

令和元年6月22日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2018

課題番号：26257415

研究課題名(和文) 死海沿岸地域の農地における水資源ポートフォリオ

研究課題名(英文) Water resources portfolio for farmlands along the Dead Sea

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) 29,300,000円

研究成果の概要(和文)：死海リサン半島の塩性乾燥環境下において、突発的洪水の集水施設、ならびに、太陽エネルギーで駆動される除塩プラントを備えた、小規模灌漑スキームのプロトタイプを構築した。客土やマルチングなどの現代的栽培技術を導入したナツメヤシの圃場に、塩水と淡水のポートフォリオを考えつつ、重力で駆動される点滴灌漑を行っている。各構成要素の最適設計や最適運用に対して、さまざまな数理科学的方法論を適用している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数値流体力学と実験水理学の知見を活用しつつ、洪水収集施設の合理的設計手法を提示した。洪水・湧水レベルの動態を、確率微分方程式を用いてモデル化し、観測データと整合するようにパラメータを決定した。貯水池の最適運用戦略を支配する方程式に対して、粘性解が一意存在することを証明した。除塩プラントの熱力学系モデルを構築し、パラメータ推定やモデル検証を実施した。淡水を点滴灌漑水路系に供給する貯留タンクの最適運用戦略に関して、離散時間動的計画法の枠組みにおいて数理解析を行った。

研究成果の概要(英文)：A prototype of micro irrigation scheme equipped with a flash flood harvesting facility and a solar energy driven desalination plant has been constructed in an arid environment of the Lisan Peninsula of the Dead Sea. The flash flood harvesting facility is an innovative intake structure constructed at the downstream end of a valley to divert ephemeral flash floods into an open-air reservoir. The desalination plant is an innovated greenhouse with another reservoir dug inside to efficiently collect condensed dew of fresh water using water repellent cloth. A portfolio of the saline water and the fresh water is considered to perform gravity driven drip tube irrigation for trees of tissue culture Phoenix dactylifera (date palm). Up-to-date farming technologies practiced in the command area include soil dressing with peatmoss and biochar, mulching, and use of shading nets. Different mathematical methodologies are employed for optimal design and operation of each constituent.

研究分野：水資源利用工学

キーワード：水資源 ポートフォリオ問題 乾燥地農業 関数解析 死海 国際研究者交流 国際情報交換 ヨルダ

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

1. 研究開始当初の背景

ヨルダン地溝帯の東岸最低位部に位置する死海沿岸地域は、温暖な気候が通年の作物栽培に適しているものの、極端な水不足と土壌塩分が農業生産性に対する重大な制約条件となっている。この地域の一般的な農地においては、ヨルダン高原に築造された多目的大ダムから水路網で送水される広域利水システム、ならびに、地域の地下に存在する帯水層からの揚水に依存して、灌漑農業が行われている。大ダムを新規に開発できるサイトはもはや残されておらず、難民の流入する都市部における水需要の急増もあり、広域利水システムの機能は限界に達している。また、帯水層は、超高塩分濃度の死海に連続し、ヨルダン高原で涵養された淡水が密度成層の効果で保持されている、水理・水文学的に脆弱な「淡水レンズ」である。一方、圃場レベルにおいては、点滴灌漑とマルチングを軸とした徹底的な節水・除塩管理が実践されている。ただし、水の需給バランスを調整するための貯水池（バッファープOND）の運用に関しては最適化がなされていない。このような背景においては、都市用水や工業用水と競合しない灌漑農業専用の水源を新たに開発し、既存のものと一緒に持続可能な運用戦略を模索することが重要である。

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。

死海沿岸地域を対象として、(1) 再生可能水資源の新規開発手法を提示し、(2) 既存水資源と併せて動態の数値モデル化を行い、(3) 最適水資源ポートフォリオを導出し、適用する。

(1) 再生可能水資源の新規開発手法を提示し、実現性を明らかにする

- (1)- 洪水時の雨水ハーベスティング：荒野の小流域において突発的に発生する洪水を、底部取水型溪流取水工により収集、貯留する手法を提示する。水文統計学的手法ならびに数値流体力学的手法によって構造物の最適水理設計を行い、実際に施工する。
- (1)- 圃場内での露収集：傾斜地の地表面を撥水層で覆い、その上にポリカーボネート板のようなプラスチック製品を設置すれば、塩性土壌においても相当量の淡水を収集できることが実験的に確認されつつある。この技術を現地にて試験し、有効性を実証する。

(2) 水資源動態の数値モデル化を行い、現象の包括的理解が可能となることを明らかにする

- (2)- 広域利水システム、淡水レンズ、洪水時の雨水ハーベスティング、圃場内での露収集を選択可能な水源として有する灌漑農地について、水、塩分、営農の動態が包括的に再現されるようなモデルを、確率微分方程式を軸として構築する。

