



展 TENBO 望

理工学部会 企画 *

植物イメージングの最近の話題



松嶋 卯月

Matsushima Uzuki
(岩手大学農学部)

1 はじめに

植物体はその重さの約90%以上が水で構成され、その生長、体内の物質移動はもとより植物体の温度調整にも水は不可欠である。しかし、植物は動物と異なり、生息している場所から容易に移動することができないため、必要な量の水をいかにして得るか、また、得られた水をいかに効率的に利用するかがその生存、生長戦略上重要になる。例えば、養液土耕法を用いて、土壤水分と肥料濃度を常に最適範囲内に保つよう制御すると、1日1度一定量の水を供給され、慣行に従って施肥した場合に比べ、夏秋トマトの 10 a^{*1} 当たり収量は1割増える¹⁾。しかし、自然の状態でそのように植物にとって都合よく水が存在することはまれで、植物は周囲の状況を検知し、状況に応じて土壤中の水のある場所を目指し根を伸張させたり、空気の湿度や土壤中の水分が低下した場合は気孔を閉じることで植物体の乾燥を防いだりする。このような植物の環境への応答について、入力と出力、例えば、入力が土壤水分で出力が根の伸張

である場合、その関係と介在するメカニズムは水分屈性であることが知られているが、根の内部の水分布や水移動についてはあまり研究されていない。根の周りに生長に十分な水がないために根を水のある場所に伸張させたいのならば、その根を伸張するために使用される水はいったいどこから供給されているのだろうか。もしも、植物内部の水の移動がライブイメージングとして目にする事ができるなら、周囲の環境と植物応答の間に隠されている様々な現象が現れると期待される。

中性子イメージングは、中性子ビームが物質に照射されたときの物質による透過度の違いを利用しており、これまで、理工学、生物学、考古学をはじめ様々な分野で非破壊検査法として利用されている。中性子イメージングは水に対する感度が高いため、植物内の水分布を観察するのに適しており、これまで、ダイズ根系の3次元分布や、植物葉の水分分布の観察などに応用されている。筆者らは、中性子イメージングと重水トレーサを併用することで、植物体内の水移動を可視化する方法を確立したが、近年、その方法を応用した植物根系による水吸収の可視化等の研究例が見られるようになってきた。ここでは、これまでの中性子イメージングの植

* 中性子応用専門委員会

*¹⁾ $\text{a} = 100 \text{ m}^2$

物研究への応用と水移動の可視化に関する最近の研究動向について紹介する。

2 植物の中性子イメージング

2.1 植物の水分布と中性子イメージ

中性子イメージングは、試料を透過した中性子ビームを検出器で捉え画像を得る。中性子ビームは、試料中の物質に吸収、散乱されるため減衰し、中性子ビームの透過度の違いが濃淡画像として現れる。中性子ビームにおける吸収と散乱は、物質を構成する元素の原子核によって異なり、水素、リチウム、ホウ素などの軽原子で減衰が大きい。植物を主に構成する水は水素の化合物であるため、植物に照射された中性子ビームの減衰は、ほとんどが植物内部の水によるものと言える(図1)。得られる中性子イメージには、もちろん植物を構成する炭素、酸素、窒素、その他の元素による像も含まれる。しかし、水以外の植物内における物質は生長によって増加するため、生長の程度が無視できる短時間における中性子イメージの変化は、植物内部の水分布の変化であると考えられる。この方法については、1990年代にT.M. Nakanishiらが、セイヨウアブラナ種子の中性子イメージングを行い、試料内における水分分布の可視化



図1 コマツナの中性子イメージ
画素が暗いほど中性子の減衰が大きいことを示す

を行った²⁾。また、土壌の鉱物による中性子ビームの減衰が水と比較して低い点に着目した中西らは、土壌中における植物根系及び土壌水分の分布を3次元画像で可視化した³⁾。土壌中の根系を非破壊で可視化することはその他の方法では難しく、中性子イメージングを用いた植物研究において主要な応用法となっている。

