

放射光蛍光 X 線分析および放射性同位体分析による モエジマシダ前葉体におけるヒ素とリンの *in vivo* 解析

柏原輝彦^{1,2}, 保倉明子^{1,3}, 中井 泉¹

¹東京理科大学理学部応用化学科, ²広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻,
³東京電機大学工学部環境化学科

In vivo analyses of arsenic and phosphorus in the gametophyte of *Pteris vittata* L. using SR-XRF and radioisotope

Teruhiko Kashiwabara^{1,2}, Akiko Hokura^{1,3}, Izumi Nakai¹

¹Department of Applied Chemistry, Faculty of Science, Tokyo University of Science,
²Department of Earth and Planetary Systems Science, Graduate School of Science, Hiroshima University
³Department of Green and Sustainable Chemistry, School of Engineering, Tokyo Denki University

1. はじめに

モエジマシダ (*Pteris vittata* L.) は、陸上におけるヒ素(As)高集積植物 (ハイパーアキュムレーター) として 2001 年に初めて報告されたシダである [1]。乾燥重量に換算して最高で 22,000 ppm もの高濃度で As を吸収・蓄積し、その大部分を地上部へ蓄積する特異的な性質をもつことから、現在、ファイトレメディエーション (植物を利用した環境浄化) への応用が最も期待されている植物である。実際に、欧米ではモエジマシダを用いたファイトレメディエーションは既に実用化されており、日本でも実用化段階へ移行しつつある [2]。

ヒ素はそのヒトに対する毒性から環境化学的に注目を集めている元素であるが、植物にとっても毒性の高い元素であるため、モエジマシダのもつ高い As 耐性および蓄積能は植物生理学的な観点からも非常に興味深い。これまで、原子吸光法や HPLC/ICP-MS などによる As の定量分析や化学形態分析、さらに SEM-EDS, EPMA による微小領域のマッピング等が世界各地で精力的に行われ、モエジマシダは地上部の羽片に 90% 以上の As を蓄積すること、その大部分が As(III) に還元された状態で存在していること等が明らかとなっている。また、As は同族必須元素である P の吸収経路を介して体内に吸収されること、細胞内小器官である液胞への区画化 (封じ込め) やタンパク質との結合による As の無毒化等、モエジマシダ体内での吸収・移行・解毒・蓄積の各プロセスについて様々な説も提唱されている [3-5]。

このような中で、我々は放射光蛍光 X 線分析および XAFS 解析を重金属蓄積植物の研究へ先駆的に導入し、モエジマシダを含むいくつかの植物体内における As, Cd, Zn, Pb, Cu 等の有害元素の分析を行うことで、植物のもつ重金属の蓄積機構に関して様々な知見を得てきた [6-11]。この手法は、上述した従来からの分析手法とは異なり、非破壊分析であり、かつ重金属の分布および化学形態に関する情報が大気中で感度良く得られるため、分析結果をそれぞれの組織構造がもつ生理機能と結びつけることを、植物が生きたままの状態で行えるという大きな利点をもつ。さらに、マイクロビームを用いれば、細胞レベルの空間分解能で分

析を行うことも可能であり、ミクロからマクロまでの様々な階層をもつ植物生理の研究において、優れた方法論の一つと成り得る。

通常の植物と異なり、モエジマシダ体内に蓄積された As のほとんどが As(III) に還元されることは注目すべき現象である。一般的に、As は地球表層の酸化的環境において As(V) の方が安定であり、また、As(III) の方が生物にとってより有毒な形態と考えられている。従って、なぜモエジマシダ体内で As が還元されるのかといった問題は、大量蓄積機構との関連から非常に興味深い。一方、As は同族必須元素の P と化学的挙動が似ていることから、P の代謝経路への侵入が As の示す強い毒性の一因として考えられている。従って、正常な生命活動を維持するためには、植物体内における As と P の識別が鍵になると考えられる。以上のような、(i) As の生体内還元作用、および (ii) As と P の識別機構の二つの問題に対する理解は、モエジマシダにおける“As の大量蓄積”と“正常な生命活動の維持”という一見相反する二つの現象を両立する特異な生理機構の解明には不可欠であり、そのためには As と P 等の元素の挙動 (分布、化学形態) を植物体各組織やライフサイクルに沿って一つ一つ明らかにしていくことが重要となる。

