展望 TENBO

植物研究に求められる RI イメージング技術とは

河地　有木
Kawachi Naoki
（量子科学技術研究開発機構）

1　はじめに

人類の生存は，土壌や大気から吸収した様々な元素を特定の器官に蓄積するという植物の機能の上に成り立っている。したがって，植物研究の分野では，環境中に存在するこのような必須元素や有害元素を吸収・移行・蓄積する生理機能の解明が求められている。ラジオアイソトープ（Radioisotope；RI）とイメージングプレートを使用するオートラジオグラフィ法は，この分野の研究に大きく貢献してきたが，実験時に対象となる生理活性を停止させてしまうデメリットを持つ。近年では，この RI トレーサを一定条件下の生きた植物体の根や葉に吸収させ，体内を移行する“動き”を画像化する，様々なイメージング装置が開発された。このような背景のもと，関心元素*の動態を解析する植物 RI イメージングという技術が，植物研究の分野における新たな方法論として発展している[1)]。

本稿では，このコンセプトを実現するために登場したイメージング装置や，実際の植物を対象とした RI イメージング実験に要求される性能を軸に，この技術を概説し，今後の植物研究に求められる植物 RI イメージング技術のあるべき姿を展望したい。

2　植物研究用イメージング装置と医用イメージング装置の違い

植物研究用の放射線イメージング装置は，医用のイメージング装置を導入，もしくは改良することで形作られてきた背景がある。しかし，医学では薬剤・化合物の体内分布が，植物研究の分野では元素の動態が主な関心対象であるという点が異なっている。例えば，ポジトロン断層法（Positron Emission Tomography；PET）や単一光子放射断層撮影（Single photon emission computed tomography；SPECT）を用いる核医学診断では，特定の部位に集まるように薬剤が設計され，これを ^{11}C ポジトロン放出核種や ^{18}F ポジトロン放出核種といった RI で標識する。したがって，ポジトロン放出核種が集中したポイントを，短時間で描出することがイメージング装置に対する要求性能となる。一方，生体内の様々な関心元素の移行が測定対象となる植物研究では，これに応じた多くの種類の RI そのものの動きをイメージングすることが求められる。さらに，その RI がシグナルとして放出する放射線の種類は β 線，X 線，γ 線と多岐にわたり，各エネルギーもそれぞれ異なってくる。^{99m}Tc やポジトロン放出核種など限られた種類の RI を撮像する医用装置とは異なり，広い領域をカバーできるイメージング装置が植物研究に求められ，これが植物 RI イメージング技術における開発のカギとなっている。

* 関心元素：研究テーマの関心対象となる元素。

近年，シンチレータ，半導体，電子回路等の放射線検出器の基盤技術が革新され，放射線イメージング装置の設計の自由度は飛躍的に向上している。例えば，シンチレータが発した光を増幅させ電気信号に変換する光電子増倍管（PMT）においては，シリコン半導体型光電子増倍管（SiPM）が主流となりつつある。SiPM は PMT と比較して，低い動作電圧，高い耐久性，小さな物理的サイズ，軽量，高い磁場耐性といった長所を持つが，特定用途向け集積回路（Application Specific Intergrated Circuit；ASIC）の開発が必要であり，コストの面で敬遠される傾向にあった。しかし，ASIC 開発が容易になり，SiPM の長所を活用した，従来にない新しい形を持つ RI イメージング装置の開発が多く見られるようになった。

植物研究のような，多様な元素動態の解明を目的とする場合，個々の課題に応じて，放射線検出に最適な測定原理を持つイメージング装置と，それを利用した植物 RI イメージング技術を用意すべきであると考える。つまり，ある特定の用途に限った最先端技術よりも，汎用性の高い技術を複数使用できる実験環境の整備が，RI イメージング技術を用いた植物研究に求められていると言える。

3 植物研究用の RI イメージング装置

約 20 年前から，量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所（高崎研）にある研究グループでは，様々な植物 RI イメージング技術を開発してきた。本章では，1. 植物 PET とも言われるポジトロンイメージング技術（Positron Emitting Tracer Imaging System；PETIS），2. 放射性 Cs の植物における体内動態の撮像を可能にしたガンマカメライメージング技術，3. その他今後の開発が期待されるユニークな植物 RI イメージング技術について，それぞれの特色を概説する。

ここで，それぞれの技術は，体内の関心元素の“動き”を捉えることを目的としているため，測定対象となる植物の育成環境を再現しつつ，非接触でイメージングすることが必須となる。医用イメージング技術における PET や SPECT は，“低侵襲”な診断法であることがそのメリットとして挙げられるが，これら植物研究のための RI イメージング技術には，より厳密な“非侵襲”が要求される。

