

中性子線による根—土壌系の水の CT イメージング

中西友子*・古川 純*・松林政仁**

CT Imaging of Water in Root-Soil System by Neutron Beam

Tomoko M. NAKANISHI*, Jun FURUKAWA* and Masashi MATSUBAYASHI**

* Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

** Neutron Research Center, Tokai Establishment, Japan
 Atomic Energy Research Institute

Abstract

We present neutron imaging of water in root-soil system by an X-ray film method as well as CT method. In the case of an X-ray film method, a soybean seedling grown in a thin aluminum container was fixed on an aluminum cassette and was irradiated for 19 seconds by thermal neutrons from a research reactor, JRR-3M, installed at Japan Atomic Energy Research Institute. The neutron flux from the reactor was 1.5×10^8 n/cm²·s. A gadolinium n/γ converter, which thickness was 25 μm, and an X-ray film were sealed in vacuum in the cassette. To get a CT image, the soybean seedling grown in a cylindrical container was fixed on a rotating disk and was irradiated for 4 seconds per projection. The neutrons penetrating the sample was converted to photons by a fluorescence converter. The photon image was guided to a cooled CCD camera using two mirrors. The sample was rotated with an interval of 1 degree for 180 degree, i.e. 180 images were obtained for the CT construction. Neutron beams allowed to image not only a root imbedded in soil but also water movement in the vicinity of the root. The method is non-destructive, therefore, morphological development of the root but also water movement near the root was able to be visualized. Through piling up the CT images, which were successively taken every 50 μm, three dimensional water image of the root-soil system was constructed.

Key words : neutron beam, CT imaging, soybean, water image, root-soil system

1. はじめに

水は生体の基本物質であるにもかかわらずその動態はほとんど知られていない。その最大の理由のひとつに計測手法がまだ未発達な点が挙げられる。

根の水分吸収モデルは Gardner (1960) が提唱した考え方がその基本であり、根は一様なシリンダーとみなされてきた。つまり、根のモデル化においては一本の根の水分吸収能の多様性について考慮に入れられてきていない。それは、根の水分吸収動態を最も直接的に反映していると予想される、根から 1 mm 以内における土壌中の根近傍の水分動態について、実際の実験が困難なことか

らほとんど測定値が報告されてこなかったからである。

我々は水の構成元素である水素により特異的に吸収・散乱する中性子線を用い、生体物質とくに生きた植物試料を中心にその中に含まれる水の動態を非破壊状態で可視化させることを試みてきた (Nakanishi *et al.*, 1997, 1998)。本法を用いると根—土壌系において育成中の根の形態および根近傍の水分像を得ることができる (Furukawa *et al.*, 1999)。

非破壊計測手法として生体試料の可視化法に通常よく用いられる X 線は、原子番号の高い、いわゆる固いものの検出に役立ってきた。一方、中性子線は X 線とは逆に柔らかいもの、とくに水素、リチウム、ホウ素などを検

* 東京大学大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

** 日本原子力研究所中性子科学研究センター中性子利用技術開発室 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根

キーワード: 中性子線, CT イメージング, サイズ, 水分像, 根—土壌系

出することができる。電子と相互作用するX線の場合には、一般に元素の外殻電子密度が高くなるに従い次第に通過する線量が減少するが、中性子線の場合には核反応であるため元素によって阻止される線量はX線の100倍から1,000倍も異なる。特に水素の場合には重金属元素よりも約1,000倍吸収・散乱能があるため、生体に中性子線を照射すると水素に特異的な像を得ることができる。生きている細胞の約8割は水で構成されているため、水素の像とは水の像であり、つまり水により組織の形態が示されることになる。

水の計測にはNMR法も可能であるが、試料の大きさに限りがあること、また空間分解能は理論的に $10\mu\text{m}$ 以下にはならないことが証明されている(Callaghan, 1991)。そのため、非破壊状態で生体物質中の水の動態を高い分解能で調べるためには、中性子線の利用が最良な手法といえるだろう。

本研究では、我々が今まで行ってきたX線フィルムを用いた中性子線による可視化手法をさらに発展させ、CCDカメラを用いた多角度における像からCT像(Computer Tomography, 断面像)を得ることを試みた。X線フィルム法とは全く異なる可視化系を組み立てて得られた像をコンピュータで処理したところ、空間的な根-土壌系の水分像を得ることができたので報告する。

