

シンポジウム(口頭講演) | シンポジウム：植物RIイメージング技術の開発と農業への応用

2025年3月17日(月) 13:30 ~ 16:25 皿 K201 (講義棟)

[17p-K201-1~7] 植物RIイメージング技術の開発と農業への応用

河地 有木(量研)

13:30 ~ 13:35

[17p-K201-1]

開会挨拶

○河地 有木¹ (1.量研高崎研)

13:35 ~ 14:05

[17p-K201-2]

RIイメージング技術で可視化する植物炭素利用の賢い戦略

○尹 永根¹ (1.量研高崎研)

14:05 ~ 14:35

[17p-K201-3]

¹⁴C標識光合成産物動態解析とRNA-seqによる葉のシンクからソースへの移行に伴う遺伝子発現プロファイルの統合解析相馬 愛¹、杉田 亮平²、栗田 悠子¹、小林 奈通子¹、中西 友子¹、○田野井 慶太郎^{1,3} (1.東大院農、2.名古屋大RIセンター、3.F-REI)

14:50 ~ 15:20

[17p-K201-4]

放射線を活用した植物体内における金属元素の動態と局在の解析

○古川 純¹ (1.筑波大生命環境)

15:20 ~ 15:50

[17p-K201-5]

微小領域のベータ線イメージングからわかるリン酸輸送・応答機構

○菅野 里美¹ (1.名古屋大高等研)

15:50 ~ 16:20

[17p-K201-6]

高等植物の重金属動態制御機構の解明に向けたイメージング技術の利用

○中村 進一¹ (1.東農大生命科学)

16:20 ~ 16:25

[17p-K201-7]

閉会挨拶

○豊川 秀訓¹ (1.高輝度光科学研究センター)

RI イメージング技術で可視化する植物炭素利用の賢い戦略

Real-Time RI Imaging Method for Revealing the Clever Strategies

for Carbon Utilization in Plants

量研高崎研 ○尹 永根

QST Takasaki Institute for Advanced Quantum Science ○Yong-Gen Yin

E-mail: yin.yonggen@qst.go.jp

作物生産の本質は、葉の光合成によって生成された同化産物（炭素）を効率的に収穫部位へ集積させることである。同化産物は植物体内に広がる師部組織を経由して輸送されるため、この輸送プロセスを解明し、制御することが生産効率向上の鍵となる。そのためには、植物全体に張り巡らされた師部組織の物理的構造や、そこを流れる炭素動態という時間的・空間的に変化する生理的メカニズムを正確に把握する必要がある。

我々は、炭素の放射性同位体（RI、Radioisotope）である ^{11}C （ポジトロン放出核種、半減期約 20 分）で標識した二酸化炭素（ $^{11}\text{CO}_2$ ）と PETIS（Positron-emitting tracer imaging system）を用いた RI イメージング技術を開発している（図 1）。この技術により、葉の光合成で生成された ^{11}C 標識同化産物が地上部から地下部に至るまでの動態をリアルタイムで追跡し、画像化することが可能となっている。

地上部を対象とした研究では、イチゴやトマトをモデル作物として、葉から果実への炭素輸送ネットワークの規則性について解析を進めている（図 1 上）。得られた師部輸送の構造情報（anatomy）と動態情報（dynamics）を統合した「転流アナトミクス」を構築し、これを基に炭素の流れを収穫部位へ意図的に誘導する画期的な栽培技術の開発を目指している。

一方、地下部に運ばれた同化産物は、根から

分泌物として放出され、その働きによって土壌や微生物と相互作用しながら根圏（rhizosphere）を形成している。この根圏領域は根の養分吸収を促進する重要な役割を果たしているが、地中における微量な分泌物の動態を直接観察することが難しいため、どこが根圏なのか特定することが困難であった。そこで、RI イメージングを活用し、根から土壌へ放出される ^{11}C 標識分泌物を可視化することで「根圏イメージング技術」を開発した（図 1 下）。

