

持続可能な食料システム構築および 宇宙農業を目指した植物栄養吸収制御と土壌開発

田畑 亮^{*1} 重田 育照^{*2} 高橋 英俊^{*3}

Control of Plant Nutrient Uptake and Soil Development for Sustainable Food Systems and Space Agriculture

Ryo TABATA^{*1}, Yasuteru SHIGETA^{*2} and Hidetoshi TAKAHASHI^{*3}

In recent years, it has become clear that small secreted peptide molecules are important for plant development and environmental stress responses, but the detailed roles of the diverse forms of peptide molecules in plants have not been elucidated. Through this project, we discovered several cysteine-rich peptides that are thought to be involved in salt stress and hypoxic stress response by screening using a cyclic peptide library. Furthermore, based on results of information science analysis, we developed highly active nitrogen-absorption-promoting peptides through amino acid modification. In the future, we aim to determine the three-dimensional structure of the protein to design even more functionally optimized peptides that are crucial for environmental stress response.

1. 研究背景と目的

大地に根を張り、自ら動くことのできない植物は、限られた場所で生育に必要な14種類のミネラル（元素）を土壌から吸収し成長する。植物は脳や神経を持たない代わりに、体中に張り巡らされた維管束を利用し、根と葉のコミュニケーションによって様々な環境ストレスに柔軟に適応する力を備えている。しかし、土壌の栄養が欠乏し、ストレスを感じた時に「植物はどのように空腹を感知し、その情報を全身に伝え、栄養吸収を促すことで成長を維持しているのか？」は、未解明な点が多い。田畑はこれまで、15アミノ酸から成るCEPペプチドが、土壌中の「窒素」欠乏情報を「根から葉」へと移動し伝える「空腹シグナル」として機能することを証明してきた（図1左）。さらに、葉におけるCEP受容体および「指令シグナルCEPD」の同定に成功し、根と葉のコミュニケーションによる窒素吸収量調節機構の全貌を明らかにしてきた（図1左）。加えて、「鉄」の欠乏ストレスについても、葉と根のコミュニケーションを担い、「指令シグナル」として働く中分子ペプチドのIRON MAN (IMA) を見出し（図1右）、中分子ペプチドIMAによる植物の鉄吸収量調節機構の解明への端緒をつかみつつある。本研究は、植物の環境ストレス適応戦略について、ペプチドを介した細胞間・器官間シグナル伝達に注目し（図1）、植物ストレス応答を分子から個体レベルで包括的に理解し、制御する、新しい学問（研究領域）を創成する。さらに、筑波大学 重田育照 教授との共同研究を通して、植物の空腹シグナルについて有機合成化学・情報生物物理学の融合から、最小限の肥料による安全で効率的な植物栽培を可能とする新たな植物ペプチド資材開発に挑戦する。また、土壌開発の観点で、慶應義塾大学 高橋英俊 准教授と協働して、植物の成長に最適な人工土壌を創生するための基盤技術を開発することを目的とする。