本稿では、このような背景の下に行ったモエジマシダ前葉体に関する研究 [11] の一部を紹介する。後述するように、前葉体は孢子発芽からの初期の姿であり、その生長過程において様々な組織構造を発達させるため、組織構造の有無と元素の挙動との関係性を議論するのに適した系である。同時に、この系を対象として異なる植物種ごとの比較を行うことで、生長過程における As の挙動の共通性および特異性を見出すことが期待できる。この点に着目して我々は、前葉体における As と P の比較解析を試みた。ただし、P に関しては軽元素であり、大気中では蛍光 X 線が著しく減衰してしまうため As と同様の *in vivo* 分析は難しい。そこで、放射性同位体を相補的に用いることで、植物体内の P の挙動も生きたまま分析し、As との比較を行った。本研究のポイントは、(i) 放射光蛍光 X 線分析を用いた As の挙動解析、(ii) 放射性同位体を用いた P の挙動解析、(iii) 他のシダ植物との比較、という三つのアプローチをモエジマ

シダ前葉体に適用することで、生長過程に沿った As と P の比較解析を行い、As 高集積植物としてのモエジマシダ特有の生理機構に関する知見を *in vivo* の測定によって得たことである。

2. モエジマシダ前葉体の生長過程における As の分布と化学形態の評価

モエジマシダはそのライフサイクルにおいて胞子体と前葉体の二種類の世代をもつ。胞子体は通常我々の身の回りで目にするシダ植物の姿であり、維管束や羽片等の組織構造が発達し、バイオマスも大きく As 蓄積量も多いことから、多くの研究対象として用いられてきた [3-8]。一方、前葉体は細胞 1~5 層程度のシート状の構造をもち、胞子発芽からの初期の段階の姿である。胞子体と異なり形態が単純である、生長が比較的早く環境を制御しやすい、均一な栽培が可能で実験結果の再現性が取りやすい等の利点があることから、近年、特に分子生物学的な研究に適した系として注目され始めている [12]。

これまで、胞子体と比較して前葉体についての分析例はほとんどなかった。それは、前葉体のサイズが小さく、かつ空気中で乾きやすいといった特徴をもつため、大気中で生きたまま扱うことが困難であったことが理由の一つとして考えられる。そのため、胞子発芽から前葉体を介して胞子体の組織構造を成熟させる生長過程において、モエジマシダ体内における As の分布はどう変わるのか、あるいは As の還元機構はいつ発現するのか、といった基本的な情報は明らかになっていなかった。これらは、実際の As 汚染サイトでモエジマシダがどのように成長していくのか、あるいはその生長過程にどのような特徴があるのかを明らかにしていく上でも重要な情報である。

前葉体のような微小試料の分析には、高感度、かつ高い空間分解能をもった分析法が必要であり、さらに生きたままの状態で行うには、大気中で扱えることが望ましい。そこで我々は、放射光マイクロビーム蛍光 X 線分析および XAFS 解析を適用し、いくつかの異なる生長段階のモエジマシダ前葉体について、As の分布と化学形態を調べた。

生長過程をいくつかのステージに分類し、以下の三つのステージに着目した。すなわち、胞子発芽からまだ特別な構造を持たないステージ 1 (発芽から約 2 週間)、生長点を明確にもちハート型になり、生殖器が発達したステージ 2 (発芽から約 1 ヶ月)、受精後、胞子体が立ち上がり前葉体と共存するステージ 3 (発芽から約 2 ヶ月) である。それぞれのステージのシダを As 濃度 50 ppm の培地 (H_2AsO_4 で調製) で 3 日間栽培し、As 投与を行った。これらを寒天で包埋してアクリルプレートに固定し、保水することで長時間生きたままの状態を保てるように工夫し、測定に供した。XRF 二次元イメージングを PF BL-4A で、XAFS 解析を PF BL-12C で行った。二次元イメージングの測定に際し、前葉体はステージ毎に試料サイズが大きく異なることから、異なる集光法を用いて、それぞれ $4 \mu\text{m} (V) \times$

