

令和元年6月22日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K15005

研究課題名(和文)地下水と養魚池の高度利用によるバングラデシュ農村の持続的開発

研究課題名(英文) Sustainable development of Bangladeshi rural communities by integrated utilization of groundwater and fish ponds

研究代表者

宇波 耕一 (Unami, Koichi)

京都大学・農学研究科・准教授

研究者番号：10283649

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：稲作と漁撈の盛んなバングラデシュの低平地氾濫原に対象地区を設定し、地域環境工学的研究を行った。地下水と地表水の観測を行って、水動態を水理的、水文学的に明らかにした。稲作と漁撈の対立、共存関係について現地調査を行ったうえで、農閑期となる冷涼な12月～1月に地下水を養魚池に導入して水温を高め、稚魚の養殖を行うことの実行可能性を検討した。さらに、一般の水質管理や生物生産について、いくつかの数理モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

対象地区における観測と調査の結果、不圧帯水層は地域のcommonsである一方、人口貯水池の所有と管理は基本的に個人で行われていることが明らかとなった。とくに、養魚の生産性向上のため、有機物の投入、ポンプによる給水や排水、てぐす張りによる鳥類からの食害防止、水田との連結などの工夫がなされている場合が数多く見られた。農閑期に地下水を養魚池に導入することは、十分に実行可能であることは明らかとなったが、経済的に有利となるとは結論できなかった。

研究成果の概要(英文)：A study area was set up in the lowland of Bangladeshi floodplain where rice cultivation and inland fishery were thriving, to conduct environmental engineering researches. Observations and computational approaches have revealed hydro-environmental dynamics in the study area. Field studies were conducted to clarify conflict and coexistence relationship between rice cultivation and inland fishery. It was expected that introducing groundwater into a fish pond during cool fallow season from December to January would raise the water temperature promoting faster growth of juvenile fish, and its feasibility study was implemented. In addition, several mathematical models were constructed for water quality management and optimal biological production in general.

研究分野：水資源利用工学

キーワード：養魚池 不圧地下水 稲作灌漑 commons ロバスト最適化 水質動態 国際研究者協力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

世界各地の半乾燥地や湿潤地には、稲作と漁撈を軸とした農村地域が広く見られる。日本を含むモンスーンアジアでは、水田稲作、畑作、内水面漁業、自給的漁撈の対立、共存関係が様々な視点から論じられてきている。それらの関係は地域性が強く、たとえば研究代表者らは、西アフリカの湿潤サバンナではモンスーンアジアとはかなり異なった様相を有することを明らかにしてきた。現在、日本の農村地域では稲作と漁撈が対立あるいは独立の関係にあることが多いが、休耕田における養魚や生態系に配慮した「ゆりかご水田」のような取り組みも一部では行われている。一方、アジア、アフリカの低開発国では伝統的な共存関係が健在であると同時に、現代的な商業的内水面漁業が急速に普及しつつある。本研究で対象としたバングラデシュの地区では、2011 年より調査を継続しており、研究開始当初に以下に列挙する知見が得られていた。

- (1) 対象地区は雨季天水と乾季灌漑の水稲二期作地帯に属し、灌漑は不圧地下水の揚水による。
- (2) 伝統的漁法による漁撈活動は、自然湖沼、水田、人工貯水池などにおいて行われているが、地下水位に連動した自然湖沼の縮小や農薬の使用により衰退傾向にある。
- (3) 商業的内水面漁業に関しては、適切な時期における稚魚の供給不足が問題となっている。
- (4) 雨季天水米の収穫から乾季灌漑開始までの間(12 月～1 月)は冷涼な農閑期であるが、年間を通じて定温の地下水はこの期間中ほとんど揚水されない。

以上より、農閑期となる 12 月～1 月に、地下水を養魚池に導入して水温を高め、稚魚の養殖を行えば、地域の持続的発展、さらには世界の食糧安全保障に資するはずであるという着想に至った。

### 2. 研究の目的

2011 年から継続してきた地下水と地表水の観測を継続、拡張することにより、地域全体での水動態を水理学的、水文学的に明らかにする。また、稲作と漁撈の対立、共存関係に対して、対象とする農村地域社会の実態を深く理解したうえで、確率過程論やシステム制御理論の立場から数理モデルを構築し、最適な地下水揚水戦略を導出する。これらに基づいて、農閑期に地下水を養魚池に導入することの実行可能性を、重点集落における実証を通じて明らかにする。

