

資料

ライフサイエンスのためのアイソトープ測定機器(第五シリーズ)  
“ライフサイエンスにおけるイメージング”

## VII. 中性子イメージングの生命科学への応用 —最近の動向から—

松嶋卯月

Reprinted from  
RADIOISOTOPES, Vol.56, No.9  
September 2007



Japan Radioisotope Association

<http://www.jrias.or.jp/>

## 資 料



## ライフサイエンスのためのアイソトープ測定機器 (第五シリーズ) “ライフサイエンスにおけるイメージング”

### Ⅶ. 中性子イメージングの生命科学への応用—最近の動向から—<sup>†</sup>

松嶋卯月

岩手大学農学部農学生命課程  
020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

Key Words : neutron imaging, life science, neutron radiography, water, plant

#### 1. はじめに

中性子イメージングは、比較的金属元素を透過しやすく水素など軽元素が観察可能であるという、X線イメージングとは異なった性質を持つ。そのため金属を透過した水の動きを可視化する目的で、燃料電池内の水移動<sup>1)</sup>、二層流の解析<sup>2)</sup>など主に工業分野の非破壊計測に広く応用されている。一方、生命科学の分野では水素に対する中性子の減衰係数が高いことを利用して、主に植物、特に根中の非破壊水分測定に使われてきた<sup>3),4)</sup>。近年は中性子ビームにおけるエネルギー選択の幅が広がったこと、中性子イメージング法及び装置の進歩を背景に生命科学分野における応用例が増加している。しかしながら、同様に生命科学分野に応用されるX線イメージングやMRイメージングと相互に補完する道を探る必要性があるなどの課題も多い。ここでは、中性子イメージングの生命科学への応用について、日本及び欧州を中心とした最近の動向に筆者らの研究を付け加えて紹介する。

#### 2. イメージング法及び装置の動向

ここでは、中性子イメージングの生命科学への応用に不可欠であると思われる技術の進歩について述べる。

##### 2・1 高速イメージングの実現

多くの中性子イメージング装置において中性子CT装置が導入され、生体試料においても3次元中性子イメージを得ることが容易になってきた。しかし、中性子CTイメージの使用目的にもよるが、生体試料を観察する上で十分な画像分解能を持つCTイメージを得るには、試料を回転させながら200枚から300枚の透過画像を撮影する必要がある。生体試料の非破壊イメージングを行う場合、イメージング中にいかに試料の鮮度を保つかが課題の一つとなるが、中性子CTイメージングでは特に撮影時間の長期化が鮮度保持上の問題となることが多い。中性子CTイメージングに要する時間を短縮するには、透過画像を短時間で撮影する必要がある。また、生体試料の非破壊イメージングでは試料が生命活動中にあることが多く、そのため画像上の位置が変化する。試料中の水分変化や器官の成長などを追跡する場合その変化の速度にもよるが、撮影に要する時間はできるだけ短いことが望ましい。持木らは、生命科学分野における中性子イメージングへの要求にこたえること

<sup>†</sup>Instruments for Radiation Measurement in Life Sciences(5). “Development of Imaging Technology in Life Sciences”. Ⅶ. Neutron Imaging for Life Science—Recent Studies—.

Uzuki MATSUSHIMA : Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8, Ueda, Morioka-shi, Iwate Pref. 020-8550, Japan.

ができる、高感度かつ撮影ダイナミックレンジが広い中性子線用カラーイメージ・インテンシファイアを試作した<sup>5)</sup>。その結果、シンチレータとカラー CCD カメラの最適化により、従来の P20 シンチレータよりも 6 倍感度を向上させ、JRR-3M の中性子ラジオグラフィ照射ポートで、金属内の水の動きをシャッター速度 1/10 000 秒で映像化できることを確認した。本技術を用いることで中性子 CT イメージングに要する時間を飛躍的に短縮でき、様々な生体試料撮影への応用が期待される。

## 2・2 画像の高分解能化

生命科学分野への中性子イメージングの応用において、もっとも望まれている技術革新の一つが画像の高分解能化であると考えられる。現在のところ、中性子ビームに対してシンチレータ及び CCD カメラの組み合わせを用いて像を得る場合、画像分解能は 100  $\mu\text{m}$  程度が限界とされる<sup>6)</sup>。しかし、生物細胞を観察するためには、少なくとも 5  $\mu\text{m}$  以下の画像分解能が必要であろう。スイスの PSI 研究所において、低エネルギー中性子ビームに一般的に使われるものより薄いシンチレータを組み合わせより高い画像分解能を得る試みがなされた<sup>7)~9)</sup>。ミラーで反射されたシンチレータ上の像はレンズで拡大され CCD で取り込まれる。その装置設定による画像分解能はおよそ 25  $\mu\text{m}$  であった<sup>†</sup>。しかし、本方法による画像分解能はほぼ限界に達したと考えられており、更なる高画像分解能を求めるとは技術的なブレイクスルーが必要であると思われる。細胞レベルにおける中性子イメージングが可能になれば生命科学分野への応用は更に広がると予想され、今後の技術開発が望まれるところである。

## 2・3 トレーサの利用

生体中において、水は常に必要とされること

ろへ供給される。たとえば血液は、常に動物の体内を循環し細胞に酸素や栄養等を供給する。また、植物は蒸散流によって葉に水を供給する。試料の厚さあるいは構成する元素の減衰係数によって濃淡が表れる中性子イメージングあるいは X 線イメージングのみでは、試料中における血液や水など流体の定常的な流れを可視化することができない。そのため、医用 X 線画像撮影では血流を観察するためにトレーサとしてヨード造影剤等が用いられる。一方、中性子イメージングでは生体試料に対してトレーサを利用した例はあまり見られない。そこで、筆者らは、トレーサとして重水を用いて植物体内の定常的な水の流れの観察を試みた<sup>10)</sup>。重水素は水素と比較して中性子の減衰係数が小さいため、重水素と酸素からなる重水は水より中性子を透過しやすい。その結果、透過画像における影は、水が重水に置き換わったところほど薄くなる。図 1 は、重水トレーサの可視化実験時の照射室内の写真である。実験は Hahn-Meitner-Institute (HMI), ドイツで行われた。実験装置は冷中性子ラジオグラフィ装置, CONRAD で、使用した撮影位置である PositionII における中性子束は  $5.8 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \text{ s}$  であった。CONRAD の詳細については後に述べる。図 2 は、トマト苗木内における重水のトレーサの移動を示した画像である。時間経過に従って、重水が植物サンプルの上方へと広がったことが観察された。植物の根にはカスバリー線という水やイオンを透過させない層がある。しかし、ところどころに膜孔、通過細胞と呼ばれる部分があり水やイオンは、一部は拡散で、しかし大部分は選択的に植物内に取り入れられる<sup>11)</sup>。重水は水と化学的性質が似ているため、トマト苗は画像中にコントラスト差が現れるのに十分な重水を吸収し、そのため水の流れの観察が可能であった。しかし、重水以外のトレーサとしてホウ素等の減衰係数が高い元素を与える場合、植物体内に通常存在する量を著しく超える量はカスバリー線を越えることができず、植物によって吸収されな

<sup>†</sup> Lehmann, E. H., Personal communication.