本発表では、これらの技術を活用した植物の炭素を利用した生存戦略の解明に向けた取り組みについて紹介するとともに、作物生産の効率化や持続可能な農業技術への応用可能性について議論する。

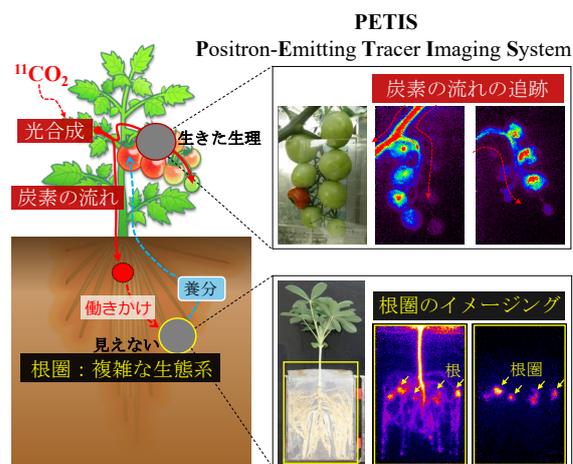


図 1 $^{11}\text{CO}_2$ と PETIS を用いた植物体内の炭素の流れと根が形成する根圏の可視化例

^{14}C 標識光合成産物動態解析と RNA-seq による葉のシンクからソースへの移行に伴う遺伝子発現プロファイルの統合解析

Integrated analysis of the leaf sink-to-source transition using ^{14}C -labelled photosynthate kinetics and gene expression analysis with RNA-seq data

相馬 愛¹, 杉田 亮平², 栗田 悠子¹, 小林 奈通子¹, 中西 友子¹, ○田野井 慶太郎^{1,3}

Ai Kaiho-Soma¹, Ryohei Sugita², Yuko Kurita¹, Natsuko I. Kobayashi¹, Tomoko M. Nakanishi¹,
○Keitaro Tanoi^{1,3}

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科, ² 名古屋大学アイソトープ総合センター, ³ 福島国際研究
教育機構 (F-REI)

E-mail: uktanoi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

植物は光エネルギーを利用して、水と二酸化炭素から酸素と炭水化物を作り出す光合成を行っている。この光合成は植物にとって欠かせない重要な反応であり、主に葉緑体を豊富に含む葉で行われている。光合成で生成された炭水化物は、主に糖として篩管を通して植物体の各部位へと輸送される。輸送先は新芽、果実、根などの成長が盛んな部分で、これらはシンクと呼ばれ、輸送元である葉はソースと呼ばれている。葉は、若く未成熟である間には他の葉から糖を受け取るシンクであるが、成長と共に光合成量が増え、他の部分へと糖を供給するソースへと変化する。シンク-ソースのバランスは植物の成長速度や果実生産量に大きく関わることから、シンクからソースへの移行のメカニズムを明らかにすることで農作物の生産性向上への寄与が期待できる。そこで本研究ではダイズを用いて、葉のシンク-ソースの移行に伴う統合解析を行った。

シンク-ソースの移行時期を特定するために ^{14}C 標識された二酸化炭素 ($^{14}\text{CO}_2$) をソースである葉に吸収させ、葉内で合成されて輸送される ^{14}C 標識光合成産物の動態解析を行った。 $^{14}\text{CO}_2$ を吸収した葉より上位にある若い葉は、成長に伴い、 ^{14}C 標識光合成産物の受け取り量が減少していた。第二本葉 (L2) が他の成熟葉からの光合成産物の受け取りを停止する時期は、第一本葉 (L1) の大きさの 75% に達した時点であった。このシンク-ソースの切り替わり時にどのようなイベントが葉で行われているのか、RNA-seq による遺伝子発現プロファイルからの解析を試みた。その結果、ショ糖の代謝や輸送に関わる遺伝子の多くはシンクからソースになるにつれ発現が上昇する一方で、シンクで高い発現を示し、ソースへの移行とともに発現が低下する遺伝子も確認された。これらの遺伝子はシンクおよびソース機能に関わる重要な因子であると考えられる。

