

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：30109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K15218

研究課題名（和文）イネ根の吸水能改善に関する研究：節水栽培における生産安定性の向上を目指して

研究課題名（英文）Improvement of Water Absorption Ability of Rice Roots: Toward Improving Production Stability in Water-Saving Cultivation

研究代表者

亀岡 笑 (Kameoka, Emi)

酪農学園大学・農食環境学群・講師

研究者番号：40781878

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：「間断灌水法」は、慣行栽培への導入が容易で、かつ水資源投入量当たりの収穫量が高い優れた節水栽培技術である。本研究では間断灌水法に着目し、「土壌乾燥の程度」と「根系発育の可塑性」との関係を精査した上で、節水と水稲の生産安定性を両立させるために最適な再灌水のタイミングを、根の可塑性（根の表面積増加）を指標として品種ごとに解明しようとした。異なる土壌条件の間断灌水条件下において、特定の再灌水タイミングは根の可塑性を最大化させ、根系形質内では「節根の伸長能」が高い可塑性を発揮した。研究結果より、土壌の物理性ならびに肥沃度のパターンごとに、各品種に対して最適な再灌水タイミングを提案できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

節水栽培法のひとつである間断灌水について、本研究によって再灌水の決定指針となる土壌の乾燥程度が明らかとなれば、これまでの節水栽培に関する研究の更なる発展はもとより、灌漑水田においては水資源の節約が、天水田においては部分灌水の効果的な活用が期待でき、その研究成果はアジア・アフリカの多くの国に波及効果をもたらすと予想される。また、根系発育の可塑性によって生じる各根系形質の変化はそれぞれ異なる形態メカニズムや遺伝支配によって制御されるため、水吸収能への各形質の寄与率を定量的に解明することで、根の水吸収能の改善に向けた今後の育種目標の明確化にも貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Intermittent irrigation is a water-saving technique for rice production that is easy to introduce into conventional cultivation and provides high yield per water input. In this study, we evaluated the relationship between "degree of soil drying" and "plasticity of root system development," and attempted to elucidate the optimal reirrigation timing for both water conservation and stable rice production, using root plasticity as an indicator for each genotype. Under intermittent irrigation conditions with different soil types and fertility, a specific reirrigation timing maximized root plasticity, and among the root system traits, "nodal root elongation" showed high plasticity. Based on the results of this study, the optimal irrigation timing can be proposed for each genotype according to soil physical properties and fertility patterns.

研究分野：作物学

キーワード：イネ 節水栽培 間断灌水 根系発育の可塑性 土壌水ポテンシャル 節根伸長 根新鮮重

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

アジア・アフリカを中心に、灌漑水田では農業用水の不足が深刻化しており、天水田では頻発する土壤乾燥がコメ生産性向上を妨げている。水資源が不足する中で増え続けるコメ生産の需要に応えるためには、水資源投入量当たりの生産性を高める節水栽培法の確立が不可欠であり、中でも田植え後から登熟まで灌水と土壤乾燥を交互に繰り返す「間断灌水(Alternate wetting and drying: AWD)法」は、慣行栽培への導入が容易で、かつ水資源投入量当たりの収穫量が高い優れた節水栽培技術である<sup>1)</sup>。しかし、「間断灌水法」では灌水タイミングの判断基準に関する知見が不足しており、しばしば土壤乾燥によって生産性が大きく低下する<sup>2)</sup>。灌水遅れによって過度な土壤乾燥が発生すると、根系の発育が抑制され、吸水量が低下し、その結果生産性が低下してしまう<sup>3)</sup>。「間断灌水法」における生産性安定性の向上のためには、根の発育と吸水を阻害せず、かつ節水を実現できる適切な灌水タイミングの判断基準を明らかにし、さらに土壤乾燥下での根の吸水能力そのものを向上させる必要がある。

