

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2016～2019

課題番号：16KT0018

研究課題名（和文）偏微分方程式の粘性解にもとづく灌漑スキームの最適運用

研究課題名（英文）Optimal Operation of Irrigation Schemes Based on Viscosity Solutions of Partial Differential Equations

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） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：乾燥・半乾燥地農業における水管理に関連した諸課題の解決に資する、数理的な方法論の構築を試みた。貯水系の最適制御問題に現れる偏微分方程式の粘性解について考察することを端緒とし、水文過程や生物生産に関連したさまざまな現象の中に、分数階微積分学や特異拡散といった数学的構造を見出すことへの展開を試みた。実世界における検証のため、ヨルダンに構築した小規模灌漑スキームのプロトタイプを運用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

貯水系の最適運用戦略について、支配方程式に対する粘性解の一意存在性や数値計算における誤差解析を行い、プロトタイプへ実装した。太陽エネルギーで駆動される除塩プラントを実際に建設、運用し、その熱力学系モデルを構築してパラメータ推定やモデル検証を実施した。水文過程や生物生産のモデル化において、分数階微積分学や特異拡散といった数学的概念を新たに導入した。これらは、乾燥・半乾燥地農業における水管理の合理化に貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：We attempted to establish a mathematical methodology that contributes to the solution of various issues related to water management in arid and semi-arid agriculture. Starting from the consideration of viscosity solutions of partial differential equations appearing in optimal control problems of water storage systems, mathematical structures such as fractional calculus and singular diffusion were sought in various phenomena related to hydrological processes and biological production. For verification in the real world, we operated a prototype of a small-scale irrigation scheme constructed in Jordan.

研究分野：水資源利用工学

キーワード：微分方程式 粘性解 数値解析 乾燥・半乾燥地農業 分数階微積分学 水管理 特異拡散 国際研究者協力

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。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

農業工学、とくに水資源の開発と管理においては、流体力学、確率論、統計数学、最適化、数値解析といった、数理的な方法論にもとづく実世界の課題解決が要請されている。しかしながら、本研究開始当初においては、数学と農業工学の連携が十分に機能しておらず、「連携探索型数理科学」の趣旨にもとづいた本研究の実施が極めて意味深いものとなることが期待された。研究代表者は、2014年度より、死海沿岸(ヨルダン)の塩性乾燥環境を対象地に設定し、自律分散型の灌漑スキームについての実証研究を行ってきた。その中で、従来の農業工学の枠組みにおいては想定されていない、数学分野との連携による解決を必要とする様々な課題が生じていた。実際、偏微分方程式論における粘性解の概念は、水の挙動や水管理者の意思決定過程をモデル化して考える際に不可欠であることが明らかとなってきた。そこで、塩性土壌における水、熱、塩分の挙動を支配する Richards 方程式や輸送方程式、灌漑スキームの最適運用戦略を支配する Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程式などの数理解析を行い、また、実世界における検証を実施することとした。

### 2. 研究の目的

研究開始当初の目的は、以下のとおりであった。

A) 塩類集積、水・熱・塩分と作物の相互作用などの農業工学的現象における因果関係を、Richards 方程式や輸送方程式などの数理モデルにもとづいて明らかにする。とくに、以下に関しては現代の数理解析的手法による理解が不可欠になると予想された。

- ・ 飽和不飽和の遷移において、体積含水率は連続だが通常の微分はできない関数となる。
- ・ 膨潤性の土壌においては領域そのものが大きく変形する。
- ・ マクロな透水係数は、通常の土壌と異なり、体積含水率の単調関数とならない。
- ・ 対象地では、通説と異なり、地下水位が十分低い状態で塩類集積が発生している。

B) 動的計画法を軸とした数理解析の支援により、灌漑スキームの最適運用が実行可能であることを明らかにする。A)で得られる知見にもとづき、水理・水文データの収集と作物成長に関する実験も行った上で、灌漑スキーム全体のダイナミクスを記述するモデルを構築する。そのモデルに対して最適制御問題を設定し、HJB 方程式の解析により最適運用戦略を導出する。重点的に検討すべき課題としては、以下のようなものが予想される。

