミュレーションモデルと、アユ産卵適地抽出のための生息地モデルの 2 つのモデルから構成されている。比較的 low flow 条件下での土砂輸送計算の精度を向上させるために、iRIC Nays2DH ソルバーのソースコードを一部修正した（論文 1，3）。生息環境モデルは、アユの産卵環境に着目して生態情報を整理し（論文 4）、産卵床として好まれる中・粗礫の割合と安定性に着目した適切な数値を設定した。結果は本報告書執筆時点で整理中であるが、暫定的な成果として、中部地方、関東地方において産卵場分布が把握されているそれぞれ 1 河川（計 2 河川）に本手法を適用した結果は、2022 年秋に開催される国際会議で報告予定である。

(5) 研究成果の総括

本研究の 3 つの目標、①河床環境-河床変動統合解析モデルの改良、②早瀬で生じる流砂現象の観察とモデル検証のための移動床水理実験及び現地調査、③生息環境評価への適用/アユ産卵場の時空間分布評価の試行は、概ね目標通り達成された。

加えて、当初の計画以上の展開した点として 2 点を示す。まず、「どれくらいの流量でどの程度の土砂輸送が生じるか」を工学的かつ簡易に表現する手法を考案した流量ステージ概念は、砂州河道管理のための指標としてだけでなく、河川生態学的な観点での洪水攪乱強度の評価、ダム下流の土砂還元の計画立案のための分析等、応用の幅の広いものとなっている。もう 1 点は、アユの産卵環境についてレビュー論文を刊行できたことである。アユの産卵環境については水産学、生態学、河川工学など幅広い分野の研究者らの知見が積み重ねられてきたものであるがこれらを集大成できたことは本研究プロジェクトの一つの重要な成果であったといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 原田 守啓、平野 和希	4. 巻 27
2. 論文標題 幅広い流況下における砂州動態を記述するための流量指標	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 河川技術論文集	6. 最初と最後の頁 439 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/river.27.0_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 原田守啓 , 塩澤翔平 , 荒川貴都	4. 巻 75
2. 論文標題 流水抵抗と空隙率の評価方法が石礫床河川の平面2次元河床変動計算に与える影響	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_997 ~ I_1002
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_997	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 原田守啓 , 吉川敦希 , 三輪浩	4. 巻 77
2. 論文標題 石礫床河川の早瀬における流水抵抗と河床表層状態の関係性	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_637 ~ I_642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_I_637	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 藤田朝彦 , 横山良太 , 加藤康充 , 井上修 , 原田守啓	4. 巻 24
2. 論文標題 アユの産卵環境はどこまでわかったのか	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 応用生態工学	6. 最初と最後の頁 217 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3825/ece.21-00021	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 平野和希・原田守啓
2. 発表標題 幅広い流況下における砂州動態の簡易な分析手法～長良川における検討事例～
3. 学会等名 応用生態工学会2020年度Web研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川敦希・原田守啓
2. 発表標題 石礫床河川の早瀬の生息場寿命に関する実験的考察
3. 学会等名 応用生態工学会2020年度Web研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木崇史・原田守啓・永山滋也
2. 発表標題 木曾川水系長良川扇状地におけるアユ個体サイズに着目した産卵環境の調査分析
3. 学会等名 応用生態工学会2020年度Web研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木崇史・富田浩生・吉川敦希・原田守啓・永山滋也
2. 発表標題 木曾三川扇状地区間の物理環境はどう違うのか？
3. 学会等名 応用生態工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩澤翔平・原田守啓・加藤大暉
2. 発表標題 平面二次元河床変動解析モデルによる長良川扇状地区間のアユ産卵場適地評価
3. 学会等名 応用生態工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉川敦希・原田守啓
2. 発表標題 木曽三川扇状地区間の早瀬の河床環境に関する研究
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木崇史・原田守啓
2. 発表標題 木曽三川の魚類群集及びアユ生息場分布とその変動要因
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塩澤翔平・原田守啓
2. 発表標題 平面二次元河床変動解析モデルによる扇状地区間のアユ産卵場適地評価
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木崇史 , 加藤大暉 , 原田守啓 , 永山滋也 , 石黒泰
2. 発表標題 長良川扇状地区間における複数年にわたるアユ時空間分布の把握
3. 学会等名 応用生態工学会第 24 回全国大会 (北海道大会・オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉川敦希 , 原田守啓 , 三輪浩
2. 発表標題 石礫床河川の早瀬における流水抵抗と河床表層状態の関係性
3. 学会等名 第 66 回水工学講演会 (オンライン)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Morihiro Harada
2. 発表標題 Predicting Spawning Habitat Distribution of <i>P. altivelis</i> in Gravel Bed Rivers by Computational Model
3. 学会等名 RiverFlow2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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	三輪 浩 (Miwa Horoshi) (70190832)	鳥取大学・工学研究科・教授 (15101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	永山 滋也 (Nagayama Shigeya) (70540558)	岐阜大学・流域圏科学研究センター・研究員 (13701)	

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