2.2 蒸散流の可視化

植物内の水分分布とその変化は、中性子イメージングによって得ることができるが、植物内を水が流れる方向を知るのには難しい。物質の流れを可視化する場合はトレーサを使用するのが一般的であるが、植物の場合は、重水をトレーサとして利用することができる。水素(^1H)の安定同位体である重水素(^2H)による中性子ビームの減衰は、水素の1/15と大きく異なるため、ビームの減衰による影は、水(H_2O)がトレーサである重水(D_2O)に置き換わったところで薄くなる。一方で、植物の根にはカस्पリー線と呼ばれる疎水性の構造があり、根からの物質の自由な出入りを制限している。そのため、通常、植物内にはそれが必要とする物質しか入らないが、重水(D_2O)は化学的性質が水によく似るため、植物の根から吸収される。筆者らはこの性質を利用し、中性子イメージングと重水トレーサを用い植物内における蒸散流の可視化を試みた⁴⁾。図2は、トウモロコシの根が重水を吸収する様子である。重水トレーサが水と置き換わり、中性子ビームが透過しやすくなった部分を画素値の増加として示す。時間の経過とともにトウモロコシの根に重水が吸収されたことが分かる。この方法を用いることで、植物茎を流れる重水トレーサのベクトルをオプティカルフロー計算法^{*2}で推定することも可能である⁵⁾。

*2 オプティカルフロー計算法：視覚表現(デジタル画像)の中で物体の動きをベクトルで表したものを。

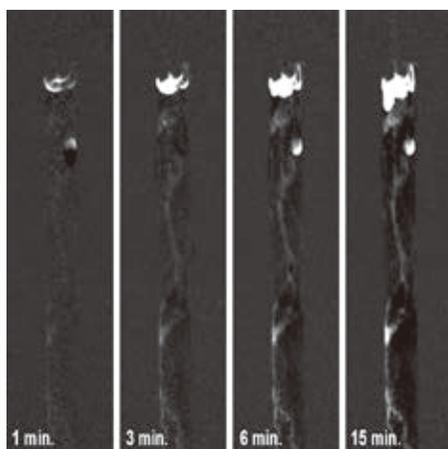


図2 トウモロコシの根が重水を吸収する様子
画素が明るいほど重水の吸収が大きいことを示す。時間経過とともに重水吸収の程度が増した

3 最近の動向

3.1 水移動観察における応用研究例

中性子イメージングと重水トレーサを併用した植物体内水移動を可視化は、その方法を応用した植物根系による水吸収の可視化等の研究例が見られるようになってきたので、その幾つかを紹介する。植物根系における水移動については、Warren らが、根の構造、生長、その含水率、また、土壤含水率を中性子イメージングによって計測した。彼らは灌水すると湿潤土から急激に水が吸収され、根系を經由し、乾燥状態の根を經由し、最終的には乾燥した土壤に水が輸送されることを明らかにし、それぞれの根における流束は水の需要と供給の度合いによって異なると述べた⁶⁾。さらに、M. Zarebanadkouki らは、1本の植物根における軸方向の場所によって水吸収能力が異なることを、重水トレーサを供給する位置を変えることによって明らかにした。また、ルピナス根系における水吸収は、そのほとんどを支根が担い、その水がシュー

*3 シュート：茎と葉でなりたち、いわゆる通常の植物における地上部をかたち作る。

ト*³に送られると結論づけた⁷⁾。一方でD. Defraeye らが、植物葉内の水移動については、採取された葉について葉脈の構造を観察し、乾燥した葉と生体葉を比較することでその含水率を、さらに、重水トレーサによって葉内における水移動を可視化することで水吸収量を推定した⁸⁾。以上のように、短期間で多くの研究グループが中性子イメージングと重水トレーサの併用による水移動の可視化法を用い、植物内における水移動について研究を進め、今後も研究の新たな展開が期待できる。