$4 \mu\text{m} (H)$ (K-B ミラー, ステージ 1), $30 \mu\text{m} (V) \times 30 \mu\text{m} (H)$ (ポリキャピラリー, ステージ 2), $200 \mu\text{m} (V) \times 200 \mu\text{m} (H)$ (スリット, ステージ 3) のビームサイズを得て試料に照射した。

Fig. 1 にそれぞれの生長ステージにおける As の XRF イメージングの結果を示す。イメージングは測定範囲内で得られた蛍光 X 線強度の最大点を赤、最小点を青に対応させた 256 階調のカラースケールで示してある。まず、ステージ 1 (Fig. 1(a)) では、As は主に胞子と仮根にそって存在し、また、うすすらとシート状の細胞にも見られた。次にステージ 2 (Fig. 1(b)) では、シート状の細胞層にそって As が一様に分布する一方で、仮根の付け根付近、すなわち生殖器が発達する部位では As はほとんど検出されることが明らかとなった。これに対し、受精後のステージ 3 (Fig. 1(c)) では、As は胞子体の地上部に蓄積されており、成熟した胞子体についてこれまで報告されてきたように、As を効率的に地上部へ移行させるしくみが存在することが示唆された。このように、各生長ステージで見られる組織構造の発達に対応して、As の体内分布が変化する様子を可視化することに成功した。一方、各ステージの前葉体における As K-edge XANES を Fig. 2 に示す。 KH_2AsO_4 を添加した培地において As は As(V) で存在しているが (Fig. 2(c)), 全てのステージの前葉体において取り込まれた As は大部分が As(III) の形態で存在していることが分かる (Fig. 2(d)-(g))。これより、組織構造の発達によらずに植物体内で As の還元が起きることが明らかとなった。

また注目すべきはステージ 2 のイメージング結果において、生殖器付近で As の存在量が低いことである。一般的に、As に対する植物の耐性は、As を液胞へ区画化することによってなされるという細胞レベルの無毒化機構が考えられている。今回得られた As の分布は生殖器という重要な組織からの As の隔離、すなわち組織レベルのスケールでの As の区画化を反映している可能性が考えられることから、モエジマシダ前葉体において、組織レベルでも As 耐性機構が備わっていることが示唆された。

さらに、生長ステージによらずに As の還元が生じることも特筆すべき点である。これまで行われてきた他の植物との比較から、As の還元はモエジマシダのハイパーアキュムレーターとしての特徴であると考えられているが、この還元は主に葉で起きるといった報告 [13] や、根で起きるといった報告 [14] 等が様々あり、この還元がどこで生じるのかについては、明確な結論は出ていなかった。これに対し、本研究では、根、茎、葉といった胞子体独自の組織、あるいは前葉体の生殖器や生長点といった組織の有無に関わらず、胞子発芽からの初期の段階 (ステージ 1) から還元が生じることを明らかにし、As の還元は各々の細胞に備わっている基本的な性質を反映していることを示したと言える。

以上のように、前葉体はモエジマシダのもつ組織構造と As の挙動の関係を議論するのに適した系であるといえる。胞子発芽から前葉体を介して組織構造を成熟させるモエジマシダの生長過程において、As の分布と化学形態をこの

