

令和 6 年 5 月 23 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H02309

研究課題名（和文）水田内の水温・地温分布シミュレーションに基づくスマート水田水管理

研究課題名（英文）Smart paddy water management based on simulation of ponded water and soil temperature variation in paddy fields

研究代表者

木村 匡臣（KIMURA, Masaomi）

近畿大学・農学部・准教授

研究者番号：80725664

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、水田用遠隔操作水門（IoT水門）を設置した水田圃場を対象に、田面水温・地温分布等の温度環境の変化の特徴を現地計測により明らかにした。つづいて、大気・植生群落・田面水・地中の熱移動を考慮した水田内の鉛直熱収支モデルを構築し、これに深層学習の手法を組み込むことによって精度を改良した。さらに、田面水の平面2次元流数値計算モデルと組み合わせることで、田面水の流れ場を考慮した水温・地温分布シミュレーションモデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により開発された田面水の流れ場を考慮した水温・地温分布シミュレーションモデルにより、水温・地温分布の予測結果を考慮したIoT水門の開閉操作アルゴリズムの提案が可能となり、水稻の品質向上に向けたスマート水田水管理への展開が期待される。また、本シミュレーションモデルを応用することで、スマート水田水管理技術による水田内の温度調節機能のポテンシャルの評価が可能となった。

研究成果の概要（英文）：In this study, we clarified the characteristics of temperature environment changes, such as surface water temperature and soil temperature distribution, through field measurements in a paddy field equipped with a remotely operated sluice gate (IoT sluice gate). Subsequently, we developed a vertical heat balance model for the rice paddies. This model considers heat transfer between the atmosphere, vegetation community, ponded water, and the ground, and was enhanced by incorporating a deep learning method. Furthermore, we constructed a simulation model of water and soil temperature distribution that accounts for the flow field of rice field water. This was achieved by integrating it with a two-dimensional numerical model of paddy water flow.

研究分野：水利環境工学

キーワード：スマート農業 田面水温 水田用IoT水門 高温障害対策 機械学習

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

(1) 水稻の高温登熟障害と水田内の温度環境

近年、水稻の登熟期の高温を原因とする高温登熟障害の発生、米の品質低下が大きな問題となっている。高温登熟障害の発生機構は、気温や日射量等、様々な気象因子による影響を受けているとされるが、同一の気象条件下では、出穂期後の水温・地温を下げることによりその発生割合を低減させられることが実証的に明らかにされている。そこで、掛け流し灌漑や飽水管理等、水田水管理の工夫によって水温・地温・水稻を冷却する手法が推奨されており、限られた水資源、水源水温の条件の制約下で、より効果的に水田内の温度環境の調節機能を発揮する方策が求められている。

水田内の温度環境に着目してみると、その分布は区画内で均一ではなく、接続する水路の水温の影響を強く受ける水口から田面水の出口となる水尻（落水口）にわたって、2次元的な分布を形成していることが知られている。つまり水田区画内の水温・地温の分布は、日射や気温、風速等の気象条件のほかに、水田区画に取水する用水量（流速）や、湛水深といった、田面水の流れ場の特性にも影響を受けて時空間的に変動している。

(2) ICT 水田水管理技術の発展と課題

水田稲作経営の大規模化、担い手への農地集積をより一層推進するためには、水田稲作における水管理に要する作業時間・労力の軽減が必要とされており、各種 ICT 機器を活用した次世代型の水管理システムのデザイン、試験導入が各地で進められている。このような背景の下、これまでにさまざまなタイプの自動給水栓や水門の遠隔操作技術が開発されており、市販化にまで至っているものも数多い。

しかし、その導入コストが依然として高価であることから、大規模な普及に至っているとはいえない。ICT 自動給水栓を対象とした費用便益分析の事例によると、水管理に要する時間の節減による効果のみを便益として計算した場合、総費用総便益比 (B/C) は 1 を大きく下回ることが報告されている。そのため、ICT 機器導入の経済的妥当性を確保するためには、大幅なコスト削減を図るほか、機器導入による水稻の品質向上効果等、付加的な効果を大きく発揮させることも重要といえる。