2. 実験方法

1) X線フィルム法

実験は日本原子力研究所の研究炉JRR-3Mの路室内で行った。植物試料はダイズ(*Glycine Max. Merr. cv. Tsurunoko*)を用いた。播種後、根の長さが約30mmに育成した段階で水分を18%添加した豊浦標準砂を充填させたアルミニウム製の薄い容器(70mm×160mm×3mm, アルミニウム厚:1mm)に移し変え、原子炉内に

設置したファイトトロン中で育成させた。薄い容器は厚さが3mmとなるよう、2枚のアルミニウム板の間にスペーサーとなるアクリルの棒を挟んだ。また、アルミニウム板の内面にはテフロンシートを貼った。育成中、容器中の水分の蒸発を防ぐため、容器の周囲をアルミニウムテープで密閉した。植物試料は中性子線を照射する直前に育成器から取り出し、アルミニウム製カセット上に固定した。カセットには、試料を通り抜けた中性子線を放射線に変換するガドリニウムコンバータ(Gdを $25\mu\text{m}$ の厚さに塗布したもの)とX線フィルム(Kodak, SR)を減圧封入させた。この試料を固定したカセットは鉛直に固定し、カセット面に垂直に中性子線の照射を19秒間行った(図1左)。原子炉からの熱中性子線束は、 $1.5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ であった。

試料中の水分量を定量したり、異なるX線フィルム像を比較したりするため、厚さが1, 2, 3, 4および5mmと階段状に異なるアルミニウム製の容器を作製し、この容器中に水を封入した標準試料用もカセットに固定して照射した。

照射後、カセットおよび植物育成容器などのアルミニウムから生成する ^{28}Al (半減期:2.3分)が減衰し、放出される γ 線強度が充分低くなるまで約10分間待った後、カセット内のX線フィルムを取り出し現像した。使用したフィルムは乳剤が片面のみ塗布されたものであり、現像ムラが出やすいため、現像を行っている際にはフィルムを動かさないなど細心の注意が必要であった。X線フィルム上の像は、スキャナー(Sharp製, JX-32F6)でコンピュータに取り込み、標準試料像と比較することにより、黒化度が水分量を示すように画像を再構築した。

2) CTイメージング

播種後5日目のダイズ幼植物を35mmのアルミニウ

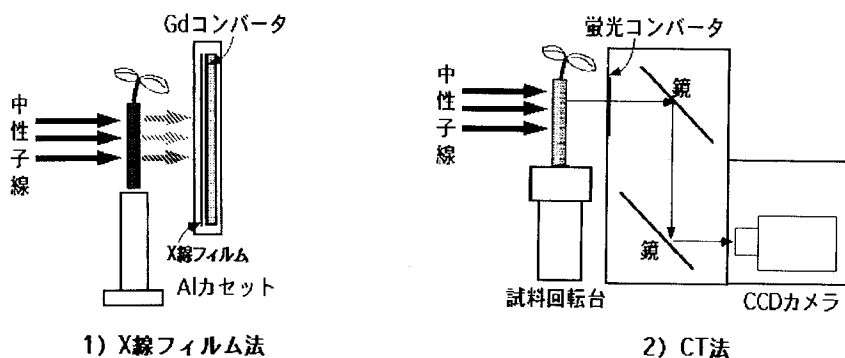


図-1 中性子線によるイメージング(X線フィルム法およびCT法)の模式図

Fig. 1 Neutron imaging by 1) X-ray film method and 2) CT method

ム製の円筒容器（アルミニウム厚：1 mm）に移し変え、ファイトトロンにて育成を行った。容器中には、水分 15% を含む、豊浦標準砂を充填し、よくシールした。植物試料はファイトトロンで 3 日間生育させた後、JRR-3 M で熱中性子線を照射した。