- ・ モデルは、確率微分方程式と決定論的な微分方程式が混在し、HJB 方程式は退化楕円型偏微分作用素を含む。
- ・ 3~4 次元の HJB 方程式に対し、効率的、かつ、安定で精度のよい数値解析手法を開発する。
- ・ 実世界での検証実験を行う。

しかしながら、研究を展開していく過程において、以下のような課題が見出されてきたことから、若干、方針を転換した。A)に関しては、当初想定していた土壌物理現象よりも、水文過程や作物生育過程の中に新たな数学的構造を与えることによって現象の理解や実問題の解決へ寄与できることが次第に明らかとなってきた。とくに、分数階微積分学や特異拡散を、さまざまな場面で応用することを試みることにした。B)に関しては、時間方向に離散的な確率過程や制御問題に連続的なものにはない重要な課題があることが判明し、解析的な方法論により探求することとした。

### 3. 研究の方法

多岐にわたる数学と農学と諸課題について意見交換を行うため、複数の機関に所属する研究参加者間で数か月ごとに会合の場を設けた。さらに、「数理農学」という新たな学際的研究領域を開拓するため、2017年10月にクロアチアで行われた SDEWES2017 国際会議においては特別セッション「水・土・生態系のための数学」を企画し、2018年1月には京都大学数理解析研究所において RIMS 共同研究(グループ型)「数理農学の基盤づくりに向けて」を主催、2018年11月には九州大学 IMI 共同利用として研究集会「数理農学における時系列データのモデル化と解析」を主催した。2019年7月から8月にかけては、イラク国立モスル大学より Rasha M.S. Fadhil 講師を京都大学へ招へいし、主に水文過程に関連した諸課題について集中的に研究を実施した。

一方、Osama Mohawesh 教授をコーディネーターとしてヨルダン国ムタ大学と協力し、死海中央部のリサン半島に位置する同学試験農場を主たる対象地に選び、自律分散型灌漑スキーム構築(図1)、実測、実験を行った。そのため、Emran S.M. AlHuwemel 氏を作業員として雇用した。自律分散型灌漑スキームでは、まず、リサン半島中央部の荒野から枯川を流下して発生する突発的洪水を、底部取水型取水工と貯水池で収集する。収集される水は塩分を含んでいるため、撥水性材



図1：対象地の自律分散型灌漑スキーム

料を活用して淡水の露を収集する、太陽エネルギー駆動型の除塩プラントを建設した。さらに、客土、マルチング、遮光網による被覆、フィードバック点滴灌漑といった現代的な方法により、耐塩性作物である *Phoenix dactylifera* (ナツメヤシ) の高付加価値品種を栽培している。気象各項目と洪水収集施設の流量、除塩プラント内の水・熱収支、受益農地の土壌と作物の動態を詳細に観測するシステムを構築し、時系列データを収集した。また、さまざまな水体、土壌水の水質についても、多項目センサーや分光光度計による分析によって定量的に評価した。また、この対象地以外にも、ヨルダンの他の地域、日本、カンボジア、マレーシア、バングラデシュ、イラク、ガーナに研究フィールドを設け、数学の持つ普遍性を生かした研究を行うこととした。とくに、イラク北部の多地点における水文データを入手できる体制を整え、モスル市内には独自に気象・土壌物理自動観測装置を設置して運用している。