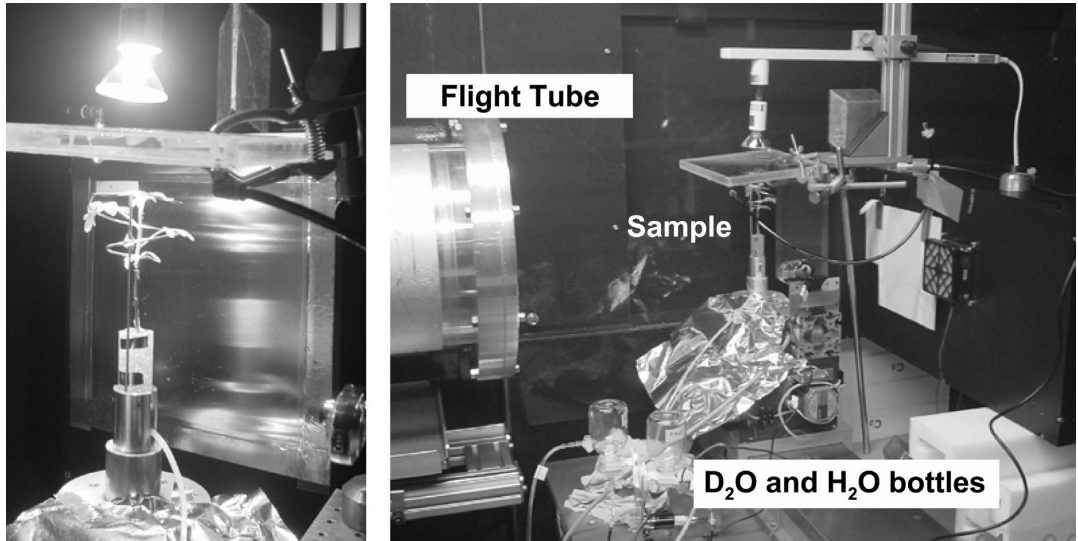


図1 重水トレーサの可視化実験時の照射室内。右：重水トレーサ装置全景 左：トマト試料

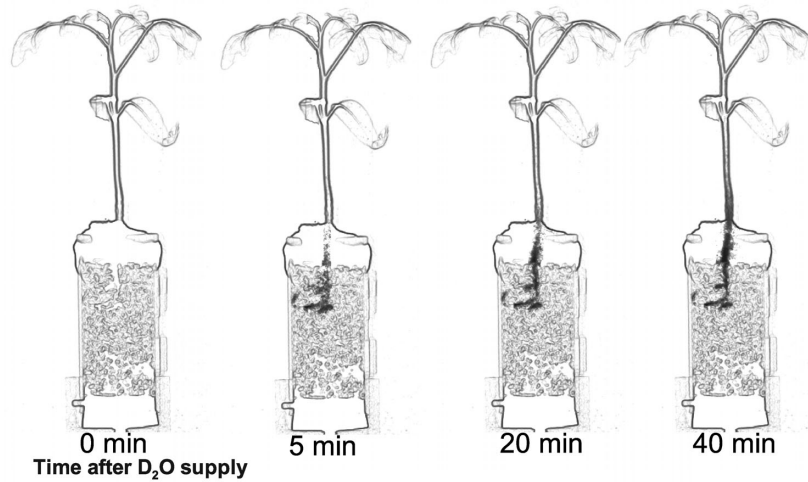


図2 トマト苗木内における重水トレーサの移動。図中に黒く示された所が重水が水に置き換わった部分である

いと考えられる。またトマト苗はソーダガラスビーズを充填した直径約2 cmの石英ガラスチューブに植えられているため、水から重水へのトレーサの入れ替えが容易で、なおかつ石英ガラス及びソーダガラスビーズには中性子の透過性があり、重水供給時には根が重水を吸収する様子が観察できる。すなわち、根も含めた画像情報を取得することが可能である。

また、中性子CTイメージングに重水トレー

サを用いることで、3次元の重水マップを得ることができる<sup>12)</sup>。図3はバラ切り花に重水トレーサを与えてから6時間後の重水マップである。中性子CTイメージングにより得られた3次元の重水マップから花柄における一断面を抜き出した。図3-Bの擬似カラーは右に添付されたカラーバーに従い、赤に近いほど重水の置換量が多い。図3-Cは重水マッピングに用いたものとは異なる試料ではあるが、同じ品種における花

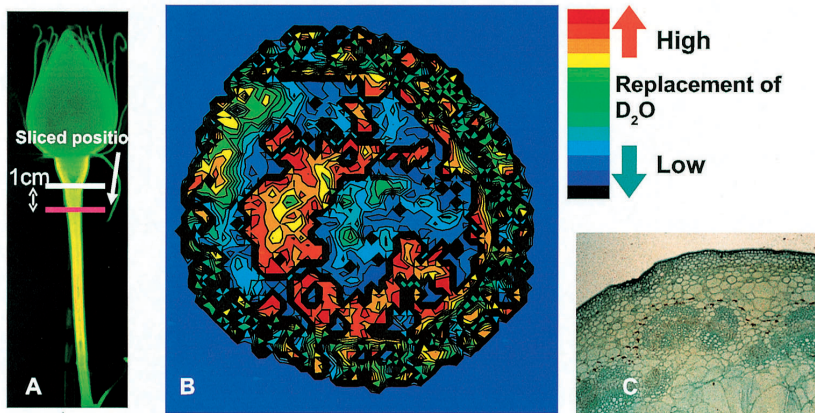


図3 バラ切り花に重水トレーサ投与後6時間における重水マップ。A：縦方向のスライス画像。図中にB図のスライス面を示した。B：重水分布。C：バラ切り花（Rosa Hybr. Var. Akito）花柄部の光学顕微鏡写真

