

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：15201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06417

研究課題名(和文) 不確実性を考慮したアユ回遊環境の数理・数値モデリングとその実用化

研究課題名(英文) Mathematical and numerical modeling for migration of *Plecoglossus altivelis* considering uncertainties

研究代表者

吉岡 秀和 (Yoshioka, Hidekazu)

島根大学・生物資源科学部・助教

研究者番号：70752161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：1次元河川や河川網(連結グラフ)に生じる魚群回遊を記述する、制御理論に依拠する新たな数理モデルを構築した。また、モデルが支配する回遊様式の導出が、ハミルトン・ヤコビ・ベルマン(HJB)方程式という微分方程式の求解に帰着されることを示し、その具体的な厳密解を得るとともに実際の意味を論じた。さらに、上記の厳密解が確かに粘性解(すなわち真つ当な一般解)であることを示した。HJB方程式の数値計算手法も開発している。加えて、河川におけるアユのマクロなダイナミクス、すなわち個体群動態を記述できる理論を構築し、不確実な環境下で持続可能な内水面漁業を営み続けるためにはどのような水産資源管理が有効かを検討した。

研究成果の概要(英文)：We developed a new mathematical model for describing fish migration along 1-D rivers or connected graphs based on the optimal control theory. We showed that the derivation of the migration strategy reduces to finding a solution to a Hamilton-Jacobi-Bellman equation: a nonlinear degenerate parabolic partial differential equation. We also showed that the equation admits a viscosity solution and discussed its practical implications. Accurate numerical schemes for stable computation of the HJB equation has also been developed in the project. In addition, macroscopic mathematical models for population dynamics of *Plecoglossus altivelis* (Ayu) in river environment was established and applied to finding cost-effective management of the fish population.

研究分野：環境水理学，数理生物学

キーワード：アユ 回遊 最適制御理論 ハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式 粘性解 斐伊川

## 1. 研究開始当初の背景

我が国の内水面漁業では、漁獲量減少による漁協の経営悪化が深刻な問題として顕在化しており、その解決は地域環境科学と関連分野における喫緊の課題である。多くの内水面漁業は、漁獲量の大部分を河川に広く分布する単年性回遊魚アユ(学名：*Plecoglossus altivelis*)に依存する。内水面漁協には漁業権と引き替えに水産資源の増殖義務が課されており、その枠組みでなされるアユ種苗の放流費用は漁協の経営支出の大部分を占める。現在、アユ漁獲量の減少が遊漁者の減少を招き、漁協経営がさらに逼迫されるという負の連鎖が生じている。アユ漁獲量が減少した原因には諸説あるが、人為的な要因が介在しやすい河川環境に関わる問題に焦点を絞れば、ダムや堰といった河川横断型の水理構造物などの回遊の物理的な障壁、水理構造物を介した河川の流況や土砂輸送の制御による産卵・生息場の減少や劣化、生活排水の流入による溶存酸素量の低下などの回遊の生物・化学的な障壁が挙げられる。

このように、アユ漁獲量の潜在的な減少要因の列挙は可能だが、経験的知見に大きく依存する既往の接近手法ではその中からの主要因の特定、影響評価、改善策の提示は困難を極める。この状況を確実に打破するためには、現地調査や実事例に基づいた考察はもとより、数理モデルや数値シミュレーションに基づき河川の水理環境を考慮した魚類回遊に関する詳細な検討が必要である。また、魚類行動には水の流れに生じる流体力学的な乱れや各個体間の身体的な差異、その他外環境の不規則な変動などに起因する不確実性が必然的に伴う。したがって、こうした不確実性を一貫的かつ効率的に記述可能であり、なおかつ実用に足る解析手法の開発が強く要求されている。しかしながら、そうした解析に適用しうる接近手法は国内外においてほとんど見当たらない。

