

水ストレス環境下におけるイネ根系の可塑性の実態解明とその生理機能

仲田 (狩野) 麻奈 (名古屋大学大学院生命農学研究科)

アジアの稲作面積の約 1/3 を占める天水田の収量は、灌漑水田の半分以下で、その生産性の向上は喫緊の課題である。また、灌漑設備が整った水田用に開発が進められている節水栽培技術では、多くの場合、慣行の湛水栽培に比べて収量の低下が避けられないが、その原因についてはいまだ解明に至っていない。仲田 (狩野) 氏は、天水田や節水栽培田の生産性向上を目指し、そこで生じる水ストレスに適応するために必要な根系形質の同定と、その機能について、作物生理・栽培学的観点から明らかにすることを目的に研究を進めてきた。その内容は以下のように要約される。

1. 種々の強度の水ストレスに対する根系発育反応の解明

従来の耐旱性研究では、対照区と乾燥ストレス区との比較によって抽出される形質に注目しているものが多い。一方本研究では、栽培圃場で生じ得る、過湿から強い乾燥までの種々の強度の水ストレスに対する地上部ならびに根系の発育反応について精査するために、連続的な水ストレス強度勾配を発生させる土壌水分勾配装置 (Line source sprinkler; LSS) を製作した。また、対象形質以外の影響を極力排除するために、日本晴と Kasalath 由来の染色体断片置換系統群 (CSSLs) を供試した。その結果、土壌水分に応じて根系発育を応答させ、とくに比較的軽度な乾燥ストレスに対し、日本晴に比べ有意に根長を増加させ、その結果、地上部乾物生産を有意に増加させる系統を見出し、根系が発揮する可塑性を定量的に捉えることに成功した (業績 1)。このように、遺伝的背景が近い材料である CSSL を用いることで、根系の可塑性に関する高い精度の定量的評価が可能となり、ストレスがない条件下で、遺伝背景となる親品種と比べ生育に差がない系統を抽出し、親品種と特定系統との差を用いることで、根系の可塑性を定量的に評価する方法を提案した (業績 7)。また、LSS 法と組み合わせることで、根系の可塑性発揮程度が水ストレス強度に依存することを定量的に明らかにした (業績 7)。

土耕実験で、圃場実験で選抜した系統 (第 9, 10 染色体の一部が Kasalath に置換) が有する根系の可塑性の実態について調べたところ、軽度な乾燥ストレスで最も強く発揮されることを明らかにし、可塑性による根長増加は、限界根長密度以下で効率的に水吸収ならびに乾物生産に貢献することを実証した (業績 2)。

さらに、根系の可塑性発揮に及ぼす土壌水分の効果は、窒素施用量と有意な交互作用を示し、窒素施肥技術によって根系の可塑性を制御し、耐旱性を強化し得る可能性を示した (業績 4)。また、根系の可塑性の発揮程度は、窒素施用量に影響されたのに対し、窒素形態には影響されず、乾燥ストレス強度と窒素施肥量に依存することを明らかにした (業績 6)。これらの研究において、仲田 (狩野) 氏は、とくに可塑性の定量化ならびに機能評価に貢献した。

2. 土壌水分変動ストレスに対する根系発育反応の解明

従来の研究では、天水田では、水不足や乾燥ストレスが低生産性の主要因と考えられてきた。しかし、土壌水分が乾燥と過湿の間を大きく変動する天水田の特徴より、乾燥、過湿による嫌気、ならびにそれらの繰り返しによる水ストレスにも注目する必要があると考え、土壌水分変動に対する地上部・根系反応について調べた。IR64 と New Plant Type 由来の染色体断片導入系統群と、IR64 ならびに KDML105 と NSG19 (両方とも東北タイの天水田適応品種) を供試した。天水田圃場実験では、収量および地上部乾物生産が優れていた品種・系統は、圃場浅層における根系の可塑性が大きく、そのことが吸水力の促進に貢献していることを明らかにした (業績 3)。

次に、天水田において硬盤層を根が貫通するメカニズムについて調べた。その結果、可塑性の大きい品種の根系の可塑性発揮のタイミングは、降雨や灌水による硬盤層の土壌含水率の上昇と土壌硬度の低下と同期すること、硬盤層より下の深層において硬盤層を貫通した節根から分枝した側根の可塑性の発育が、吸水、そして光合成能力を維持し、乾物生産維持に貢献することを明らかにした。これらの一連の研究では、可塑性の定量化を主として担当した (業績 8, 10)。

以上より、乾燥ストレスと土壌水分変動は質的に全く異なる水ストレスであること、土壌中での根系の可塑性発揮のタイミングと場所は、灌水や降雨による土壌中の水分分布と密接に関連することを明らかにし、そのことを踏まえた上で、根系の可塑性に関わる QTL の同定に貢献した (業績 9)。