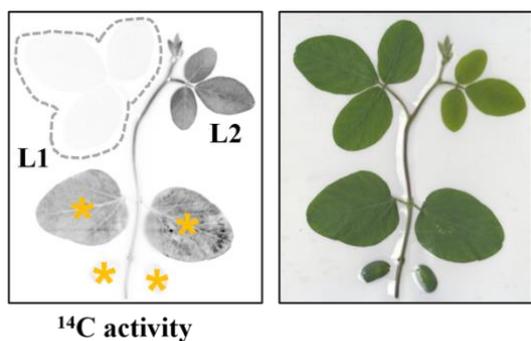


Figure: Distribution of ^{14}C in soybean. The left panel shows the autoradiograph, while the right panel shows a photograph. The asterisks (*) indicate the $^{14}\text{CO}_2$ -absorbed leaves. The ^{14}C activity of L2 reflects the translocated ^{14}C -photosynthates. L1: first trifoliolate, L2: second trifoliolate.

放射線を活用した植物体内における金属元素の動態と局在の解析

Behavior and Localization of Metal Elements in Plants Investigated by the Radiation

筑波大生命環境¹ ○古川 純¹

Univ. Tsukuba¹ ○Jun Furukawa¹

E-mail: furukawa.jun.fn@u.tsukuba.ac.jp

植物の成長には、窒素、リン、カリウムのように多量に必要とされる養分のみならず、鉄、マンガン、亜鉛、銅などといった金属元素も重要な役割を担う。これら必須栄養元素を吸収・輸送するメカニズムは、植物が健全に成長するために欠かせないものであり、農業生産量の拡大や高付加価値な作物の栽培にも関連している。植物科学分野における金属元素の動態研究では、対象元素の挙動を制御する多種多様な遺伝子の機能を解明することが主要な目的となるため、分子生物学的な解析を実施する部位とタイミングの適切な選択が重要である。そのため、ポジトロンイメージング装置 (PETIS) やコンプトンカメラを用いた非侵襲での元素動態解析や、大気マイクロ粒子励起 X 線放出 (PIXE) 分析などによる高解像度な元素局在解析といった、植物体内の元素分布を可視化する多様な手法を相補的に組み合わせることで解析の効率化が大きく進むものと考えている。本発表ではマメ科のモデル植物であるミヤコグサにおける複数金属集積機構を例として、植物における金属元素の動態解析に対する放射線計測手法の貢献について紹介する。

ミヤコグサの MG-20 と B-129 という 2 つの品種を対象として含有元素濃度の比較を行ったところ、B-129 においてマンガン、ニッケル、銅、亜鉛などを高濃度に根と地上部に蓄積している一方で、根から地上部への鉄の長距離輸送が抑制されていることを示唆する結果を得た。この原因を明らかにするために根の横断切片を作成し、PIXE 法で鉄の局在解析を行ったところ、B-129 の根において中心柱の維管束組織に鉄の蓄積が観察された。維管束を介して根から地上部へと鉄を輸送するには鉄を導管内に輸送する IREG 輸送体と、導管内で鉄と錯体を形成するとされるクエン酸を導管内に輸送する FRD3 輸送体が関与することが知られている。そこで、これら遺伝子の発現量を両系統で比較したところ、FRD3 の発現量が B-129 で約半分に抑制されていることが明らかになった。これは導管内のクエン酸量が不十分であるために、鉄の移動性が低下していることが長距離輸送能の低さの原因となっていることを示唆するものである。この条件下で根の表層で根圏から鉄を細胞内に吸収する IRT1 輸送体の発現量を比較すると、B-129 で MG-20 の約 3 倍となっており、地上部への鉄輸送活性が低い B-129 では鉄の吸収機構が活性化されていることが示された。シロイヌナズナを用いた先行研究から IRT1 はマンガン、コバルト、亜鉛の吸収にも関与することが知られていることから、鉄欠乏あるいは鉄過剰条件で 4 日間栽培したミヤコグサを用いて PETIS 法により亜鉛の吸収を可視化したところ、鉄欠乏状態の植物では高い亜鉛吸収能が、鉄過剰状態の植物では亜鉛吸収能の減少が認められた。これらの結果は鉄の栄養状態に応じて亜鉛の吸収が制御されることを示したものであり、B-129 のマンガンや亜鉛の高蓄積には鉄の長距離輸送能の低さに起因する IRT1 の発現誘導が関与していることを示唆するものとなった。

微小領域のベータ線イメージングからわかるリン酸輸送・応答機構

Phosphate transport and response mechanisms revealed by micro-regional

beta ray imaging.

