

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04465

研究課題名（和文）多様な体内元素のあらゆる動態を可視化するための植物RIイメージング技術開発

研究課題名（英文）Development of radioisotope imaging technology of multi-elements in a plant body for agricultural science

研究代表者

河地 有木（Naoki, Kawachi）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・上席研究員

研究者番号：70414521

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究成果によるプレスリリース「干ばつを生き抜くイネの戦略」は、多くの紙面で掲載され注目された。ここでは、地中の根の機能を探る新たな植物RIイメージング技術を開発した。これを用いて、水分状況に応じて栄養の分配先を選択的に素早く切り替えるという仕組みを持つ、イネの耐干ばつメカニズムの一端が明らかになった。これは、植物の生存戦略を詳細に解明する強力なツールだと結論づけた。その他、洪水耐性メカニズムの解明のため植物体内ガスの流れをイメージングする技術を開発した成果、大麦の鉄輸送動態に関する成果が挙げられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

農作物の生産性を左右する植物が持つ生理機能を探索する強力なツールとして、植物RIイメージング技術を形作った。植物栄養学を基盤とした植物体内の元素の動きを可視化する技術を応用する研究手法の有用性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The press release "Rice's Strategy to Survive Drought," based on the results of this research, received a lot of print coverage and attention. Here, we developed a new plant RI imaging technology to investigate underground root function. Using this technology, we have revealed one aspect of the drought tolerance mechanism of rice plants, which involves selective and rapid switching of nutrient partitioning sites in response to humidity conditions. We concluded that this is a powerful tool for elucidating plant survival strategies in detail. Other results included the development of a technique for imaging gas flow in plants to elucidate flood tolerance mechanisms, and results on iron transport dynamics in barley.

研究分野：放射線計測学、植物栄養学

キーワード：RIイメージング 元素動態 放射線計測 放射性同位元素（RI）

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

近年地球規模の気候変動により、干ばつや豪雨など様々な異常気象が世界中の農地で頻発し、作物の生産に甚大な被害をもたらしている。一方で世界的な人口増加と経済発展が続く中、2050年の食料需要量は2010年比の1.7倍にも達すると予想されており、将来的な食料不足が危惧される。世界的な食料問題の解決のために、植物の元素動態を精確に捉えるためのイメージング技術を開発し、持続的かつ安定した作物生産を可能にする育種・栽培技術に貢献することが求められていた。

本研究の代表的成果である、Frontiers in Plant Science 誌に掲載された“Rice immediately adapts the dynamics of photosynthates translocation to roots in response to changes in soil water environment”(DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1024144>)を中心に記載する。

### 2. 研究の目的

根は、葉の光合成で作られた炭素栄養をエネルギー源として伸長し、土壌から水分や養分を吸収する。土中で複雑に発達する根の構造を解析し、炭素栄養がそれらの根の中を運ばれる様子を観察するため、地中の根の構造を可視化する X 線 CT 技術と、量研が得意とする植物体内の元素の動きを可視化する植物ポジトロンイメージング技術を融合させ、新たな RI イメージング技術を開発することを試みた。

### 3. 研究の方法

本研究では、CT 画像から土中で 3 次元的に生長する根の構造を三次元再構築する技術を使用し、プラスチックポットに植えたイネの土中の根の生長を非破壊的に可視化した。さらに再構築画像から、根の領域において土中の根のみを抽出しその構造を観察した。次に PET を用いて、生きたイネの体内の放射性同位元素 (RI) の動きをイメージングした。イネの葉から根に運ばれる炭素栄養の観察を行うため、イネを PET にセットし、イネの葉を密閉容器内に入れて、炭素の RI である炭素 11 ( $^{11}\text{C}$ ) で標識した二酸化炭素 ( $^{11}\text{CO}_2$ ) を空気と一緒に与えた後、PET で撮像した。 $^{11}\text{C}$  は光合成によって生成された炭素栄養 ( $^{11}\text{C}$ -炭素栄養) の一部に目印として組み込まれ、葉から根に運ばれる。目印である  $^{11}\text{C}$  のシグナルを PET で追跡することで、根の隅々へ運ばれる  $^{11}\text{C}$ -炭素栄養の動きを可視化できる。さらに、 $^{11}\text{C}$  の半減期が約 20 分と短いため、同じイネ個体に対して根の環境条件を変えて繰り返し撮像実験が可能となる。

実際にイネの根が干ばつ状況下に置かれた環境と、干ばつから回復し水分が十分に存在する環境下における炭素栄養の分配の様子を観察した。干ばつ状況に置かれたイネの地下部を X 線 CT によって撮影し、その後葉に  $^{11}\text{CO}_2$  を与えた後に PET によって根へと  $^{11}\text{C}$ -炭素栄養が運ばれる様