柄部の光学顕微鏡写真である。図3-Cと比較することで、図3-Bにおいてどのあたりに維管束が位置するか推定可能であり、両図から維管束の周辺から髄へかけて重水の置換が盛んであったと推測された。このように、重水トレーサと中性子CTイメージングを用いて3次元における水の動きも可視化可能であり、本方法は植物中の水移動を追跡するイメージング法として多様な目的に応用できると考えられる。

### 3. エネルギー依存中性子イメージング

現在、中性子イメージングでは、熱中性子のみならず、低エネルギー中性子あるいは単色中性子、更には高速中性子の利用が試みられている。生命科学へ応用する上で、その生体試料の厚さや含水量などを考慮し、対象となる試料により適したエネルギーの中性子イメージングを選択することが可能になってきた。ここでは、各エネルギー領域における中性子イメージングの生命科学分野への応用例を紹介する。

#### 3.1 熱中性子イメージング

熱中性子イメージングは、早くから開発が進んだことから、生命科学分野への応用例も多い。特に、土中における植物根の非破壊イメージングに盛んに用いられている。1990年代には、

中西らによって植物地上部及び地下部における水分分布の観察方法に関する研究が進められ<sup>3),4)</sup>、土中のアルミニウムが植物根に与える影響の解明に応用された<sup>13)</sup>。また、中性子CTイメージから土壌含水率を推定する方法を考案し、大豆根系と土壌の間の3次元水分マップを得た<sup>14)</sup>。植物の根系と関連が深い土壌水分に関しては Carminati ら<sup>15)</sup>が、中性子イメージングで土壌中の水移動を観察し、更に画像分解能の高いシンクロトロンX線イメージングを用いて土壌中の気相、液相、固相の三相を可視化した。植物根系における水分分布の研究では、ほかにルピナス<sup>16),17)</sup>、朝鮮人參<sup>18)</sup>の可視化例がある。

樹木、木材の形状及び水分マッピングにも、いくつか応用例がある。山田ら<sup>19)</sup>は、スギに病変を起こす菌 *G. cryptomeriae* を接種し、接種部の経過観察を行った。時間の経過に伴って菌接種部に水分減少が認められた。また、木材による水分吸収の経過を観察した例もある<sup>6)</sup>。他に、ポストハーベストテクノロジー分野（収穫後における農産物の品質保持技術に関わる分野）への応用では、中性子CTイメージングを用いて貯蔵中のトウモロコシ粒の内部変化を経過観察した例がある<sup>20)</sup>。

以上列举したとおり、熱中性子を利用した応用の幅は広い。これは、熱中性子イメージング

表1 CONRADにおけるポジションI及びIIの諸元

	Position I	Position II
Flux $n/cm^2 \cdot s$	$2.0 \times 10^8$	$5.8 \times 10^6$ (L/D 521)
Beam size $cm^2$	$5 \times 3$	$10 \times 10$
L/D	<70	521, 261, 174

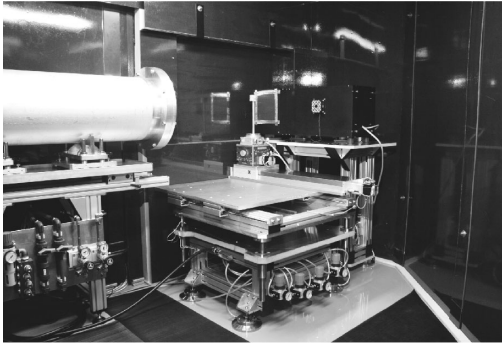


図4 CONRAD, HMIにおける照射室内部。この照射室がPositionIIにあたる

装置が一般的であるのみならず、エネルギーが冷中性子より高いため、水分を多く含む生体試料でもある程度の厚さまで観察できること、また、中性子フラックスも冷中性子より高いため、容易により高いL/Dが得られ、その結果画像分解能が高くなることもその理由であると考えられる。土壌中の根系の観察では、その試料の厚さ及び含水率の兼ね合いから、透過画像を得るには工夫が必要であるが<sup>4)</sup>、高エネルギービームによるイメージング<sup>21)</sup>の利用も解決法の一つであろう。

### 3・2 低エネルギー中性子イメージング

ここでは、低エネルギー中性子イメージングとは、冷中性子以下のエネルギーの中性子ビームを利用したものとする。ここ数年で、相次いで低エネルギー中性子専用のイメージング装置が設置された。代表的な装置として、CNRF (JRR-3M, 日本原子力研究開発機構), ICON (SINQ, Paul Scherrer Institut, スイス), CONRAD (BER II, Hahn-Meitner Institut, ドイツ), ANTARES (FRM II, Technischen Universität

München, ドイツ)があげられる。装置の一例として、著者らが現在主な利用装置としているCONRADを紹介する。Hahn-Meitner Institut (HMI)の冷中性子イメージング装置CONRADは、研究炉BER-IIにおける冷中性子源に設置されたNL1bビームラインに位置する。照射スペクトルのピーク波長は約 $3.1\text{\AA}$ である<sup>22)</sup>。CONRADには、高中性子フラックスで低L/DのポジションIと、ピンホールスリットによりコリメーションを施した低中性子フラックスで高L/DのポジションIIの二つの照射室が用意されており、高速撮影にはポジションI、高い画像分解能が必要である場合はポジションIIと、目的に応じて選択することができる。ポジションIIの画像サイズは $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ で画像分解能は $200\ \mu$ 程度である。両ポジションの諸元を表1に、照射室内部の写真を図4に示す。照射室内には上下左右方向に試料を自動可動できる試料台が設置され、それによりビーム位置に対するサンプル移動の融通性を持つ。照射室内のビームの進行方向に向かって右側は2~3人が入って作業しても十分なスペースがある。詳細についてはKardjilovら<sup>23)</sup>、及びHilgerら<sup>22)</sup>の報告を参照されたい。

低エネルギー中性子イメージングの利点は、高い画像コントラストを得られる点である。生体試料の多くは、水を多量に含んでおり、その水のわずかな変化を捉えることのできるコントラストを持つイメージング法は有用度が高い。前述した重水トレーサを用いた植物中の水移動追跡の場合も低エネルギー中性子イメージングの特徴である高画像コントラストを利用することで効果的に可視化が行える。しかし、生命科学への応用を考えると、低エネルギーの中性子は、水を多量に含む生体試料に対して熱中性子以上に透過度が低下する。以上の特質により、後ほど述べるMRイメージングを用いてのイメージングが困難である小型で薄い試料のイメージングに対して力を発揮する。図5は、どちらも低エネルギー中性子イメージングによるツタの葉の