以上のような実世界の現象に対して、数理モデルの構築と解析を行った。

#### 4. 研究成果

公表済みおよび査読中の代表的な学術的成果を、以下6点にまとめる。

##### (1) 洪水・湧水レベルのモデル化

自律分散型灌漑スキームにおける洪水・湧水レベルの動態を包括的に記述するための、連続時間マルコフ過程モデルを提案した。モデルはランジュバン方程式で記述され、それに支配されるゼロ回帰型オルンシュタイン・ウーレンバック過程を、時間的に変化する洪水・湧水レベルとみなす。突発的洪水の発生に表す閾値と各流量の生起確率、ならびに、ランジュバン方程式の回帰係数と拡散係数が、観測された時系列データより同定すべきモデルパラメータである。実際には、遷移確率密度関数を支配するコルモゴロフ前進方程式の数値近似解を、有限要素法によって計算し、観測データと整合するようにパラメータ値を選んだ。

##### (2) 塩水貯水池の最適運用戦略

貯水池の水収支モデル、ならびに、(1)の洪水・湧水レベルモデルから構成される系について、確率制御問題を定式化し、動的計画法の枠組みを用いて解析した。これにより、突発的洪水を収集して得られる塩分を含む水を直接灌漑に利用する場合について、貯水池からの最適取水戦略が導出された。非線型かつ退化型の偏微分方程式である HJB 方程式の解析には、粘性解の概念が不可欠である。とくに、比較定理が成立すれば、粘性解の一意性と安定性が保証されることになる。一方、粘性解の存在を構成論的に示すための一般的な方法として、ペロンの方法が知られている。しかしながら、貯水池の運用問題においては、貯水池が空になる場合と満水する場合が特異な状況となるため、従来の方法をそのまま適用することはできない。そこで、特別な補助関数を導入することによって新たな比較定理を証明した。また、あるソボレフ空間から粘性解の空間への埋蔵を考えることによって粘性解の存在性を証明し、同時に、数値近似手法を開発した。

##### (3) 除塩プラントの熱動態モデル

除塩プラントは、ヨルダンに広く普及している幅 9m 長さ 51m のトンネル型ビニールハウス 1棟を購入し、改造して建設した。内部を掘削して遮水シートを張り、塩水貯水池とした。すなわち、取水構造物によって屋外の貯水池に誘導された濁塩水は、沈砂後にポンプで除塩プラント内の貯水池へ輸送される。除塩プラント内部両側には、撥水布を懸垂させ、天井ビニールの結露を効率的に収集できる構造とした。露起源の淡水の収集は、作業員が毎朝行い、淡水貯留タンクに蓄えることとした。この除塩プラントの動作原理を簡明に説明するため、水収支とエネルギー収支にもとづく常微分方程式系モデルを構築した。除塩プラントは、外部環境、塩水貯水池、床面、空気、撥水布、天井ビニールで構成されるものとし、冗長なものを除いた 3 本の水収支式と 5 本のエネルギー収支式を連立させた。このモデルは、ステファン・ボルツマン定数のような既知とみなしうる 10 のパラメータの他、さまざまな 20 のパラメータを含んでおり、2017 年 3 月から 2018 年 2 月までに実際に収集された露の量と気象観測データにもとづいて値を推定した。その結果、外部環境が高温となる 5 月から 9 月には、淡水生成効率が非常に高くなることが判明し、これにもとづいて 2018 年度に結露の収集方法を改良した。

##### (4) 淡水貯留タンクの最適運用戦略

(3)の除塩プラントで生成される淡水貯留用のタンクに関しては、離散時間決定論的動的計画問題を定式化し、解析した。作業員は、タンク貯留量の情報にもとづいて、タンク内の水を点滴灌漑システムに供給するバルブを開くか否かを決定するものとした。最大化すべき評価関数が、リブシツ連続である場合と有界変動である場合の両方について検討した。まず、ディスカウントを伴う無限時間問題では、評価関数のリブシツ連続性は価値関数に継承されることがわかる。そのため、年周期問題について不動点定理を適用することができ、価値関数の一意存在性が示される。ディスカウントを行わない場合や評価関数が有界変動である場合については、事後誤差評価の可能な数値手法を適用して数値実験を行った。その結果、スキバ点が最適運用戦略におけるバルブ開放の閾値として現れることがわかった。そして、淡水生成効率は夏と冬で大きく異なるにもかかわらず、バルブ開放の閾値は年間を通じてほとんど変動しない。これは、合理的な最適運用戦略として受容できるものである。

