

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K07939

研究課題名(和文) 水稻の高温登熟障害抑制のための水管理法による水田の熱環境制御効果の解明

研究課題名(英文) Effect of water management technique for preventing high temperature damage of rice on thermal environment in a paddy field.

研究代表者

西田 和弘(Nishida, Kazuhiro)

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：90554494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：水稻の高温登熟障害抑制のための水管理法が、水田の熱環境に与える影響を解明することを目的として、実際の水田を用いた各種水管理試験と調査、水管理の影響を表現可能な水田の熱環境予測モデルの作成を行った。その結果、様々な灌漑条件下の水田水温分布の結果を取得するとともに、高い精度で水温分布を予測可能なモデルを作成することができた。一方で、掛流し灌漑の実施水田の米の品質を調べたところ、水温が低い地点ほど、玄米タンパク質濃度は低く、白未熟粒割合は多かった。この結果より、灌漑による窒素の流入や地温変化が、水稻の窒素吸収量を減少(増加)させることで米の品質を悪化(向上)させるメカニズムの存在が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、農家の水管理の影響を評価可能なモデルが作成できた。これにより、各種水管理法が水田の熱環境に与える影響を定量的に評価・予測可能になった。また、従来は、水管理による米の外観品質への影響は、水田の温度環境(稲の温度)を介して生じると考えられてきたが、水田の窒素環境(稲や玄米の窒素状態)を介した影響もあることが本研究により初めて明らかになった。今後、水管理が窒素環境に与える影響が明らかにされることで、水管理と肥培管理を一体化した、より効果的な高温障害対策法の解明・提案に繋がることが期待される。

研究成果の概要(英文)：To study the effect of water management techniques on heat environment in a paddy field, we conducted field experiments and measurement in a paddy field under various water managements, and developed models that can predict effects of the water management on heat environment in a paddy field. As a results, water temperature distribution under various irrigation conditions were obtained, and the models was developed that can predict water temperature distribution with high accuracy. Moreover, to study the effects of continuous irrigation with running water (CIRW) on grain protein concentration and rice grain quality, we conducted CIRW experiments. Decrease in water temperature due to CIRW decreased grain protein concentration and rice grain quality. This result suggests the mechanism that nitrogen runoff or input and soil temperature change due to irrigation and drainage decreases (or increases) nitrogen absorption of rice and then deteriorates (or improves) the quality of rice.

研究分野：農地環境工学

キーワード：水田の水管理 水稻の高温登熟障害 気候変動 水田の熱環境 水田の熱環境予測モデル 水温 米の外観品質 玄米タンパク質濃度

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

水稻の登熟期が高気温になることで、白未熟粒割合が増加し米の外観品質が低下する、水稻の高温登熟障害が問題となっている。これまでに、白未熟粒は出穂後 20 日間程度の平均気温が 26~28 °C 以上になると多発することが報告されている。高温登熟障害の発生は、米の等級の下落により農家の減収を招くこと、また、気候変動に伴う温暖化の進行によって今後の被害の拡大が懸念されることから、これを回避・抑制するための対策が求められている。

高温登熟障害対策の一つとして、各種水管理法による水田の熱環境制御（冷却）が考えられている。中でも、低温の灌漑水を用いた掛流し灌漑は、最も効果が高い水管理法であるとされている。この灌漑方法は、低温の用水を灌漑すると同時に田面水を排水することで、田面水や稲を通常よりも冷却し、これにより米の品質の向上を図る方法である。実際に、低温の用水を用いた掛流し灌漑により、米の品質が向上した事例や研究がいくつか報告されている。