3.2 根系観察における応用研究例

Nakanishi ら³⁾、Warren ら⁶⁾、Zarebanadkouki ら⁷⁾をはじめとする土壤中における根系の観察には、多くの場合、シリコンを主成分とし中性子の透過性が高い砂が培地として利用される。砂は、また含水率が低い特徴も持ち、中性子イメージングに向いている。逆に、含水率の高い粘土質や有機物を多く含む土壌を用いる場合、植物を植えるポットの径によっては中性子が透過せず、画像が得られないか、中性子の透過度がほぼ等しく中性子イメージ上において培地と根の区別がつかない。そこで、植物栽培培地の水分分布を中性子イメージングで、根系の分布を写真で撮影し、両者の関係について観察した例について紹介する。試料としてもみ殻培地に定植したコマツナ、「みすぎ」を用いた。もみ殻培地とは、容積比率でもみ殻を75%、赤土を25%を混合し、それに木炭粉、肥効調節型肥料を作型ごとに適量加えて調製したものである⁹⁾。コマツナを生育させたアルミ製コンテナの一部を取り除くと、もみ殻培地表面に発達した根系を観察することができるが、この画像から根系のみを抽出して中性子イメージに重ねることで根系と培地内の水分分布との関係を推定することができる(図3)。図中のコマツナは、高さ15 cmのアルミコンテナの下部5 cmの高さまで灌水して栽培した試料であり、培地下部と上部における根系の形状が異なる。24時間、水の供給を行わないと、培地上部の根系が発達

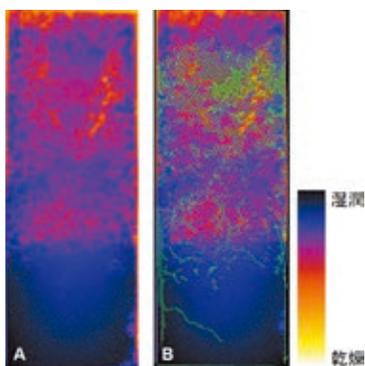


図3 コマツナ根系の抽出画像ともみ殻培地の中性子イメージ
A：もみ殻培地の中性子イメージ，B：中性子イメージと根系抽出画像の重ね合わせ

した部分における水分が減少したが、湛水によって水を供給すると、乾燥が進んだ培地上部において水分が増加した。培地上部には直接水を供給していないため、培地下部の湛水域から培地上部に運ばれたことが推察される。もみ殻培地は間隙が多く培地のみでの毛管上昇は起こりにくいいため、培地上部への水の移動にはその領域に発達したコマツナ根系が何らかの働きをしていると考えられる。

4 おわりに

以上、これまでの中性子イメージングの植物研究への応用と水移動の可視化に関する最近の研究動向について紹介した。中性子イメージングは、高分解能が得られるイメージング装置、大強度陽子加速施設（J-PARC）におけるパル

ス中性子源の利用により更なる発展が期待されている。本稿が少しでも植物研究への中性子イメージングにおける応用の発展に繋がれば幸いである。

参考文献

- 1) 六本木和男, 加藤俊博, 野菜・花卉の養液土耕 (第1版), pp.33-34, 農文協, 東京 (2000)
- 2) Nakanishi, T.M., Inagawa, S., *et al.*, Non-destructive analysis of rape plant pod by neutron radiography, *Radioisotopes*, **40**, 126-128 (1991)
- 3) Nakanishi, T.M., Okuni, Y., *et al.*, Water gradient profiles at bean plant roots determined by neutron beam analysis, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **264**, 313-317 (2005)
- 4) Matsushima, U., Herppich, W.B., *et al.*, 3-dimensional water flow imaging using cold neutron and D_2O tracer, *BENSC Exp. Rep.* 2007, 183 (2008)
- 5) Matsushima, U., Herppich, W.B., *et al.*, Estimation of water flow velocity in small plants using cold neutron imaging with D_2O tracer, *Nucl. Inst. Met.*, **A605**, 146-149 (2009)
- 6) Warren, J.M., Bilheux, H., *et al.*, Neutron imaging reveals internal plant water dynamics, *Plant Soil*, **366**, 683-693 (2013)
- 7) Zarebanadkouki, M., Kim, Y.X., *et al.*, Where do roots take up water? Neutron radiography of water flow into the roots of transpiring plants growing in soil, *New Phytol.*, **199**, 1034-1044 (2013)
- 8) Defraeye, T., Derome, D., *et al.*, Quantitative neutron imaging of water distribution, venation network and sap flow in leaves, *Planta*, DOI 10.1007/s00425-014-2093-3 (2014)
- 9) Ozawa, K., Yamamumra, M., *et al.*, Rice-cheff and composite as a culture medium for vegetable seedlings, *Acta. Hort.*, **319**, 407-412 (1992)