3.1 ポジトロンイメージング

高崎研で発展してきた植物 PET，いわゆる PETIS は医用 PET と同様に，関心元素である RI の存在位置を推定するため，ポジトロン放出核種の物理的な特性（対消滅によって約 180° 方向に 2 本の 511 keV γ 線を同時に放出）を用いている。この手法は，他のイメージング技術と比べ非常に高い感度を持つ。そのため，装置視野内に分布する数 MBq の RI を数秒間でイメージングできるため，例えば一分間で数 cm 移行する篩管流といった速い元素動態が，^{11}C を標識した二酸化炭素で撮像可能となる。光合成によって合成されたショ糖の移行や光合成における炭素動態を追跡し，光合成機能の解析から作物の生産性まで議論できる，^{11}C と PETIS を用いる実験系は，今後も数多くの成果が期待できる（**図 1**）。

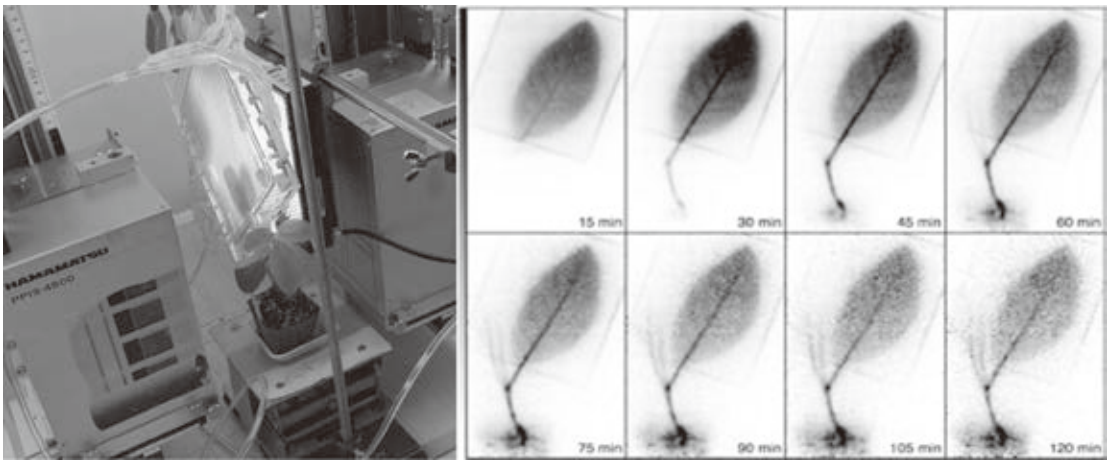

図 1　ポジトロンイメージング装置とこれを用いて撮像したタバコ葉内の炭素動態の撮像結果
合成されたショ糖が地下部に移行している様子がわかる

ポジトロン放出割合がほぼ100％の^{11}C，^{13}N，^{15}O，^{18}Fで合成されたPET用RI標識薬剤ではなく，PETISでは^{22}Na，^{52}Mn，^{52}Fe，^{107}CdといったRI溶液を用いたイメージング実験で，植物体内の微量必須元素や環境汚染物質の動態を解明してきた。「ヨシはなぜ塩水でも育つのか」という疑問を元に，植物の耐塩性に関する生理機能を解明することを目的とした，^{22}Naを用いたRIイメージング実験では，根の中でNaを送り返す動きを撮像することに成功している[2)]。国内で最も深刻な環境汚染物質であったCdに関して，植物による吸収・移行を制御するため，イネ，アブラナ，ソルガム，セダムを対象として^{107}Cdでイメージング実験を行った。私たちの健康被害を引き起こす原因元素であるだけでなく，植物にとっても有害なCdが，根から吸収され，どのような化学形態で地上部に運ばれ，導管や篩管を介してどの器官を経由し体内に蓄積されるのか，という根本的な生理メカニズムを明らかにしてきた。^{107}Cdはポジトロン放出割合が，0.2％と微量ではあるが，そもそもCdの移行が1時間で数cm程度と非常に遅いため，撮像にかけられる時間は十分にあり，イメージング装置の感度は大きな要求性能とはならない。^{107}Cdトレーサの合成法から，動きが遅い元素を撮像するため数日間にわたる測定環境を維持する技術が，イメージング実験の成否を左右する要因となる。植物の成長を見込んだ視野設定，放射性トレーサを含む水耕液の水面を一定に保つ工夫や植物体内に効率よく送り込む方法が例として挙げられる。

