

氏名	ナビラ ムンタヒナ NABILA MUMTAHINA
本籍（国籍）	バングラデシュ人民共和国
学位の種類	博士（農学）
学位記番号	連研第 853 号
学位授与年月日	令和 6 年 3 月 2 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当課程博士
研究科及び専攻	連合農学研究科 生物生産科学専攻
学位論文題目	Impact of deep-placed fertilization on root system architecture and productivity in rice （深層施肥がイネの根系構造と生産性に及ぼす影響）
学位審査委員	主査 岩手大学准教授 松波 麻耶 副査 岩手大学教授 下野 裕之 副査 山形大学准教授 佐々木 由佳 副査 弘前大学教授 松山 信彦

論文の内容の要旨

With rice being a staple for over half the global population, the need for sustainable practices is imperative. The excessive use of fertilizers has raised environmental concerns, necessitating innovative approaches to enhance nutrient use efficiency. The research explores deep-placed fertilization (DPF) as an innovative approach to enhance nutrient use efficiency and mitigate environmental impacts. DPF has proven to be a promising technology, providing higher yield at lower fertilizer consumption. The research, conducted in relatively cool regions, sheds light on the adaptability and potential benefits of DPF technology across diverse climatic environments. This investigation evaluates the impact of DPF on rice root system architecture (RSA) and its consequential effects on growth, nutrient uptake, and overall productivity.

In Chapter 2, A comprehensive three-year field trial utilizing the Akitakomachi rice cultivar to assess the effects of DPF on rice root system development in a cool climate is presented. The experiment included three treatments: Mix Plot, where NPK fertilizer was uniformly mixed at a 15 cm depth before transplantation; DP1, where fertilizer was locally placed at 7 cm/ 10 cm depth; and DP2, with dual-depth placement at 7 and 15 cm after transplantation with a ratio of N:P:K of 8:6.5:7.5 (g/m²). Here, DP1 and DP2 served as representatives of DPF treatments. A root box experiment utilizing identical planting materials and treatment conditions was also conducted to visualize the development of the root system. DPF plots showed a notable delay in initial growth but eventually outgrew Mix plots. The study demonstrates positive outcomes for DPF of combined N, P, and K fertilizers through changes in RSA. Spatial-temporal changes in RSA, characterized by increased root surface area and thicker roots at the fertilization site, led to improved acquisition of fertilizer components and essential elements such as Ca and Mg from the

lower soil layers during the ripening period. DPF contributed to higher yields compared to conventional broadcasting fertilization. Overall, the study from this chapter provides valuable insights into the complex interactions between the DPF method, root dynamics, and nutrient management, offering a comprehensive understanding essential for sustainable and efficient rice production practices.

Chapter 3 builds upon these findings, demonstrating the positive impact of the DPF method on nutrient absorption and rice productivity across diverse RSA. The *DRO1* and *qSOR1* genes are associated with root gravitropism and are crucial in determining RSA. In this study, the parent variety IR64 and its three NILs were designated as the DEEP, INTERMEDIATE, and SHALLOW lines. Two treatments were implemented: the Mix plot, where NPK fertilizer was uniformly mixed at a 15 cm depth, and DP1 as the DPF treatment, where NPK fertilizer was locally placed at 10 cm. A root box experiment with the same plant materials and treatment conditions was also implemented to visualize the root system development. The study demonstrates that DPF positively influences nutrient uptake, sink capacity rice, and productivity, contributing to higher yields across different RSA lines. While confirming the overall benefits of DPF, the study unveils differences in the responses of IR64 and its NILs to localized fertilization, influencing final yield production. In the root box experiment, IR64 and its NILs, excluding the DEEP line, exhibited higher root accumulation at the fertilizer position under DPF, whereas, in the field condition, even the DEEP line displayed root acquisition at the fertilizer position under DP1 treatment, along with IR64 and the INTERMEDIATE line, while the SHALLOW line showed diminished root surface area and limited responsiveness to fertilizer. Furthermore, the chapter investigates the impact of DPF at different experimental sites with distinct soil properties such as high phosphate absorption coefficient and low P and K availability and highlights the adaptability and transferability of DPF's effects across diverse soil conditions because ANOVA showed no significant effect of different location on yield production for any of the plant material. A preliminary examination under extreme soil conditions reveals differential responses among RSA lines, offering insights into their adaptability to nutrient deficiencies. IR64 exhibits better growth under P-deficient conditions, while IR64 and its DEEP and INTERMEDIATE lines performed comparably when P is present. This intriguing finding suggests that genetically different root system distributions respond differently to nutrient deficiencies, warranting further investigation. The overall results align with the hypothesis that a combination of deep and shallow RSA, represented by the INTERMEDIATE line, proves most beneficial for efficient rice production under DPF condition. This chapter provides valuable insights into the interplay between RSA, DPF method, and rice productivity under varied soil properties, contributing to a comprehensive understanding of sustainable rice cultivation practices.