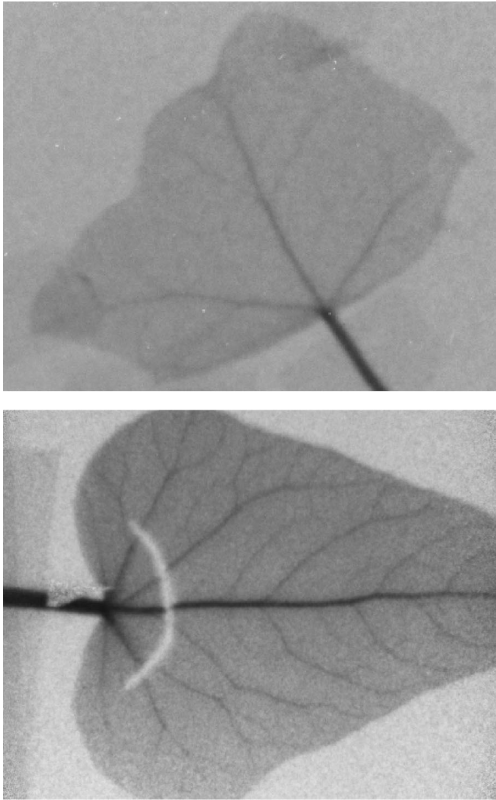


図5 ツタ葉部の低エネルギー中性子イメージ。イメージングに使用した照射スペクトルのピーク波長は上の図が約3Å (CONRAD, BER-II), 下の図が約60Å (VCNポート, ILL)である

透過画像である。図5の上はHMIのCONRADにて、下の図はInstitut Laue-Langevin (ILL), フランスのVCNポート (PF2) にて撮影された<sup>24), 25)</sup>。図5-下の照射スペクトルのピーク波長は図5-上より一桁長い。すなわち、エネルギーが低いほど画像のコントラストが高くなり葉脈が観察しやすくなる。ILLのVCNポートで得られた結果から推定される水の厚さの分解能は約5 $\mu\text{m}$ であった。このような低エネルギー中性子イメージングの試料厚さに対する分解能の高さを利用して、キク切り花の真空予冷時における水分減少について検討した<sup>26)</sup>。低エネルギー中性子イメージング装置には京都大学原子炉実験所におけるCN-3ビーム孔の装置を利用した。キク切り花葉部の真空予冷時における水分減少

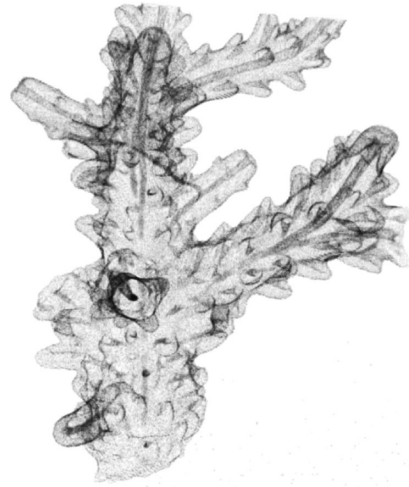


図6 サンゴ (*Acropora* sp.) 骨格の低エネルギー中性子イメージ。内部構造が観察できる

は、予冷前の質量に対して約5%であるが、予冷前、予冷後の水分減少量マップの差から葉にできた傷近傍で水分減少が盛んに起こることが確認された。また、海洋生物研究への応用も進められている。大森らは、二酸化炭素の増加と温暖化により変化しつつあるサンゴ礁の炭酸システムに対して、サンゴ礁生物がどのように応答するのかを海水の炭酸システム変動、及びサンゴの骨格成長の両面から追究している<sup>27), 28)</sup>。筆者ら、琉球大並びに岩手大の共同研究グループでは、今後、生体サンゴ内部の骨格成長について重水トレーサ及び低エネルギー中性子イメージングを用いて解明を進める予定である。そこで、まず、サンゴ骨格の低エネルギー中性子CTを試みたが(図6)、表面形状はもとより骨格内部の莖壁などの構造も観察された。また、骨格内における密度分布の変化も画像上のコントラスト差としてはっきりと可視化された。その他、自然科学分野における興味深い応用では、Hammarlundら<sup>29)</sup>による生物の軟組織が化石化する過程の解明が挙げられる。図7は粘土に埋められたエビの腐朽あるいは保存過程を低エネルギー中性子CTイメージングで経過観察した画像の一枚である。軟組織及び硬組織ともはっきり可視化された。以上のように、低エネルギー中



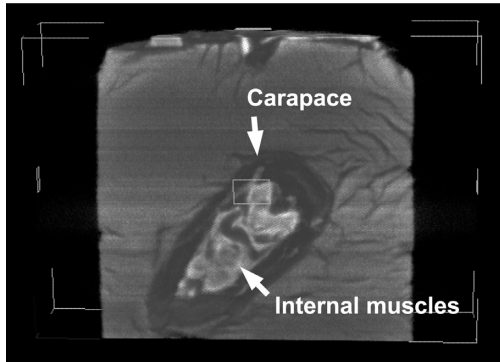


図7 化石化過程にあるエビと堆積物の低エネルギー中性子CTイメージ。Ms. Emma Hammarlundのご厚意による

中性子イメージングによって生体試料のサイズや画像コントラストの必要度によって、効果的に可視化画像が得られる例を紹介した。今後、低エネルギー中性子イメージング装置が増加することで、ますます応用が増えることが期待される。

### 3・3 単色中性子イメージング

これまで単色ビームを用いた中性子イメージングについて研究が進められてきたが<sup>30)–32)</sup>、中性子ラジオグラフィ装置の常設のオプションとして使用が可能になったのは最近である。これにより、生命科学分野のユーザにも単色中性子イメージングを用いて研究を行う機会が与えられた。単色中性子を用いる最大の利点は、波長による減衰係数の変化が各元素によって異なることを利用し、減衰の差が大きい二つの波長におけるイメージの差から、元素によってはその透過画像を上回る高コントラストでイメージングできる点であろう。鉄、銅、鉛、アルミニウム、ホウ素、プレキシグラス、テフロン等の単色中性子イメージングの結果が報告されている<sup>32), 33)</sup>。

本方法は、特定の元素の生体試料内における分布をマッピングする上で効果を発揮する。例えば、ICON, Paul Scherrer Institut における常設の装置を利用した、乾燥した植物葉における