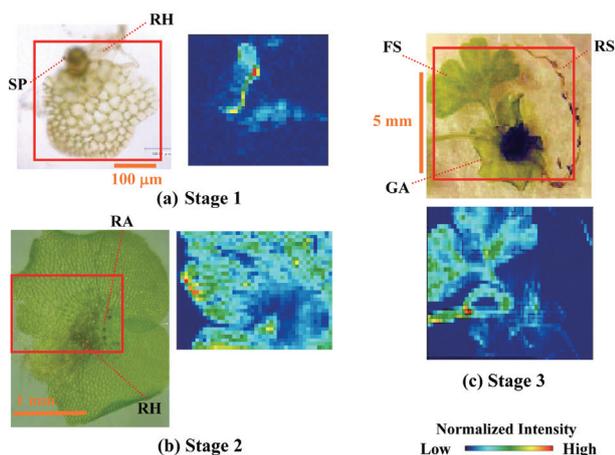


Figure 1
The distribution of arsenic in *P. vittata* gametophytes in different growth stages. SP: spore, RH: rhizoid, RA: reproductive area, GA: gametophyte part, FS: frond of sporophyte, RS: root of sporophyte. The red squares in photographs are measurement areas by XRF imaging.

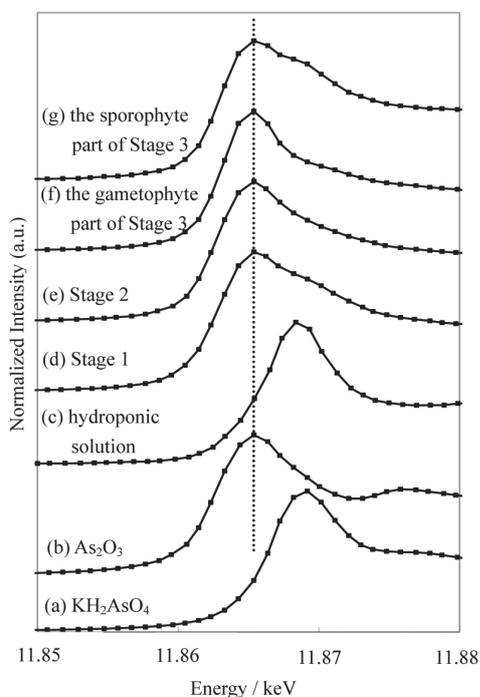


Figure 2
Arsenic K-edge XANES spectra of reference materials and the gametophytes of *P. vittata*.

ように追跡していくことで、各組織構造およびその機能がAsの蓄積に果たす役割に関して、なんらかの手がかりを見出すことが期待できる。今後、タンパク質や遺伝子の発現等に関する生物学的データと組み合わせて詳細な実験を行うことは、生長過程で発現するAs高集積植物としての特異的な生化学プロセスの存在、あるいは植物個体全体のシステムとしてのAs蓄積機構の発達等を理解していく上で有効であろう。

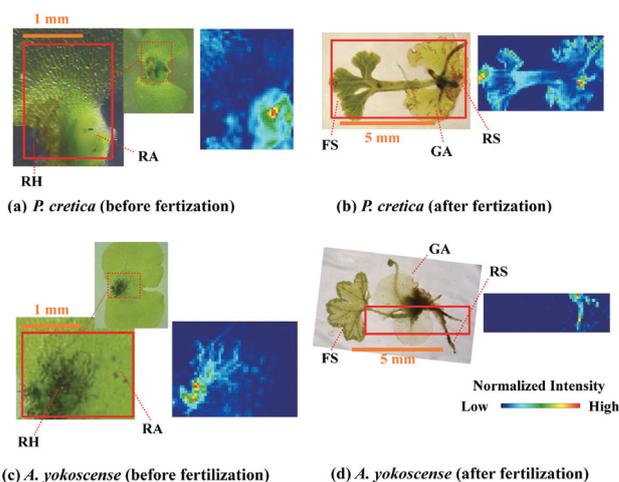


Figure 3
The distribution of arsenic in gametophytes of *P. cretica* and *A. yokoscense* before/after fertilization. RH: rhizoid, RA: reproductive area, GA: gametophyte part, FS: frond of sporophyte, RS: root of sporophyte. The red squares in photographs are measurement areas by XRF imaging.