(5) 分数階微分方程式による流出過程のモデル化

自律分散型灌漑スキームの水源となる突発的洪水は、極端な乾燥環境のため、一時的であり、各イベントを明確に区別することができる。観測された降雨と流出の時系列データにもとづき、流出過程の新しいモデルの構築を試みた。まず、線型計画法のシンプレックス法を使用して、各流出時系列を上下から抑えるような、一対の外因性入力を備えた線型自己回帰モデル（ARX モデル）を同定する。外因性入力部分は従来の単位ヒドログラフ法に相当するが、自己回帰部分は離散化された分数階微分演算子と見なす。次に、降雨強度から流出流量への伝達関数を、各線型 ARX モデルを近似する線型分数階微分方程式に対して決定する。以上の線型モデルにもとづいて、流出の上限と下限、および異なるイベント間の摂動を、システム理論の枠組みにおいて考察した。

(6) 干ばつリスク評価のためのマルコフ連鎖モデルと全変動最小化流によるその正則化

イラク北部に広がる二ネベ平原は、乾燥した暑い夏と湿った冬が特徴で、一年生の天水作物の栽培が可能である。数十年來の気候変動による深刻な降雨の減少は、干ばつのリスクを高めている。実時間で干ばつリスク評価に適用することを念頭に、干天期間の長さを状態変数とし、降雨強度の確率分布が付随する、新しい多状態マルコフ連鎖モデルを開発した。このモデルを、1975 年から 2018 年の間に二ネベ平原のモスル市で観測された日降雨量データにもとづいて実証的に運用した。まず、コルモゴロフ-スミルノフ検定を適用することにより、降雨強度がそれぞれの異なるガンマ分布に従う 2 つのサブ期間を抽出した。次に、マルコフ連鎖を決定する遷移確率を観測データから推定したが、データ数が十分でない場合に不自然な振動が発生した。この振動を、極値である 0 と 1 を制御する縮退係数を有する特異拡散方程式の解となる全変動最小化流を用いて正則化した。このモデルの応用例として、将来の干天継続日数、ならびに、特定の終端日までの総降雨量に関し、期待値と分散を計算した。それらの統計量は、当日までの干天期間の長さの情報にもとづいて、干ばつリスクを定量化するものである。詳細な干ばつリスク評価の結果は、1980 年代から 2010 年代への気候変動が干天期間の長さや降雨量に関してレジームシフトをもたらしたことを示唆し、二ネベ平原で実施されている天水農業の破綻を警告するものとなった。そこで、そのリスクを回避するための対策について検討した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 28件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Mean S, Unami K, Fujihara M	4. 巻 269
2. 論文標題 Level-set methods applied to the kinematic wave equation governing surface water flows	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 110784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110784">https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110784</a>	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 Unami K, Mohawesh O, Fujihara M	4. 巻 24(2A)
2. 論文標題 Prototype and model of solar driven desalination plant in arid environment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Thermal Science	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2298/TSCI180604097U">https://doi.org/10.2298/TSCI180604097U</a>	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 Hoermann G, Okamoto H	4. 巻 39
2. 論文標題 Weak periodic solutions and numerical case studies of the Fornberg-Whitham equation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Discrete & Continuous Dynamical Systems - A	6. 最初と最後の頁 4455-4469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/dcds.2019182	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 Miyaji T, Okamoto H	4. 巻 36
2. 論文標題 Existence proof of unimodal solutions of the Proudman-Johnson equation via interval analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 287-298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s13160-018-00339-x">https://doi.org/10.1007/s13160-018-00339-x</a>	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 宇波耕一	4. 巻 88
2. 論文標題 技術研究「マルコフ連鎖による連続干天日数のモデル化」	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土地改良の測量と設計	6. 最初と最後の頁 22-27
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 Unami K, Mohawesh O, Fadhil RM	4. 巻 353
2. 論文標題 Time periodic optimal policy for operation of a water storage tank using the dynamic programming approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Mathematics and Computation	6. 最初と最後の頁 418-431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.005">https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.02.005</a>	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 Yoshioka H, Shirai T, Tagami D	4. 巻 7
2. 論文標題 A Mixed optimal control approach for upstream fish migration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems	6. 最初と最後の頁 101-121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0221">http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0221</a>	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 Alam AHMB, Unami K, Fujihara M	4. 巻 223
2. 論文標題 Holistic water quality dynamics in rural artificial shallow water bodies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 676-684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jenvman.2018.06.076	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 Unami K, Mohawesh O	4. 巻 32
2. 論文標題 A unique value function for an optimal control problem of irrigation water intake from a reservoir harvesting flash floods	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Stochastic Environmental Research and Risk Assessment	6. 最初と最後の頁 3169-3182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s00477-018-1527-z">https://doi.org/10.1007/s00477-018-1527-z</a>	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 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara Masayuki	4. 巻 219
2. 論文標題 A singular stochastic control model for sustainable population management of the fish-eating waterfowl <i>Phalacrocorax carbo</i>	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Management	6. 最初と最後の頁 18-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jenvman.2018.04.099	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 Kim S-C, Miyaji T, Okamoto H	4. 巻 35
2. 論文標題 Unimodal solutions of the generalized Constantin-Lax-Majda equation with viscosity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 1065-1083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1007/s13160-018-0320-1">https://doi.org/10.1007/s13160-018-0320-1</a>	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 Ndede EO, Unami K, Fujihara M	4. 巻 24
2. 論文標題 Numerical computation of robust optimal harvesting policy in a fish pond under uncertainty	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Rainwater Catchment Systems	6. 最初と最後の頁 33-36
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 Unami K, Mabaya G, Alam AHMB, Fujihara M	4. 巻 77
2. 論文標題 Active water quality management in rural small watersheds	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Environmental Pollution, Water Science and Technology Library	6. 最初と最後の頁 419-428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-10-5792-2_33	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 Kim S-C, Miyaji T, Okamoto H	4. 巻 65