### 3. 研究の方法

ジャムナ川はバングラデシュの主要な大川の一つであり、広大な低平地氾濫原は水稲二期作地帯となっている。その中に位置するジャマルプル市の郊外に、重点集落を選定した。対象地区(G 地区)は、重点集落と不圧帯水層を共有する範囲として定義される。その範囲を明らかにし、地下水動態のモデル化を行うため、当初 2 箇所のみとなっていた水位・水温観測井を 3 箇所に拡張した。すなわち、観測井を 1 箇所、新たに掘削した。また、パルスロガー付き転倒マス型雨量計を 2 箇所に設置し、降雨の時空間的分布を正確に把握するものとした。

重点集落においては、12 基の人工貯水池について、水質と棲息する生物、管理の実態を中心に調査を行う。とくに、もっぱら養魚を目的としているそのうちの 1 基に、従来の水位・水温観測計に加えて溶存酸素計を設置し、実際に農閑期に地下水を導水して稚魚の養殖を行う。写真 1 に、2016 年 12 月 21 日に実施した、養魚池への地下水導水の状況を示す。バングラデシュの冬季における養魚に関しては、資料が少なく、文献の渉猟ならびにバングラデシュ農業大学の水産学の専門家との情報交換により知見を蓄積する。実際には、インド亜大陸における代表的な食用コイ 3 種、すなわち、*Catla catla*、*Labeo rohita*、*Cirrhinus cirrhosus* が混合した稚魚群を地下水導水後の養魚池に放流した。一方、この養魚池を含むいくつかの人工貯水池は、灌漑用土水路を介して深層地下水の補給を受けることが可能となっており、水準測量を含む測量を行って、流水の動態を計算機上で再現できる状態にする。



写真 1: 不圧帯水層からの揚水ポンプ (左) およびホースで給水される養魚池 (右)

さらに、比較対照を行うため、滋賀県甲賀市の I 地区にも、自動観測機器を設置して調査を行った。I 地区は、茶園、山林、水田が主な土地利用で、灌漑用溜池が点在している。いくつかの水体に、*Oryzias latipes* や *Misgurnus anguillicaudatus* の個体群が確認されている。



#### 4. 研究成果

3 箇所の観測井における調査の結果、水位変動は広範囲にわたってほぼ同じ挙動を示し、G 地区のコモンズとして取り扱いうることが明らかとなった。2 箇所の雨量計の間でも、降雨時系列に顕著な差異は認められなかった。また、人口貯水池に対するさまざまな調査の結果、所有と管理は基本的に個人で行われていることが明らかとなった。とくに、養魚の生産性向上のため、有機物の投入、ポンプによる給水や排水、てぐす張りによる鳥類からの食害防止、水田との連結などの工夫がなされている場合が数多く見られた。

一方、農閑期に地下水を養魚池に導入することは、十分に実行可能であることは明らかとなったが、経済的に有利となるとは結論できなかった。また、水温や栄養塩類のような環境条件を制御変数として、生物成長の最速制御問題を定式化すると、数学的に病的な解が得られることが示唆された。



写真 2: 雨量計 (左), 観測井の新規鑿井 (中), および水田と連結された養魚池 (右)

数理モデルの構築を中心とした、公表済みの代表的な学術的成果を、以下 4 点にまとめる。

##### (1) 揚水ポンプから人工貯水池へ至る送水系の動的特性解析

地下水を人工貯水池に輸送する灌漑用土水路については、水準測量を行って地理情報を整理したうえで、すでに開発済みの 1 次元開水路流れの数値実験モデルを用いて非定常流を調べた。対象とする水路は、深層地下水を汲み上げる電動ポンプを上流端とし、水田、ならびに、養魚を主目的とした多数の人工貯水池に給水している。水路と人口貯水池は塩ビ製のパイプで接続されており、それぞれの水位の関係によって逆流を含む異なったパイプ流量が発生する。それらの関係式を、まず、室内水理実験を行って推定し、1 次元開水路流れの数値実験モデルに人工貯水池とともに組み込んだ。いくつかの入力パラメータは、現地で簡便な実験を行って決定した。数値実験の結果、異なった定常状態間の遷移における収束の速さは、パイプ流量を定める関係式が非線型であることに起因して、いくつかの本質的に異なる場合に分類できることが明らかとなった。

