

令和 5 年 9 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H03071

研究課題名（和文）水稻の登熟期の水管理が水田の窒素環境および米の外観品質に与える影響の解明

研究課題名（英文）Effect of water management during the rice grain filling period on the nitrogen environment of paddy fields and the rice grain quality

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）・准教授

研究者番号：90554494

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：登熟期の水管理による米の外観品質向上（高温登熟障害抑制）効果解明を目的として、水稻の登熟期の水管理が水田窒素環境および米の窒素状態に与える影響を調べた。その結果、水管理による米の品質への影響は、水田の熱環境（稲の温度）への影響だけでなく、窒素環境（米の窒素状態）への影響によっても生じること、水管理による米の窒素状態への影響は、灌漑水温および窒素濃度に大きく依存すること、低窒素濃度の灌漑水を用いて田面水温を低下させる水管理を行うと、玄米の窒素（タンパク質）含有率の低下によって米の品質が悪化する可能性があることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、水稻の登熟期の水管理は、水田の熱・窒素環境を共に変化させることで、米の外観品質に影響を与えることが明らかになった。このことは、水管理と肥培管理を組み合わせ対策により水田の熱・窒素環境をうまく制御すれば、従来よりも有効な対策となりうることを示唆する。今後、このような考えに基づく研究や技術開発が行われることで、米の高温障害問題の解決が促進されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：To understand the effects of water management during the grain filling stage on rice grain appearance quality, the effects of the water management on the nitrogen environment in a paddy field and the nitrogen contents of rice grain were investigated. The following results were obtained: 1) the effect of water management on the rice grain quality was caused by the changes not only in the thermal environment of the paddy field (temperature of rice) but also in the nitrogen environment (nitrogen contents of rice); 2) the effect of the water management on the nitrogen contents and the quality of rice grain depended significantly on the temperature and nitrogen concentration of irrigation water, and (3) applications of water management that decrease paddy water temperature using low nitrogen concentrations of irrigation water may worsen rice quality due to decrease in nitrogen (protein) content in rice grain.

研究分野：農業農村工学

キーワード：水管理 気候変動 水田 熱環境 窒素環境 窒素動態 水稻 米

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米の外観品質が悪化（白未熟粒割合が増加）する、水稻の高温登熟障害の発生が問題となっている。高温登熟障害の発生は、米価の基準である米の等級の下落により減収を招くこと、気候変動に伴う温暖化の進行により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喫緊に求められている。

この高温登熟障害対策の一つとして、各種水管理法（掛流し灌漑、飽水管理など）が多くの地域で推奨されている。特に、灌漑と同時に排水を行う掛流し灌漑は、各種水管理法の中で最も効果が高いとされており、これによる米の品質向上効果が報告されている。また、近年の ICT の活用による水管理の自動化・遠隔化技術の開発は、今後、このような多様な水管理の実施を可能にすることを期待させる。このように、水管理による対策は、その効果および今後の技術革新への期待から高温登熟障害の重要な対策となる可能性を秘めている。

その一方で、これらの水管理法がどのようなメカニズムで（水田環境の何を変えることで）米の品質を向上させるのか、は十分に明らかにはされていない。従来、水管理による米の外観品質向上（白未熟粒割合の減少）は、低温の用水の灌漑や水深の制御により田面水温・地温・稲体温度を低下させることで生じると考えられてきた。しかし、水管理の変更は、水田の熱環境だけでなく水田の窒素環境の変化も招くため、これに伴う稲や玄米の窒素状態の変化によっても米の品質に影響する可能性がある。実際、高温登熟障害対策としての肥培管理の研究によって、追肥による玄米中の窒素（タンパク質）含有率の増加により米の外観品質が向上することが示されているように、水田の窒素環境や稲の窒素状態は、米の外観品質に大きな影響を与える要因である。しかし、このような水田の窒素環境や稲の窒素状態への影響を考慮して、登熟期の水管理の効果を調べた研究は存在しない。