一方、現場の水田では、利用可能な灌漑水の条件（水温、水量）に制約があることで、低温の灌漑水を多量に使用できる環境にはなく、期待される効果は簡単には得られない。そのため、現場での掛流し灌漑には、こうした制約がある中で最大の効果が得られる灌漑方法の適用が不可欠である。また、掛流し灌漑が多量の水を必要とすることを踏まえると、期待される効果が得られないのであれば、掛流し灌漑とは異なる節水的な水管理法（飽水管理、深水管理など）、あるいは、従来の水管理を適用する方が、水資源の有効利用の点で好ましい場合もありえる。これらを判断するには、掛流し灌漑による水温や稲体温度冷却効果、および、それに伴う米の品質への影響の科学的な理解と定量的な評価に基づき、現場における掛流し灌漑の効果を明らかにすることが求められる。

2. 研究の目的

- (1) 現場観測・試験に基づく各種水管理法による水田熱環境制御（温度低下）効果の実証
- (2) 農家の水管理の影響を表現可能な水田の熱環境予測モデルの開発
- (3) 水管理が米の外観品質に与える影響の解明を目的とする

3. 研究の方法

(1) 各種水管理法による水田熱環境制御効果の実証

① 農家が管理する複数の水田において、水田水温・地温・各種気象項目・水深変化を測定し、水深変化と水田水温・地温の関係を取得した。この結果を用いた重回帰分析および土壌中の熱伝導方程式を用いた解析により、最高・最低水温・地温の日振幅を予測する経験式を作成し、水深変化と水温低下の関係を検討した。

② 農家が管理する水田において、異なる灌漑条件（灌漑水量・灌漑水温）の下で掛流し灌漑を実施し、水田の水温・地温分布を取得した。この結果を下に、灌漑条件と気象条件から、夜間掛流し灌漑時の平均水温分布や最低水温分布を予測する経験式、必要灌漑水量の推定式を作成した。

(2) 農家の水管理の影響を表現可能な水田の熱環境予測モデルの開発

水田内の鉛直方向（水田-水稻-大気間）の熱交換予測モデル（田面水、水稻の熱収支式）に、水田の水平方向の水移動に伴う熱の移流、田面水への熱の貯留の影響を考慮可能なモデルを追加し、農家の水管理の影響を表現可能な水田内の水温分布予測モデル（解析モデル、数値モデル）を作成した。作成したモデルは、現場試験で得たデータを用いて検証した。また、このモデルに用いて、様々な気象、灌漑条件の下で、各種水管理法下の水田の熱環境を計算・比較し、水管理法（灌漑条件）の違いが水田の熱環境に与える影響を検討した。

(3) 水管理が米の外観品質に与える影響の解明

(1) で使用した水田において、米の外観品質（各種白未熟粒割合）を測定し、水温低下と白未熟粒割合の関係を取得した。また、水管理による米の品質向上が報告された文献値を用いた分析も合わせて実施した。一方で、上記の結果、水管理が米の外観品質に与える影響は、水田の熱環境以外の要因も介していることが明らかになった。そこで、当初計画していなかった、水田の窒素環境（田面水・土壌水の窒素濃度）、稲の窒素状態（玄米タンパク質濃度）の測定を実施し、水管理の変更に伴う窒素環境の変化が米の外観品質に与える影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 現場観測・水管理試験による水温低下効果の算定

① 水深変化と水田水温・地温の関係

登熟期の水深、気象条件、初期水温、出穂後の日数から最高・最低水温・水温の日振幅を予測する経験式（RMSE : 0.49 °C（最低水温）、0.81 °C（最高水温））、深さごとの地温振幅の予測式（RMSE : 0.41 °C）を作成した。これを用いた分析により、平均水深 1 cm の低下で、最高水温・最低水温は、それぞれ、 0.01 ± 0.10 、 0.18 ± 0.05 °C 低下、水温の日振幅は 0.16 ± 0.12 °C 増加することが明らかになった。

② 灌漑条件（水温・水量）と掛流し灌漑水田の水温分布の関係

計 18 条件の灌漑・気象条件下における夜間掛流し灌漑下の水田の水温分布を取得した（図 1）。この結果に基づき、灌漑水量・強度・水温、気温、灌漑開始時の水温から、夜間掛流し灌