##### (2) 漁獲戦略のロバスト最適化

養殖漁業において、市場価格の不確実性に対してロバストな漁獲戦略を選択することは、持続可能性を保証するために重要である。1 基の養魚池を運用することを想定し、ポラティリティを含む市場価格の時間発展モデルを仮定すると、時間軸上に漁獲率を配分するロバスト最適化問題を定式化することができる。得られたロバスト最適化問題は、非線型連立方程式系の問題に帰着し、ニュートン・ラフソン法によって実際に解が得られることを数値実験によって示した。その結果は、直感によく合致したものであった。ロバスト最適化手法を時間軸上の最適配分問題に適用した点に、本研究の意義がある。

##### (3) 農村小流域における水質環境の動的管理

バングラデシュの G 地区と日本の I 地区を比較しつつ、稲作と漁撈を両立するための水質環境管理について、動的計画法にもとづいて検討した。G 地区の帯水層や I 地区の溜池を水貯留系として取り扱い、その貯留量ならびに稲と魚それぞれの生育段階を状態変数とするシステムに対して、最適制御問題を定式化した。制御変数は水貯留系からの取水の有無にとり、その影響が稲と魚の成長率に異なった効果をもたらすものとした。最小化すべき評価関数においては、取水コスト、稲と魚の収穫時の価値を考慮した。以上から決まるハミルトニアンは、凸性などのよい性質を有するものであり、ベルマン方程式の数値求解によって最適運用戦略を容易に求めることができた。

##### (4) 人工貯水池の水質動態

G 地区の養魚用人工貯水池と I 地区の灌漑用溜池に、1 分毎にデータを記録する多目的水質計を 1 昼夜設置し、詳細な水質動態を計測した。その結果を、確率微分方程式モデルにもとづいて、システムとしての安定性を解析した。計測した水質項目は、溶存酸素濃度、水温、pH、酸化還元電位である。いずれの地区においても、水生生物による溶存酸素の消費と生産が時間帯によって大きく異なることが推測された。そこで、1 時間毎に区切って安定性解析を行った。その結果、いくつかの場合にはシステムが不安定となることが判明し、安定であることを前提とした従来の水質管理手法を見直していくことの必要性が明らかとなった。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 11 件)

Unami K, Mohawesh O, Fujihara M (2019) Prototype and model of solar driven desalination plant in arid environment, *Thermal Science*, <https://doi.org/10.2298/TSCI180604097U>

Unami K, Mohawesh O, Fadhil RM (2019) Time periodic optimal policy for operation of a water storage tank using the dynamic programming approach, *Applied Mathematics and Computation*, 353, 418-431.

Alam AHMB, Unami K, Fujihara M (2018) Holistic water quality dynamics in rural artificial shallow water bodies, *Journal of Environmental Management*, 223, 676-684.

Ndede EO, Unami K, Fujihara M (2018) Numerical computation of robust optimal harvesting policy in a fish pond under uncertainty, *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 24(1), 33-36.

Unami K, Mohawesh O (2018) A unique value function for an optimal control problem of irrigation water intake from a reservoir harvesting flash floods, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(11), 3169-3182.

Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M (2018) A singular stochastic control model for sustainable population management of the fish-eating waterfowl *Phalacrocorax carbo*, *Journal of Environmental Management*, 219, 18-27.

Mabaya G, Unami K, Takeuchi J, Fujihara M, Yoshioka H (2017) Robust optimal model for sustainable joint production of green tea and paddy rice in Japanese agricultural watersheds, *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 11(1), 69-84.

Mabaya G, Unami K, Fujihara M (2017) Stochastic optimal control of agrochemical pollutant loads in reservoirs for irrigation, *Journal of Cleaner Production*, 146, 37-46.

Nakamichi T, Unami K, Fujihara M (2016) Optimal shapes of weirs for trapping migratory fish, *Jurnal Teknologi*, 78(1-2), 15-20.

Sharifi E, Unami K, Yangyuoru M, Fujihara M (2016) Verifying optimality of rainfed agriculture using a stochastic model for drought occurrence, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 30(5), 1503-1514.