2. 論文標題 Unimodal patterns appearing in the two-dimensional Navier-Stokes flows under general forcing at large Reynolds numbers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 European Journal of Mechanics - B/Fluids	6. 最初と最後の頁 234-246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.euromechflu.2017.04.004	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 Okamoto H	4. 巻 77
2. 論文標題 Models and special solutions of the Navier-Stokes equations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Handbook of Mathematical Analysis in Mechanics of Viscous Fluids	6. 最初と最後の頁 1-52
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-10151-4_14-1	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 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M	4. 巻 23(1)
2. 論文標題 Optimal installation of overhead lines (Tegusu) to reduce predation from piscivorous birds to Plecoglossus altivelis (Ayu) taking into account of its decaying protection effect	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Rainwater Catchment Systems	6. 最初と最後の頁 13-18
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 Nakamichi T, Unami K, Fujihara M	4. 巻 78
2. 論文標題 Optimal shapes of weirs for trapping migratory fish	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Jurnal Teknologi	6. 最初と最後の頁 15-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.11113/jt.v78.7254">https://doi.org/10.11113/jt.v78.7254</a>	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 Mabaya G, Unami K, Yoshioka H, Takeuchi J, Fujihara M	4. 巻 14
2. 論文標題 Robust optimal diversion of agricultural drainage water from tea plantations to paddy fields during rice growing seasons and non-rice growing seasons	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Paddy and Water Environment	6. 最初と最後の頁 247-258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10333-015-0494-y	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 Sharifi E, Unami K, Yangyuoru M, Fujihara M	4. 巻 30
2. 論文標題 Verifying optimality of rainfed agriculture using a stochastic model for drought occurrence	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Stochastic Environmental Research and Risk Assessment	6. 最初と最後の頁 1503-1514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00477-015-1129-y	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 Mabaya G, Unami K, Takeuchi J, Fujihara M, Yoshioka H	4. 巻 11
2. 論文標題 Robust optimal model for sustainable joint production of green tea and paddy rice in Japanese agricultural watersheds	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Innovation and Sustainable Development	6. 最初と最後の頁 69-84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJISD.2017.080618	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 Mabaya G, Unami K, Fujihara M	4. 巻 146
2. 論文標題 Stochastic optimal control of agrochemical pollutant loads in reservoirs for irrigation	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 37-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2016.05.108	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 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M	4. 巻 603
2. 論文標題 Numerical simulation of a Hamilton-Jacobi-Bellman equation for optimal management strategy of released <i>Plecoglossus altivelis</i> in river systems	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 91-101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-10-2158-9_8	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 Yoshioka H, Yaegashi Y, Unami K, Fujihara M	4. 巻 645
2. 論文標題 Application of stochastic control theory to biophysics of fish migration around a weir equipped with fishways	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Communications in Computer and Information Science	6. 最初と最後の頁 190-200
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-10-2669-0_21	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 Yoshioka H, Yaegashi Y, Unami K, Fujihara M	4. 巻 72
2. 論文標題 Identifying the cost function for upstream migration of individual fishes in 1-D open channels based on an optimal control theory	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser.B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_1147-I_1152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.72.I_1147	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 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M	4. 巻 22(1)
2. 論文標題 Optimal strategies for harvesting and predator extermination to sustain <i>Plecoglossus altivelis</i> (Ayu) population in stochastic river environment	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Rainwater Catchment Systems	6. 最初と最後の頁 7-13
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 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M	4. 巻 8(2)
2. 論文標題 An optimal management strategy for stochastic population dynamics of released <i>Plecoglossus altivelis</i> in rivers	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing	6. 最初と最後の頁 1-16
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 Cho C-H, Okamoto H, Shoji M	4. 巻 33
2. 論文標題 A blow-up problem for a nonlinear heat equation in the complex plane of time	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 145-166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13160-015-0203-7	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 岡本久	4. 巻 71(8)
2. 論文標題 巨大渦の安定性 2次元非圧縮高レイノルズ数の流れの中で	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 526-532
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.71.8_526	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43件(うち招待講演 11件/うち国際学会 23件)