漑時の平均水温分布や最低水温分布を予測する経験式，夜間掛流し漑に必要の漑水量の推定式を作成した．経験式の RMSE は， $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ （夜間平均水温）， $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ （最低水温）であり，十分な精度で水温予測が可能で推定式を作成できた（図1）．また，この経験式を用いた必要漑水量や水温低下効果の計算により，平均的な漑水量の下では，水田全体に対する大幅な水温低下効果は見込めないことを明らかにした．

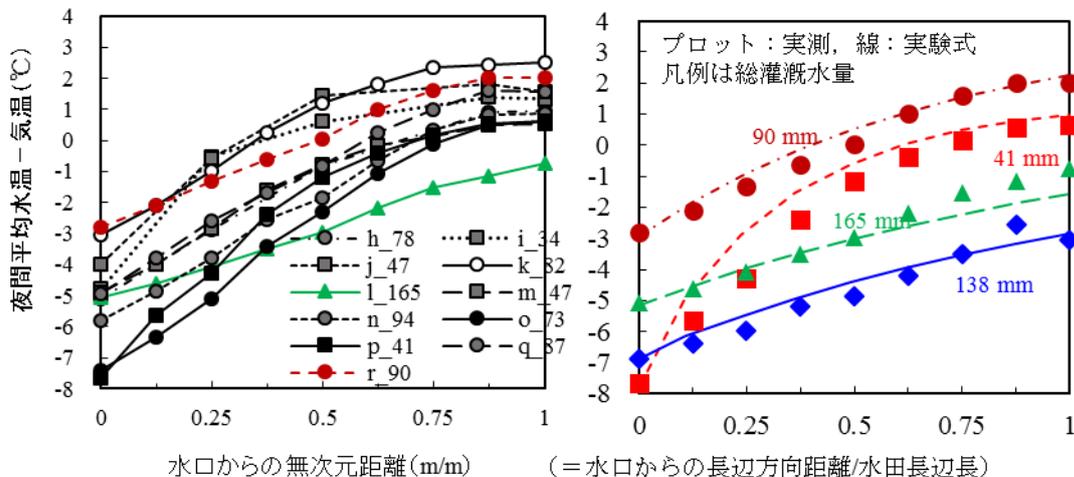


図1（左）平均水温分布の一例，（右）実測値と計算値の比較

(2) 水田の熱環境予測モデルの開発

① 解析解の導出

田面水の水平水移動に伴う熱の移流を考慮した田面水の熱収支式と水稻の熱収支式を解析的に解くことで，漑条件・気象条件から水温と稲体温度を計算できる理論式を得た．また，この理論式を用いた解析により，漑条件（水量・水深・水温・気象条件）と水温・稲体温度の理論的關係を明らかにした．

② 数値モデルの作成と検証

水田内の水平水移動および上記の熱収支式を数値的に計算するモデルを作成した．このモデルを実測水分分布で検証した結果，計算値は，水温の時間変化・空間分布を良く再現（RMSE： $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ （全体）， $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ （掛流し漑時））することが確認できた（図2）．