3. オオバノイノモトソウおよびヘビノネゴザの前葉体におけるAsの分布と化学形態の評価

近年、モエジマシダ以外にもAsを蓄積するシダ植物がいくつか報告されている。モエジマシダと同じ *Pteris* 属に分類されるオオバノイノモトソウ (*Pteris cretica* L.) は、Asのハイパーアキュムレーターとして、地上部と地下部にそれぞれ2,800 ppm、750 ppmのAsを蓄積することが報告されている一方で[15]、無性生殖というモエジマシダとは異なる生殖様式をとる。また、従来からCd, Cu, Pb, Znのハイパーアキュムレーターとして知られるヘビノネゴザ (*Athyrium yokoscense*) [16,17] は、Asの蓄積能をもつ一方で、地上部に約900 ppm、地下部に約2,200 ppmというモエジマシダとは異なる体内分布を示すことが報告されている[18]。このようにモエジマシダと生殖様式やAsの分布が異なるシダを比較・研究することは、As大量蓄積に関する3種のシダの共通性や特異性等の新たな知見につながると期待される。しかしながら、モエジマシダ以外の前葉体においてAsを分析した例はなく、生長過程におけるAsの挙動にどのような特徴があるかは分かっていない。そこで我々は、放射光蛍光X線分析を用いて、オオバノイノモトソウとヘビノネゴザの前葉体についても研究を進めた。そして、モエジマシダ前葉体に関して得られた知見と比較することで、それぞれのシダの特性(生殖様式、蓄積様式)とAsの挙動がどう関係するのかを見出すことを目指した。

実験では、モエジマシダにおいて特に特徴的であった受精前後の二つのステージ(ステージ2と3)に着目した。それぞれの植物種に対し、50 ppm(オオバノイノモトソウ)、1 ppm(ヘビノネゴザ)の濃度でAsを投与した(培地はKH₂AsO₄で調製)。3日間後、寒天包埋して保水したものを分析に供した。分析はPF BL-4AとBL-12Cで行った。

オオバノイノモトソウとヘビノネゴザにおけるAsのXRFイメージングの結果をFig. 3に示す。まずオオバノイ

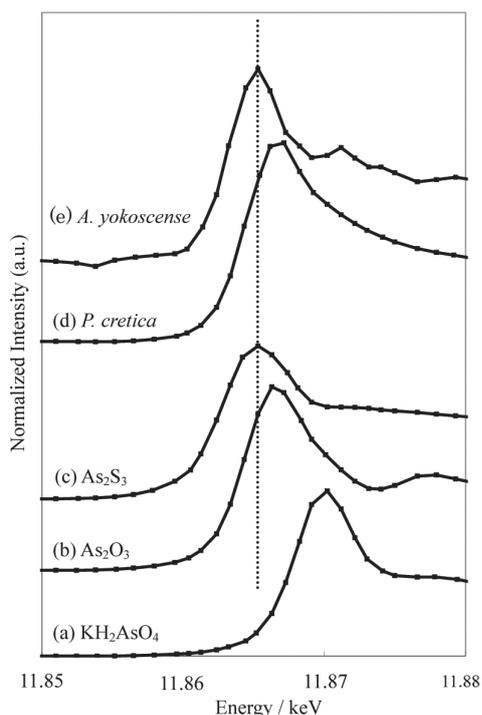


Figure 4
Arsenic K-edge XANES spectra of reference materials and gametophytes of *P. cretica* and *A. yokoscense* before fertilization.

ノモトソウの前葉体は、受精前 (Fig. 3(a)), シート状の細胞と比較して生殖器付近に As の蓄積が見られることが明らかとなった。また、受精後のステージ (Fig. 3(b)) では、前葉体と孢子体の両方に As が分布している様子が見られた。これに対し、ヘビノネゴザ前葉体については、受精前の前葉体 (Fig. 3(c)) において、うっすらと細胞の形に沿って As が存在する一方で、他の二つのシダとは異なり、As は仮根に多く存在していた。また、受精後のステージ (Fig. 3(d)) においても、As は孢子体の根に多く存在しており、他の二つのシダのような地上部への移行はほとんど見られなかった。一方、XANES 測定の結果 (Fig. 4), どちらの前葉体においても As の還元が起こっていることが明らかとなった (Fig. 4(d),(e))。さらに、ヘビノネゴザに関しては (Fig. 4(e)), 他の二つのシダと比較しておよそ 1.0 eV 低エネルギー側にピークトップがあり、これは参照物質である As_2S_3 と同じピークトップのエネルギーであることから、As は S と結合していることが推定された。