## 2. 研究の目的

魚類の生息・回遊環境の存続が危ぶまれている河川の環境評価と改善に資するための、不確実性を考慮した数理・数値モデル化手法の開発と実用化が本研究の目的である。とくに魚類回遊に重点を置き、我が国の内水面漁業の主要な水産資源であり近年の急激な漁獲量減少が指摘されているアユを対象魚種とする。また、アユ漁獲量の減少による漁協経営の悪化が深刻化しており、下流に水環境・生態学的に重要性の高い汽水域を有する島根県斐伊川を研究対象とする。斐伊川で斐伊川漁業協同組合と協力して水理環境およびアユ回遊に関する現地調査を行う。調査結果と数理モデルに基づいた数値シミュレーションを実施し、水理環境やアユ回遊に関する現状評価と将来予測を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では以下の項目 I から項目 III を遂行した。なお、本研究は斐伊川漁業協同組合の協力のもとで実施した。

- I. 数理モデルと数値計算手法の開発
- II. アユ回遊ならびに河川の水理環境に関する現地調査
- III. 数値シミュレーションによる河川環境の現状評価とその将来予測

本研究は、平成 27、28 年度の 2 年度にわたり実施した。

I. 数理モデルと数値計算手法の開発は、主に平成 27 年度に実施した。河川を 1 次元開水路網として考える、有限要素法や有限体積法に基づく汎用的かつ高い計算効率性を発揮する流れ解析モデルを開発した。また、魚類回遊を記述する、最適制御理論に基礎を置く数理モデルを提案した。

II. 現地調査は両年度にわたり実施した。島根県斐伊川にある 2 カ所の魚道(日登魚道：ヴァーティカルスロット式魚道、吉井魚道：階段式魚道と水辺の小わざ式魚道の複合型)付近を含め河川縦断的に数箇所の調査地点を設定し、魚類の遡上時期(春期)と降下時期(秋期)を中心に、水中カメラによるアユ回遊の調査、流速計、水位計、水質計による水理調査を行った。

III. 回遊の現状評価と将来予測は主に平成 28 年度に実施した。斐伊川本川の上流部から宍道湖との接続部および各支川を計算領域とし、数値シミュレーションにより斐伊川の水理環境およびアユ回遊、とくに遡上成功率に関する現状評価を行った。また、今後の河川管理が導きうる不確実性を考慮した、アユ回遊の質的・量的な将来予測を行った。

## 4. 研究成果

1 次元の河川、ならびに河川網(連結グラフ領域)に生じる魚群回遊を記述する、最適制御理論に依拠する新しい数理モデルを構築した。このとき、数理モデルが支配する回遊様式の導出が、非線型の微分方程式または変分不等式の求解に帰着されることを確認した。さらに、上記の微分方程式や変分不等式の具体的な厳密解を得て、その生態学的な意味を検討した。微分方程式や変分不等式の粘性解を近似するための、処罰法を併用した簡素な有限差分スキームを新たに考案し、数値実験的にその収束性を確認した。また、線形化問題に対してであるが、その安定性と精度に関する知見を得た。より巨視的な視点から河川等における水産資源の動態を検討する、不確実性を考慮した個体群動態モデリングに関する理論・数値的な研究も実施した。

尾原ダムの上・下流側に定点観測地点を1カ所ずつ設定し、年間を通して水位と水温を10分間隔で測定し続けている。水位・水温に関する現地観測は、アユ回遊の要衝であるとされている吉井堰堤で春季に、斐伊川漁協のアユ養殖水槽で夏季においても実施している。さらに、年間を通し不定期ではあるが、尾原ダム上・下流地点で河床付着藻類の繁茂状況を観測し、ダム上流にカワシオグサの繁茂がないことを確認した。アユの生息（個体数、密度、体長や体重）については、吉井堰堤周辺での投網調査（株式会社大隆設計も協力）、斐伊川漁協主催のアユ投網大会の結果、斐伊川漁協組合員から得た漁獲履歴から、極めて有益なデータを得ている。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計14件）