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 Rainfall-runoff models with fractional derivatives applied to Kurau River Basin, Perak, Malaysia
3. 学会等名 The 5th International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Magero EJ
2. 発表標題 Nonlinear growth dynamics of date palms responding to environmental parameters
3. 学会等名 The 5th International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 A nominal model upper bounding flash flood events in a wadi of the Jordan Rift Valley
3. 学会等名 5th International Symposium on Flash Floods in Wadi Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 Generalized additive models for water balance in Bukit Merah Reservoir, Perak, Malaysia
3. 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mean S
2. 発表標題 Application of level-set method to analysis of surface water flows
3. 学会等名 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nop C
2. 発表標題 A Markov chain model for precipitation to be used in optimal reservoir operation
3. 学会等名 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 A discrete time dynamic programming problem for a plant growth model with controlled parameters
3. 学会等名 農業農村工学会応用水理研究部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshioka H
2. 発表標題 On a hyperbolic-elliptic system having discontinuous self-similar solutions
3. 学会等名 Modeling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, IMI Workshop, Kyushu University (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yaegashi Y
2. 発表標題 Stochastic optimal impulse control policy for management of seasonal fish-eating bird population dynamics
3. 学会等名 Modeling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, IMI Workshop, Kyushu University (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 Multi-state Markov chains applied to drought management in rainfed agriculture
3. 学会等名 Modeling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, IMI Workshop, Kyushu University (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fujikura Y
2. 発表標題 Optimal control of an irrigation tank during a flood event
3. 学会等名 Modeling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, IMI Workshop, Kyushu University (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤倉大和
2. 発表標題 豪雨による溜池決壊を想定した決定論的動的計画問題
3. 学会等名 第26回日本雨水資源化システム学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新井芽丹
2. 発表標題 塩性乾燥地域における灌漑ナツメヤシ成長の一般化加法モデル
3. 学会等名 第26回日本雨水資源化システム学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yaegashi Y
2. 発表標題 A time-dependent stochastic optimal impulse control model for management of fish-eating bird
3. 学会等名 第26回日本雨水資源化システム学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 Deterministic dynamic programming for operation of micro irrigation scheme
3. 学会等名 The Eighth Scientific Agricultural Conference ESAC-2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fadhil RM
2. 発表標題 Markovian properties and distribution of daily rainfall in northern Iraq
3. 学会等名 The Eighth Scientific Agricultural Conference ESAC-2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mean S
2. 発表標題 Convergence to steady states of open channel flows in a paddy irrigation canal system with ponds
3. 学会等名 PAWEES & INWEPF International Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Unami K
2. 発表標題 A prototype of micro irrigation scheme in the Jordan Rift Valley and its mathematical modelling
3. 学会等名 International Green Capitals Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤倉大和・宇波耕一・藤原正幸
2. 発表標題 雨水ハーベスティングシステムの運用に対する動的計画法の応用
3. 学会等名 平成29年度農業農村工学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 柳井康太郎・宇波耕一・Alam AHMB
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第25回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Ndede EO, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Robust optimal harvesting policy for fish in a pond with price volatility
3. 学会等名 平成29年度農業農村工学会応用水理研究部会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Unami K, Mohawesh O, Fujikura Y, Fujihara M
