

総説 (招待)

気候変動に適応した根系構造を目指した設計志向型育種への挑戦

宇賀優作

(農研機構・次世代作物開発研究センター)

根は土壌から養水分を獲得するために必要不可欠な器官である。特に、根系構造 (RSA) は植物が土壌中の養水分を取り込む範囲を決定する。また、根は干ばつや洪水、塩害などの非生物学的ストレスに対応する最前線の器官である。地球規模の気候変動が加速するなか、地下部の改良が地上部同様に重要になっている。しかし、根は地面の下に隠れているため、表現型選抜に基づく従来の育種法では、非生物学的ストレスに適応した有望な RSA を有する育種系統を選抜することは困難である。そのため、表現型選抜を必要としない新しい育種戦略が必要と

される。近年の分子生物学やバイオテクノロジーの進歩は、表現型選抜を必要としない RSA の設計志向型育種を可能にする期待される。そこで、これらの技術を RSA 育種に活用するため必要となる RSA イデオタイプ (デザイン) と RSA 関連遺伝子 (素材) の最近の研究成果をまとめた。また、RSA の設計志向型育種における今後の課題を浮き彫りにし、その解決策を考察した。

Breeding Science 71: 3–12 (2021)

農業および環境上の観点から作物根系を理解するための個根の形質の重要性

田島亮介

(東北大学大学院・農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター)

資源獲得は、根の主要な機能の一つであり、作物の生育や環境負荷軽減に貢献しうる機能である。根の資源獲得では、土壌資源の動態と関連した土壌中の根の時間的、空間的分布が重要である。この根の分布は根系の発育によって決定される。根系は種類や発達段階の異なる多くの個根から構成されている。個根は、それぞれ固有の発育、資源獲得、輸送の形質を有し、これらは根の発育に伴って変化する。根系内の個根の形質を統合

したものが、土壌中の根の分布を介して、様々な環境における作物の能力となる。しかしながら、この個根の形質と根の分布パターンとの関係は複雑である。この複雑な関係を理解するためには、膨大な数の個根の形質を評価して、個根の発育と根の分布の関係や、土壌中の資源の動態とともに個根の形質の統合的な機能を理解する必要がある。

Breeding Science 71: 13–19 (2021)

水ストレスへの適応時に見られるイネ根系の可塑的反応とその形態生理・分子機構

Nonawin Lucob-Agustin^{1,3}・河合 翼¹・仲田 (狩野) 麻奈²・Roel R. Suralta³・Jonathan M. Niones³・長谷川知美¹・井成 (池田) 真由子²・山内 章¹・犬飼義明²

(¹名古屋大学大学院・生命農学研究科, ²名古屋大学・農学国際教育研究センター, ³フィリピン稲研究所)

作物の生産性は種々の水ストレスにより大きく影響を受けるが、それらのストレスを回避する上で根系は重要な役割を担う。灌漑による嫌気条件から天水条件まで幅広い土壌水理条件下にて栽培される禾穀類のイネの場合、根系形態の可塑性が特に重要となる。近年、異なる水ストレス条件下において重要な可塑的根系形質や、それらの生理・分子メカニズムの理解が徐々に

進んでいる。本総説では、これらの可塑的根系形質や異なる水ストレス下にて水吸収の促進をもたらす上での本形質による乾物生産への貢献をまとめる。また、根系の表現型可塑性をもたらす生理・分子機構についても論じる。

Breeding Science 71: 20–29 (2021)

トウモロコシ属植物の耐湿性に関わる根系形質の遺伝的制御

間野吉郎¹⁾・中園幹生^{2,3)}

(¹⁾農研機構・畜産研究部門, ²⁾名古屋大学・大学院生命農学研究科, ³⁾西オーストラリア大学・理学部)

過剰な降雨と排水不良によって引き起こされる過湿ストレスは、畑作物の生産や持続可能な食糧供給を脅かすため、高度耐湿性を備えた新しい畑作物の品種開発が必要である。しかし、育種に利用可能な耐湿性の高い遺伝資源が存在しないうえ、耐湿性には関与する形質が多数存在するため、これまでにトウモロコシをはじめとする畑作物において高度耐湿性を備えた品種の育成例は見られない。これらを克服し、耐湿性トウモロコシを育成する目標を達成するため、私たちは耐湿性が高い遺伝資源テオシントを利用した。そしてテオシントを有する耐湿性に関与する複数の根系形質を個別に分けて、精度の高い検定方法を確立し、関与する形質それぞれについてトウモロコシ×テオ