1. **Yoshioka H.**: Transport phenomena in surface water bodies: from mathematical, numerical, application point of views (邦題: 地表水体に生じる輸送現象: 数値, 数値, 応用の観点から), Bulletin of Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University (島根大学生物資源科学部研究報告), 2015, Vol. 20, pp. 21-27. (査読なし)
2. **吉岡 秀和**, 吉井 傳, 八重樫 優太: 斐伊川中流域における内水面漁業の現状とその展望, 島根大学生物資源科学部研究報告, 2016, Vol. 21, pp 23-28. (査読なし)
3. Yaegashi Y., **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: An optimal management strategy for stochastic population dynamics of released *Plecoglossus altivelis* in rivers, International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing, Vol.8, No.2, 1750039, 16pp. (査読あり)
4. **Yoshioka H.** and Yaegashi Y.: Optimization model to start harvesting in stochastic aquaculture system, Applied Stochastic Models in Business and Industry. (in press). DOI: 10.1002/asmb.2250 (査読あり)
5. 田中 智大, **吉岡 秀和**, 木村 匡臣, 山崎 大: 1次元局所慣性方程式に対する摩擦項を考慮した数値安定性解析, 土木学会論文集 B1, 2017, Vol. 73, No. 4, pp. I\_577-I\_582. (査読あり)
6. **Yoshioka H.**, Shirai T., and Tagami D.: Cost-minimizing upstream migration strategy of isolated and schooling fishes in 1-D open channel flows, J. JSCE B1, 2017, Vol. 73, No. 4, pp. I\_433-I\_438. (査読あり)
7. **Yoshioka H.** and Yaegashi Y.: Finding the optimal opening time of harvesting farmed fishery resources, Pacific Journal of Mathematics for Industry, 2016, Vol. 8, No. 6, 6pp. (査読あり)
8. **Yoshioka H.**: Mathematical analysis and validation of an exactly solvable model for upstream migration of fish schools in one-dimensional rivers, Mathematical Biosciences, 2016, Vol. 281, pp. 139-148. (査読あり)
9. **Yoshioka H.**, Yaegashi Y., Unami K., and Fujihara M.: Application of stochastic control theory to biophysics of fish migration around a weir equipped with fishways, Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems: Communications in Computer and Information Science, 2016, Vol. 645 (Zhang L., et al. Eds.), Springer Science+Business Media Singapore, pp.190-200. (査読あり)
10. Yaegashi Y., **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: Numerical simulation of a Hamilton-Jacobi-Bellman equation for optimal management strategy of released *Plecoglossus altivelis* in river systems, Model Design and Simulation Analysis: Communications in Computer and Information Science, 2016, Vol. 603 (Chi S.D. and Ohn S.Y., Eds.), Springer Science+Business Media Singapore, pp.91-101. (査読あり)
11. Yaegashi Y., **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: Optimal strategies for harvesting and predator extermination to sustain *Plecoglossus altivelis* (Ayu) population in stochastic river environment, Journal of Rainwater Catchment Systems, 2016, Vol. 22, No. 1, pp. 7-13. (査読あり)
12. **Yoshioka H.**, Yaegashi Y., Unami K., and Fujihara M.: Identifying the cost function for upstream migration of individual fishes in 1-D open channels based on an optimal control theory, 土木学会論文集 B1 分冊 (水工学特集号), 2016, Vol. 60, No. 4, pp. I\_1147-I\_1152. (査読あり)
13. **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: Numerical comparison of shallow water models in multiply connected open channel networks, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 2015, Vol. 2, No. 2, pp. 271-291. (査読あり)
14. **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: A Petrov-Galerkin finite element scheme for 1-D time-independent Hamilton-Jacobi-Bellman equations, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学特集号), 2015, Vol. 71, No. 2, pp. I\_149-I\_160. (査読あり)

〔学会発表〕（計26件）

1. **吉岡 秀和**, 八重樫 優太: 河床付着藻類の繁茂抑制策を見出すための確率制御問題, 島根大学生物資源科学部研究シーズによる地域活性化と人材育成、地域企業とのコラボ, 島根県民会館, 2017年2月24日. (ポスター発表)