CT 像を得るためには、何枚もの画像を処理する必要がある。しかし X 線フィルムで一枚毎の像を得ては毎回セットするフィルムの試料に対する位置が少しずつずれるため、各フィルムから取り出す像の正確な位置決めを行うことができない。そこで、X 線フィルムの代わりに分解能が高くノイズが低い冷却型 CCD カメラ（浜松ホトニクス製、C4880）を用いた。冷却型 CCD カメラを使用する場合には試料を通り抜けた中性子線を光に変換する必要がある。しかし、前述の X 線フィルム法で使用したガドリニウムコンバータでは中性子線は放射線のみに変換されるため CCD カメラでは像を得ることができない。そこで、中性子線を光に変換する蛍光コンバータの開発が必要であった。調製した蛍光コンバータ（NRC 95）は ${}^6\text{LiF}:\text{ZnS}(\text{Ag})=4:6$ となるように混合し硝酸セルロースでアルミニウム板に直接 1 mm の厚さでコーティングしたものである。また、中性子照射チェインバー内は中性子線により放射化された物質から γ 線などが発生していることから、放射線に非常に敏感なチップを内蔵した冷却型 CCD カメラはできる限りビームから遠い所で、かつ充分なしゃへい体内に設置させなくてはならない。そのため、コンバータからの光を暗箱中二つの鏡を用いて反射させ、中性子ビーム軸とは離れた位置に設置した CCD カメラへ導入した（光路：約 90 cm）。蛍光コンバータと CCD カメラの間の距離が短いほど CCD カメラで得られる像の 1 ピクセル上での画像面積の大きさが小さくなり、見かけ上での分解能は高くなる。しかし、散乱放射線による CCD カメラ内のチップの損傷をできる限り少なくするため、鏡を用いてしゃへい体内に CCD カメラを設置する必要がある。そのため蛍光コンバータからカメラまでの光路は約 90 cm となった。また試料を水平に精確に回転させる回転台も用意し、回転の制御ならびにカメラのシャッターはコンピュータにより制御できるようにした。CCD カメラにはニコン製 Micro Nikkor F=105 mm レンズを取り付けた。中性子照射チェインバー中の装置の模式図を図 1 右に示した。

植物試料は回転台に固定し中性子線のシャッターは全開とした。試料台は 1 度ずつ回転させながら各角度において 4 秒間シャッターを開き、冷却型 CCD カメラで撮像した。一つの試料で画像は 180 度まで、合計 180 枚の画像を CCD カメラで撮像しコンピュータ処理により

CT 像を構築した。取り込まれる各角度における像はリアルタイムでコンピュータによりモニターした。180 枚の画像を撮り終わるのに約 1 時間を要した。蛍光コンバータ（面積：50 mm×60 mm）の画像をコンピュータ上の 500×600 pixel の画像として取り込んだ。CT 画像を構築するためのアルゴリズムは Filtered Back Projection Method を用い、Shepp & Logan Filter を使用した。ソフトウェアは IP Lab Spectrum 3.1.1 C であった。

3. 実験結果と考察

1) X 線フィルム法

ダイズの発根し始めた根および周辺土壌中の水分像を図 2 に示す。アルミ薄箱中（厚さ 3 mm）に水分 18% を添加した豊浦標準砂中で 8 日（左図）および 15 日間（右図）育成させた場合の像である。試料中水分量が多い部分ほど通り抜けられる中性子数が減少するため、その箇

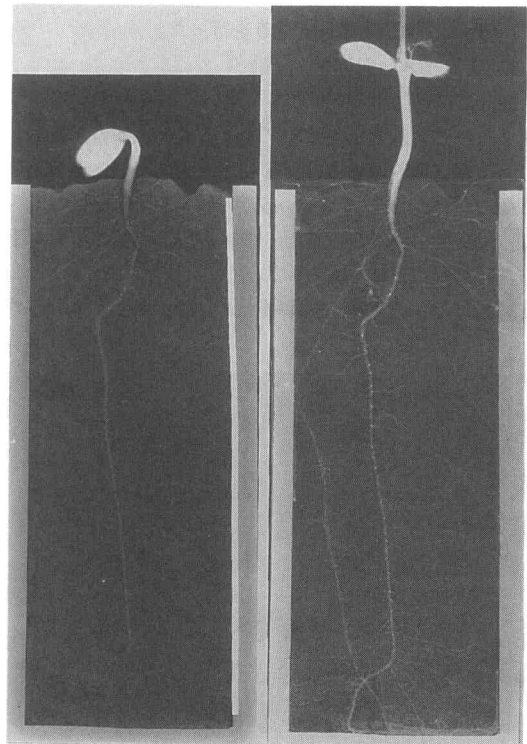


図-2 中性子線による生育過程におけるダイズの根および土壌中の水分像（左：8 日目，右：15 日目）

Fig. 2 Water imaging of soybean root imbedded in soil by neutron beam (left : 8 days, right : 15 days)