ホウ素分布の可視化の試みなどがある<sup>34)</sup>。またHMIのCONRADにおいても、常設の装置で単色中性子イメージングが可能である。本方法は、中性子イメージ中の元素の定量にも使用できると考えられる。すなわち、照射する中性子のエネルギーが異なれば減衰係数も異なるため、エネルギーの異なる中性子ビームで取得したイメージの比から画像上における重水の量が求められると考えられる。これを利用して重水トレーサの置換量を定量することができる。また、単色光ビームを用いた研究で今後重要なことは、J-PARKの建設により spallation の中性子源が得られることである。すなわち TOF (time of flight: 飛行時間) 法を用いた中性子の分光が可能となる。TOF法を用いた中性子分光イメージングに関して、既にいくつか興味深い研究がなされている<sup>35)–37)</sup>。また、中性子ホログラムが一般ユーザに開放されると、生命科学研究上においても大きな成果が期待される<sup>38)</sup>。いずれにせよ単色ビームによる中性子イメージングの応用研究は始まったばかりであり、生命科学分野においても、中性子による分光イメージング研究はやっとスタートラインに立ったところである。

## 4. 生体イメージング法としての差別化

中性子イメージングと競合関係にある生体イメージング法は、対象となる試料の大きさや、非破壊イメージングという点で選択すると、MRイメージング(MRI)とX線イメージングであろう。MRIは生体に対する影響がほとんどなく、試料の構造、水分分布のみならず、水の流速ベクトルや他の分子との結合状態を得ることができる。画像分解能は技術開発により日進月歩で高くなり、植物体の観察例では、Manzらが30  $\mu\text{m}$ の画像分解能でタバコ種子発芽時の経過を観察した<sup>39)</sup>。しかし、画像分解能は勾配磁場コイルのサイズに依存し、勾配磁場コイルが大きくなれば分解能は下がり、試料が小さい場合画像を得るために十分な信号を得



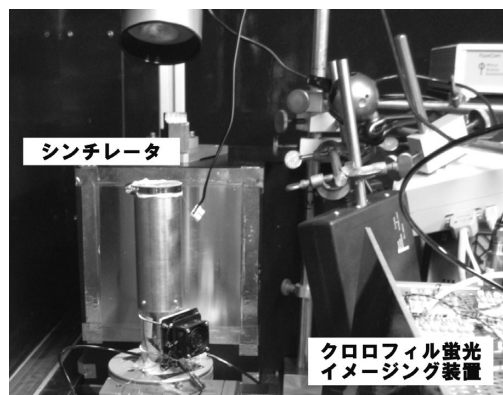


図8 中性子イメージング装置内におけるクロロフィル蛍光イメージング装置の設置状況。クロロフィル蛍光イメージング装置は中性子ビームが直接当たらないところに設置される

るまで時間がかかる。小型の試料であるシロイヌナズナ根のMRI画像を得る場合の問題点については鈴木らの報告に詳しい<sup>40)</sup>。また、画像撮影中は磁場がかかるため、磁場に弱い計測機器を試料周辺に設置するのは困難であり、なおかつ試料は勾配磁場コイルに囲まれているため画像以外のパラメータを同時計測するのが難しい。一方で中性子イメージングは、中性子ビームの軌道さえ確保できれば、その周囲に計測機器を置きやすい。その利点を利用し、中性子イメージングと他の生体イメージング法を同時に行った試みを紹介する。

パルス変調を用いたクロロフィル蛍光イメージングは、光化学系Ⅱの最大量子収率、電子伝達の量子収率、エネルギーの熱放散の効率などといった光合成の諸性質を簡便に測定できる。中性子及びクロロフィル蛍光イメージングを組み合わせることで、植物の水分マップと光合成活性の関係を得ることができる。図8は低エネルギー中性子イメージング装置内におけるクロロフィル蛍光イメージング装置の設置状況を示したものである。実験はCONRAD, HMIにて行った。画像撮影用のCCDカメラ、励起光用ランプからなるクロロフィル蛍光イメージング装置は中性子ビームが直接照射されない場所に設置されたため、そのままでは試料正面からのク

ロロフィル蛍光イメージングは行えなかった。そこで、クロロフィル蛍光イメージングを撮影するために試料台を回転させた。本実験では、試料であるハイビスカス苗木のSO<sub>2</sub>耐性を明らかにする目的で、両イメージングでそれぞれ得られる光合成活性及び水移動速度を試料のSO<sub>2</sub>耐性の指標となるパラメータとして求めた。一定濃度のSO<sub>2</sub>ガスに曝露するために、試料はアルミニウム容器で覆われ、その容器にはクロロフィル蛍光イメージングのための石英ガラス窓を設置した。アルミニウムは、中性子の透過性が高いため中性子イメージングにおいて試料台等によく使われる。一般に中性子イメージング装置はデテクタ周辺に空間的余裕を持たせていることが多く、このように試料容器を用いてその内部ガス組成を変化させるなど、特殊な環境の中でのイメージングが比較的行いやすい。また、腐食性ガスのSO<sub>2</sub>を濃度2 ppmで用いたが、CONRADの照射室には外部への排気ダクトが設置され配管を接続することができるため、照射室内の汚染は起こらなかった。図9は、SO<sub>2</sub>に曝露前、曝露中、曝露後のクロロフィル蛍光イメージである。ここで、計測されるパラメータの一つである $F_v/F_m$ は、光化学系Ⅱの最大収率であり、量子収率の低下に伴って減少する。図の擬似カラーは $F_v/F_m$ が大きいほど図中カラーバーの右方の、少ないほど左方の色で着色された。SO<sub>2</sub>ガス曝露によってハイビスカス葉の $F_v/F_m$ は減少し、光合成活性が低下したことが示された。重水トレーサを用いた中性子イメージも同時に撮影された(図10)。試料をSO<sub>2</sub>ガス2 ppm環境下に置いてから65分後にクロロフィル蛍光イメージングを行い、その直後に試料に供給するガスを空気に切り替えた。そのため、図10中の3枚の画像間の時間間隔はほぼ20分である。クロロフィル蛍光イメージングではSO<sub>2</sub>の曝露により光合成活性が低下したことが示されたが、重水トレーサの移動速度には大きな変化は見られなかった。しかし、光合成が活発であるほど葉は水を必要と