2. **吉岡 秀和**, 白井 朋之, 田上 大助: 魚類の河川遡上に関連した, ある最適化問題の数学解析と数値計算, 日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会第20回シンポジウム, 呉市海事歴史科学館, 2017年1月12日, 要旨集 pp. 22-25.
3. 八重樫 優太, **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: 捕食者の最適駆除戦略に関する特異確率制御問題の厳密解と数値解析, 日本応用数理学会環瀬戸内応用数理研究部会第20回シンポジウム, 呉市海事歴史科学館, 2017年1月12日, 要旨集 pp. 18-21.
4. 藤倉 大和, **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: Mathematical analysis of a primitive dynamic programming problem for water reservoirs (貯水池運用の単純な動的計画問題に対する数学解析), 平成28年度農業農村工学会応用水理研究部会, 岐阜市文化センター, 2016年12月3日, 要旨集 pp. 36-40.
5. 八重樫 優太, **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: カワウ捕食圧下における放流アユ個体群の最適管理戦略, 第73回農業農村工学会京都支部講演会, 大阪リバーサイドホテル, 2016年11月16-17日, 要旨集 pp. 104-105.
6. **Yoshioka H.**, Yaegashi H., Unami K., Fujihara M.: Optimal installation of overhead lines with decaying protection effect for fish from predators, 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会, 京都市, 京都大学, 2016年10月29日-10月30日, 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会講演要旨集, pp. 104-105.
7. Yaegashi H., **Yoshioka H.**, Unami K., Fujihara M.: Optimal installation of overhead lines preventing piscivorous birds in stochastic river environment, 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会, 京都市, 京都大学, 2016年10月29日-10月30日, 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会講演要旨集, pp. 100-103.
8. Yaegashi Y., **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: A stochastic control model for optimal management strategy of released *Plecoglossus altivelis* in river environment based on a pure death process, AsiaSim/SCS Autumn Sim 2016, October 8-11, 2016, Beijing, China, Proceedings p. 76.
9. **Yoshioka H.**, Yaegashi Y., Unami K., and Fujihara M.: Application of stochastic control theory to biophysics of fish migration around a weir equipped with fishways, AsiaSim/SCS Autumn Sim 2016, October 8-11, 2016, Beijing, China, Proceedings p. 76. (同名の論文が Springer CCIS Vol. 645 に収録)
10. 木村 匡臣, 安瀬地 一作, 五名 美江, 田中 智大, 中谷 加奈, 山崎 大, **吉岡 秀和**: 地表水の数値解析技術に関する研究グループ 活動報告, 水文・水資源学会2016年度総会・研究発表会, 福島県福島市コラッセふくしま, 2016年9月15-17日.
11. **吉岡 秀和**, 八重樫 優太, 次橋 健太郎: 養殖水産資源に対する最適漁獲開始時刻の支配方程式, 平成28年度応用数理学会年会, 福岡県北九州市北九州国際会議場(ポスター発表)
12. 八重樫 優太, **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: アユを魚食性鳥類から守るための最も経済的なテグス張り戦略, 平成28年度応用数理学会年会, 福岡県北九州市北九州国際会議場, 2016年9月12日-14日, 演予稿集 pp. 176-177.
13. **吉岡 秀和**, 八重樫 優太: 放流された内水面水産資源の最適管理戦略に関する数学解析, 平成28年度応用数理学会年会, 福岡県北九州市北九州国際会議場, 2016年9月12日-14日, 講演予稿集 pp. 174-175.
14. Yaegashi Y., **Yoshioka H.**, Takagi K., Unami K., and Fujihara M.: Finite element solution of a stochastic control model for optimal population management strategy of released *Plecoglossus altivelis*, 第21回計算工学講演会, 新潟県新潟市朱鷺メッセ, 2016年5月31日-6月2日, 計算工学講演会論文集第21巻, Paper No. F-4-3, pp. 1-6.
15. **Yoshioka H.**, Tagami D., Shirai T., and Yaegashi Y.: Mathematical modeling and numerical analysis of a nonlinear degenerate elliptic equation for upstream fish migration in rivers, 第21回計算工学講演会, 新潟県新潟市朱鷺メッセ, 2016年5月31日-6月2日, 計算工学講演会論文集第21巻, Paper No. F-4-2, pp. 1-6.
16. **吉岡 秀和**: 地表水ネットワークに生じる輸送現象の数値モデリングと数値解析・シミュレーション~現状と未解決課題~, 第2回水文・水資源学会「地表流の数値解析技術に関する研究グループ」2016年4月11-12日勉強会, 東京都東京大学. 要旨集 pp. 13-18.
17. 八重樫 優太, **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: 放流アユの最適管理戦略に関する有限要素解析, 京都大学計算科学ユニット若手研究交流会, 京都大学学術メディアセンター, 2016年3月9日.(口頭発表)
18. **吉岡 秀和**: 地域を取り巻く自然・社会科学的な事象の数値・数値モデリング, 平成27年度島根大学若手研究員に対する支援研究成果報告会, 島根大学松江キャンパス, 2016年3月8日.(ポスター発表)