2. 研究の目的

本研究は、水田内の水温・地温の分布を予測するシミュレーションモデルを構築し、これを水田用遠隔操作水門の自動開閉操作に組み込むことにより、水稻の品質向上に向けたスマート水田水管理の実現を目指す。そのためにまず、水田用遠隔操作水門 (IoT 水門) を設置した水田圃場における、田面水温・地温分布等の温度環境の変化を現地計測により明らかにする。つづいて、既開発の水田内熱収支モデルを、深層学習を組み込むことにより改良し、これと田面水の平面 2 次元流数值計算モデルと組み合わせることで、田面水の流れ場を考慮した水温・地温分布シミュレーションモデルを構築する。本シミュレーションモデルを応用することで、水温・地温分布の予測結果を考慮した IoT 水門の開閉操作アルゴリズムの提案が可能となり、スマート水田水管理技術による水田内の温度調節機能のポテンシャルの評価への展開が期待される。

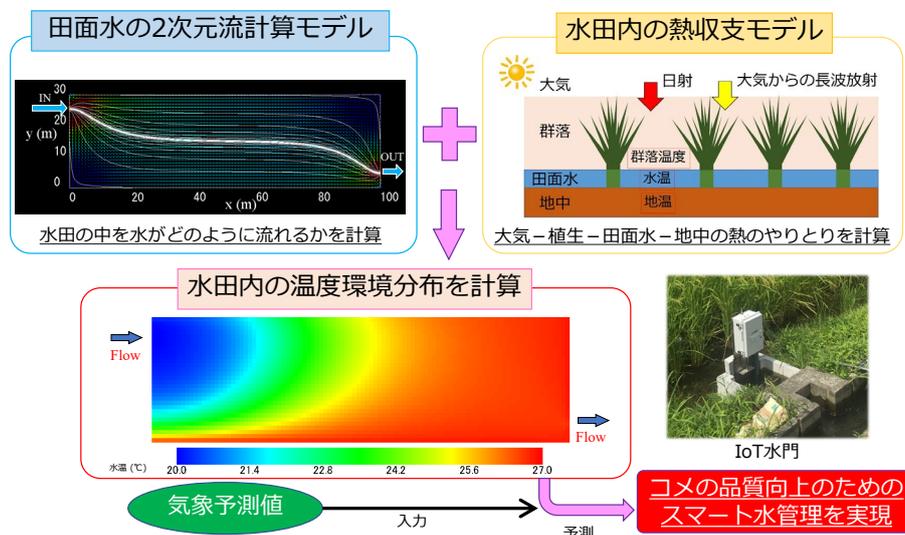


図 1 本研究の概要

### 3. 研究の方法

#### (1) 水田圃場における現地観測

水田用 IoT 水門を設置した調査対象水田圃場において、水門開閉の操作と、田面水温・地温分布等の温度環境の変化を計測し、モデル構築・検証のためのデータを収集した。日射、気温、湿度、風速等の基礎的な気象データを観測するとともに、IoT 水門の開度データおよび用水路水位から水田内への取水流量を換算し、自記式水位・温度計にて水田内の湛水深、田面水温・地温の分布を連続測定するほか、プラント・キャノピー・アナライザーを用いて定期的に葉面積指数 (LAI) の計測を実施した。