2. 発表標題 Lipschitz continuity of value functions solving a dynamic programming problem for a water storage tank
3. 学会等名 平成29年度農業農村工学会応用水理研究部会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤倉大和・宇波耕一
2. 発表標題 灌漑用貯水池の最適運用戦略
3. 学会等名 RIMS共同研究（グループ型）数理農学の基盤づくりに向けて
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Unami K, Mohawesh O
2. 発表標題 A prototype of micro irrigation scheme in the Jordan Rift Valley and its mathematical modelling
3. 学会等名 International Green Capitals Congress（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉岡秀和
2. 発表標題 生物移動の数理モデルにおける粘性解
3. 学会等名 RIMS共同研究(グループ型)数理農学の基盤づくりに向けて
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内潤一郎・宇波耕一・吉岡秀和
2. 発表標題 農学系学部・大学院における数学教育
3. 学会等名 RIMS共同研究(グループ型)数理農学の基盤づくりに向けて
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Okamoto H
2. 発表標題 Numerical pursuit of unimodal solutions in 2D Navier-Stokes equations at large Reynolds numbers
3. 学会等名 2nd Vietnam International Applied Mathematics Conference(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Okamoto H
2. 発表標題 Existence proof of unimodal solutions via interval analysis
3. 学会等名 Mathematics of Fluid Motion: Theory and Computation, Korea Institute for Advanced Study(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Okamoto H
2. 発表標題 Existence proof of solutions of fluid mechanical equations via interval analysis
3. 学会等名 Mathematical Aspects of Physical Oceanography, The Erwin Schroedinger Institute (Vienna Austria) Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mohawesh O, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Designing and modeling on-farm desalination system using dew collection technology
3. 学会等名 3rd International Conference on Agricultural and Food Engineering (CAFEi2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 宇波耕一・オサマ モハウエシ・藤原正幸
2. 発表標題 様々な制御理論のチェックゲート運用に対する適用可能性
3. 学会等名 平成28年度農業農村工学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Optimal installation of overhead lines preventing piscivorous birds in stochastic river environment
3. 学会等名 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Optimal installation of overhead lines with decaying protection effect for fish from predators
3. 学会等名 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中道理介・宇波耕一・藤原正幸
2. 発表標題 特異拡散型方程式を用いた魚群形状のモデル化
3. 学会等名 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Alam AHMB, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Identification of water quality dynamics in shallow ponded water bodies
3. 学会等名 第24回日本雨水資源化システム学会大会研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Alam AHMB, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Rural water quality management in small watersheds
3. 学会等名 平成28年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Fujikura Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Mathematical analysis of a primitive dynamic programming problem for water reservoirs
3. 学会等名 平成28年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 増田重明・宇波耕一・藤原正幸
2. 発表標題 定量的補助金制度設計に向けた貯留系の水質動態モデル
3. 学会等名 平成28年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 藤倉大和・宇波耕一・藤原正幸
2. 発表標題 雨水ハーベスティングシステムの運用に対する動的計画法の応用
3. 学会等名 平成29年度農業農村工学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Unami K, Fadhil R, Kamal MR, Mohawesh O
2. 発表標題 The viscosity solution to an HJB equation governing the optimal release strategy from Bukit Merah Reservoir, Malaysia
3. 学会等名 The 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Alam AHMB, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Stability of water quality dynamics in artificial shallow water bodies
3. 学会等名 The 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshioka H, Shirai T, Tagami D
2. 発表標題 Viscosity solutions of a mathematical model for upstream migration of potamodromous fish
3. 学会等名 The 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yaegashi Y, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M
2. 発表標題 Optimal policy of predator suppression for sustainable inland fishery management
3. 学会等名 The 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計5件