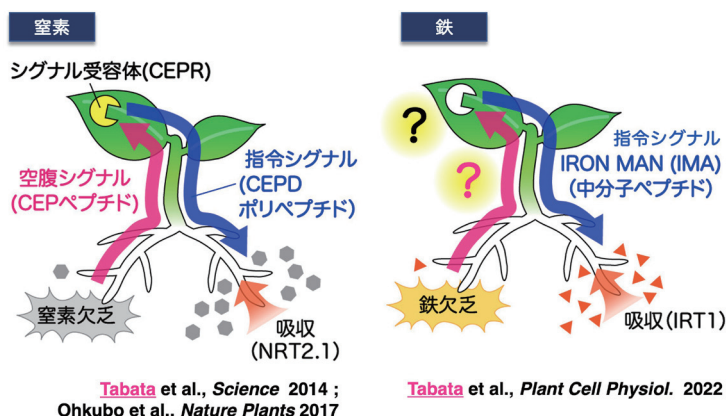


図1 栄養吸収制御に必須の植物空腹・指令シグナルの発見。

2026年3月1日 受理

豊田理研スカラー共同研究Phase2

*1 明治大学農学部農芸化学科

*2 筑波大学計算科学研究センター

*3 慶應義塾大学理工学部機械工学科

2. 植物の環境ストレス応答を制御する新規ペプチド分子同定

新規ペプチドシグナリング解明を目的として、名古屋大学ITbM大石俊輔博士との共同研究によって、中分子ペプチドの部分構造を抽出し、再構築 (KAHA ライゲーション) することで、機能を保持する環状ペプチドのライブラリ開発を進め、様々な栄養欠乏応答に関与する中分子ペプチド (システインリッチペプチド: CRP) を探索した。植物体投与によるペプチド機能評価スクリーニングを通して、環境ストレス応答関連遺伝子の発現量を上昇させる CRP ペプチドを複数選抜した。その中から RALF ペプチドの1つに着目し、過剰発現体を作成して RNA-seq 解析をおこなった結果、エチレン応答や防御応答関連の遺伝子発現上昇がみられた。RALF 遺伝子は塩ストレスに反応して鋭敏に mRNA 発現量が上昇し、この RALF と相溶性の高い遺伝子を欠損させた三重破壊株では塩ストレス感受性を示した。さらに、RALF ペプチドの受容体候補破壊株を用いた遺伝学的解析により、RALF ペプチドの機能に必要な CrRLK1L ファミリー受容体キナーゼを同定した。以上より、本研究で着目した RALF ペプチドは CrRLK1L ファミリー受容体を介して機能し、塩ストレス応答を制御する新規ペプチドシグナリングを担うことが示唆された (図2)。

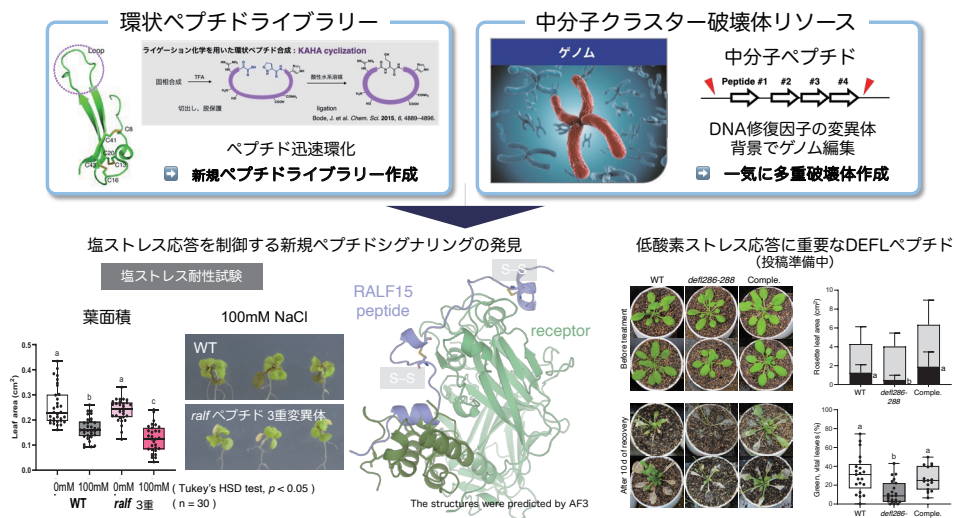


図2 環境ストレス応答に重要な新規システインリッチペプチド分子の発見。

また、シロイヌナズナを用いた DNA 修復因子の変異体背景でゲノム編集することにより、ゲノムに大きな欠失を引き起こす手法 (Tandem cluster 破壊法) を用いて、根における鉄欠乏に反応して葉で mRNA 発現量が誘導される DEFL タイプの CRP ペプチドのクラスター破壊株を作成をおこなった。ICP-MS 解析より、defl ペプチド三重破壊体の地上部の鉄含量は野生型と差が見られなかった。一方で、defl 三重破壊体で発現量が低下している遺伝子群について GO 解析を実施したところ「低酸素ストレス」に関与する GO term がエンリッチされていた。実際に、三重破壊体では冠水実験による生存率の低下が観察された。今後は、DEFL ペプチドを軸として、「鉄欠乏ストレス」と「低酸素ストレス」の関連性を明らかにする。

3. 窒素吸収促進 CEP ペプチドの高活性化

窒素は植物の生育に劇的な影響を与えることから、食料生産を支える最も重要な元素の一つである。一方で、日本では窒素肥料の原料の約96%を海外に依存しており、さらに農業現場では過剰施肥による窒素が環境汚染を引き起こしていることが深刻な課題となっている。これまで田畑は、植物の「窒素」吸収を促進するペプチドホルモン CEP を同定してきた (図1)。CEP ペプチドは、少ない窒素肥料でも窒素吸収効率を向上させ、収量を維持できる可能性を有することから、次世代型農業ペプチド資材として期待されている。しかし、実際の農業現場での応用には、さらなる分子安定性や高活性化が求められる。そこで本研究では、情報生物物理学の新たな解析手法を導入し、活性化に重要なアミノ酸残基を抽出することで高機能性ペプチドの開