本手法の解像度，いわゆる空間分解能は，数mmのオーダーとなる。これは，511 keVの高エネルギーγ線を止めることのできるシンチレータのサイズ，対消滅γ線放出時の角度揺動，ポジトロンの飛程，などで制限されている。特に，ポジトロンの飛程（放出されたポジトロンが対消滅を起こすまでの距離）はRIの周辺密度に依存しており，非常に薄い草本植物が実験対象となる場合は，ポジトロンが体外に抜けてしまう可能性があり，イメージング実験時の注意が必要である。関心元素の輸送タンパク質の同定を目的とした分子生物学的手法と異なり，植物RIイメージング技術では体外から体内への移行や，器官・組織間の移行・蓄積が撮像対象と設定するため，この空間分解能でも十分に有効なイメージング実験が設計できる。むしろ，画像強度と放射能量との間の幅広いダイナミックレンジや線形応答性がイメージング装置にとって重要な性能となる。

3.2　ガンマカメライメージング

植物RIイメージング技術において，測定対象となる関心元素のすべてがポジトロン放出核種とは限らない。この場合，物理的なコリメータを用いてγ線の到来方向を推定するガンマカメライメージング技術が最も堅実な手法だと言える。しかしながら，γ線のエネルギーが高くなるにつれてコリメーションが困難になり，空間分解能が劣化する。さらに，検出器に届く放射線がコリメータによって減少するため，感度もポジトロンイメージングに比べ格段に劣る。よって，ガンマカメラを用いた植物研究では，半減期の長いRIを用いた，数時間単位，数日単位の元素動態がイメージングの対象となる。

前章で環境汚染物質Cdに対する取り組みについて述べたが，福島における原発事故以降，放射性Csが最も深刻な環境汚染物質となった。作物による放射性Csの吸収・移行・蓄積といった生理機能の解析，もしくは土壌浄化用Cs高集積植物の解析と評価などが重要な課題となっている。そこで，植物体内の^{137}Cs動態をイメージングするため，ピンホール型ガンマカメラを開発した。ピンホール型ガンマカメラとは，いわゆる針穴写真機と同じメカニズムで，^{137}Csから放出される622keV γ線をピンホールで絞り，放射性Csの分布を撮像する（**図2**）。環境中の放射性Csをモニタするガンマカメラは様々な種類のものが開発されたが，植物RIイメージング技術では画像の定量性を重視した装置開発が求められた。製作したピンホール型ガンマカメラの^{137}Csに対する空間分解能は数cmのオーダーとなっ

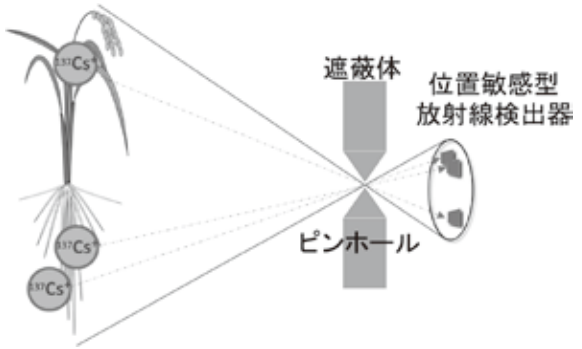

図2　ピンホール型ガンマカメラの測定原理

た。ダイズを対象にしたイメージング実験では，導管流に比べ遅い移行速度や，成長期における特定部位への蓄積といった分配様式が明らかになった[3)]。

低エネルギー γ 線や特性 X 線を放出する RI を対象とした場合，物理的コリメータにおける放射線の透過が最小限に押さえられることから，ピンホール型ガンマカメラはサブミリオーダー以上の空間分解能を獲得できることになる。人や小動物が撮像対象である場合は，体内から検出器に届くまでの放射線の減弱が大きいため現実的ではなかったが，厚みが薄い草本植物であれば十分に有用なイメージング技術となる。すでに，東北大学や名古屋大学でも開発が始まっており，より詳細な物質動態の解析が期待される。