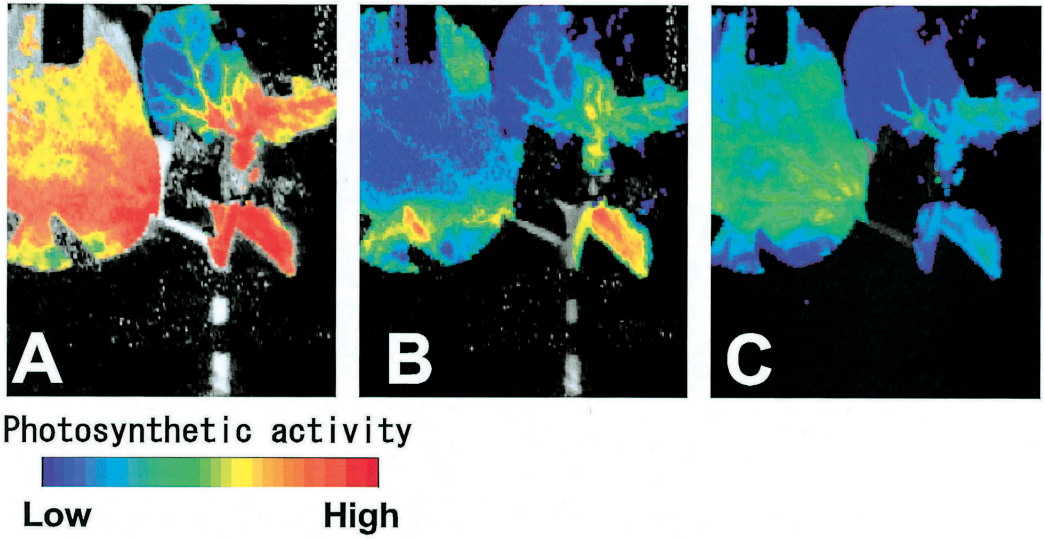


図9 異なる  $\text{SO}_2$  ガス環境に置かれたハイビスカス苗木のクロロフィル蛍光画像。A:  $\text{SO}_2$  ガス曝露前。  
B: 同試料を  $\text{SO}_2$  ガス 2 ppm 環境下に置いてから 65 分後。C: 再び空気環境下に置いてから 120 分後

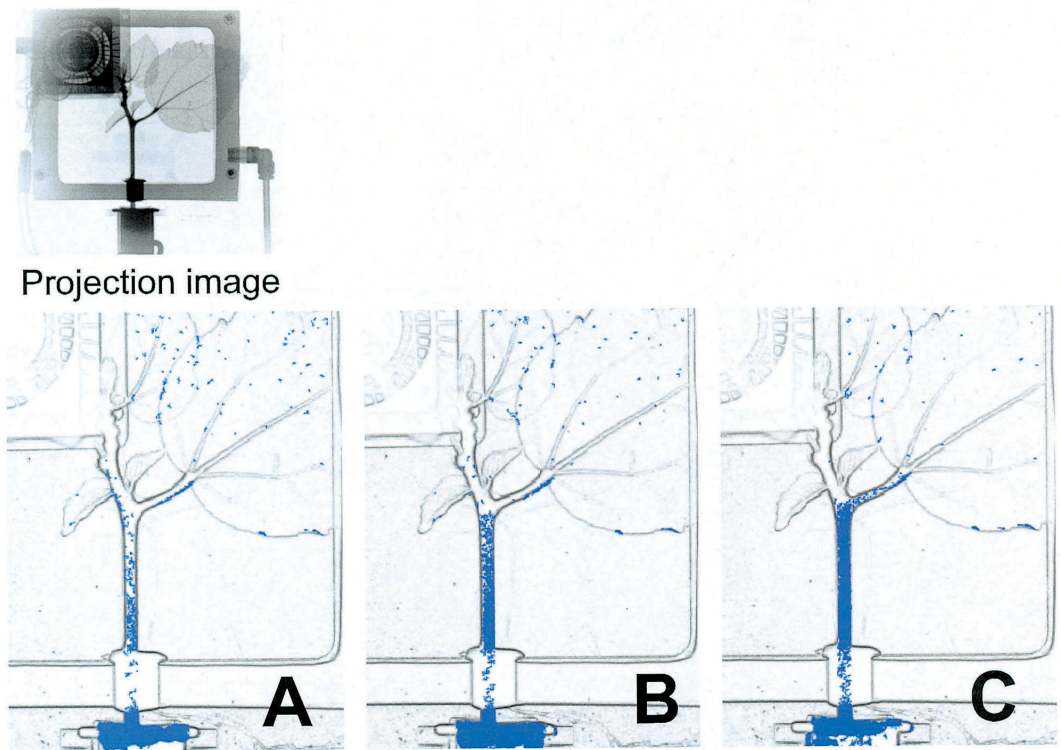


図10 異なる  $\text{SO}_2$  ガス環境に置かれたハイビスカス苗木における重水トレーサの吸収。A: 試料を  $\text{SO}_2$  ガス 2 ppm 環境下に置いてから 50 分後。B: 同 65 分後。C: 再び空気環境下に置いてから 20 分後

するため、光合成活性が低下すると植物の蒸散流量は減少する。本実験は今のところ一例であるため今後実験例を増やし、重水トレーサの移動速度と光合成活性について更に検討を進める予定である。

他の例として、カーネーション切り花萎凋の経過を中性子イメージングを行いながら、CO<sub>2</sub>センサを用いて試料の呼吸速度を計測したものもある<sup>41)</sup>。クライマクテリック上昇と呼ばれる呼吸速度の変化が起こるとカーネーションが萎凋することを踏まえ、クライマクテリック上昇の段階と切花内部の水分変化の経過を比較した。中性子 CT イメージングから、花の各器官の水分がマッピングされ、萎凋の段階ごとに器官によって水分分布が異なることが示された。このような生体のある現象に対して複数の生態計測法を同時に行うことで、計測されるパラメータ同士の関連が明確になり、生体現象の解明が進む。特に中性子 CT イメージングなど非破壊 3 次元イメージングとの組み合わせでは、生体内の位置情報も合わせて得られるため有用であろう。

生命科学分野における中性子イメージングにとって、もう一方の競争的イメージング法は X 線イメージングであろう。その位置分解能は市販されている X 線マイクロ CT イメージングで 5 μm 程度、シンクロトロン X 線イメージングの分解能は 1 μm より高く、zone plate を利用した X 線顕微鏡にいたっては 50 nm より高いなどと、中性子イメージングと比較できる範囲をはるかに超えて優れる。また、X 線イメージングでは、透過画像のコントラストが低いため生体組織の観察は困難であるが、位相差観察法を用いることで、生体組織や細胞の境界を強調しそれらの構造を観察できる。それに対する中性子イメージングの利点は、試料に対するダメージが X 線イメージングより小さいことが挙げられる。蛍光 X 線マイクロ CT イメージングでは、中性子同様各元素に対する X 線波長による吸収の差を利用して元素マッピングを行うことが可能である。しかし、アルファル