シントのマッピング集団を用いた量的形質遺伝子座 (QTL) 解析を行い、さらに染色体置換系統群 (ILs)、準同質遺伝子系統群 (NILs) や集積系統を作出する取り組みを行った。その結果、耐湿性に関係する根系形質である通気組織形成能、酸素漏出バリア形成能、湛水・還元条件下における耐性、湛水によって生じる地表根形成能、そして浅根性を支配する QTL の染色体上の位置を特定した。さらに、各 QTL について IL や NIL を作出するとともに、複数の QTL を集積した系統を開発中である。これらの系統群は、耐湿性に着目した実用的なトウモロコシ育種を行う際の重要な育種素材としての利用が期待できる。

Breeding Science 71: 30–39 (2021)

酸素漏出バリアは根系の低酸素環境での発達を支えている

江尻真斗・深尾武司・宮下智貴・塩野克宏

(福井県立大学・生物資源学部生物資源学科植物環境学分野)

過湿土壌で根が生育するためには内部の酸素通気が欠かせない。湿生植物の多くは、酸素漏出 (radial oxygen loss, ROL) バリアと呼ばれる根の基部からの酸素の漏れを抑制する物理的障壁を形成する。酸素漏出バリアは根の基部における通気組織からの酸素損失を減らすことで、根端細胞の呼吸をまかなう酸素の長距離輸送を可能にする。酸素漏出バリアがつくられない根端では、輸送された酸素が土壌に放出されて根圏を酸化することで有毒な還元物質 (硫酸イオンや二価鉄イオンなど) を無毒化する。酸素漏出バリアは根の外側の組織に蓄積するスベリン

が主成分と考えられている。この沈着したスベリンが、還元化土壌で発生する有毒物質の根への流入も防いでいるのかもしれない。根から放出される酸素量は酸素漏出バリアの強度、根長、環境状態に影響を受けて、時空間的に根系の酸化パターンは変化している。本稿では酸素漏出バリア形成の制御についての最新の成果をまとめ、作物の耐湿性強化育種に向けた展望を議論する。

Breeding Science 71: 40–50 (2021)

気候変動適応型作物～作物の耐湿性強化の鍵となる根の解剖学的形質～

山内卓樹^{1,2,5)}・野下浩司^{1,3,4)}・堤伸浩²⁾

(¹⁾科学技術振興機構・さががけ, ²⁾東京大学大学院・農学生命科学研究科, ³⁾九州大学大学院・理学研究院生物科学部門, ⁴⁾九州大学・植物フロンティア研究センター, ⁵⁾現:名古屋大学・生物機能開発利用研究センター)

植物は代謝と成長に水を必要とする一方、土壌中の水の不足や過剰はそれらを阻害する。大気中から土壌中への酸素の拡散は土壌の冠水によって著しく制限される。気候変動による冠水被害の増加により、農作物の生産性の低下が懸念されている。そのため、冠水耐性をもつ作物を早期に育成することが求められている。根の解剖学的形質は植物の乾燥および冠水への適応のバランスを決める重要な要因である。植物の根は内側に導管を含む中心柱をもち、その外側に通気組織 (空隙) を形成する

場である皮層をもつ。導管は土壌中から地上部への養水分の輸送を担い、通気組織は地上部から根端部への酸素の供給を担う。そのため、中心柱と皮層のサイズには乾燥および冠水への適応という観点からトレードオフがあると考えられる。本総説では、根の皮層と中心柱のサイズ比のトレードオフに焦点をあて、作物の耐乾性および耐湿性に寄与する根の解剖学的形質に関する最近の知見を紹介する。さらに、モデルを適用した根の解剖学的形質の評価法や画像解析と機械学習を利用した根の切片画像

の自動解析の進捗について紹介する。その上で、根の解剖学的形質をどのように作物の耐湿性の強化に応用すべきかを議論

する。

Breeding Science 71: 51–61 (2021)

窒素とリン酸による植物の根形質の調整：トランスポーター，長距離シグナル伝達性のタンパク質とペプチド，および潜在的な実験の落とし穴

Mian Gu^{1,2,3}・Xu Hu¹・Tingting Wang¹・Guohua Xu^{1,2,3}

¹State Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Nanjing Agricultural University, China, ²MOA Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilization in Lower-Middle Reaches of the Yangtze River, China, ³Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, China)