In conclusion, this study underscores the complexity of RSA responses to DPF and the importance of considering genetic diversity for targeted and efficient nutrient management in rice cultivation. The results confirm that the DP of combined NPK

fertilizers initiates root spatial-temporal changes with greater root accumulation around the localized nutrient source. The study further confirms that a blend of both deep and shallow RSA proves advantageous for effective rice production, as evidenced by the INTERMEDIATE line achieving the highest yield among the tested plant materials. This suggests that the combination of accumulation ability of roots to fertilizer and the extensive distribution of roots, both horizontally and vertically in the soil, may contribute to optimal yield potential under DPF conditions. The study not only contributes practical knowledge for optimizing DPF technology but also emphasizes the need for tailored approaches based on specific genetic traits and environmental conditions. The potential of DPF technology to adapt to varying climates and its capacity to reduce fertilizer dosage make it a compelling option for both developing and fertilizer-dependent countries. This study collectively provides a foundation for future research, suggesting that understanding the intricate interplay between RSA and nutrient responses is crucial for advancing sustainable and high-yield rice production practices.

【和文要約】

本研究では、肥料利用効率を高め、環境への影響を軽減するアプローチとして、深層施肥 (DPF) に注目し、イネの DPF 栽培において局所的な養分に対する根系構造の応答性やその品種間差異が、生育、養分吸収、生産性に及ぼす影響と、慣行的な施肥方法に対する優位性を評価することを目的とした。第 2 章では、イネの根系の発達に対する DPF の効果を評価するため、ジャポニカ品種“あきたこまち”を用いて 3 年間のフィールド試験を実施した。全層施肥区 (MIX)、1 か所に深層施肥した DP1、2 か所に分けて施肥した DP2 を試験区とした。また、MIX と DP1 条件について根箱実験も行った。両 DPF 区では、栄養生長期に茎数発達が遅延したが、子実収量は MIX と同程度か上回った。DPF 区では施肥位置への根の集積や深根化が起り、土壌下層からの肥料成分および Ca や Mg などの必須元素の吸収が増加した。これらの結果から、DPF が根の分布を変化させるとともに、土壌下層での長期的な肥効が無追肥での収量性向上をもたらしたことが示された。第 3 章では、多様な根系構造を示す材料を用い、DPF 条件における養分吸収と生産性に与える影響を検証した。根の重力屈性に関する *DRO1* と *qSOR1* 遺伝子の機能型・非機能型を組み合わせた、インディカ品種“IR64”とその 3 つの準同質遺伝子系統 (NIL) を用いた。根箱実験では、深根系統を除き DPF 処理下で肥料位置に根の集積を示した。一方、圃場条件では、全ての系統が施肥位置に根の集積を示したが、浅根系統は根表面積が減少し、肥料に対する反応性が制限された。収量性においては深根と浅根の組み合わせが、DPF 条件下での最も効果的であったが、いずれの系統でも深層施肥による増収効果は確認された。第 2、3 章の結果から、DPF 条件により、イネは局所的な養分源の周辺に根を蓄積させ、根の空間的・時間的変化を引き起こすことが確認された。このような根の肥料周辺への集積能力と、土壌中での効率的な根系分布の組み合わせが、DPF 条件下で収量性向上に寄与する可能性を示唆した。本研究は、DPF 技術を最適化するための知見に貢献するだけでなく、特定の遺伝形質と環境条件に基づくテーラーメイドの根系育種のアプローチの必要性も強調した。本研究は様々な気候や土壌条件に適應する DPF 技術の可能性を提示し、発展途上国や肥料依存国の双方にとって、イネ生産性の向上と持続性に貢献できることを示した。