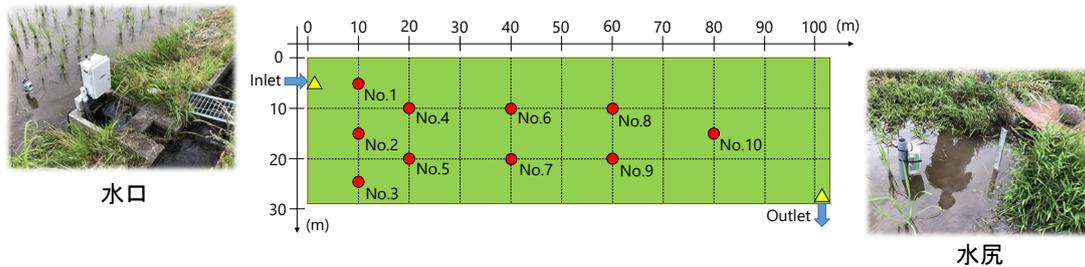


図 2 調査対象水田圃場内の水位・水温計設置位置

#### (2) 稲株の流れ場への抵抗を組み込んだ田面水の平面 2 次元流数值計算モデルの構築

稲株の周囲を流れる田面水の流れ場を計算可能な流体解析シミュレーションモデルを、微細計算格子に基づく有限体積法を用いて構築し、任意の湛水深、流速、稲株の太さ、稲株配置の間隔に応じて計算を行うことにより、さまざまな条件下における稲株群による流れへの抵抗を抵抗係数としてモデル化した。この結果を用いて、田面水が水田内のどの場所をどの程度の速度で流れるかをシミュレートする、田面水の平面 2 次元流数值計算モデルの構築を行った。開発した田面水の平面 2 次元流数值計算モデルおよび水田内の熱収支モデルを結合させることにより、任意の入力条件（水田区画の形状、稲株の太さ・密度、生育状況 (LAI)、湛水深、灌漑水量、気象予測値）に対して水田内の水温・地温の平面分布を予測するシミュレーションモデルを構築した。

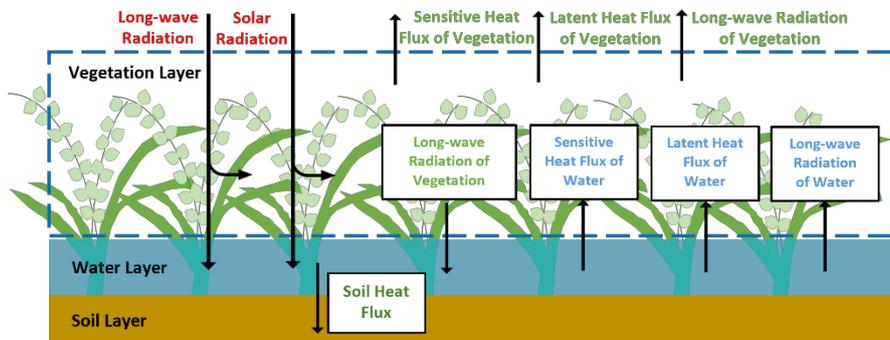


図 3 構築した水田内熱収支モデルの概要

#### (3) 深層学習を応用した水田内の熱収支モデルの構築、改良

これまでに開発済みの、大気-植生群落-田面水-地中の熱移動を組み込んだ水田内の鉛直熱収支モデルを応用することにより、湛水深および気象データを入力データとし、田面水温および地温の鉛直分布を出力するアルゴリズムを開発した。その際、入力気象データを付近のアメダスなどによる計測データから補間、補正して与える方法についても検討した。これは、実際の営農の現場への適用を想定する上で、必ずしもその現場における気象データの計測が必要ではないことを確認するためである。

加えて、深層学習等の機械学習のアプローチを組み込んだアルゴリズムの開発にも取り組み、その適用可能性や精度について明らかにした。その際、長期の時系列データを学習することが可能な LSTM (Long Short-Term Memory) に加えて、近年注目されている、対象とする物理現象の基礎式も一部考慮に入れた機械学習法 (PGNN: Physics-Guided Neural Networks) の試行も行った。これにより、一般的な機械学習に比べて、物理則を一部反映したより現実的なネットワーク構造となり、推定精度の向上に加えて、学習のために必要な観測データ量の削減、計算時間の大幅な短縮が期待される。

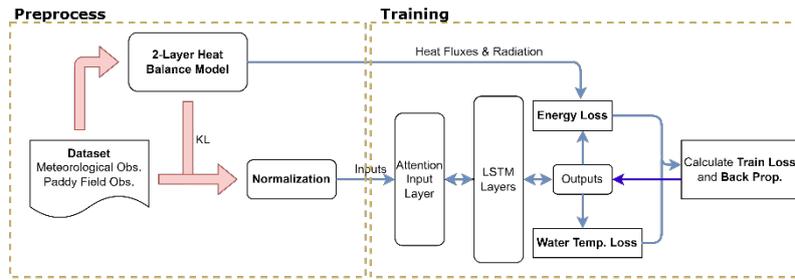


図4 構築した機械学習モデル (PGNN) の概要

#### 4. 研究成果

調査対象水田圃場における観測結果（水田用 IoT 水門からの取水流量、水口・水尻における水深、各観測点の田面水温）の一例を図5に示す。スケジュール管理された IoT 水門から水田内へ取水される様子や、それに伴って水田内の水温分布が変化の様子、その影響が2次的に広がっていく様子が詳細に観測された。また、これらの傾向は、構築したシミュレーションモデルによっても良好に再現可能であることが確認された。

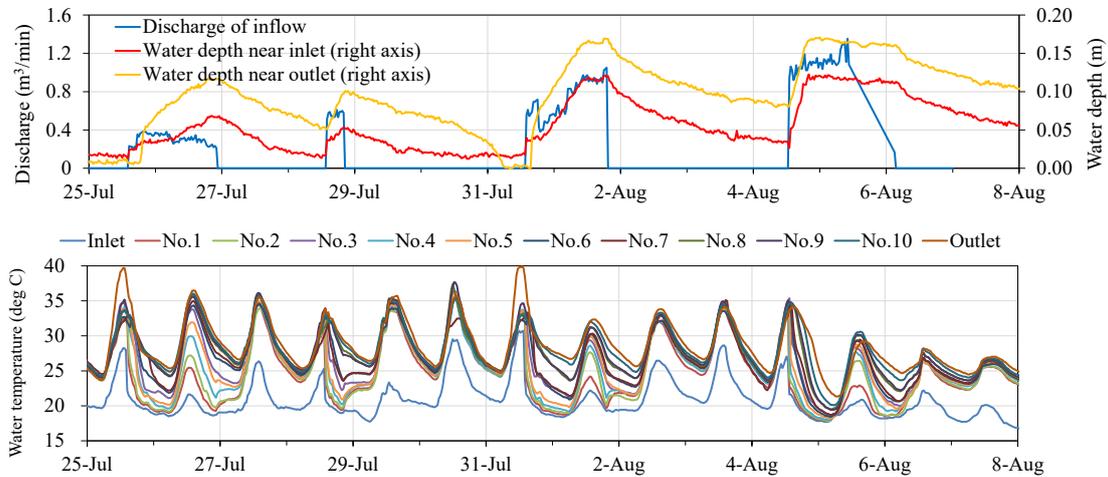


図5 調査対象水田圃場における観測結果（水深、水温、取水流量）

物理現象の基礎式も一部考慮に入れた機械学習法である PGNN (Physics-Guided Neural Networks) による水温シミュレーションモデルの構築では、損失関数に熱収支の残余を組み込む際の重み付けを決定する複数のパターン (MW、DWA、MTRA) を検証した。その結果、本研究により提案した PGNN (MTRA) が高精度に観測水温を再現可能であることが明らかになった。また、LSTM 等の他の深層学習モデルに比べて、より少ない観測データでの学習も可能であることも示された。

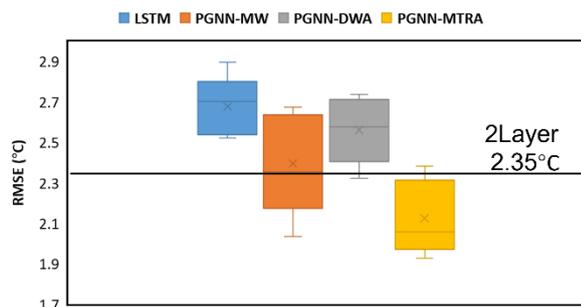


図6 各種機械学習モデルの精度比較結果

本研究により開発された田面水の流れ場を考慮した水温・地温分布シミュレーションモデルにより、水温・地温分布の予測結果を考慮した IoT 水門の開閉操作アルゴリズムの提案が可能となり、水稻の品質向上に向けたスマート水田水管理への展開や、その際の水田内の温度調節機能のポテンシャルの評価への応用が見込まれる。

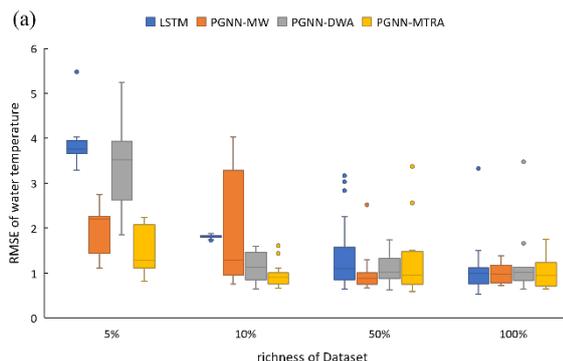


図7 各モデルの学習データ量と精度の関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Masaomi Kimura, Satoru Kobayashi, Marie Mitsuyasu, Wenpeng Xie, Toshiaki Iida	4. 巻 71
2. 論文標題 Simulation model of water temperature variation in dual purpose canals considering return flow from upstream paddy fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Irrigation and Drainage	6. 最初と最後の頁 138 ~ 154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ird.2697	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 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Yohei Asada, Toshiaki Iida, Naritaka Kubo	4. 巻 71
2. 論文標題 The development of a hybrid model to forecast paddy water temperature as an alert system for high temperature damage	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Irrigation and Drainage	6. 最初と最後の頁 124 ~ 137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/ird.2692	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 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Kyoji Takaki, Yohei Asada, Toshiaki Iida, Xiaowei Jia	4. 巻 58
2. 論文標題 Interpretable framework of physics-guided neural network with attention mechanism: Simulating paddy field water temperature variations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2021wr030493	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

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 1件/うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Masaomi Kimura, Wenpeng Xie, Katsunori Shimomura, Yutaka Matsuno
2. 発表標題 Evaluation of the effect of installing ICT devices for paddy irrigation from the viewpoint of paddy water temperature management
3. 学会等名 25th ICID International Congress（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Runze Tian, Hongmei Li
2. 発表標題 Physical-theory inclusion neural network for accurate paddy water temperature simulation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Kyoji Takaki
2. 発表標題 LSTM-based meta-learning framework to simulate water temperature in under-observed paddy fields with few-shot monitoring data
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 飯田 俊彰, 中山 慶祐, 木村 匡臣, 浅田 洋平
2. 発表標題 スマート水管理機器による水田湛水温の遠隔制御の試み
3. 学会等名 2022年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Kyoji Takaki, Toshiaki Iida
2. 発表標題 Physical-guided neural network model with attention mechanism to simulate paddy field water temperature variations
3. 学会等名 2021年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山 慶祐, 飯田 俊彰, 木村 匡臣, 謝 文鵬
2. 発表標題 大規模稲作経営体の水田へのスマート水管理機器導入による水管理労力削減効果の推定
3. 学会等名 2021年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Kyoji Takaki
2. 発表標題 Examination of climate resilience of paddy farming under climate change using short-term hybrid forecast model
3. 学会等名 PAWEES 2021 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Wenpeng Xie, Masaomi Kimura, Xiaowei Jia, Kyoji Takaki
2. 発表標題 Interpretable framework of physics-guided neural network for water temperature simulation
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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	松野 裕  (MATSUNO Yutaka)  (50340766)	近畿大学・農学部・教授   (34419)	

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	皆川 裕樹  (MINAKAWA Hiroki)  (70527019)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門・上級研究員    (82111)	

	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
研究協力者	謝 文鵬  (XIE Wenpeng)		
研究協力者	下村 克己  (SHIMOMURA Katsunori)		

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