これら二種類のシダの前葉体における As の分布に関する報告は、本研究が初めてであった。特に、無性生殖を示すオオバノイノモトソウにおいて、受精前のステージで生殖器周辺に As が多く存在していることは、有性生殖を示すモエジマシダと対照的であり、それぞれの生殖様式の違いを反映した興味深い結果が得られたといえる。これらのシダは互いに *Pteris* 属に分類されている一方で、孢子芽芽から 1 ヶ月後の前葉体では既にそれぞれの特徴を備えており、特に生殖器付近に As を蓄積させないことがモエジマシダの特徴の一つとして明らかになったといえる。一方、ヘビノネゴザは従来から、Pb, Cu, Zn 等の重金属を根に特

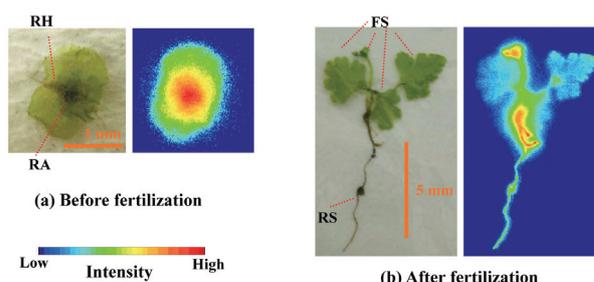


Figure 5
The distribution of phosphorus in gametophytes of *P. vittata* before/after fertilization. RH: rhizoid, RA: reproductive are, FS: frond of sporophyte, RS: root of sporophyte.

異的に蓄積することが知られているが、As についても同様に孢子体の根に蓄積されている様子が可視化されると同時に、受精前の前葉体の仮根にも As を多く蓄積していることが明らかとなった。前葉体の仮根は、養分吸収に関して孢子体の根と役割が似ているということは従来から言われているが、As の蓄積についても、孢子体の根と同様の性質をもつと推測された。

ヒ素の化学形態に関する報告も、これらの前葉体については本研究が初めてである。通常の植物の場合、As の還元は、解毒機構の一過程として、グルタチオン (GSH) やファイトケラチン (PCs) 等のチオール基を含む化合物との錯生成によって起こり、その結果、As の隣接原子は S になると考えられている [19]。一方、地上部への輸送の一過程として、根における木部への As の積み込みは、ハイパーアキュムレーターかどうかを問わず、主にオキシアニオンの形態 (亜ヒ酸とヒ酸) に対して行われるため、As-GHS や As-PCs は地上部へあまり輸送されないといった報告もなされている [20]。本研究では、As 蓄積能をもつ三種のシダにおいて共通して As の還元が認められたが、三種のうち、ハイパーアキュムレーターでないヘビノネゴザのみ As-S 結合の存在が示唆された。このことは、上記のような As の解毒および輸送に関する従来の報告と矛盾なく、以下のように解釈することができる。すなわち、ヘビノネゴザでは受精前の維管束組織を持たない前葉体は、細胞レベルで As-S 結合をもつ錯体を形成して As を解毒する。そして受精後、維管束組織が発達したステージでは、解毒・蓄積された As はオキシアニオンではないことから木部への積み込みは行なわれず、孢子体地上部への移行はほとんど見られない。これに対し、ハイパーアキュムレーターである二つのシダ (モエジマシダとオオバノイノモトソウ) は、ヘビノネゴザとは異なる解毒機構をもち、オキシアニオンとして As を還元するため、受精後、維管束組織の発達と共に孢子体地上部へ移行した様子が観測される。ここで明らかになった重要なことは、As の還元機構は細胞レベルで備わった現象であり維管束等の特定の組織構造の有無とは関係なく起きる現象で、この還元機構の違いが植物種による As の地上部への移行の有無を決めている可能性があることである。As とチオール基を含む化合物