根系発育の可塑性(可塑性:環境の変化に対する適応能力)は、土壤乾燥への適応に重要な役割を果たす<sup>4)</sup>。これまでに、湿潤から過度な乾燥まで段階的に制御した土壤水分環境におけるイネ根系のフェノタイピングを通じ、ある特定の土壤の乾燥程度において、根系発育の可塑性が顕著に発揮され、湿潤条件に比べてイネ根の表面積が増加することが報告されてきた<sup>5)</sup>。これらの結果に基づき申請者は、「『間断灌水法』では、再灌水直前の土壤の乾燥程度が特定の範囲内に収まっていれば、イネ根系発育の可塑性が促進され、土壤養水分吸収が維持され、湿潤条件に比べても生産性が低下しない」との仮説を立てた。すなわち、「土壤乾燥の程度と根系発育の可塑性との関係を精査し、節水しながらも生産性を落とさない、有効な再灌水のタイミングとなる土壤の乾燥程度を、イネ根の可塑性(根の表面積増加)を指標として品種ごとに解明できる」と考えた。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、節水栽培技術である「間断灌水法」の生産安定性を、根の環境適応性を利用して改善することである。「間断灌水法」の灌水時期が遅れて生じる過度な土壤乾燥は、根の発育と水吸収能を阻害し、生産性を大きく低下させる。一方で、特定の土壤の乾燥程度(比較的軽度)では、イネ根の環境適応性が発揮され、根の表面積が増加し、養水分吸収が改善すると考えた。本研究では、土壤乾燥に対する根系発育の可塑性に特徴を有する3品種を供試して、(1)間断灌水法の灌水時期の決定基準として、根の環境適応性を発揮しうる土壤の乾燥程度を明らかにすること、(2)間断灌水条件下におけるイネ根系発育の可塑性発揮に重要な根系形質を同定することを目指した。(3)さらに、大規模土壤水分制御試験の自動化を見据え、各ポットの土壤水ポテンシャルを重量測定から算出する手法について検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 間断灌水法の灌水時期の決定基準となる土壤の乾燥程度の同定

供試品種として、土壤乾燥に対する根系発育の可塑性に優れた水稻(*Oryza Sativa* L.)品種のうちKDML105(*indica*)・Swarna(*indica*)、対照品種として日本晴(*japonica*)を供試し、側窓を開放した温室において多肥(黒ボク土)・標準施肥(砂土)・少肥条件(砂土)の計3つの施肥条件でのポット栽培試験を実施した。

まず1/5000 aワグネルポット内に試験用土を充填し、土壤の表層から12.5 cm深さのpFメータ(DIK-8333, 大起理工業株式会社)を挿入した。温室で育苗した中苗をポットに移植し活着を確認後、常時湛水区(対照区)ならびに-20 kPa, -40 kPa, -70 kPa到達時の3つの再灌水処理区を設けた<sup>6)</sup>。朝夕の1日2回の灌水確認によって出穂期まで間断灌水処理を維持した後、栽培した全個体の茎葉部・根系をサンプリングした。節根数を目視で計測し、直径別の根長は画像解析ソフトウェアImage Jに根長解析マクロ<sup>7)</sup>を用いて算出した。

対照区との灌水総量の比較結果に基づき、間断灌水処理期間中の節水率を算出した。対照区との茎葉乾物重の比較結果に基づき、茎葉乾物重の維持率を根拠として、最適な灌水時期の決定基準となる土壤水ポテンシャルを品種・施肥条件ごとに決定した。

#### (2) 間断灌水条件下におけるイネ根系発育の可塑性発揮に重要な根系形質の同定

以下の根の可塑性の算出式<sup>8)</sup>をもとに、品種・施肥条件・冠水条件ごとに、節根数、平均節根長、側根分枝数の可塑性程度を算出した。

根の可塑性 = (処理区 - 対照区) / 対照区

算出結果を根拠に、(1)で同定した再灌水条件における根表面積決定への各根系形質の寄与率を定量評価した。

### (3) ポットの土壌水ポテンシャルを重量測定から算出する手法に関する検討

前述の栽培試験でサンプリングした根系を、市販の野菜水切り器(C66, パール金属株式会社)を活用して一定速度、一定時間で水切りし、根新鮮重の評価に適切な脱水時間を検討した。(1)の栽培試験結果ならびに根新鮮重の評価方法を活用した上で、「栽培ポット重」を変数とした土壌水分ポテンシャル校正式を作成し、継続的にこの校正式を使用する際に必要となる自動補正の程度を定量評価した。