ファ種子発芽時における元素マッピングを行い鉄及び亜鉛の 3 次元分布を得たが、放射性障害により同一種子の経過観察は不可能であったとの報告がある<sup>42)</sup>。発芽中の種子であったため、特に放射線に敏感であったと予想されるが、中性子イメージングは、同様に細胞分裂が盛んである根の生長過程の観察にしばしば利用されている。前述した山田ら<sup>19)</sup>は、スギ試料への菌接種に先立ち、中性子が菌の生長に与える影響を調査したところ顕著な影響は見られなかったと報告している。しかし、植物試料に関しては波長の長短や中性子フラックスによる影響の違い、長期間のビーム照射の影響に関していまだ十分な調査はされていない。中性子イメージングが植物試料に与える影響については、いまだデータが不十分であり、今後の検討が必要である。

X 線では位相差観察法を用いて生体試料のイメージが取得可能であるが、吸収によるコントラスト、すなわち生体試料の密度情報は得にくい。そのため水素など密度の低い元素のマッピングは中性子イメージングや MRI の方がより効果的に像を得ることができる。すなわち軽元素のマッピングには中性子イメージングを利用し、比較的密度の高い物質に焦点を当てる場合は X 線イメージングと両イメージング法を使い分け相互に補完する必要がある。そのため、中性子イメージング装置内に X 線照射装置も組み込み、試料設置位置を移動することなく両イメージングを行うことができる複合的なイメージング装置が有用であろう<sup>43)</sup>。

## 5. おわりに

中性子イメージングはかつて熱中性子ビームを中心に用いて応用されていたが、現在、低エネルギー中性子、単色中性子など様々なビーム選択が可能になってきた。更に、競争的なイメージング法である X 線イメージングや他の生体イメージングなどと組み合わせた相補的なイメージングも試みられている。生命科学の分野では、試料の時間的、空間的变化を観察すること

で多くの情報を得ることができる。そのため、非破壊イメージングは生命現象を理解するうえで欠かせないものである。各種中性子イメージング、MRI、X線イメージング、原子間力顕微鏡など、様々な非破壊イメージング法があり、日々その方法は進歩している。いずれにせよ、最も重要なことは各生体試料において必要なイメージに対して各イメージング法の向き不向きを理解した上で、最適なイメージング法を選択し、生命の不思議を目の当たりにすることであると考える。

## 文 献

- 1) Trabold, T., Owejan, J., Jacobson, D., Arif, M. and Huffman, P., In situ investigation of water transport in an operating PEM fuel cell using neutron radiography: Part 1-Experimental method and serpentine flow field results, *Int. J. Heat Mass Transfer.*, **49**(25-26), 4712-4720 (2006)
- 2) Kramer, D., Zhang, J. B., Shimoi, R., Lehmann, E., Wokaun, A., Shinohara, K. and Scherer, G. G., In situ diagnostic of two-phase flow phenomena in polymer electrolyte fuel cells by neutron imaging part A. experimental, data treatment, and quantification, *Electrochem. Acta*, **50**(13), 2603-2614 (2005)
- 3) Nakanishi, T. M., Inagawa, S. and Kobayashi, H., Nondestructive analysis of rape plant pod by neutron radiography, *RADIOISOTOPES*, **40**, 126-128 (1991)
- 4) Nakanishi, T. M., Matsumoto, S. and Kobayashi, H., Morphological change of plant root revealed by neutron radiography, *RADIOISOTOPES*, **41**, 638-641 (1992)
- 5) 持木幸一, 日塔光一, 中性子線用カラーイメージンテンシファイア, *応用物理*, **75**(11), 1349-1353 (2006)
- 6) Lehmann, E., Hartmann, S. and Wyer, P., Neutron radiography as visualization and quantification method for conservation measures of wood firmness, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 87-94 (2005)
- 7) Kühne, G. and Lehmann, E., Properties of the new installation for neutron imaging with cold neutron ICON, Conference CD of Int. workshop on "neutron imagin using cold neutrons and related topics" (2005)
- 8) Frei, G. and Lehmann, E., Optimization of neutron sensitive imaging scintillators, Book of abstracts, 8th world conference of neutron radiography, Gaithersburg, USA, October 16-19, 2006, 21 (2006)
- 9) Kühne, G., Vontobel, P., Frei, G., Lehmann, E., Buhlmann, M., Heinger, K. C. and Zweifel, B., Neutron imaging facilities at the paul scherrer institut and their application for non-destructive testing of abrasive water jet nozzle's, ECNDT 2006 proceedings, Tu.3.5.1, (2006), <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.5.1.pdf>
- 10) Matsushima, U., Kardjilov, N., Herppich, W. and Hilger, A., Neutron imaging of water uptake in plants, *BENSC Exp. Rep.*, 2005B, 96 (2006)
- 11) 増田芳雄, 植物生理学, p. 133, 培風館, 東京 (1994)
- 12) Matsushima, U., Graf, W., Kardjilov, N., Zabler, S. and Herppich, W., Investigation of rose bent neck syndrome using neutron and synchrotron X-ray imaging, 44. Gartenbauwissenschaftliche Tagung vom 21.-24.02.07 in Erfurt Kurzfassungen der Vorträge und Poster (2007)
- 13) Saito, K., Nakanishi, T. M., Matsubayashi, M. and Meshitsuka, G., Development of new lignin derivatives as soil conditioning agents by radical sulfonation and alkaline-oxygen treatment, *Mokuzai Gakkaishi*, **43**(8), 669-677 (1997)
- 14) Nakanishi, T. M., Okuni, Y., Hayashi, Y. and Nishiyama, H., Water gradient profiles at bean plant roots determined by neutron beam analysis, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **264**, 313-317 (2005)
- 15) Carminati, A., Kaestner, A., Lehmann, P., Flühler, H., Lehmann, E., Hassanein, R., Vontobel, P., Stampanoni, M. and Graso, A., Monitoring water flow in soils, using neutron and X-ray tomography, *PSI scientific report*, **1** (2005)
- 16) Oswald, S., Menon, M. and Lehmann, E., Dynamic imaging of water uptake by plant roots via neutron radiography, Conference CD of Int. workshop on "neutron imagin using cold neutrons and related topics" (2005)
- 17) Mannes, D., Lehmann, E., Oswald, S. and Niemz,