また、現場の水田では、利用可能な灌漑水の条件（温度・窒素濃度・水量）が多様であるにも関わらず、その条件が考慮されないまま各種水管理が推奨されている実状にある。特に、掛流し灌漑のように、多量の灌漑水を流入させる場合、灌漑水の温度・窒素濃度の違いによって、水田の熱・窒素環境は大きく変わるはずである。そのため、灌漑水の条件が異なれば、同じ水管理法を実施したとしても米の外観品質への効果が同じになるとは限らない。しかし、こうした灌漑水の条件の違いを考慮して水管理の効果を調べた研究も存在しない。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究では、灌漑水の条件（水温・窒素濃度）・水管理の違いが、水田の窒素環境・米の窒素状態に与える影響を明らかにすること、高温障害対策としての水管理法が米の外観品質に影響を及ぼすメカニズム（特に、水田の窒素環境・米の窒素状態を介した影響）を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

1) 圃場試験

灌漑水の条件（水温・窒素濃度）が異なる 3 地域（石川県、東京都、茨城県）の水田で複数年のかけ流し灌漑試験を実施し、灌漑水の水温・窒素濃度が登熟期の水田の窒素環境・水稻の窒素状態に与える影響を調べた。灌漑水の条件は、それぞれ、低水温、低窒素濃度、低水温、高窒素濃度、高水温、低窒素濃度であった。

これらの水田内の複数地点において、灌漑水・田面水・土壌水・稲体（玄米）のサンプリングおよび熱環境（水温・地温・気象条件）の測定を実施した。田面水、灌漑水、土壌水は、出穂後 20 日間の間に 1~複数回採取し、各種窒素濃度（全窒素、硝酸態窒素、アンモニア態窒素濃度）を室内分析で測定した。稲体および玄米は、収穫時に採取し、玄米のタンパク質含有率（玄米中の窒素量より計算）、各種白未熟粒割合（背基白粒割合等）を測定した。水温・地温、各種気象項目、水深は、各種センサーにより連続測定しデータロガーに記録した。

2) 重回帰分析

全地域の測定データを用いた重回帰分析を実施し、登熟期の水管理が米の外観品質および玄米のタンパク質含有率（GPC）に与える影響を調べた。外観品質に関しては、目的変数を高気温により顕著に増加することが報告されている背基白粒割合（BBWG）とし、説明変数の候補を、出穂後 20 日間の平均水温（ T_w ）、平均気温（ T_a ）および GPC とした。また、GPC に関しては、説明変数の候補を、 T_w 、田面水からの窒素供給量（ NS ：田面水の全窒素濃度（ N_w ） \times 浸透速度より計算）、追肥量（ FN ）とした。これらの変数の下で、AIC が最小となる重回帰式を決定した。また、地域ごとのデータに対しても同様の分析を行った。

4. 研究成果

1) 水田内の水温・窒素濃度分布

図 1(a)(b)(c)に、登熟期の水田内の水温・全窒素濃度分布の一例（高気温年）を示す。田

面水温は、灌漑水温が低水温であった石川と東京では水口に近いほど低温に、灌漑水温が高水温であった茨城では水口に近いほど高温になった。一方、田面水の全窒素濃度は、灌漑水の窒素濃度が高濃度の東京では水口に近いほど高濃度になったが、灌漑水が低窒素濃度であった石川と茨城では水田内の濃度は場所に寄らずほぼ同じであった。このように、同じかけ流し灌漑を実施したとしても、水田内の熱・窒素環境は灌漑水の条件により大きく異なることが確認された。

2) 水田内の玄米タンパク質含有率および背・基白粒割合分布

図1(d)(e)(f)に、米の外観品質およびタンパク質含有率の水田内分布の一例を示す。灌漑水の流入により、BBWGとGPCにも水田内に分布が形成されること、その分布は、灌漑水の条件によって大きく異なることが確認された。このことは、灌漑水の条件の違いが、玄米の窒素状態や米の外観品質にも影響を及ぼすことを示している。