(3) 最適水資源ポートフォリオを導出し、持続可能な農業生産に資することを明らかにする

- (3)- モデル化された水資源動態を制御の対象とし、確率制御問題を定式化する。モデル上のあらゆる確率事象に対する最適戦略、すなわち、最適水資源ポートフォリオを、その支配式であるハミルトン・ヤコビ・ベルマン(HJB)方程式の解析によって導出する。とくに、数値流体力学的手法を応用して具体的な運用戦略を定め、対象地域の農地に適用する。

研究開始後に、(1)- については、ビニールハウスを改造して除塩プラントを構築することがより有効であることが明らかとなり、実際に建設、実証した。(2)- については、確率微分方程式に限定することなく、さまざまな数値モデルの適用を試みた。

3. 研究の方法

ヨルダン国ムタ大学と協力し、実測、理論構築、実験を行った。とくに、死海中央部のリサン半島に位置する同学試験農場を中心に、実証試験を実施した。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収集するため、底部取水型取水工と貯水池を設計、施工した。収集される水は塩分を含んでいるため、撥水性材料を活用して露を収集する、太陽エネルギー駆動型の除塩プラントを開発した。細部の最適水理設計には、水文統計学的手法や数値流体力学的手法を活用した。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する受益農地を開発した。これらは、ひとつの自律分散型灌漑スキームを構成するものである(図1)。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。以上のようなフィールドにおける研究と相補的に、さまざまな数理科学的方法論にもとづいて各構成要素の最適設計や最適運用戦略の導出を行った。



図1：構築した自律分散型灌漑スキーム

4. 研究成果

自律分散型灌漑スキームのプロトタイプは、試行錯誤的な改修を経て、2016年度の後期から本格的に稼働している。公表済みの代表的な学術的成果を、以下5点にまとめる。

(1) 底部取水型取水構造物の水理設計と施工

取水構造物は、洪水時のみに水流が発生する谷底において底部取水を行うための全幅16mの溝、ならびに、取水した水を貯水池に導くための長さ60mの導水路から構成されている。導水路には余水吐を備えている。水準調査と水文学的考察の結果、取水構造物の横断面は幅1.6mの矩形とした。詳細については、数値実験と水理模型実験を行って設計した。数値実験は、すでに開発済みの有限体積スキームを用い、2次元浅水方程式を離散化して実行した。水理模型実験は、水平方向縮尺1/8、粗度縮尺1/1の歪模型を、京都大学総合農業水利研究実験場に製作して実施した。プロトタイプは、水路底は鉄筋コンクリート、側壁はコンクリートブロックで建設した。

(2) 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。

(3) 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、(2)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。

(4) 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。

(5) 淡水貯留タンクの最適運用戦略

(4)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 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 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.

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.

Yoshioka H, Fujihara M, Unami K (2015) A dual finite volume method scheme for catastrophic flash floods in channel networks, *Applied Mathematical Modelling*, 39(1), 205-229.

Unami K, Mohawesh O, Sharifi E, Takeuchi J, Fujihara M (2015) Stochastic modelling and control of rainwater harvesting systems for irrigation during dry spells, *Journal of Cleaner Production*, 88, 185-195.

Yoshioka H, Unami K, Fujihara M (2014) A finite element/volume method model of the depth-averaged horizontally 2D shallow water equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 75(1), 23-41.

[学会発表](計9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.

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.

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.

Bashiri H, Unno Y, Sharifi E, Unami K, Fujihara M (2016) Precise fertigation using multiply-connected drip tube networks, *International Water Conference 2016: Water Resource in Arid Areas: The Way Forward*, 37-37.

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.

Sharifi E, Unami K, Mohawesh O, Nakamichi T, Kinjo N, Fujihara M (2015) Design and construction of a hydraulic structure for rainwater harvesting in arid environment, *E-proceedings of the 36th International Association for Hydro-environment Engineering and Research (IAHR) Congress*, 3375-3386.

[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〕

ホームページ等

Smart reservoir management for harsh, arid environments

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

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：オサマ モハウエシ

ローマ字氏名：Osama Mohawesh

所属研究機関名：ヨルダン国立ムタ大学

部局名：科学研究院/農学部/死海環境エネルギー研究ファイサル王子センター

職名：教授

研究協力者氏名：ラシャ モハンマド サミ ファディル

ローマ字氏名：Rasha Mohammad Sami Fadhil

所属研究機関名：イラク国立モスル大学

部局名：工学部

職名：講師

研究協力者氏名：ハーリド アブーサムハダネ, ムタセム ガザル

ローマ字氏名：Khalid S. M. Abu-Samhadaneh, Mutasem Ghazal

所属研究機関名：ヨルダン国立ムタ大学

部局名：死海環境エネルギー研究ファイサル王子センター

職名：研究員

研究協力者氏名：吉岡 秀和, ゴーデン マバヤ, エルファネ シャリフィ

ローマ字氏名：Hidekazu Yoshioka, Goden Mabaya, Erfaneh Sharifi

所属研究機関名：京都大学

部局名：農学研究科

職名：(元)博士課程学生

※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。