との間に明確な関係が認められないにも関わらず、なぜ通常より高い As 耐性を示すのかといったハイパーアキュムレーターのもつ解毒機構は未だに分かっていない。しかしながら、このように植物間の As の分布や化学形態の違いに着目することで、As の解毒機構と体内分布の関係について一つの仮説を提示することができた。これにより、As の還元機構の詳細を調べることが、ハイパーアキュムレーターにおける As の蓄積挙動の特異性を明らかにする上でも重要な課題の一つであることが改めて示唆されたと見える。

4. 放射性同位体元素を用いたモエジマシダ前葉体における P のイメージング

以上に示してきたように、放射光蛍光 X 線分析では As のような重元素の分布および化学形態については大気中で感度よく分析できるものの、軽元素の蛍光 X 線は空气中で著しく減衰してしまうため、植物が生きた状態での分析は難しいといった問題点も持つ。一方で、有害重金属元素に限らず、多量必須元素を含むより多くの元素を非破壊で分析できれば、様々な生理現象を突き止めることができるはずである。特に同族元素であり、化学的挙動が似ている P は、As 高集積植物であるモエジマシダ体内において、様々な場面で As と競合関係を引き起こすと考えられるため、その挙動を把握することは重要な課題である。

しかしながら、これまでなされてきたモエジマシダの P に関する研究では、胞子体については器官レベルの定量や SEM-EDS による分析が行われているのみであり [4]、さらに前葉体に関しても、そのサイズの小ささから個体レベルの定量分析しかなされていない [12]。そのため、As についてこれまで得られた知見との比較・検討は十分ではなかった。そこで、放射性同位体 (RI) を用いた P の分析を放射光蛍光 X 線分析と相補的に用いることで、モエジマシダにおける P の挙動を非破壊で明らかにすることを試みた。

試料には、受精前後のモエジマシダ前葉体を用い、P のトレーサーとして、 β 線放出核種である ^{32}P (半減期: 14.3 日, 最大 β 線エネルギー: 1.711 MeV) を用いた。P 濃度 4.1 ppm の通常培地に ^{32}P を PO_4^{3-} の形態で添加し、As も AsO_4^{3-} の形態で 50 ppm になるように添加した。この培地で前葉体を栽培することで、 ^{32}P の投与を行った。3 日間の投与期間の後、洗浄してイメージングプレートに露光した。その後、イメージングプレートの読み出しを行い、P のイメージング像を得た。

Fig. 5(a) は受精前のモエジマシダ前葉体についての P の分布である。P は前葉体全体に分布し、特に仮根付け根および生殖器周辺の数百ミクロン角の範囲内に多く存在していることが明らかとなった。一方、Fig. 5(b) は受精後のステージについてのイメージング結果である。P は植物体全体に行き届いており、主に、胞子体地下部の根と、伸長途中の葉の先端に多く蓄積されていることが明らかとなった。このように、受精前後の植物体内の P の分布を、組織レベルの空間分解能で可視化することに成功した。

一般的に、通常の植物は As 投与によって枯死し、その体内において P は地上部に、As は地下部に多いという元素分布を示すことが知られている。これに対し、As に耐性をもつモエジマシダでは、これまでの成熟した胞子体における器官別の定量分析から、As は地上部に多く、P は地下部に多いという異なる元素分布を示すという報告がなされており、胞子体地上部へ As を効率的に輸送・蓄積することがハイパーアキュムレーターとしての重要な特性の一つであると考えられてきた。本研究の受精後のステージの結果でも、胞子体地上部への As の蓄積 (Fig. 1(c)) と、胞子体地下部への P の蓄積 (Fig. 5(b)) が可視化されたことから、受精後のまだ早いステージの胞子体においてもこのようなモエジマシダ特有の As と P の関係が実現されていることが明らかとなった。