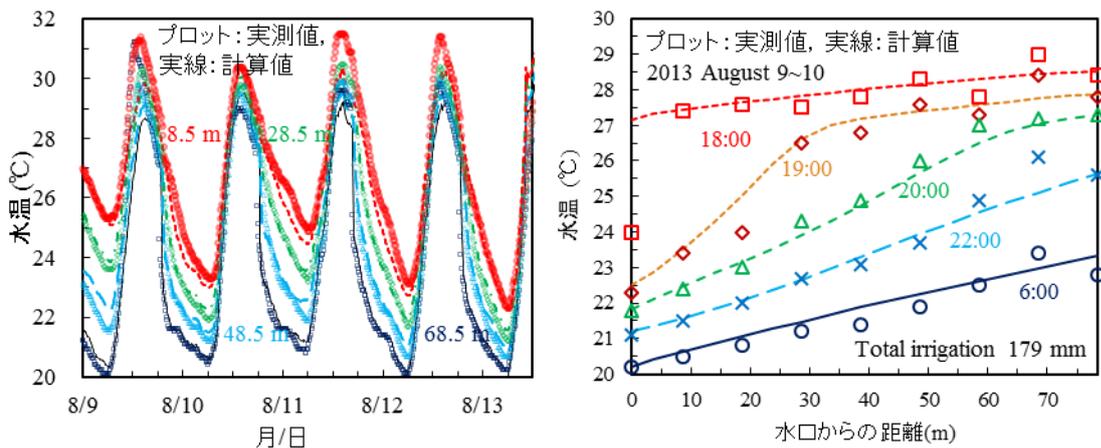


図2 実測値と数値モデルによる計算値の比較

③ 数値シミュレーション

作成したモデルを用いて，異なる漑条件，気象条件下での水温分布および水温低下効果を計算した．図3は，同一総漑水量の下で，漑の間隔（漑強度）を変えた場合の水温分布の計算例である．漑間隔が長いほど水田内での水温差小さくなる結果が得られた（図3）．このような水管理変更時の水温分布を，漑条件と気象条件から予測可能になった．

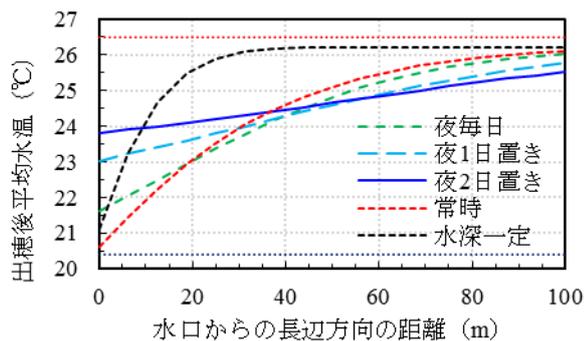


図3 数値シミュレーション（例）

(3) 水管理が米の外観品質に与える影響

① 出穂後の平均水温・地温と白未熟粒割合の関係

各種文献値を用いた回帰分析により、出穂後 20 日間の平均水温・地温と白未熟粒割合の関係を調べた結果、平均水温・地温が 1℃低下することで、白未熟粒割合は 2~4%低下することがわかった (図 4 左). 一方で、これらの既往の研究の結果は、高温登熟障害が多発する条件の目安である平均気温 27℃を下回る条件で得られたものであることが判明した. 図 4 右は、本研究により得られた高気温年の平均水温と白未熟粒割合の関係である. 白未熟粒割合は平均水温が低い地点ほど高い結果となり、従来指摘されている高温障害抑制効果は確認されず、むしろ米の外観品質が悪化する結果となった. この結果より、低温の用水を用いた掛流し灌漑、あるいは水温低下は、常に米の外観品質を向上させるわけではないことが明らかになった.