Mabaya G, Unami K, Yoshioka H, Takeuchi J, Fujihara M (2016) Robust optimal diversion of agricultural drainage water from tea plantations to paddy fields during rice growing seasons and non-rice growing seasons, *Paddy and Water Environment*, 14(1), 247-258.

### 〔学会発表〕(計 10 件)

Unami K, Fadhil R (2019) Multi-state Markov chains applied to drought management in rainfed agriculture, *Modelling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, The Mathematics for Industry Research*, 13, 147-163.

Fujikura Y, Unami K, Okamoto H, Fujihara M (2019) Optimal control of an irrigation tank during a flood event, *Modelling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, The Mathematics for Industry Research*, 13, 165-188.

Unami K, Fujikura Y, Arai M, Fujihara M (2018) A discrete time dynamic

programming problem for a plant growth model with controlled parameters, 平成30年度農業農村工学会応用水理研究部会講演要旨集, 46-47.

Mean S, Unami K, Alam AHMB, Fujihara M (2018) Convergence to steady states of open channel flows in a paddy irrigation canal system with ponds, *PAWEES-INWEPF International Conference Nara 2018*, Session 2, 7.

Unami K, Mohawesh O, Fadhil R (2018) Deterministic dynamic programming of micro irrigation scheme, *The Eighth Scientific Agricultural Conference ESAC-2018*, 53.

柳井康太郎, 宇波耕一, Alam AHMB, 藤原正幸 (2017) 様々な灌漑条件下における降雨と地下水位の入出力関係の逆解析, 日本雨水資源化システム学会第25回研究発表会講演要旨集, 14-17.

Alam AHMB, Unami K, Fujihara M (2017) Stability of water quality dynamics in artificial shallow water bodies, *12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)*, Invited Paper, 176.

Unami K, Fadhil R, Kamal R, Mohawesh O (2017) The viscosity solution to an HJB equation governing the optimal release strategy from Bukit Merah Reservoir, Malaysia, *12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)*, Invited Paper, 178.

Alam AHMB, Unami K, Fujihara M (2017) Identification of water quality dynamics in shallow ponded water bodies, 日本雨水資源化システム学会第24回研究発表会講演要旨集, 85-87.

Sharifi E, Unami K, Mohawesh O, Fujihara M (2016) Operational rules for micro-dams solving stochastic control problems, *International Water Conference 2016: Water Resource in Arid Areas: The Way Forward*, 218-218.

〔図書〕(計4件)

Unami K, Chono C, Yoshioka H, Tagami D, Shirai T (Editors) (2019) Modelling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, *The Mathematics for Industry Research*, Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University, ISSN 2188-286X.

Yaegashi U, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M (2019) Impulse and Singular Stochastic Control Approaches for Management of Fish-Eating Bird Population. *New Trends in Emerging Complex Real Life Problems*, Edited by Daniele P, Scrimali L, Springer, 493-500.

Unami K, Mabaya G, Alam AHMB, Fujihara M (2018) Active Water Quality Management in Rural Small Watersheds, *Environmental Pollution. Water Science and Technology Library*, Springer Singapore, 77, 419-428.

Unami K, Mohawesh O (2018) A prototype of micro irrigation scheme in the Jordan Rift Valley and its mathematical modelling. *International Green Capitals Congress*, ISBN 978-973-6299-49-4.

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

なし

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

なし

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：アブル ハサン ムハマド バディウル アラム

ローマ字氏名：Abul Hasan Md. Badiul Alam

所属研究機関名：京都大学

部局名：農学研究科

職名：研究員(科学研究)

研究協力者氏名：ゴーデン マバヤ

ローマ字氏名：Goden Mabaya

所属研究機関名：京都大学

部局名：農学研究科

職名：博士課程学生

研究協力者氏名：柳井 康太郎

ローマ字氏名：Kotaro Yanai

所属研究機関名：京都大学

部局名：農学研究科

職名：修士課程学生

研究協力者氏名：エリザファン オティエノ ンデデ

ローマ字氏名：Elizaphan Otieno Ndede

所属研究機関名：京都大学

部局名：農学研究科

職名：修士課程学生

研究協力者氏名：ソバンナ メアン

ローマ字氏名：Sovanna Mean

所属研究機関名：京都大学

部局名：農学研究科

職名：修士課程学生

※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、研究者個人に帰属されます。