固着生物である植物は、定着や養水分の吸収を根に依存している。植物の根は、窒素 (N) やリン (P) の栄養またはストレスを含む多様な環境刺激に反応して、形態学的・代謝学的な可塑性を示す器官である。N と P は、細胞の構造的な構成要素であるだけでなく、根の順化反応を誘発する局所的・全身的なシグナルとしても不可欠な主要栄養素である。今回、根の局所的、全身的な調節因子を代表するトランスポーターおよび長距離移動性のタンパク質やペプチドの観点から、N と P の栄養またはストレスに対する根の応答に関する最新の知見に我々は焦点をあてた。さらに、数十年前から日常的に採用されている栄

養に関する実験デザインの潜在的な落とし穴のいくつかを例示した。これらの一般的に受け入れられた方法は、植物の内在的な反応の基本的なメカニズムを研究者が理解するのに役立つかもしれない。しかし、自然生態系や農業生態系の観点から、その研究成果は現実の状況とは強い関連性を欠いている可能性がある。このような背景のもと、実験室条件下で得られたデータをより実践的に解釈することを目的として、確立された（まだ検証されていない）実験デザインの改善について、さらに我々は議論する。

Breeding Science 71: 62–75 (2021)

遺伝子発現情報に基づいた栄養応答機構解明および作物生産改良に向けたアプローチ

竹久妃奈子・佐藤 豊

(農研機構・次世代作物開発研究センター)

ゲノムワイドな遺伝子発現プロファイリングは、植物の発達や生理的過程に関わる鍵となる遺伝子やパスウェイを特定するのに有用な手法である。この総説では、主にイネの窒素、リン、カリウムの栄養応答に焦点をあてた遺伝子発現プロファイリングと栄養吸収・輸送や根系構造に関する時空間的プロファイリングの研究を紹介する。また、栄養に対する動態や応答・適応

制御機構解明に利用できる、異なる試験や研究由来の遺伝子発現データを活用したメタ解析や共発現解析について論じ、作物の育種や栽培の観点から遺伝子発現プロファイリングの展望について推察する。

Breeding Science 71: 76–88 (2021)

根の機能と構造が寄与する植物の耐塩性機構

唐原一郎¹・堀江智明²

¹富山大学・学術研究部理化学系, ²信州大学・学術研究院繊維学系)

土壌の塩類化は、非塩性の作物の生産性に対する世界的規模の脅威である。根は、非ストレス環境下のみならず、塩ストレスを含む種々のストレス条件下でも不可欠な役割を担う器官である。本総説においては、異なる膜輸送体やシグナル分子のはたらきに依存したイオン恒常性などの塩ストレス下の根におけ

る必須の機能に焦点をあてながら、耐塩性に関与する量的形質遺伝子座 (QTLs)、あるいは遺伝子座 (責任遺伝子が判明している場合はそれらの機能も含めて) の耐塩性へのインパクトに関する近年の研究の進展について説明する。さらには、アポプラスト経路でのナトリウムを含むイオン種の流出入に対するバ

リア構造の発達と、塩ストレス下におけるバリア構造の機能と
構成要素の理解に資する重要な文献を紹介する。

Breeding Science 71: 89–108 (2021)

根のフェノタイピング：作物における根のモデリングに必要な重要かつ最小限の情報

高橋宏和¹⁾・Christophe Pradal^{2,3)}

(¹⁾名古屋大学大学院・生命農学研究科, ²⁾フランス農業開発研究国際協力センター (CIRAD), ³⁾フランス国立情報学自動制御研究所 (INRIA))

植物は移動することができないため、水や養分を取り込むための効果的な根系を必要とする。根の発達の可塑性は、植物が様々な環境条件に適応することを可能にする。根系は地上部と比較して、画像化することが難しいため、作物の根系の改善に関する研究は限られている。効果的な根系の育種は、「第二の緑の革命」として期待されており、近年、Root system architecture (RSA) に関する研究が報告されているものの、RSA を解析するための手法は統一されていない。本総説では、根のイメージング方法に関する古典的な手法と最新の手法を紹介し、根の構造のフェノタイピング法について議論する。根は根圏の影響を受けやすく、地上部よりも可塑性を示すことから、同じ遺伝子型でも根の形態が大きく異なることがあり、重要な

根の構造は共通化されていない。そのため、育種に適した理想的な根系を定義することは困難である。そこで本総説では、根系の特徴付けを容易にするために、根の解析、モデル化を介して根の重要なパラメータを特定するための複数のソフトウェアを紹介する。これらのパラメータは、圃場で撮影した写真からも容易に抽出することができる。このモデリングアプローチは、古い形式または未発表の形式で保存されている様々な根のレガシーデータにも適用可能である。それらを利用し、多様な RSA データを共通化することで、理想的な根系の推定に役立つ可能性がある。

Breeding Science 71: 109–116 (2021)