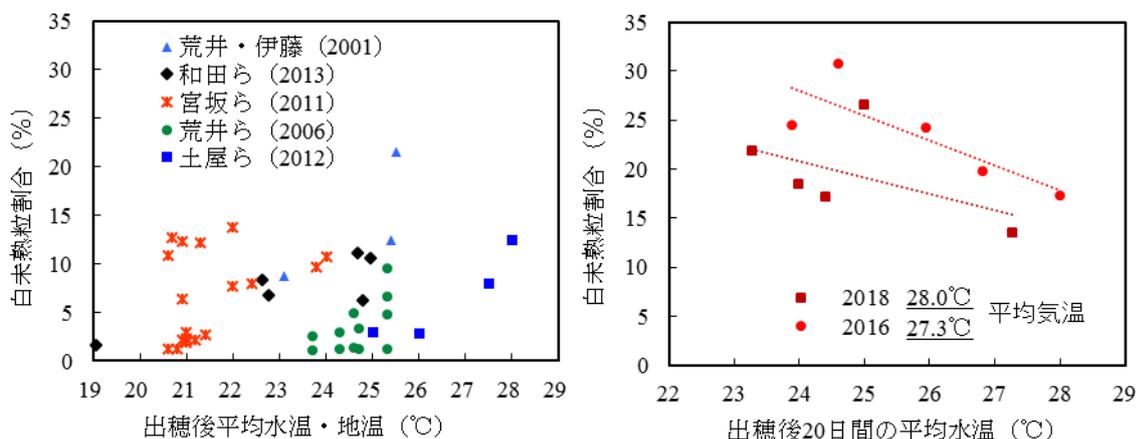


図4 出穂後の平均水温・地温と白未熟粒割合の関係 (左: 文献値, 右: 本研究)

② 稲の窒素吸収量 (玄米タンパク質濃度) への影響

掛流し灌漑の実施により米の品質が悪化した原因として、窒素環境の変化の影響を考えた. 図 5 は、掛流し灌漑実施水田における出穂後 20 日間の平均水温と玄米タンパク質濃度 (玄米中の窒素濃度より算出) の関係である. 玄米タンパク質濃度は、平均水温が低い地点ほど低くなる傾向が見られた. この玄米タンパク質濃度と白未熟粒割合の関係を示したものが図 6 である. 低気温年 (2017 年) の大幅に水温を下げた地点を除き、玄米タンパク質濃度と白未熟粒割合に負の相関が見られた. これらの結果より、掛流し灌漑の実施により稲の窒素吸収が阻害され、これが白未熟粒割合を増加させたと考えられた. 灌漑による窒素の流出入や地温低下が、水稻が利用可能な窒素量、水稻の窒素吸収量を減少 (増加) させることで米の品質を悪化 (向上) させるメカニズムが存在すると考える.

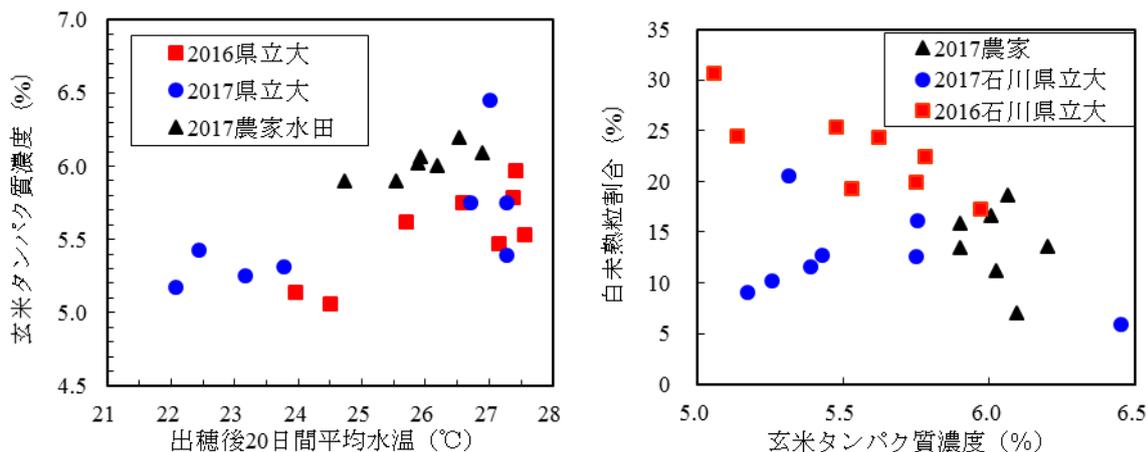


図5 出穂後の平均水温と玄米タンパク質濃度の関係 図6 玄米タンパク質濃度と白未熟粒割合の関係

以上より、登熟期の水管理が米の外観品質に及ぼす影響は、水田の熱環境への影響だけでなく、窒素環境への影響も介して生じていることが明らかになった. そのため、水稻の高温登熟障害抑制のための最適な水管理法を明らかにするには、このメカニズムを踏まえた検討が必要になる. 現在、本研究の継続課題において、水管理が水田の窒素環境および稲の窒素吸収に与える影響を明らかにするための研究を実施しており、各種水管理が米の外観品質に与える影響、最適な水管理法の解明に取り組んでいる.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 5 件）