## 4. 研究成果

### (1) 間断灌水法の灌水時期の決定基準となる土壌の乾燥程度の同定

1日2回の灌水確認によって、処理期間にわたって-20 kPa, -40 kPa, -70 kPa 到達時の再灌水を、灌水タイミングの大きな遅れを伴わず継続的に維持できた。全品種において再灌水処理に伴う節水効果が確認された。各再灌水処理区における茎葉乾物重の対照区に対する割合を算出した結果、多肥(黒ボク)条件下において、日本晴は「-40 kPa」再灌水区、SwarnaとKDML105は「-20 kPa」再灌水区で最大値を示し、同様に標準施肥(砂土)条件下において、日本晴とSwarnaは「-20 kPa」再灌水区、KDML105は「-40 kPa」再灌水区で最大値を示し、少肥(砂土)条件下では全品種とも「-20 kPa」再灌水区で最大値を示した。

多肥(黒ボク)条件下において特定された再灌水処理区において、日本晴とSwarnaの茎葉乾物重は対照区に対して10%水準で有意に高い値を示したが、ほかの条件では品種を問わず、茎葉乾物重は対照区において最大値を示した。KDML105については、標準施肥(砂土)条件下において、特定した再灌水処理区における対照区に対する茎葉乾物重割合は他品種に比べて高い値を示した。

以上の結果より、間断灌水によって水稻の節水栽培が実現可能であること、さらに適切な再灌水タイミングが土壌物理性ならびに土壌栄養条件の違いによって変化しうることが示された。すなわち土壌の物理性ならびに肥沃度に応じ、異なる品種ごとに適切な施肥量と灌水タイミングを採用することで、節水と茎葉発育の両立を達成できる可能性が示唆された。

### (2) 間断灌水条件下におけるイネ根系発育の可塑性発揮に重要な根系形質の同定

施肥処理、品種に関わらず、3つの再灌水処理区内で比較すると、総根長は(1)で同定した再灌水処理区において最大となった。特定した再灌水処理区における総根長の可塑性がプラス( $0 <$ )の値を示したのは多肥(黒ボク土)条件下の日本晴とSwarnaのみで、砂土条件下では総根長の可塑性は全品種でマイナス( $< 0$ )となった。一方で、砂土条件に限定した場合、標準施肥条件における総根長の可塑性は、日本晴では少肥条件に比べて目立った変化がなく、Swarnaでは少肥条件に比べて微増し、KDML105では少肥条件に比べて顕著に増加した。節根数、平均節根長、側根分枝数の可塑性を定量評価した結果、いずれの品種においても平均節根長のみ、再灌水処理区における可塑性がプラス( $0 <$ )の値を示した。さらに砂土条件に限定した場合、標準施肥条件における平均節根長の可塑性は、日本晴とKDML105では少肥条件に比べて増加し、Swarnaでは少肥条件に比べて低下した。

すなわち砂質土壌の目立つ東北タイで多く栽培されるKDML105は、黒ボク土条件下では間断灌水に対して根系発育の目立った可塑性を示さなかったが、砂土条件下では平均節根長における可塑性が発揮され、この可塑性の発揮程度は施肥条件の改善によって増加した。一方で、日本晴とSwarnaにおいては砂土土壌に比べて黒ボク土において根系発育の可塑性が顕著に発揮され、根系形質においては同じく平均節根伸長において間断灌水処理に伴う根系発育の可塑性発揮が確認された。

以上の結果より、間断灌水条件下で発揮されるイネ根系発育の可塑性の発揮には、土壌物理性ならびに土壌栄養条件が密接に関わること、さらに、間断灌水条件下では節根伸長能が優れた可塑性を示すことが明らかとなった。

### (3) ポットの土壌水ポテンシャルを重量測定から算出する手法に関する検討

市販の水切り器を用いた提案法によって、初心者でも簡単かつ迅速に根新鮮重を測定でき、測定者3名の場合、72個体を108分(1個体あたり1.5分)で測定できた。本提案法を用いることで、灌水処理が根新鮮重に及ぼす影響を、統計的に有意な比較結果を算出しうる測定誤差で評価することができた。検証結果より、提案法は栽培試験に応用可能な測定法だと評価できた。ただし測定値について、過大・過小評価の有無に関する追加検証は必要であると考えられる。