1. 著者名 Unami K, Chono C, Yoshioka H, Tagami D, Shirai T	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University	5. 総ページ数 305
3. 書名 Modelling and Analysis of Time Series Data in Math-Agro Sciences, The Mathematics for Industry Research	

1. 著者名 Yaegashi U, Yoshioka H, Unami K, Fujihara M	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 471
3. 書名 New Trends in Emerging Complex Real Life Problems	

1. 著者名 Unami K, Mohawesh O	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Konya Metropolitan Municipality	5. 総ページ数 240
3. 書名 International Green Capitals Congress	

1. 著者名 Okamoto H	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 3045
3. 書名 Handbook of Mathematical Analysis in Mechanics of Viscous Fluids	

1. 著者名 Unami K, Mabaya G, Alam AHMB, Fujihara M	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 571
3. 書名 Environmental Pollution, Water Science and Technology Library	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Smart reservoir management for harsh, arid...  
[https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research\\_results/2017/180305\\_3.html](https://www.kyoto-u.ac.jp/en/research/research_results/2017/180305_3.html)  
 砂漠の洪水を灌漑用水に変える - ヨルダンの乾燥地で数理的最適戦略によるプロトタイプを運用 -  
[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2017/180305\\_3.html](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2017/180305_3.html)  
 数理農学の基盤づくりに向けて  
<http://www.wre.kais.kyoto-u.ac.jp/RIMSjan2018/MAjp.html>

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	岡本 久  (Okamoto Hisashi)  (40143359)	学習院大学・理学部・教授    (32606)	
研究分担者	吉岡 秀和  (Yoshioka Hidekazu)  (70752161)	島根大学・学術研究院環境システム科学系・助教    (15201)	
研究協力者	アラム アブル ハサン ムハマド バディウル  (Alam Abul Hasan Md. Badiul)		
研究協力者	モハウエシ オサマ  (Mohawesh Osama)		
研究協力者	ファディル ラシャ モハンマド サミ  (Fadhil Rasha Mohammad Sami)		



## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	シャリフィ エルファネ (Sharifi Erfaneh)		
研究協力者	マバヤ ゴーデン (Mabaya Goden)		
研究協力者	八重樫 優太 (Yaegashi Yuta)		
研究協力者	ミーソ ソバナ (Mean Sovanna)		
研究協力者	ンデデ エリザファン オティエノ (Ndede Elizaphan Otieno)		
研究協力者	藤倉 大和 (Fujikura Yamato)		
研究協力者	ノップ チャンピサイ (Nop Channpisey)		
研究協力者	マゲロ エイリーン ジョアン (Magero Eileen Joan)		