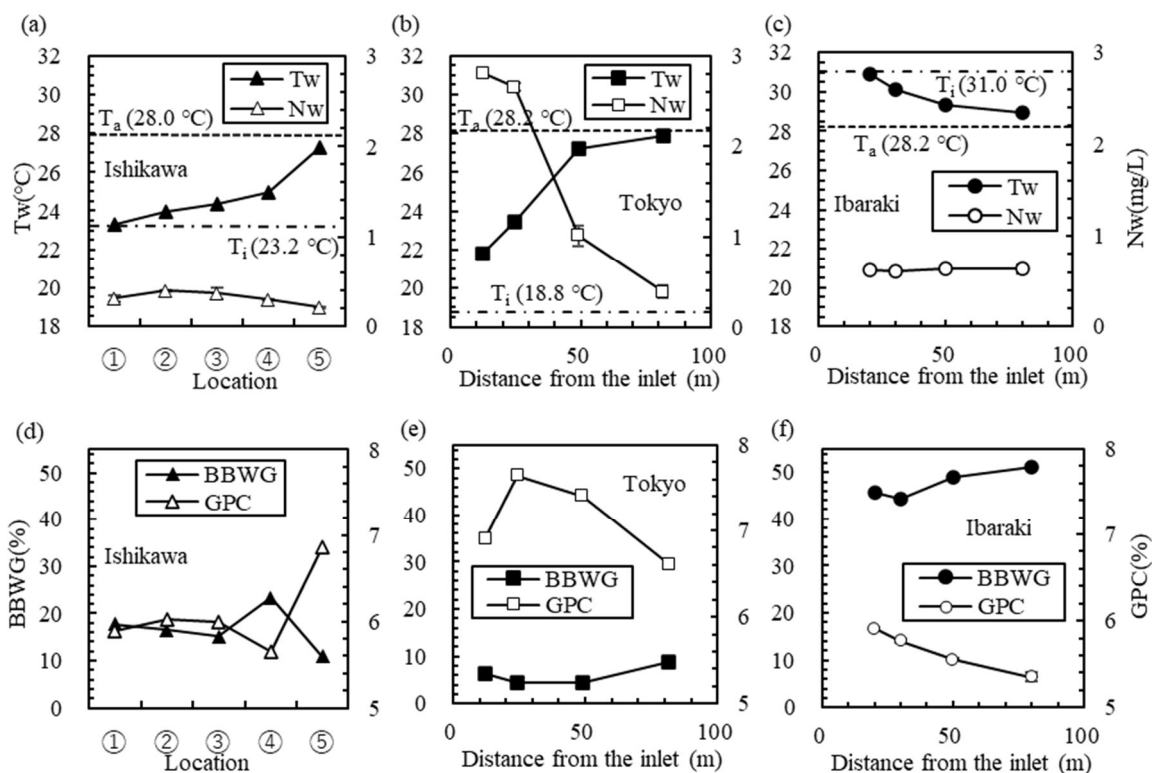


図1 (a)(b)(c)高温年の田面水の平均水温 (Tw)・全窒素濃度 (Nw) 分布、および、(d)(e)(f)背基白粒割合 (BBWG)、玄米タンパク質含有率 (GPC) 分布。Ti: 平均灌漑水温, Ta: 平均気温

3) 水管理が米の外観品質に与える影響

以上の試験により得た、平均水温 (Tw)、気温 (Ta)、玄米タンパク質含有率 (GPC) と背基白粒割合 (BBWG) の関係、および、Tw、NW、NF と GPC の関係 (図2) を用いて重回帰分析を行った。この結果を模式図で示したものが図3である。BBWG に関する重回帰分析の結果、気温と水温の偏回帰係数は有意な正の値、GPC は有意な負の値となった。また、GPC に関する重回帰分析の結果、Tw、NS、NF の偏回帰係数はすべて有意な正の値となった。

以上の重回帰分析の結果により、登熟期の水管理による米の外観品質への影響は、少なくとも三つのメカニズム、すなわち、水温低下に伴う直接的効果、水温低下に伴う間接的効果、灌漑水中の窒素の流入による効果 (図3の) によって生じると考えられた。

のメカニズムは、Tw と BBWG 間の正の偏回帰係数によって表現されるもので、これは従来考えられてきた水温低下に伴う稲体温度の低下による効果に相当するものだと考えられる。一方、 と は、水田の窒素環境および稲の窒素状態を介した影響である。 のメカニズムは、水温低下に伴う GPC の低下 (Tw と GPC 間の正の偏回帰係数) それに伴う BBWG の増加 (GPC と BBWG 間の負の偏回帰係数) である。これは、水田の温度低下に伴って土壌中の窒素量が減少し、それにより稲の窒素量が減少する影響を表現していると考えられる。また、 のメカニズムは、田面水から土壌中への窒素供給量の増加による GPC の増加、これに伴う BBWG の減少である。この効果は、田面水の窒素濃度が高いほど高くなると考えられる。

これらのメカニズムの内、 と は共に水温低下を原因とするものであるが、BBWG への影響は逆 (水温低下によって、 では米の外観品質は向上するが、 では悪化する) である。これらは必ず同時に生じるため、水温低下に伴う米の外観品質向上効果の有無は、 と の影響の大小関係で決まる。したがって、従来の考えである水温低下による米の外観品質向上効果が常に発現されるとは限らず、むしろ悪化する可能性があることを示唆する。一方、 に関して

は、水温低下と直接の因果関係はないと考えられるものの、共に灌漑水の流入が原因で変化が生じるものである。そのため、 T_w および T_a の影響は、見かけ上の相関関係にある。また、 T_w の影響は、灌漑水の窒素濃度に大きく依存する。そのため、灌漑水の温度が同じであったとしても、その窒素濃度が高濃度であれば、相対的に T_w の影響が大きくなる。実際、灌漑水温が低水温であった石川と東京の重回帰分析の結果を比べると、灌漑水の窒素濃度が低濃度であった石川では T_w の効果が高かった（田面水温が低い地点で BBWG が多かった）が、高窒素濃度の東京では T_w の効果が高かった（田面水温が低温でも BBWG が少なかった）。以上のように、登熟期の水管理の効果は、灌漑水の水温・窒素濃度で大きく異なることが明らかになった。今後、このような水田の熱・窒素環境への影響を適切に考慮した管理技術の開発が求められる。

4) まとめ

本研究により、 T_w 水管理による米の品質への影響は、従来考えられてきた水田の熱環境（稲の温度）への影響だけでなく、窒素環境（米の窒素状態）の変化によっても生じること、 T_w 米の窒素状態への影響は灌漑水の窒素濃度に大きく依存すること（灌漑水が高温、高窒素濃度条件で、窒素含有率が高くなる）、 T_w 灌漑水が低窒素条件下では、水温低下によって玄米の窒素含有率（タンパク質含有率）の低下によって米の品質を悪化させる可能性があることが明らかになった。今後、このような水管理による水田の熱・窒素環境への影響、および、稲や玄米の窒素状態への影響を考慮した、水管理・肥培管理技術の開発が望まれる。

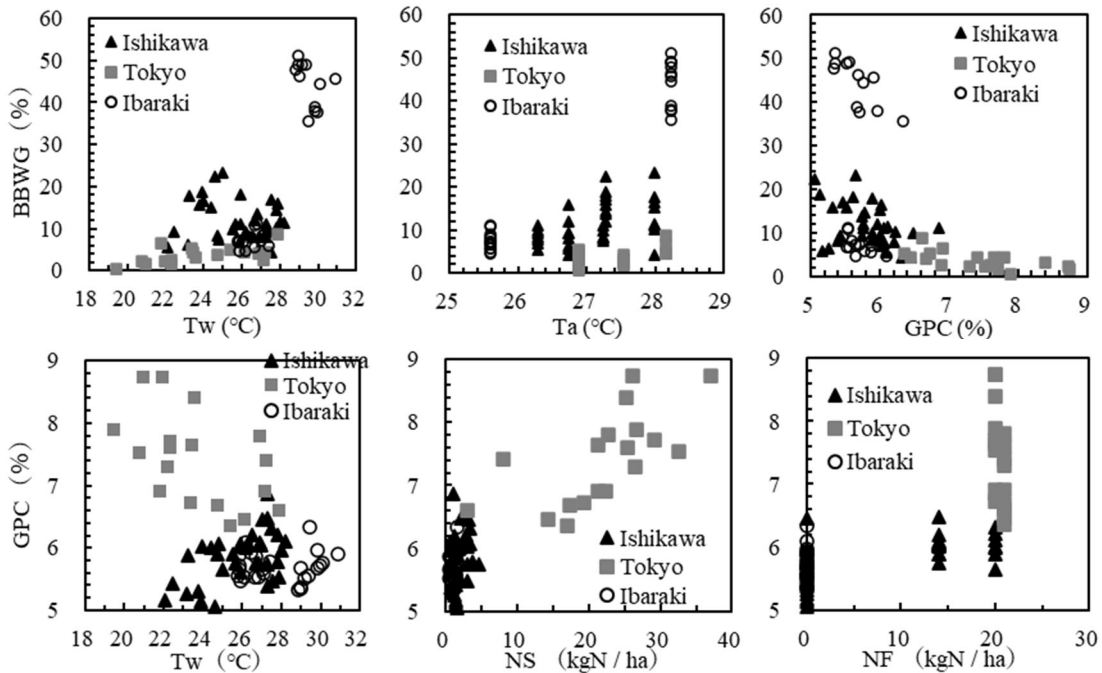


図2 田面水の平均水温 (T_w)、気温 (T_a)、玄米タンパク質含有率 (GPC) と背基白粒割合 (BBWG) の関係および T_w 、田面水からの窒素供給量 (NS)、追肥量 (NF) と GPC の関係

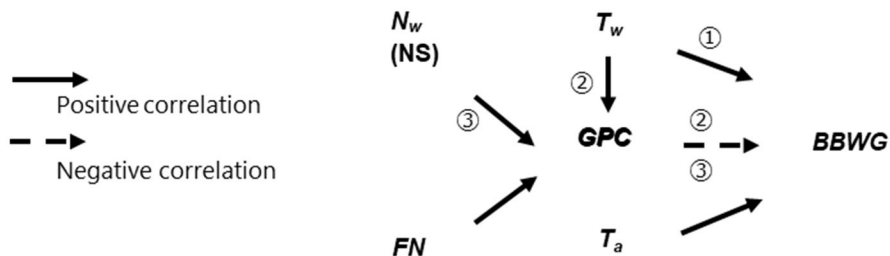


図3 登熟期の水管理が米の外観品質（背基白粒割合 BBWG）に与える影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Nishida Kazuhiro, Yoshida Shuichiro, Shiozawa Sho	4. 巻 20
2. 論文標題 Numerical simulation on effect of irrigation conditions on water temperature distribution in a paddy field	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Paddy and Water Environment	6. 最初と最後の頁 199 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10333-021-00884-1	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 Nishida Kazuhiro, Yoshida Shuichiro, Shiozawa Sho	4. 巻 245
2. 論文標題 Numerical model to predict water temperature distribution in a paddy rice field	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Agricultural Water Management	6. 最初と最後の頁 106553 ~ 106553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.agwat.2020.106553	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 光安 麻里恵、西田 和弘、二宮 悠樹、野村 幹雄、吉田 修一郎	4. 巻 88
2. 論文標題 水管理の違いが水稻の登熟期の水田水温・地温に与える影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 805 ~ 808, a1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jjsidre.88.10_805	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 西田 和弘、岩崎 里子、塚口 直史、吉田 修一郎	4. 巻 88
2. 論文標題 水稻の登熟期の掛流し灌漑が水田の窒素環境に与える影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 809 ~ 812, a1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jjsidre.88.10_809	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 西田 和弘、塚口 直史、柴田 里子、吉田 修一郎、塩沢 昌	4. 巻 87
2. 論文標題 低温・低窒素濃度の灌漑水を用いた掛流し灌漑が玄米タンパク質濃度および白未熟粒割合に与える影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 農業農村工学会論文集	6. 最初と最後の頁 I_219 ~ I_226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11408/jsidre.87.I_219	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 -

[学会発表] 計21件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 西田和弘, 松本悠志, 塚口直史, 吉田修一郎
2. 発表標題 登熟期の水管理が玄米たんばく質濃度および米の外観品質に与える影響
3. 学会等名 日本土壤肥料学会2022年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Nishida , Yushi Matsumoto, Tadashi Tsukaguchi, Shuichiro Yoshida
2. 発表標題 Effect of water management during rice ripening period on rice grain protein content and quality
3. 学会等名 PAWEES2022 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuhiro Nishida
2. 発表標題 Water management to control paddy heat and nitrogen environment for promoting sustainable paddy farming
3. 学会等名 The XX CIGR World Congress 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本悠志, 西田和弘, 塚口直史, 吉田修一郎
2. 発表標題 高温の灌漑水を用いたかけ流し灌漑が玄米タンパク質含有率・白未熟粒割合に与える影響
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田和弘, 松本悠志, 塚口直史, 吉田修一郎
2. 発表標題 灌漑水の窒素濃度が冷水掛流し灌漑水田の玄米タンパク質濃度および白未熟粒割合に与える影響
3. 学会等名 2019年度農業農村工学会全国大会
4. 発表年 2019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	塚口 直史 (Tsukaguchi Tadashi) (40345492)	石川県立大学・生物資源環境学部・准教授 (23303)	
研究 分担者	吉田 修一郎 (Yoshida Shuichiro) (90355595)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・教授 (12601)	

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
---------	---------