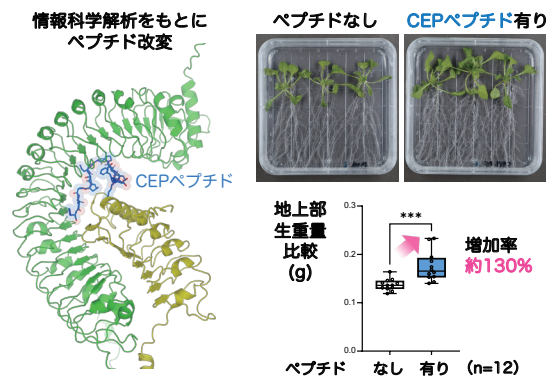


図3 変型 CEP ペプチドによる植物の生育促進効果。

発を目指した。重田育照教授によるMDシミュレーションを用いてCEPペプチドとCEPR受容体の動的相互作用を解析した結果、CEPペプチド中の特定のアミノ酸配列が機能に重要である可能性が示唆された。そこで、数十種類の改変型CEPペプチドを化学合成し、植物の生育促進効果を検証した。その結果、ある改変型CEPペプチドがシロイヌナズナの根の発達および地上部の成長を促進することを明らかにした(図3;未発表データ)、今後はさらなる高活性化を目指すとともに、この生育促進効果の分子メカニズムの解明を進めていく予定である。

4. 高機能人工土壌の開発に向けた基盤技術開発

本研究では、植物の成長制御のみならず、土壌開発も視野に入れた取り組みを行った。近年、バイオ炭は、①土壌微生物の担体、②土壌改良材、③炭素固定材としての機能が注目されている。バイオ炭は、木材や農業廃棄物などを酸素の少ない環境下で350℃以上の高温で熱分解することにより生成される固形物である。しかしながら、バイオ炭を土壌に混合した際に生じる土壌の物理化学的性質の変化が、植物の根の成長にどのような影響を及ぼすかを詳細に解析した研究は限られている。そこで本研究では、高橋英俊准教授が中心となり田畑との共同研究を通して、植物が土壌中に根を展開する際の力学的過程を記述するモデルを構築し、植物育成に最適な人工土壌の基盤技術を創出することを目的とした。具体的には、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いて、二次元の微細格子模様を組み込んだ植物栽培用ゲル培地を開発した(図4)。このゲル培地内で成長する植物の根の展開過程をタイムラプス撮像により二次元断面として記録し、得られた画像から格子模様の変位をサンプリングモアレ (SM) 法により解析した(図4)。さらに、成長後に植物体を培地から引き抜く際に生じる格子変形についても同様に撮像・解析を行った。得られた格子変位情報から面内の変位分布を高分解能で算出し、これを基にひずみ分布を導出することで、植物の根が人工土壌に対して発揮する力学的特性を評価する測定系プロトタイプの開発に成功した。今後は本測定系を活用し、植物の根の成長、環境応答、支持力発現といったメカノバイオロジーを統合的に評価することで、植物育成に適した人工土壌の構築へと発展させる。

サンプリングモアレ法と寒天グリッドパターン培地を用いた根成長の応力分布測定

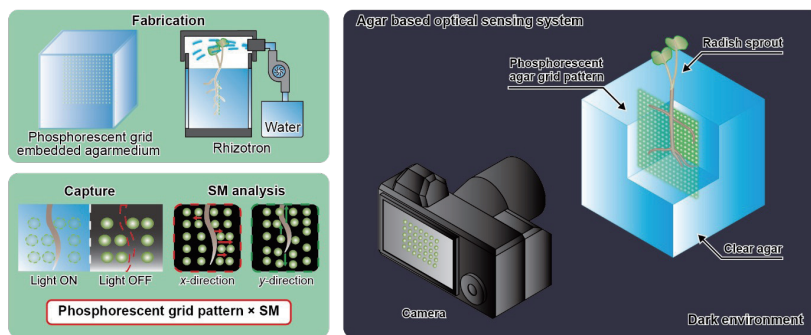


図4 植物の根成長の応力分布測定系構築。

5. まとめ

豊田理研スカラー共同研究Phase2では、植物の様々な環境ストレス応答に対して、多様なペプチド分子が果たす役割を明らかにするとともに、受容体同定を通して植物ストレス応答の新たな制御機構を提示した。さらに、情報生物物理学および有機合成化学との融合により、CEPペプチドの高機能化に挑戦し、農業応用を見据えた次世代型ペプチド資材開発の可能性を示した。また、土壌開発の観点からは、根の力学応答を定量評価する測定系を構築し、植物と土壌の相互作用を力学的に解析する基盤技術を確立した。今後は、基礎科学としての理解をさらに深化させるとともに、最小限の肥料で高効率な作物生産を実現する持続可能な農業技術の開発へと発展させ、食料問題と環境問題の解決に貢献することを目指す。

6. 謝辞

本研究は公益財団法人豊田理化学研究所・豊田理研スカラー共同研究の研究助成により遂行されたものであり、ご支援に心から感謝申し上げます。

REFERENCES

- 1) Kurotani, *et al.*, *Nature Communications*, **16** (2025) 3483.
- 2) Tabata, *et al.*, *Plant Cell Physiology*, **63** (2022) 842-854.
- 3) Ohkubo, *et al.*, *Nature Plants*, **3** (2017) 17029.
- 4) Tabata, *et al.*, *Science*, **346** (2014) 343-346.