- ①西田和弘, 塚口直史, 二宮悠樹, 宇尾卓也, 吉田修一郎, 塩沢昌. (2018) : 夜間掛流し灌漑が出穂後 20 日間の平均水温・地温および米の外観品質に与える影響, 農業農村工学会論文集, 86(1), I_105-I_115. DOI: https://doi.org/10.11408/jsidre.86.I_105 (査読あり)
- ②Nishida K, Yoshida S and Shiozawa S (2018): Theoretical analysis of the effects of irrigation rate and paddy water depth on water and leaf temperatures in a paddy field continuously irrigated with running water, Agricultural Water Management. 198, 10-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.11.021> (査読あり)
- ③西田和弘 (2018): 水稻の高温登熟障害対策としての掛流し灌漑, アグリバイオ, 2(5), 69-72. (査読なし)
- ④西田和弘, 光安麻里恵, 吉田修一郎, 塩沢昌. (2017) : 水稻の登熟期の水田水深と水田水温・地温との関係, 農業農村工学会論文集, 85(2), I_253-I_263. DOI:https://doi.org/10.11408/jsidre.85.I_253 (査読あり)
- ⑤西田和弘, 二宮悠樹, 宇尾卓也, 吉田修一郎, 塩沢昌. (2016) :夜間掛流し灌漑下の灌漑水量・水温と水田水温分布の関係, 農業農村工学会論文集, 84(3), 391-401. DOI: https://doi.org/10.11408/jsidre.84.I_391 (査読あり)

〔学会発表〕（計 5 件）

- ①西田和弘, 柴田里子, 塚口直史, 吉田修一郎, 塩沢昌 (2018) : 水稻の高温障害抑制のための掛流し灌漑が水田の窒素環境と稲の窒素吸収に与える影響, 平成 30 年度農業農村工学会全国大会講演要旨集, 792-793
- ②西田和弘, 柴田里子, 塚口直史, 吉田修一郎, 塩沢昌 (2018) : 水稻の高温障害抑制のための掛流し灌漑が田面水・土壌水の窒素濃度および玄米タンパク質濃度に与える影響, 日本土壌肥料学会講演要旨集, 93
- ③Nishida K., Shibata S., Tsukaguchi T., Yoshida S. and Shiozawa S. (2018) : Effect of Continuous irrigation with running water on the nitrogen environment in a paddy field, PAWEES=INWEPF International Conference 2018 in NARA
- ④西田和弘, 柴田里子, 吉田修一郎, 塩沢昌 (2017) : 掛流し灌漑の灌漑強度・時間帯が出穂後の平均水温に与える影響, 平成 29 年度農業農村工学会全国大会講演要旨集, 724-725.
- ⑤柴田里子, 西田和弘, 吉田修一郎, 塩沢昌 (2016) : 灌漑水量・方法が水田水温・地温に与える影響. 平成 28 年度農業農村工学会全国大会講演要旨集, 629-630

〔図書〕（計 1 件）

- ①西田和弘 (2017) :夜間かけ流し灌漑が水田水温・稲体温度に及ぼす影響, 最新農業技術作物 vol.9, 農山漁村文化協会, 177-192.

6. 研究組織

(2) 研究協力者

研究協力者氏名 : 吉田修一郎

ローマ字氏名 : Yoshida Shuichiro

研究協力者氏名 : 塚口直史

ローマ字氏名 : Tsukaguchi Tadashi

※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。