論文審査の結果の要旨

イネをはじめとする穀物生産では、しばしば肥料投入量が過剰となり、コスト増大や環境問題を引き起こしている。本研究は、施肥利用効率を高め、環境負荷の軽減と生産性の向上を両立する革新的なアプローチとして、深層施肥（DPF）に注目した。Nabila氏はDPFによる収量性向上をさらに高めるためには、養分吸収を担う根系機能が収量形成プロセスにどのように関与するかを明らかにする必要があると考え、DPFに対する根系構造の応答性やその品種間差異が養分吸収や収量性に及ぼす影響の解明を目指した。

まず、イネの根系発達に対するDPFの効果を評価するために、ジャポニカ品種“あきたこまち”を用いて3年間のフィールド試験を実施し、全層施肥区とDPF区の生産性や養分吸収量を比較した。その結果、DPF区では栄養生長期に茎数発達が遅延したものの、子実収量は全層区と同程度か上回り、基肥のみで十分に生産性が維持できることを明らかにした。さらにDPF区では施肥位置やその下層への根の集積が起り、土壌下層からの肥料成分およびCaやMgといった必須元素の吸収が増加したことも判明した。これらの結果から、DPFにより根系が下層に分布したことで、土壌下層での長期的な肥効が調和したことで、養分吸収が促進し収量性が向上したと示唆された。

つぎに、多様な根系構造を示す材料を用い、DPF条件における養分吸収と生産性に与える影響を検証した。根の重力屈性に関与する*DRO1*と*qSOR1*遺伝子の機能型・非機能型を組み合わせた、インディカ品種“IR 64”とその3つの準同質遺伝子系統を用いた。圃場条件での根系解析の結果、系統の違いに関わらずDPF位置で根の集積が確認された。子実収量はいずれの系統でも全層施肥と比較するとDPFで増収した。系統間を比較すると深根系統と深根と浅根を組み合わせた形質を持つ系統が年次や試験サイトに関わらず安定して高い収量を示した。以上のことから、供試した条件においては*DRO1/qSOR1*の制御による根系構造の違いに関わらず、根が肥料に到達したことでDPF効果が得られたこと、また*DRO1*を導入した深根系統ではより高い収量が得られたことから、深層根の増加が収量向上の重要な鍵となる可能性が示唆された。

Nabila氏の一連の結果は、局所的な施肥に対しイネは根圏構造の変化を引き起こすことにより、施肥量及び追肥コストの削減と高い収量性を両立できることを明らかにした。さらに、DPF技術を普及するために、各地域における栽培品種の特性と環境条件に基づくテーラーメイドのアプローチが必要であることも提起するなど、世界の稲作における持続的・環境保全的農業のあり方とその方向性について議論を深めた。これらは農業における環境保全と生産性の両立を目指すうえで重要な知見をもたらしたと言える。

よって、本審査委員会は、「岩手大学大学院連合農学研究科博士学位論文審査基準」に則り審査した結果、本論文を博士（農学）の学位論文として十分価値のあるものと認めた。

学位論文の基礎となる学術論文

Nabila M, Matsuoka A, Yoshinaga K, Moriwaki A, Uemura M, Shimono H, Matsunami M (2023) Deep placement of fertilizer enhances mineral uptake through changes in the root system architecture in rice. *Plant and Soil* 490:189–200.