3. 水ストレス条件下における器官間の炭素分配と根系の可塑性発揮との関連

種々の強度の乾燥ストレス条件下における、光合成固定炭素の分配について調べるため、日本晴と Kasalath を供試し、上述の LSS 装置を導入した実験圃場で生育させたイネを対象に、異なる器官の $\delta^{13}\text{C}$ を測定した。その結果、乾燥ストレス強度が高まるにつれ $\delta^{13}\text{C}$ 値は増加し、その増加程度は、シンク器官である穂や根系で、葉や茎より大きく、乾燥ストレスによる $\delta^{13}\text{C}$ の変動パターンは、器官間で異なることを明らかにした (業績 5)。また、乾燥ストレスによる $\delta^{13}\text{C}$ 値の増加程度は、日本晴より Kasalath の方が大きく、根系の可塑性発揮に関連している可能性を示した (業績 5)。

根の可塑性程度が異なることがわかっているササニシキとハバタキを供試し、土壌水分変動条件下で優れた乾物生産を示したハバタキは、硬盤層より下の深層における根系発育が優れ、また深層に分布する根の $\delta^{13}\text{C}$ 値が有意に高い特徴を有することを明らかにし、このことから $\delta^{13}\text{C}$ 値が根系の可塑性発揮程度の指標となり得る可能性を示した (業績 8)。

以上のように、仲田 (狩野) 氏は、実験処理効果が明確に表れる極端に強いストレス強度ではなく、実際に作物生産活動が成立し得る範囲のストレス条件を正確に把握することに、とくに注意を払ってきた。その上で、作物生産に重要な役割を果たす根系形質の同定とあわせて、その生理的メカニズムを解明する研究方法論は、現在の根系の可塑性研究の基盤となっており、今後の根系育種においても有用な知見となり得る。今後さらなる研究の進展が期待され、日本作物学会奨励賞に十分値する業績と評価される。

研究業績

1. 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 and Soil*, 342, 117-128.
2. Kano-Nakata, M., Inukai, Y., Wade, L. J., Siopongco, J. D., & Yamauchi, A. (2011). Root development, water uptake, and shoot dry matter production under water deficit conditions in two CSSLs of rice: Functional roles of root plasticity. *Plant Production Science*, 14, 307-317.

3. Kano-Nakata, M., Gowda, V. R. P., Henry, A., Serraj, R., Inukai, Y., Fujita, D., Kobayashi, N., Suralta, R., & Yamauchi, A. (2013). Functional roles of the plasticity of root system development in biomass production and water uptake under rainfed lowland conditions. *Field Crops Research*, 144, 288-296.
4. Tran, T. T., Kano-Nakata, M., Suralta, R. R., Menge, D., Mitsuya, S., Inukai, Y., & Yamauchi, A. (2014). Root plasticity and its functional roles were triggered by water deficit but not by the resulting changes in the forms of soil N in rice. *Plant and Soil*, 386, 65-76.
5. Kano-Nakata, M., Tatsumi, J., Inukai, Y., Asanuma, S., & Yamauchi, A. (2014). Effect of various intensities of drought stress on $\delta^{13}\text{C}$ variation among plant organs in rice: Comparison of two cultivars. *American Journal of Plant Sciences*, 5, 1686-1693.
6. Tran, T. T., Kano-Nakata, M., Takeda, M., Menge, D., Mitsuya, S., Inukai, Y., & Yamauchi, A. (2015). Nitrogen application enhanced the expression of developmental plasticity of root systems triggered by mild drought stress in rice. *Plant and Soil*, 378, 139-152.
7. Kano-Nakata, M., Inukai, Y., Siopongco, J. D. L. C., Mitsuya, S., & Yamauchi, A. (2017). Quantitative evaluation of plastic root responses to contiguous water gradient in rice. *Plant Root*, 11, 70-78.
8. Nguyen, D. T. N., Suralta, R. R., Kano-Nakata, M., Mitsuya, S., Owusu-Nketia, S., & Yamauchi, A. (2018). Genotypic variations in the plasticity of nodal root penetration through the hardpan during soil moisture fluctuations among four rice varieties. *Plant Production Science*, 21, 93-105.
9. Owusu-Nketia, S., Inukai, Y., Ohashi, S., Suralta, R.R., Doi, K., Mitsuya, S., Kano-Nakata, M., Niones, J. M., Nguyen, D. T. N., Kabuki, T., Makihara, D., & Yamauchi, A. (2018). Root plasticity under fluctuating soil moisture stress exhibited by backcross inbred line of a rice variety, Nipponbare carrying introgressed segments from KDML105 and detection of the associated QTLs. *Plant Production Science*, 21, 106-122.
10. Suralta, R. R., Niones, J. M., Kano-Nakata, M., Tran, T. T., Mitsuya, S., & Yamauchi, A. (2018). Plasticity in nodal root elongation through the hardpan was triggered by rewatering during soil moisture fluctuation stress in rice. *Scientific Reports*, 8, 4341.
11. Owusu-Nketia, S., Lanceras J. S., Siangliw, M., Toojinda, T., Vanavichit, A., Noppon Ratsameejanphen, N., Ruangsiri, M., Sriwiset, S., Suralta, R. R., Inukai, Y., Mitsuya, S., Kano-Nakata, M., Nguyen, D. T. N., Kabuki, T., & Yamauchi, A. (2018). Functional roles of root plasticity and its contribution to water uptake and dry matter production of CSSLs with the genetic background of KDML105 under soil moisture fluctuation. *Plant Production Science*, DOI:10.1080/1343943X.2018.1477509.