名古屋大高等研

Nagoya Univ. IAR, °Satomi Kanno

E-mail: kanno.satomi@iar.nagoya-u.ac.jp

植物は、環境から元素を吸収し生育を最適に制御する。しかしながら、いつ・どこに・どれくらいの元素を吸収・輸送制御するかについての全貌は未解明である。これらの基礎的な知見は作物生産における肥料の最適化を考える上で重要である。しかしながら、その理解のためには、経時的に植物を採取し、分析する破壊的手法が主であることから、同一個体での連続的な解析は難しく、特に解析対象物質が少ない微小組織での連続的な解析は容易ではない。

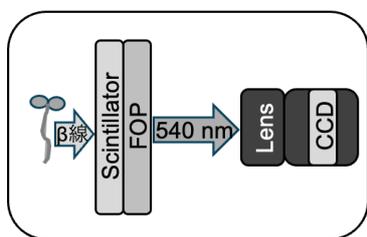


Figure 1. Principle of the first model of Realtime Radioisotope Imaging System (RRIS). Radiation (β -rays) is converted into visible light by phosphor and detected by CCD camera.

本研究は、先行研究で立ち上げた放射性トレーサとシンチレータを

使った非破壊イメージング実験系 (Fig. 1) を基本に、その検出感度や空間分解能を対物レンズやイメージセンサーを利用して向上させることにより、モデル植物シロイヌナズナを個体レベルから細胞間レベルまでの元素トレーサ挙動と集積の偏りを明らかにしてきた (Fig. 2, 3)。さらに、これらのイメージングシステムと分子生物学を組み合わせることで根の組織の栄養吸収への寄与の違いを検証した。環境から細胞へのリン酸輸送を担う細胞膜上に局在するリン酸輸送体タンパク質の種類や個体での局在パターンやこれらの遺伝子変異株でのリン酸トレーサ (ベータ線) イメージングにより生体内におけるリン酸輸送体タンパク質の機能を評価し、植物個体全体の生育に対する根端細胞のリン酸吸収寄与の高さを明らかにした。

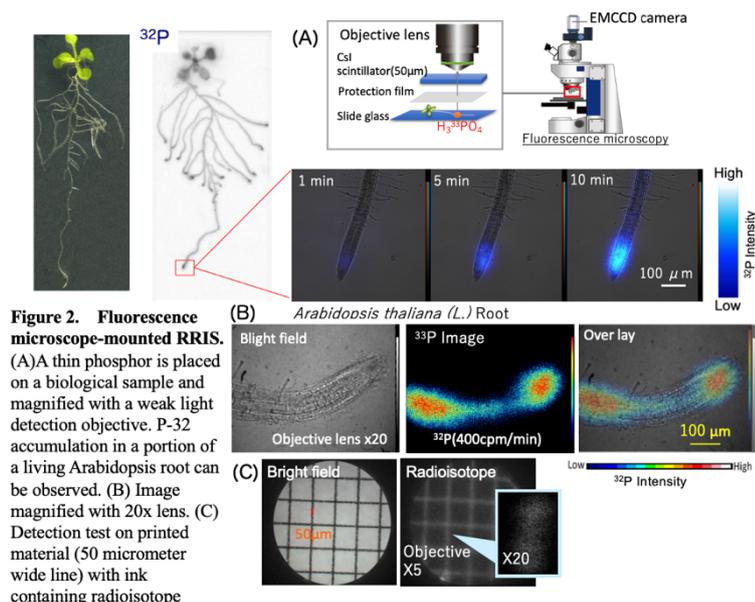


Figure 2. Fluorescence microscope-mounted RRIS. (A) A thin phosphor is placed on a biological sample and magnified with a weak light detection objective. P-32 accumulation in a portion of a living *Arabidopsis* root can be observed. (B) Image magnified with 20x lens. (C) Detection test on printed material (50 micrometer wide line) with ink containing radioisotope