19. **吉岡 秀和**, 八重樫 優太, 宇波 耕一, 藤原 正幸: 斐伊川水系における水・物質輸送動態 と魚類回遊の評価および予測, 平成 27 年度鳥根大学ミッション成果報告会, 鳥根県松江市くにびきメッセ, 2016年2月26日. (ポスター発表)
20. Yaegashi Y., **Yoshioka H.**, Unami K., and Fujihara M.: Numerical simulation on optimal countermeasure for feeding damage by great cormorant to inland fisheries based on stochastic control theory, AsiaSim2015, November 4-7, Jeju, Korea. Proceedings of AsiaSim2015, pp.46-53. (査読有り)
21. **Yoshioka H.** and Shirai T.: On analytical viscosity solution to a 1-D Hamilton-Jacobi-Bellman equation for upstream migration of individual fishes in rivers, EMAC2015, December 6 - 9, Adelaide, Australia. Proceedings, p.52.
22. **Yoshioka H.**, Yaegashi Y., Unami K., and Fujihara M.: Stochastic control of fishery resources using dynamical models for local behaviour and global population (邦題: 局所的行動と大域的個体群の動態モデルを用いた水産資源の確率制御) ランダム力学系理論とその応用, 京都大学数理解析研究所, 2015年9月27日-10月1日, 数理解析研究所講究録 No. 2028, pp. 134-147.
23. 八重樫 優太, **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: 内水面漁業におけるカワウ食害の一変数確率制御モデル, 第 72 回農業農村工学会京都支部講演会, 大津市ピアザ淡海, 2015年11月19日, 要旨集 pp. 116-117.
24. **Yoshioka H.**, Yaegashi Y., Unami K., and Fujihara M.: Optimal migration strategy of individual fishes to minimize the swimming cost based on a monomial function (邦題: 単項式関数に基づく遊泳コストを最小化する魚類個体の最適回遊戦略), 第 23 回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会, 名古屋市, 桜華会館, 2015年10月31日-11月2日, 第 23 回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会講演要旨集, pp. 127-128.
25. **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: 魚類遡上を記述する 1 次元ハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式, 日本応用数学会 2015 年度年会, 金沢大学, 2015年9月9日-11日, 講演予稿集 pp. 194-195.
26. **吉岡 秀和**, 宇波 耕一, 藤原 正幸: 連結グラフ上で定義されるハミルトン・ヤコビ・ベルマン方程式に対する適合有限要素スキーム (A conforming finite element scheme for Hamilton-Jacobi-Bellman equations defined on connected graphs), 第 20 回計算工学講演会, つくば国際会議場, 2015年6月8日-10日, 計算工学講演会論

文集第 20 巻, Paper No. F-9-3, pp. 1-6.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)  
取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

**吉岡 秀和**: 斐伊川研究に着手して, 瀬音 (斐伊川漁業協同組合広報誌) 第 8 号, p.8, 2015 年 7 月 1 日発行.

**吉岡 秀和**: 地表水ネットワークに生じる輸送現象の数値解析と数値シミュレーション, 第 1 回水文・水資源学会「地表流の数値解析技術に関する研究グループ」2016 年 2 月 19 日勉強会.

**吉岡 秀和**, 八重樫 優太, 宇波 耕一, 藤原 正幸, 白井 朋之, 田上 大助: アユ群れる川の再生に向けて 斐伊川でのアユ回遊に関する研究, 瀬音 (斐伊川漁業協同組合広報誌) 第 9 号, p.7.

武田 育郎, 山口 啓子, **吉岡 秀和**: 大学研究室めぐり (地域環境科学に潜む現代数学), 環境技術, Vol. 45, No. 7, pp. 385-388, 2016.

**吉岡 秀和**, 八重樫 優太: アユ群れる川の再生に向けて 斐伊川でのアユ回遊に関する研究, 斐伊川漁業協同組合役員会後の研修会における講演発表, 2016年7月23日, 下熊谷地域福祉サブセンター, 鳥根県雲南市.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉岡 秀和 (YOSHIOKA, HIDEKAZU)  
鳥根大学・生物資源科学部・助教  
研究者番号: 70752161

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし