

令和元年6月10日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18770

研究課題名(和文) 水田流域水環境における水理・熱環境・窒素動態の統合解析

研究課題名(英文) Integrated analysis for hydraulics, thermal environment and nitrogen dynamics in paddy-dominated watershed

研究代表者

木村 匡臣 (Kimura, Masaomi)

東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・助教

研究者番号：80725664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：水田流域における水環境に対して、空間的な構成要素(水路-水田群-排水路)間の相互作用を考慮した、流れ場、熱環境、溶存窒素動態の統合的な解析モデルを作成した。本モデルは、稲株が無数に存在する水田圃場の中での田面水の流況を表すモデル、田面水の流れ場や灌漑水の水温、気象条件に影響を受けて、水田内の温度環境や田面水中の窒素濃度分布がどのように変化するかを表現するモデル、用水地区全体の水温、窒素濃度の分布を時空間的に表現するモデルにより構築される。

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平面2次元流計算モデルは、水田内の温度環境分布の解析のみならず、例えば水口から液肥や農薬等を流し込んだ際の水田内への分散状況を予測するツールへも応用が期待される。また、水田内の温度環境分布の計算モデルは、田面水の水理条件(水深、流速)と田面水温や葉温との関係を明らかにできるため、リモートセンシングやセンサー類により取得した熱画像を用いて、水田内の湛水深や灌漑水量、水稻の生育状況を推定する手法へと展開させることを予定している。

研究成果の概要(英文)：An integrated analysis model of flow field, thermal environment and dissolved nitrogen dynamics was developed considering the interaction among spatial components (irrigation and drainage canal and paddy fields) for the water environment in a paddy dominated basin. This numerical model consists of three components; a model that can represent flow condition of paddy ponding water surrounding numerous rice bunches, a model that expresses how the temperature environment in the paddy field and the nitrogen concentration distribution in the paddy water change depending on the flow field of the paddy water, the temperature of the irrigation water, and the weather conditions, and a model that represents the spatiotemporal distribution of water temperature and nitrogen concentration throughout the paddy irrigation area.

研究分野：水利環境工学

キーワード：田面水 平面2次元流 流れの可視化 PIV 用水の反復利用 気候変動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

水田内および水田流域における水環境・熱環境・栄養塩環境は、気候や微気象と共に、生産される米の収量や品質に大きく影響を与える因子である。現在進行中の地球温暖化、将来の気候変動の下で、このような環境はどのように変化し、どのような適応策が適用可能であるのか、という点に注目が集まってきている。

研究代表者はこれまでに、用排兼用水路網を利用する農業用水受益地区において、幹線水路内の水温の時間的・空間的変動の観測とモデル化に取り組んできた。その結果、7月下旬から8月上旬にかけて、水田の落水口から支線排水路を経て幹線水路へ還流する排水量が多くなり、これに伴い、幹線水路の水温が下流へ行くに従い高くなっていることが明らかになった。これは水稻が特に高気温に対して脆弱である出穂後の時期に、高温登熟障害対策として掛流し灌漑などの水管理方策が採られたため、上流側の水田で温められた田面水が排水として幹線水路へ多く流入したためである。この結果を踏まえると、水温と同様の現象が水中に溶存する栄養塩の濃度に関しても生じていると考えられ、水田からの排水が還流することによって、幹線水路内の水質が下流へ行くに従って変化していると推測されるが、この点についてはまだ詳しく明らかになっていない。

幹線水路へ流入する水田からの排水の水温や水質は、水田内で田面水として存在する間に受ける外部要因（気象条件、施肥、作物吸収、脱窒など）の影響により決まる。このため、水田流域における水循環プロセスの中でも特に滞留時間の長い、水田内の湛水状態において、水口から水尻までの田面水の水温や水質の平面的な分布を観測して把握し、モデル化することが重要である。これまでの調査により、水田圃場の田面水の水温は総じて、水口付近で低く、水口から遠ざかるにつれて高くなる傾向が見られ、1区画の水田内であっても大きく分布していることがわかっている。さらに、水田内の湛水深を浅くし、水口からの取水量を多くするほど、水温低下の効果がより遠くまでに及ぶことが実験的に明らかになっている。このような水田内の水理条件と水温との関係のモデル化に関する研究では、水口から水尻までの流れを簡略化して1次元的に取り扱っているものが多く、水田内の2次元的な温度環境分布は把握できていない。また、水田内の栄養塩の動態、特に窒素除去機能のメカニズムについては、これまでに数多くの実験研究がなされ、施肥の方法の他に、気温や水温などの温度環境による影響を強く受けることが知られている。最近では、これらに加えて田面水の流れ方（田面水がどの程度の距離をどのような速度で流れるのか）も影響していることが明らかになってきているが、温度環境と流れ場を統合的に考慮した計算モデルは見当たらない。

また、研究代表者はこれまでに、田面水の流れ場の計算手法の開発を目標とし、無数の稲株が配置された田面内の表面水の平面2次元流れの数値計算に取り組み、流れの向きや、流速、水深と、稲株による流れの抵抗との間の関係を整理した。これにより、計算コストを抑えながら田面水の局所的な流れ場を把握するための数値解析モデルを作成したが、模型実験等は行っておらず、実測値や理論的な解析結果との比較検証が不十分である。

2. 研究の目的

水田流域における水環境に対して、空間的な構成要素（用水路—水田群—排水路）間の相互作用を考慮した、流れ場、熱環境、溶存窒素動態の統合的な解析モデルを作成する（図1）。そのため、まず、稲株が無数に存在する水田圃場の中で田面水がどのように流れるのかを模型実験と水理解析により明らかにする。次に、田面水の流れ場や灌漑水の水温、気象条件に影響を受けて、水田内の温度環境（水温、地温、群落内気温、稲体温度）や田面水中の窒素濃度の分布はどのように変化するのか、実測により明らかにし、モデルを作成する。以上の成果を基に、水田内の温度環境および田面水窒素濃度の分布や水管理方法に影響を受けて、用水地区全体の水温、窒素濃度の分布は時間的・空間的にどのように変化するのかをシナリオシミュレーションにより明らかにする。

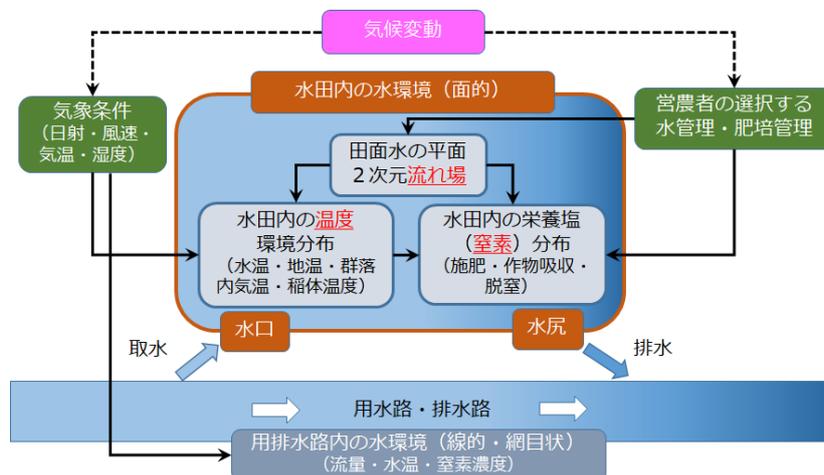


図1 解明を目指すメカニズムの概要とモデル化の対象

3. 研究の方法

(1) 水田模型水理実験および田面水の平面2次元流計算モデルの構築

稲株群を円柱群で模した実スケール規模の水田模型を作成し、内部を流れる水の流況を可視化することで、田面水の平面2次元流れ場の計測を試みた。作成した水田模型は5m四方で、模型装置の底面および壁面は透明アクリル板で構成されており、水田模型全体を高さ約1mの架台の上に設置することで、水の流れを底面の下部からも観察できるようにした。稲株群を模すために、外径89mm、高さ10cmの塩ビ管を625本、20cm間隔で正方配置した。幅20cmの水口および水尻を向かい合う壁面にそれぞれ配置することで、準実スケールの水田模型内における水の流れを再現できるようにした。一定流量の水を水口より通水し、水尻に設置した堰板を越流させて排水し、流れが安定した後に、数か所の円柱周りを対象に流況の計測を開始した。田面水の流れ場を可視化するため、比重が1よりも若干小さいポリエチレン粉末をトレーサーとして水面に撒布し、上部を暗幕で覆い、装置底面の下部よりブラックライトでトレーサーを照射しながらビデオカメラにより撮影を実施した。得られた動画を基に、PIV（粒子画像流速測定法）により円柱周りの流れ場のベクトル分布を計算して求めた。

稲株が規則的に配置された水田内の田面水の2次元流れ場の予測を簡便かつ精密に行う計算手法の確立を目標に、まず、非構造格子有限体積法を用いたメッシュサイズ1cmでの小メッシュ計算手法を構築し、数種のパターンの流況下における、稲株周囲の流れの様子を再現した。定常数値解が得られた後に、水深および流速の平均値、動水勾配を算出し、これらの値を基に1m四方領域におけるx, y軸方向の抵抗係数を計算する。以上の操作を、外部境界部での流向、流量、水深を数パターンに変化させて行うことにより、1m四方の領域における流向、流速、水深と抵抗係数の関係を得た。つづいて、1区画の水田領域を1m四方の構造格子メッシュに分割して計算を行う、大メッシュ計算手法を構築した。ここでは、小メッシュ計算により得られた結果を基にして、各メッシュにおける流向、流速、水深の出力値に対応した抵抗係数を割り当てながら計算を進めた。

(2) 田面水の流れ場を考慮した水田区画内温度環境分布の計算モデルの構築

稲株による流れの抵抗を考慮した田面水の平面2次元流れ計算を応用し、田面水の移流による熱移動と鉛直方向の水田内熱収支を連立して解くことにより、田面水温や葉温、地温などの温度環境の平面分布を計算するモデルを構築し、掛流し灌漑による水温や葉温の低減効果の試算を行った。短辺30m長辺100mの水田区画を想定し、空間メッシュサイズは1m四方、変数の配置にはStaggered格子、離散化した連続式と運動量方程式のカップリングにはSIMPLE法を用いた。境界条件は水口において流量を与える流入境界、水尻において水深を与える流出境界、畦畔はNo-slip壁面境界とした。水田内の鉛直方向の熱収支は、葉温、田面水温、地温の鉛直分布を各メッシュに配置して、各層の間での熱移動（短波放射、長波放射、潜熱、顕熱）を計算して求めた（図2）。田面水の熱収支には、田面水の流れ場を考慮した移流拡散方程式を採用し、移流項の離散化には一次風上差分を、拡散項の離散化には中心差分を用いて求めた。

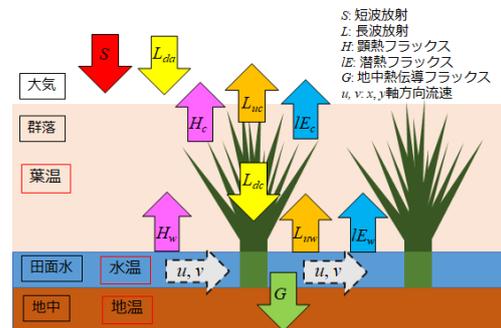


図2 水田内温度環境分布計算モデルの概要図

(3) 用排兼用水路網における水理・水温シミュレーションモデルの構築

用水が水路を流下する間に、気象要因と水田からの排水の還流を受けてどのように水温が変化するかを追跡するために、水路内の水温の保存則と流量の連続式を連立して導かれる水温の移流方程式を、CIP法により差分化して数値計算を行うモデルを作成した。手取川七ヶ用水の4-1, 4-2号支線を観測対象水路とし、図3に示すA~Gの観測点および4つの分水工において連続観測された水温と比較することにより、計算結果の検証を実施した。その後、構築した排水の還流を考慮した用排兼用水路における水温変動シミュレーションモデルを手取川七ヶ用水の4号支線全域に適用し、用水水温の予測を行った。また、気象データの将来予測値を用いて水温変動計算を行うことにより、気候変動が本対象地幹線水路内における用水水温に与える影響を定量的に予測した。さらに、考え得るいくつかの気候変動適応策を提案し、シナリオシミュレーションを行うことによりそれらの効果を推定した。

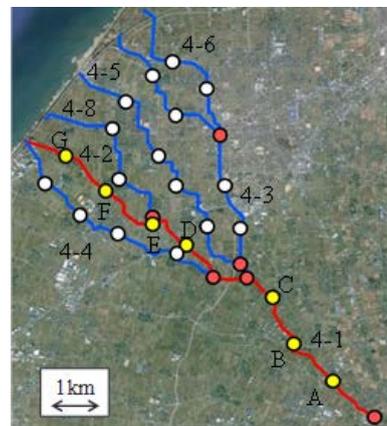


図3 手取川七ヶ用水4号支線
 (赤線: 観測対象水路 (4-1, 4-2号支線),
 青線: その他の幹線水路, 黄丸 (A~G): 観測点,
 赤丸: 分水工, 白丸: 水路区間の境界)

4. 研究成果

(1) 水田模型水理実験および田面水の平面2次元流計算モデルの構築

水田模型水理実験については、円柱の周囲に適度な密度でトレーサーを均一に散布するために、試行を多く繰り返す必要があったが、概して円柱群の間を縫って流れる田面水の流況を把握することに成功した(図4)。また、ほとんどの試行において、トレーサーが円柱の壁面近傍を避けるように流れていく様子が観察された。これは、円柱壁面と水面との間の表面張力が原因と考えられる。また、同じ撮影箇所であっても、試行によって大きく異なる流況が観察されることも多く、流れが定常に収束しにくいことや、実験作業中の装置の振動などがその原因と推察された。表面張力の影響によって水面における流れが遅くなり、流速の鉛直分布における最大点が水面よりも下部に位置していることなども推察された。

田面水の平面2次元流計算モデルについては、非構造格子有限体積法を用いたメッシュサイズ1cmでの小メッシュ計算を行った結果から、1m四方領域で平均化した抵抗係数が、水深には依存せず、流向によって若干変化し、流速にはほぼ反比例することが明らかになった。つづいて、構造格子を用いたメッシュサイズ1mでの大メッシュ計算手法を構築し、小メッシュ計算結果との比較を行い、その有効性を示した。さらに、抵抗係数の与え方を数パターン試行し、流速によって抵抗係数を変化させることが、流れ場全体の流況とエネルギー損失をより精度よく表現する上で不可欠であることを明らかにした。

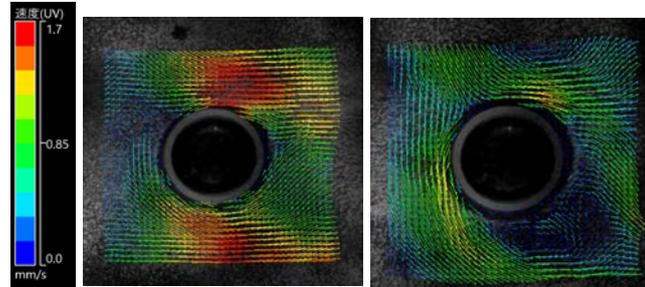


図4 水田模型における流れの可視化の結果例

10m四方の水田を想定した領域に対する小メッシュ計算の結果より、水田内の2次元定常流れは、巨視的に見れば水位をポテンシャルとするポテンシャル流近似が可能であることが明らかになった。このことは、エネルギー勾配が流速に比例することと整合し、実用上は、ポテンシャル流計算により得られた水位の平面分布を基に、水位勾配に比例する形で流速場を求めることになるが、その比例定数を決定する際に、本研究にて得られた結果を応用することが可能である。また、水田内の湛水過程や排水過程など、流れの非定常性の考慮が必要である場合には、ポテンシャル流計算を適用することはできないため、本研究にて大メッシュ計算として提案したような、抵抗係数を含む2次元浅水方程式に基づく計算が有用である。

(2) 田面水の流れ場を考慮した水田区画内温度環境分布の計算モデルの構築

図5(a)は、湛水深が5cm、灌漑水量が $0.005\text{m}^3/\text{s}$ 、灌漑水温が 20°C で一定であった場合の、手取川七ヶ用水地区における水田を想定した田面水温分布(2013/8/11 16:00)の計算結果を示している。水口より取水された低温の灌漑水は、水田内で次第に温まっていき、水尻付近ではほとんど灌漑水温の影響がなくなっていることがわかる。また、図5(b)は、湛水深が10cm、灌漑水量が $0.002\text{m}^3/\text{s}$ で一定であった場合の計算結果を示している。図5(a)の結果に比べて水口付近の水温低減効果は低いものの、水尻付近の水温は低いことがわかる。これは、湛水深が深くなったことにより、田面水の熱容量が増えたため、昼間の日射の影響が小さくなったためであると考えられる。

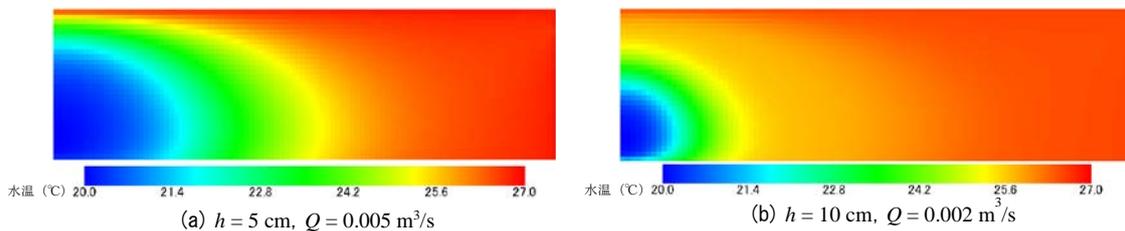


図5 田面水温分布の計算結果

手取川七ヶ用水地区における観測水田の水尻における田面水温の計算結果と観測結果を図6に示す。田面水温の日較差の大きい6月は比較的大きな誤差が見受けられたものの、本モデルによる計算値は観測値をおおむね良好に再現できていた。本モデルを活用することにより、掛流し灌漑等の水田水管理状況の変化が田面水温、葉温、地温に与える効果や、気候変動下において灌漑水温が上昇した場合等について試算を行うことが可能となる。

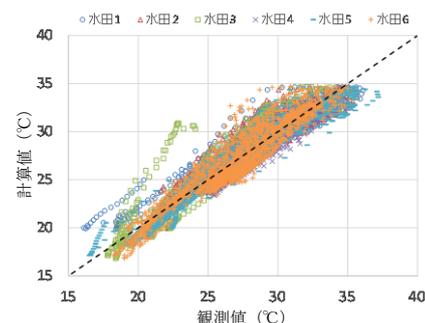


図6 水尻田面水温の計算値と観測値

(3) 用排兼用水路網における水理・水温シミュレーションモデルの構築

図7は、2011年、2012年、2013年の気象データおよびA地点の観測水温を用いて計算した、G地点の水温を示している。計算値は夜間の観測値を若干過小評価する傾向があるものの、概ね水温変動の傾向を再現できているといえる。2011年、2012年、2013年の7月11日から8月20日までの期間の晴天日における、G地点水温の計算値と観測値の誤差(RMSE)は、それぞれ0.59℃、0.59℃、0.48℃であった。

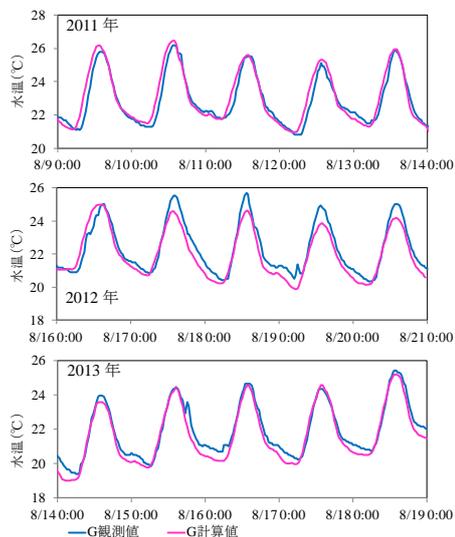


図7 水路内水温の計算値と観測値

図8(a)は、気温が高かった日の例として2013年8月10日を取り上げ、日平均水温の計算結果を示したものである。図中の水路の長さは各区間の水路長に、幅は流量に、色は水温に対応しており、観測対象水路である4-1、4-2号支線を赤色の破線で囲んでいる。また、各区間に排水を流入する圃場の面積を緑色の円の大きさに表している。下流へ下るほど流量は少なくなり、そこへ水田からの排水が還流することで水温が大きく上昇していることがわかる。図8(b)は、受益地全域が取水可能な限りの掛流し灌漑を行った場合の計算結果を示している。一部の支線では水温が気温に近い値となっており、このような水温環境の下では、十分に低温の用水を灌漑できない圃場が存在すると考えられる

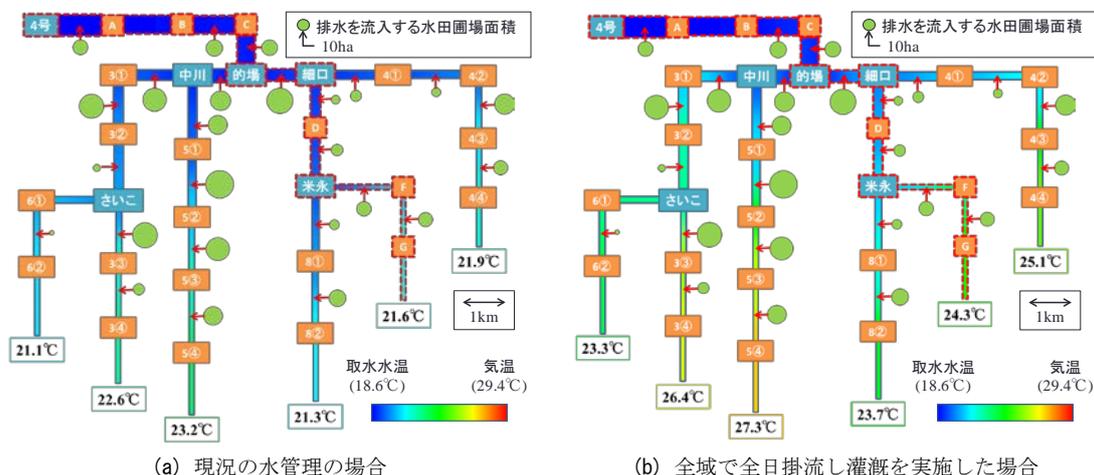


図8 手取川七ヶ用水4号支線における日平均水温(2013/8/10)のシミュレーション結果

気候変動下において、受益地の全圃場が掛流し灌漑を行った場合(Case A)のG地点水温の計算結果を図9に赤線で示す。2013年の観測値(図9緑線)に比べて、約3~4℃水温が高くなることが推定された。このような気象条件下での適応策として、支線排水路の暗渠化や、掛流し灌漑と飽水管理との併用などが考えられる。研究代表者らによる本対象地の支線排水路における水温観測から、側溝にコンクリート蓋を被せたものを利用している排水路では、排水の温度の日較差は隣接する圃場の水尻の水温と比べて小さくなることが明らかになった。これは、日射が遮られることにより排水の熱収支が変化するためであると推察される。また、田面水の飽水管理は、掛流し灌漑には及ばないものの、水稻の高温障害対策として有効であることがこれまでに報告されている。図9紫線は、暗渠形式の支線排水路が全域に適用され、さらに幹線水路への排水の還流量が最大可能量の半分となった場合