検証結果より、「栽培ポット重」を変数とした土壌水ポテンシャル校正式は供試水稻品種の生育と共に横軸右方向に移動し、その移動量は土壌水ポテンシャルが低下開始してから再灌水評価基準に達するまでの「栽培ポット重」の変化量を超えた。さらに、最終サンプリング時（葉齢約 13）における根新鮮重は茎葉新鮮重を上回った。これらの結果から、校正式を継続的に有効とするには茎葉ならびに根新鮮重の定量評価を踏まえて校正式を自動補正する必要があること、根新鮮重は茎葉新鮮重に比べて校正式の補正量に占める割合が大きい可能性があること、以上 2 点が示された。

#### 引用文献

- 1) Bouman BAM, Tuong TP 2001 Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agric. Water Manag.* 49: 11–30.
- 2) Belder P 2005 Water Saving in Lowland Rice Production: an Experimental and Modeling Study. Wageningen University and Research.
- 3) Tuong TP, Bouman BAM 2003 Rice production in water-scarce environments. In: *Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement.* pp 53–67.
- 4) O'Toole JC, Bland WL 1987 Genotypic Variation in Crop Plant Root Systems. *Adv. Agron.* 41: 91-145.
- 5) Kano M, Inukai Y, Kitano H, Yamauchi A 2011 Root plasticity as the key root trait for adaptation to various intensities of drought stress in rice. *Plant Soil* 342: 117–128.
- 6) Sudhir-Yadav, Gill G, Humphreys E, Kukal SS, Walia US 2011 Field Crops Research Effect of water management on dry seeded and puddled transplanted rice . Part 1 : Crop performance. *Field Crops Res.* 120: 112–122.
- 7) Tajima R, Kato Y 2013 A quick method to estimate root length in each diameter class using Freeware Imagej. *Plant Prod. Sci.* 16: 9–11.
- 8) Sandhu N, Raman KA, Torres RO, Audebert A, Dardou A, Kumar A, Henry A 2016 Rice root architectural plasticity traits and genetic regions for adaptability to variable cultivation and stress conditions. *Plant Physiol.* 171: 2562–2576.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 KAMEOKA Emi, YOSHINO Hinaki, SUZUKI Hiroataka, OHMI Yuki	4. 巻 30
2. 論文標題 Root fresh weight measurement for rice root system - A proposal for a simple dewatering method of fresh paddy roots using a vegetable drainer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Root Research	6. 最初と最後の頁 33 ~ 40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3117/rootres.30.33	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Emi Kameoka, Hinaki Yoshino, Hiroataka Suzuki and Yuki Omi
2. 発表標題 Optimizing intermittent irrigation methods that maximize rice productivity while saving irrigation amount by promoting root developmental plasticity with adequate level of nitrogen
3. 学会等名 第10回アジア作物会議（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀岡笑, 吉野ひなき
2. 発表標題 水稻の最適な間断灌水法の検討：間断灌水条件下で発揮されるイネ根系発育の可塑性に窒素施肥量が及ぼす影響
3. 学会等名 第249回日本作物学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉野 ひなき, 亀岡 笑
2. 発表標題 サラダスピナーを用いた 水稻根系の新鮮重測定法の効率性の検証
3. 学会等名 第50回根研究学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀岡 笑
2. 発表標題 重量法で作成した土壌水ポテンシャル校正式の適切な補正方法の検討
3. 学会等名 第48回根研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀岡 笑
2. 発表標題 Optimizing intermittent irrigation methods that maximize rice productivity while saving irrigation amount by promoting root developmental plasticity
3. 学会等名 International Rice Congress 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀岡 笑
2. 発表標題 水稻根系の新鮮重測定法の提案
3. 学会等名 第49回根研究集会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀岡 笑
2. 発表標題 間断灌水法に伴うイネ根系発育の可塑性発揮に土性が与える影響
3. 学会等名 第247回 日本作物学会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 近江 祐樹 ・ 亀岡 笑
2. 発表標題 イネ根系の可塑性を最大化する間断灌水法の検討
3. 学会等名 第245回日本作物学会講演会
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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