所の X 線フィルムの感光され方が少なくなり、現像後はより白い像となる。根周辺土壌中の水分量よりも根中の水分量の方が多いため、根の像が鮮明に写っている。図中、黒い箇所ほど水分が根に吸収され少なくなっていることを示している。8 日目の像ではとくに主根の上部から水分が吸収されていることが根近傍の黒くなった像から判る。主根の所々白くなった点は、この箇所から側根が前方または後方に生育している所である。主根と側根が重なったため水分量が多くなりより白い像となった。

ダイズを育成させながら経時的に像を撮っていくと、根の形態変化ならびに根の長さを測定することができる。豊浦標準砂を用い、土壌水分量が 15% の場合には、20 mm 厚のアルミニウム箱でもダイズの主根を像として得ることができた (データ省略)。

しかし、X 線フィルム法では試料中の全ての水分量が重なった像となるため、例えば、側根が主根の手前側から生育しているのか、または後ろ側からかというような空間的な位置関係を知ることはできない。そこで次に CT (断面) 像を構築する試みを行った。

2) CT イメージング

図 3 に冷却型 CCD カメラを用いて得られた、アルミニウムの円筒に育成させたダイズの根の上部の例を示した。X 線フィルム像とは異なり、蛍光コンバータを用いた像では黒いところほど水分が多い箇所を表わしている。左右の根が曲がっているのは、円筒の壁にあたり下向きとなったためである。

図 3 に示された像の分解能は約 $100\mu\text{m}$ と見積もられ

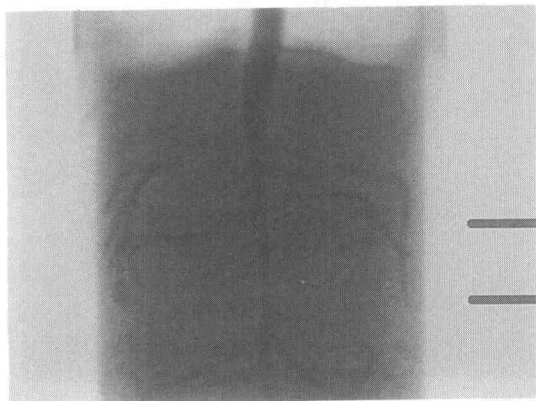


図-3 冷却型 CCD カメラで得られたダイズの根および土壌中の水分像

Fig. 3 A water image of soybean root imbedded in soil through cooled CCD camera

た。中性子線による水の可視化像の分解能は、現在のところ電子顕微鏡の場合の銅やニッケルで作製された標準物質により実際に像を作ることができないことから実験的に求めることはできない。そこで便宜的にコンピュータで取り込まれた画像上の 1 ピクセルの大ききで分解能を見積もっている。CT 像の場合には上述のようにカメラをコンバータに接した位置に設置できないことから X 線フィルムを用いる場合よりも分解能は低くなる。コンバータと試料間の距離が短いほど得られる像の分解能は高くなるからである。X 線フィルム法の場合にも同様に分解能は約 $16\mu\text{m}$ と見積もっている (Nakanishi et al., 1997)。

図 3 のような画像を各角度ごとに撮り、180 枚、全ての画像から同じ高さにおける 1 ピクセルラインの画像を取り出して、コンピュータにより、任意の高さにおける CT 像を構築した。

図 4 は、図 3 に示した 10 mm の範囲の CT 像を、下部へ 1 mm づつ連続的に求めた CT 像である。番号が大きくなるほど試料の下部となる。これらの像の中心にある白い点は主根であり、その他の白い点は、各断面図上にある側根の像である。主根に接した黒い部分は根に吸収され土壌水分が減少したところである。これらの水平な CT スライス像は $50\mu\text{m}$ ごとに取得可能であったため、上部から下部まで全ての高さにおける CT 像を全て構築するとコンピュータ上では連続的な映像として見る事ができる (データ省略)。

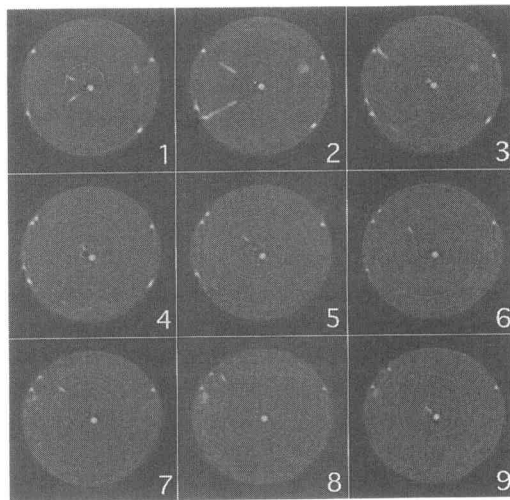


図-4 図 3 に示した箇所における CT 像 (上部から 1 mm おきに順に示した)