(Case B)のG地点の水温変動を計算した結果である。Case BはCase Aに比べて約1.5~2.5℃、G地点の水温が低くなることが推定された。

以上のように、本研究により開発されたシミュレーションモデルは、気候変動下における農業用排水路内の水温環境予測、水田水管理等による適応策を講じた場合の効果の推定に応用することが可能である。

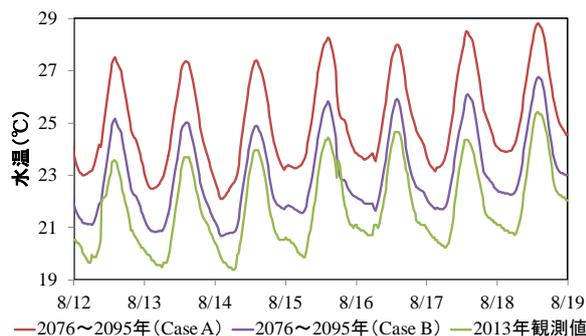


図9 シナリオシミュレーション結果(G地点水温)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- ① 田中 智大, 渡部 哲史, 小槻 峻司, 林 義晃, 丸谷 靖幸, 峠 嘉哉, 山崎 大, 木村 匡臣, 田上 雅浩, 江草 智弘, 橋本 雅和, 仲吉 信人, 最前線の水文・水資源学～WACCA 世代の挑戦～, 水文・水資源学会誌, 査読有, Vol. 31, No. 6, 2018, 509-540
DOI: 10.3178/jjshwr.31.509
- ② 木村 匡臣, 田中 智大, 安瀬地 一作, 中谷 加奈, 山崎 大, 吉岡 秀和, 地表水流れの数値解析技術に関する分野横断的視点から見た特徴と最前線, 水文・水資源学会誌, 査読有, Vol. 30, No. 5, 2017, 307-334
DOI: 10.3178/jjshwr.30.307
- ③ 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 (水工学), 査読有, Vol. 73, No. 4, 2017, I_577-I_582
DOI:10.2208/jscejhe.73.I_577

[学会発表] (計11件)

- ① Masaomi Kimura, Issaku Azechi, Wenpeng Xie, Toshiaki Iida, Integrated models for assessing impacts of climate change and paddy water management on thermal environment in paddy-dominated watershed, AGU 2018 Fall Meeting, 2018
- ② 木村 匡臣, 福田 守成, 浅田 洋平, 安瀬地 一作, 稲株群を模した水田模型における田面水の流れの可視化実験, 平成30年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会, 2018
<http://www.jsidre.or.jp/wordpress/wp-content/uploads/2018/12/ouyouH30proceedings-e2.pdf>
- ③ Masaomi Kimura, Issaku Azechi, Toshiaki Iida, Naritaka Kubo, Sensitivity analysis for mathematical models of thermal environment in paddy field considering ponding water condition, PAWEES 2017 International Conference, 2017
- ④ 木村 匡臣, 小林 聡, 田面水の流れ場を考慮した水田区画内温度環境分布の計算モデル, 水文・水資源学会 2016年度研究発表会, 2016
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jshwr/29/0/29_118/_article/-char/ja/
- ⑤ 小林 聡, 木村 匡臣, 飯田 俊彰, 久保 成隆, 手取川七ヶ用水の用排兼用水路網における掛流し灌漑実施時の水温変動シミュレーション, 平成28年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 2016
<http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/16/6-8.pdf>

[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]

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：安瀬地 一作

ローマ字氏名：(AZECHI, issaku)

※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。