- P., Investigation of water transport processes in plants by means of neutron imaging techniques, Proceedings of 5th Plant Biomechanics Conference-stockholm, August 28-September 1 2006, 393-398 (2006)
- 18) Kim, H. H., Sung, B. J., Sim, C. M., Lee, S. W., Jeon, S. J. and Kim, Y. J., Development of techniques for ginseng root growth analysis using neutron radiography, Book of abstracts, 8th world conference of neutron radiography, Gaithersburg, USA, October 16-19, 2006, 49 (2006)
  - 19) Yamada, T., Aoki, Y., Yamato, M., Komatsu, M., Kusumoto, D., Suzuki, K. and Nakanishi, T. M., Detection of wood discoloration in a canker fungus-inoculated Japanese cedar by neutron radiography, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **264**, 329-332 (2005)
  - 20) Cleveland IV, T. E., Hussey, D. S., Chen, Z., Jacobson, D. L., Brown, R., Carter-Wintjes, C., Cleveland, T. E. and Arif, M., The use of neutron tomography for the structural analysis of corn kernels, Book of abstracts, 8th world conference of neutron radiography, Gaithersburg, USA, October 16-19, 2006, 51 (2006)
  - 21) Bücherl, T., Lierse, C. and Gostomski, L. V., Tomography using fission neutrons, Book of abstracts, 8th world conference of neutron radiography, Gaithersburg, USA, October 16-19, 2006 (2006)
  - 22) Hilger, A., Kardjilov, N., Strobl, M., Treimer, W. and Banhart, J., The new cold neutron radiography and tomography instrument CONRAD at HMI Berlin, *Physica B*, **385** (86), 1213-1215 (2006)
  - 23) Kardjilov, N., Hilger, A., Manke, I., Strobl, M., Treimer, W. and Banhart, J., Industrial applications at the new cold neutron radiography and tomography facility of the HMI, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **542** (1-3), 16-21 (2005)
  - 24) Matsushima, U., Kawabata, Y., Hino, M., Geltenbort, P. and Nicolaï, B. M., Measurement of changes in water thickness in plant materials using very low-energy neutron radiography, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 76-80 (2005)
  - 25) Kawabata, Y., Hino, M., Nakano, T., Sunohara, H., Matsushima, U. and Geltenbort, P., Application of very low energy neutron radiography with energy selection system using 4QC (4M) supermirror, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542**, 61-67 (2005)
  - 26) Matsushima, U., Kawabata, Y. and Horie, T., Estimation of the volumetric water content in chrysanthemum tissues, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **264** (2), 325-328 (2005)
  - 27) 大森 保, サンゴによる石灰化と二酸化炭素の固定—サンゴ飼育水槽実験—, *地質ニュース*, **465**, 26-31 (1993)
  - 28) 藤村弘行, 大森 保, 北田幸男, 真栄平司, さんご礁海域における二酸化炭素分圧と大気—海洋間のCO<sub>2</sub>フラックス, *うみ*, **40** (3), 99-109 (2002)
  - 29) Hammarlund, E., Canfield, D. and Bengtson, S., Neutron radiography for understanding evolution of life, Book of abstracts, 8th world conference of neutron radiography, Gaithersburg, USA, October 16-19, 2006, 25 (2006)
  - 30) Kawabata, Y., Hino, M., Tasaki, S., Ebisawa, T., Maruyama, R. and Horie, T., Improvement of the cold neutron beam line (CN-3) in KUR for neutron optical device development, *Physica B*, **311** (1-2), 106-111 (2002)
  - 31) Kardjilov, N., Schillinger, B. and Steichele, E., Energy-selective neutron radiography and tomography at FRM, *Appl. Radiat. Isot.*, **61** (4), 455-460 (2004)
  - 32) Zawisky, M., Bastürk, M., Derntla, R., Dubus, F., Lehmann, E. and Vontobel, P., Non-destructive <sup>10</sup>B analysis in neutron transmission experiments, *Appl. Radiat. Isot.*, **61**, 517-523 (2004)
  - 33) Kardjilov, N., Baechler, S., Bastürk, M., Diericke, M., Jolie, J., Lehmann, E., Materna, T., Schillinger, B. and Vontobel, P., New features in cold neutron radiography and tomography part II : Applied energy-selective neutron radiography and tomography, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **501**, 536-546 (2003)
  - 34) Kühne, G., Frei, G., Lehmann, E. and Vontobel, P., CNR—the new beamline for cold neutron imaging at the swiss spallation neutron source SINQ, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A542** (1-3), 264-270 (2005)
  - 35) Lehmann, E. H., Vontobel, P. and Frei, G., Neu-

- tron imaging—Present status and options with TOF methods—TOF neutron imaging, *J. Neutron Res.*, **13**(1-3), 27-31 (2005)
- 36) Kiyanagi, Y., Kamiyama, T., Iwasa, H. and Hiraga, F., Characteristics of a new type neutron radiography using time-of-flight method, *Key Eng. Mater.*, **270-273**, 1371-1375 (2004)
- 37) Kiyanagi, Y., Kamiyama, T., Nagata, T. and Hiraga, F., Application of spectroscopic radiography using pulsed neutron time-of-flight method for material characterization, *Key Eng. Mater.*, **321-323**, 1663-1666 (2006)
- 38) Schewe, P. F., Stein, B. P. and Riordon, J., ニュースダイジェスト, パリティ, **18**, 76 (2003)
- 39) Manz, B., Müller, K., Kucera, B., Frank, V. and Leubner-Metzger, G., Water uptake and distribution in germinating tobacco seeds investigated in vivo by nuclear magnetic resonance imaging<sup>1[w]</sup>, *Plant Physiol.*, **138**, 1538-1551 (2005)
- 40) 鈴木 均, 生物研究チーム第二サブチーム, 独立行政法人理化学研究所平成5年度研究年報, 561-565 (2003)
- 41) Matsushima, U., Lehmann, E. H., Vontobel, P., Frei, G., Nicolaï, B. M., Nishizawa, T. and Kawamitsu, Y., Observation of water distribution in cut spray carnation flowers using neutron tomography, Asia Pacific Symposium Book of Abstracts, August 7-10, 2006, Bangkok (2006)
- 42) 星野真人, 渡辺紀生, 青木貞雄, 位相差 X 線マイクロ CT と蛍光 X 線マイクロ CT による低コントラスト生体微細構造の可視化と 3 次元元素マッピングの試み, *Photon Factory News*, **24**(3), 14-18 (2006)
- 43) Deschler-Ebr, E., Lehmann, E. H., Pernet, L., Vontobel, P. and Hartmann, S., The complementary use of neutrons and X-rays for the non-destructive investigation of archaeological objects from swiss collections, *Archaeometry*, **46**(4), 647-661 (2004)