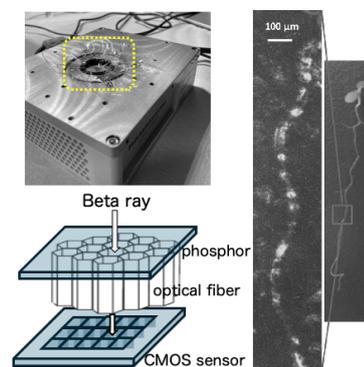


Figure 3. CMOS sensor system with phosphor.

A system of phosphor and CMOS sensor connected by optical fiber. Differences in P-32 accumulation between *Arabidopsis* root tissues are visible. Detection sensitivity is greatly improved. Spatial resolution is 15 μm .

高等植物の重金属動態制御機構の解明に向けたイメージング技術の利用

Application of Imaging Techniques to Elucidate the Regulatory Mechanisms of Heavy Metal Behaviors in Higher Plants

東農大生命科学¹ ○中村 進一¹

Tokyo Univ. Agric.¹ °Shin-ichi Nakamura¹

E-mail: sn206169@nodai.ac.jp

有害重金属元素であるカドミウム(Cd)の農作物への蓄積は我々の食の安全を脅かす要因となりうる。可食部分(主に植物体の地上部)への Cd の移行・蓄積の抑制は Cd 含量の少ない安全な農作物の栽培技術の確立に繋がる。アブラナ根に部位特異的に与えた生理活性ペプチドのグルタチオンは植物体の地上部への Cd の移行と蓄積を選択的に抑制する。今回の発表ではポジトロンイメージング実験、マイクロ粒子線励起 X 線分析(PIXE)実験などを行ったグルタチオンが活性化する植物体内における Cd 動態の制御機構の解明に向けた取り組みを紹介する。

実験材料にはアブラナ(品種 ; 農林 16 号、Westar)を用いた。栽培条件を完全に制御できる人工気象器内でアブラナを水耕栽培した。植物体内の Cd 量や植物体の地上部への Cd 移行率は元素分析の結果から算出した。ポジトロンイメージング実験、マイクロ PIXE 実験は量研機構高崎量子技術基盤研究所のイオン照射研究施設(TIARA)で実施した。ポジトロンイメージング実験では Cd のポジトロン放出核種として ¹⁰⁷Cd を用いた。この実験ではアブラナにおける Cd 動態を可視化するとともに、得られた画像データを解析し、グルタチオンが Cd 動態に及ぼす影響を評価した。また、マイクロ PIXE 実験では、根における Cd 組織内分布の可視化に注力した。

ポジトロンイメージングによって、根に与えたグルタチオンが Cd 動態を制御している様子を可視化できた。各部位に関心領域を設定して、Cd 蓄積の経時変化を調べるところグルタチオンによる植物根からの Cd 排出の活性化が明らかになった。地上部基部(植物体の地上部と地下部の境界部分)ではグルタチオンによって、Cd 返送 (導管から篩管への Cd の積み換え) が活性化していた。さらにグルタチオンは植物根の Cd 保持能も高めていた。化学形態が異なる(酸化型・還元型)グルタチオンは Cd 動態に及ぼす影響が異なることや Cd 動態の制御には根圏に一定量以上のグルタチオンの存在が必要であることなども確認している。また、マイクロ PIXE によって根の Cd 組織内分布を可視化した結果はこれまでの研究で得られた実験結果を支持するものであった。

グルタチオンはアブラナ根における Cd の保持、根から Cd の排出、アブラナ地上部基部における Cd の返送など複数の Cd 動態の制御機構に関与して、アブラナの地上部への Cd の移行と蓄積を抑制していることが明らかになった。