Fig. 4 Successive CT images, every 1 mm, at the part indicated in Fig. 4

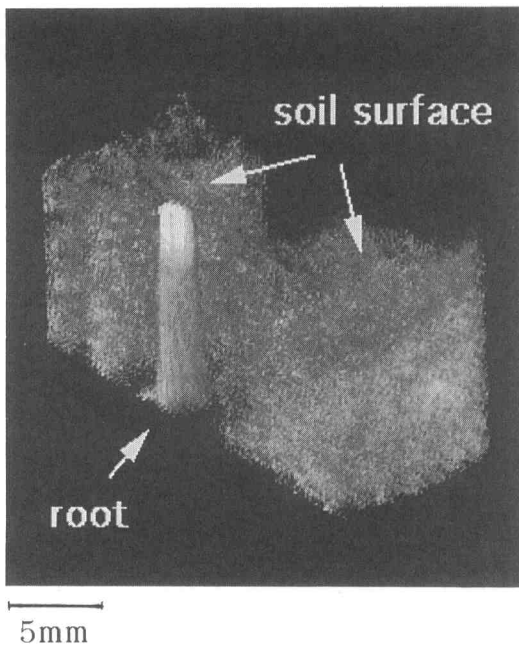


図-5 CT 像 400 枚を重ね合わせて得られた根上部の水の立体像

Fig. 5 Three dimensional water image of the upper root in soil, obtained by piling up the 400 CT images

根の上部の CT 像を 400 枚分重ね合せると高さ 2 cm の土壌中の根近傍の水の立体像を得ることが可能であった (図 5)。この場合には、得られた CT 像を全て重ねると根が見えなくなるため、主根のところで元の画像を切り分け約半分の像を積み重ねた。中心には主根が示されており、土壌中の水分分布は根の近傍で減少していることが示された。

4. ま と め

根から 1 mm 以内の水分動態は根の活動を最も良く反映していると予想されているにも拘わらず、実際の実験が困難であることから殆ど報告されてこなかった。中性子線を用いると根および根近傍の水分分布を非破壊状態で可視化することができる。中性子線を用いた根-土壌系の空間的な水分分布像を得ることは初めての試みであ

る。装置上の問題から CCD カメラを用いた CT 画像の分解能はまだ X 線手法と比較して低いものの、全ての高さにおける水平 CT 像を用いると、任意の角度面における空間的な水の分布を可視化させることが可能である。本手法により土壌中の生きた根の活動がさらに解析されることを期待したい。

引 用 文 献

- Callaghan, P.T. (1991) : Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy. p. 203, Oxford Science, Oxford.
- Furukawa, J., Nakanishi, T.M. and Matsubayashi, M. (1999) : Neutron Radiography of a Root Growing in Soil with Vanadium. Nucl. Instrum. Meth. in Physics Research A, **424** : 116~121.
- Gardner, W.R. (1960) : Dynamics Aspects of Water Availability to Plant. Soil Sci., 89 (2), 63~73.
- Nakanishi, T.M., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M. (1997) : Water Movement in Plant. Fifth World Conference on Neutron Radiography. DGZfp (Deutsche Gesellschaft für Zertörungsfreie Prüfung E.V.) Publisher.
- Nakanishi, T.M. and Matsubayashi, M. (1997) : Nondestructive Water Imaging by Neutron Beam Analysis in Living Plants. J. Plant Phys., **151** : 442~445.
- Nakanishi, T.M. and Matsubayashi, M. (1997) : Water Imaging of Seeds by Neutron Beam. Bioimages, 5 (2) : 45~48.
- Nakanishi, T.M., Okano, T., Karakama, I., Ishihara, T. and Matsubayashi, M. (1998) : Three Dimensional Imaging of Moisture in Wood Disk by Neutron Beam During Drying Process. Holtzforschung., **52** : 673~676.
- Nakanishi, T.M., Karakama, I., Sakura, T. and Matsubayashi, M. (1998) : Moisture Imaging of a Camphor Tree by Neutron Beam. Radioisotopes, **47** : 387~491.

受稿年月日：1999年1月6日

受理年月日：1999年5月28日