3.3　その他のイメージング技術

ポジトロンイメージングでは使用できる核種が限られる，ガンマカメラでは感度が低い，といった各技術のデメリットを補い，粒子線励起 X 線（Particle Induced X-ray Emission；PIXE）のような複数元素の同時解析を可能にする次世代のイメージング装置として，コンプトンカメラが注目されている。コンプトンカメラはガンマカメラの一種として，福島の環境モニタ用のイメージング装置として，数多くの開発が行われた[4)]。この装置の原理は，検出器内のコンプトン散乱を精確に計測し，散乱の運動学から γ 線の到来方向を推定し，放射性同位元素の分布を描出するものである。このため，位置分解能，エネルギー分解能が高い検出器素子と，膨大な計測データを処理できる電子回路の開発が必須となる。イメージング装置としての概念は，PET と同時期に発表されたものであるが，ASIC をはじめとする電子回路と画像再構成アルゴリズムの開発が高いハードルであったため，近年ようやくコンプトンカメラが現実のものとなってきた。生体内の複数の元素を同時に撮像し，体内物質の相互作用を明らかにしようという研究，またより多くの核種を用いた RI イメージングを実現し，多様な生体内物質を追跡しようという研究が，このコンプトンカメライメージング技術で切り開かれていくことが期待されている。当研究グループでも，植物にとって害となる Na と必須栄養元素である Mn の動態を同時に撮像する実験を行い，植物 RI イメージング技術としての有用性を示してきた。

器官・組織間を移行する元素動態を撮像する植物 RI イメージング技術にとって，より高い次元の空間分解能は不要である，と述べたが，イメージング装置を開発する研究者にとって，さらなる空間分解能の向上は避けて通ることのできない課題である。しかしながら，生体を透過する X 線，γ 線が検出対象とした場合，検出素子内における光子の飛程を鑑みると劇的な空間分解能の向上は見込めない。いわゆる“発想の転換”が必要であった。IP を用いた植物研究では β 線放出核種が多く用いられており，実際にオートラジオグラフィ法を発展させた東京大学のリアルタイムイメージング装置では高い分解能を実現している。これは β 線の飛程が，空間分解能にほぼ等しいと考えられるからである。ただし，β 線の検出するイメージング装置では，電子の組織透過性によって定量値に誤差を生じさせる。表面にくらべ深い組織に分布する RI からの β 線は減弱する。そこで，β 線が組織中を走る際に発生する微弱な，チェレンコフ光（**図 3**）に着目したイメージング技術が開発された[5)]。このチェレンコフ光は β 線の飛程と比較して RI 近傍で発生し，さらには光学技術を用いた集光や拡大・縮小が容易となるため，数十 μm オーダーの分解能が実現できる，将来有望なイメージング技術であるといえる。

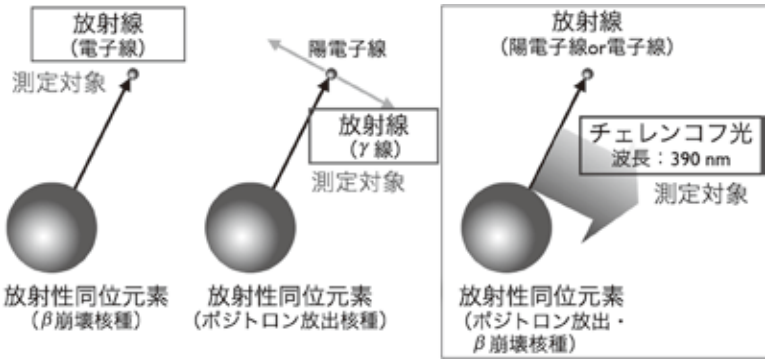

図 3　チェレンコフ光イメージングの測定原理
（左，中央）にあるように放射性同位元素からの放射線を直接測定するのでなく，（右）にあるように副次的に放出される微弱な光を測定する。測定対象が光であるため，光学レンズの使用が可能となる。また，CCD カメラは放射線イメージング装置に比べ安価である

4 おわりに

植物研究を対象としたRIイメージング技術には，まだ多様多種な応用範囲が広がっており，今後も数多くの応用研究に利用され，その進展に大きく寄与できると思われる。ただし，この技術開発には学際的な研究チームによる取り組みが必要不可欠であり，筆者としては，若い研究者達がこの学際分野に飛び込んで来ることを希望する。本稿で紹介した，ポジトロンイメージング以外の多くのイメージング技術については，応用研究は模索段階であり，未だ道半ばである。RIをトレーサとして用いた植物RIイメージング実験技術の発展が，植物研究のみならずイメージング技術の開発研究をさらに推進するものになることを切望する。

参考文献

1）大山卓爾，放射線と産業，**132**，2–3（2012）
2）Fujimaki, S., *et al*., *PCP*, **56**, 943–950（2015）
3）Kawachi, N., *et al*., *J. Environ. Radioact*., **151**, 461–467（2016）
4）先端計測分析技術・機器開発プログラム 放射線計測領域成果集（2015）
5）Yamamoto, S., *et al*., *NIMA*, **777**, 102–109（2015）