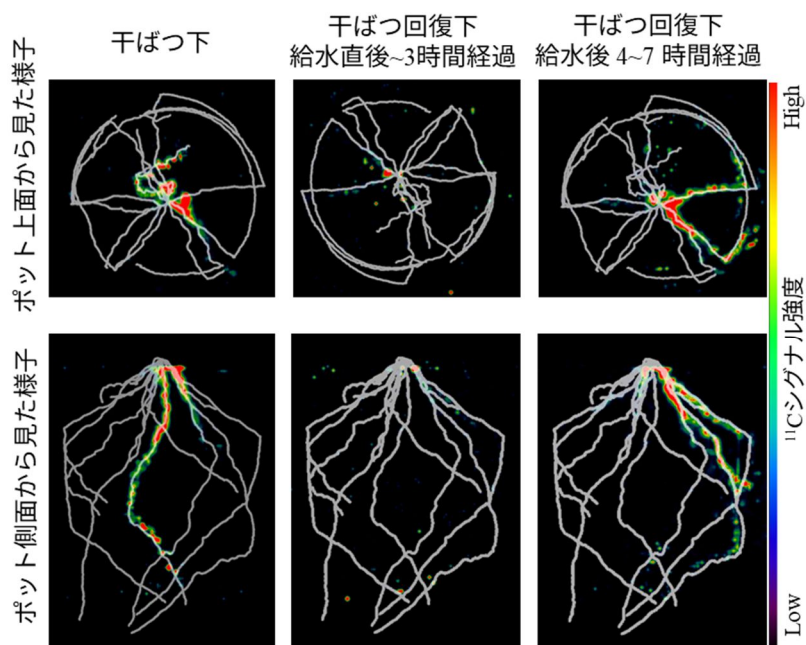


図1 X線 CT 装置で捉えた根の構造 (白黒画像) と PET で可視化した  $^{11}\text{C}$ -炭素栄養の様子 (RGB 画像)

子を3時間撮像、撮像終了後にプラスチックポットの底面を水に浸して、干ばつ状況下の土壌に給水し、再びイネの葉に $^{14}\text{C}$ を与え、根へ $^{14}\text{C}$ -炭素栄養が運ばれる様子を2度撮像した。

#### 4. 研究成果

図1に、X線CT装置で撮像した根の構造と、PETによる3時間の撮像で得られた積算画像を示す。RIイメージング技術を用いることで、目で見ることのできない土中の根に運ばれる炭素栄養の様子を可視化することができた。また、得られた画像より、土中の水分状態によって炭素栄養の分配先となる根が切り替わり、水分がほとんどない干ばつ状況下では土壌下層に向かって真下に伸びる根へ栄養を分配しているのに対し、土壌全体の水分量が増えると栄養の分配先が横方向に伸長する根へと切り替わることが示された。さらに、給水直後に実施した2回目の撮像時点で、真下へ伸びる根への炭素栄養の分配がほとんど観察できなくなっており、炭素栄養の分配先が切り替わる現象が土壌水分量の変化に応じて素早く行われていることが明らかになった。以上のことから、イネは通常横方向に伸長する根により多くの炭素栄養を送り、水分や養分の獲得機能を強化しながら生長するが、干ばつ状況下では土壌下層に存在する水分の吸収を最優先するために下方向に伸びる根へと炭素栄養を分配する。土壌に水が戻ると根の本来の機能を回復するため再び横方向に伸長する根に優先して炭素栄養を分配することが示された。

以上の結果をまとめると、断続的な干ばつを生き抜くイネの生存戦略の一端を捉えることに初めて成功したといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y.-G. Yin, Y. Mori, N. Suzui, K. Kurita, M. Yamaguchi, Y. Miyoshi, Y. Nagao, M. Ashikari, K. Nagai, N. Kawachi	4. 巻 232
2. 論文標題 Non-invasive imaging of hollow structures and gas movement revealed the gas partial pressure gradient-driven long-distance gas movement in the aerenchyma along the leaf blade to submerged organs in rice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Phytologist	6. 最初と最後の頁 1974-1984
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/nph.17726	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 -

1. 著者名 Miyoshi Yuta, Soma Fumiyuki, Yin Yong-Gen, Suzui Nobuo, Noda Yusaku, Enomoto Kazuyuki, Nagao Yuto, Yamaguchi Mitsutaka, Kawachi Naoki, Yoshida Eiji, Tashima Hideaki, Yamaya Taiga, Kuya Noriyuki, Teramoto Shota, Uga Yusaku	4. 巻 13
2. 論文標題 Rice immediately adapts the dynamics of photosynthates translocation to roots in response to changes in soil water environment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Plant Science	6. 最初と最後の頁 1024144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fpls.2022.1024144	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0件

〔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
研究分担者	神谷 富裕  (Kamiya Tomihiro)  (70370385)	群馬大学・大学院理工学府・教授    (12301)	

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	鈴木 伸郎  (Suzui Nobuo)		
研究協力者	山口 充孝  (Yamaguchi Mitsutaka)		
研究協力者	尹 永根  (Yin Yong-Gen)		
研究協力者	三好 悠太  (Miyoshi Yuta)		
研究協力者	長尾 悠人  (Nagao Yuto)		
研究協力者	野田 祐作  (Noda Yusaku)		
研究協力者	榎本 一之  (Enomoto Kazuyuki)		

## 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
---------	---------