さらに今回、受精前の前葉体において、生殖器付近の数百ミクロン角の範囲内に P が多く蓄積されていること (Fig. 5(a)) が明らかとなった。これは放射光マイクロビームで明らかになった As の挙動 (Fig. 1(b)) と対照的であることから、この部位において P を蓄積し、As を蓄積させない何らかの生理機構が存在することが示唆されたと見える。このような組織レベルでの As と P の認識機構の存在を報告したのは本研究が初めてであり、今後、モエジマシダ前葉体の生殖器付近に着目して、タンパク質や遺伝子等に関するより生物学的なアプローチを行うことで、モエジマシダのもつ As と P の認識機構に関して新たな知見が得られることが期待される。

以上のように、モエジマシダにおける As と P の挙動の違いが、これまでより高い空間分解能で植物体全体について明らかになった意義は大きい。植物体のもつ各組織は、それぞれ植物個体全体に対して異なる役割をもつため、当然、組織によって、元素の要求度や元素の働きは異なる。そのため、それぞれの組織において異なった As と P の関係が存在する可能性がある。従って、本研究のように、高い空間分解能で As と P の挙動を可視化することができれば、鍵となる組織を特定し、その組織のもつ本来の生理機構との関連性から、識別に関する手がかりを得られる可能性がある。すなわち、放射光蛍光 X 線分析と同時に放射性同位体を相補的に用いて P の *in vivo* 解析を行うことは、As 蓄積に関して植物体内に存在する生理機構の解明に有効なアプローチであると言える。

5. まとめ

本稿では、放射光蛍光 X 線分析および放射性同位体分析の二つの非破壊分析法を用いて行ったモエジマシダ前葉体における As と P の *in vivo* 解析、および他のシダ植物との比較に関する研究を紹介した。本研究により、モエジマシダ、オオバノイノモトソウおよびヘビノネゴザの三種のシダ植物前葉体について、胞子発芽からの生長過程における As と P の挙動に関する基本的な情報を *in vivo* で得ることに成功し、(i) As の生体内還元作用、および、(ii) As と P の認識機構に関して、いくつかの有用な知見を得ることが

できた。今後、より高い空間分解能での比較解析、あるいは様々な栽培条件下での検討等を実現させて引き続き分析を行うことで、それぞれの元素の挙動の違いを、ミクロからマクロまでの様々なスケールで詳細に明らかにすることができるであろう。

植物体内の元素の挙動（元素の局在、化学形態変化、動態等）は、遺伝子やタンパク質、細胞、組織、器官等のさまざまな階層で存在する生体物質や、それらが働くことによって起こる生理現象そのものである。したがって、植物体内の元素の挙動を化学的側面から解明していくことは、その背後にある生理機構の存在を明確化していくことを意味し、生物学的知見を得るための基礎的データを与える。今後、本研究のようなアプローチがモエジマシダを含む様々な重金属蓄積植物のもつ特異な生理現象の理解に貢献することを期待する。

謝辞

本稿では、著者である柏原輝彦が東京理科大学大学院の修士課程在学時に行った研究で得られた成果の一部を紹介させていただきました。本研究を行うにあたり、(株)フジタの北島信行博士、理化学研究所の阿部知子博士には試料や栽培場所を提供していただき、さらに植物生理学上の沢山のディスカッションをしていただきました。また東京理科大学大学院農学生命科学研究科の中西友子教授、田野井慶太助教にはRI実験に際して甚大なご協力をいただきました。高エネルギー加速器研究機構の飯田厚夫教授には、マイクロビームのセットアップ等でお世話になりました。この場を借りて皆様に御礼申し上げます。なお、本実験はPF BL-4A, 12C (課題番号:2004G332, 2006G124, 2007G638)にて行われました。

参考文献

- [1] Ma L.Q., Komar K.M., Tu C., Zhang W., Cai Y., Kennelley E.D., *Nature*, **409**, 579 (2001).
- [2] 北島信行：モエジマシダによるヒ素浄化，“メタルバイオテクノロジーによる環境保全と資源回収-新元素戦略の新しいキーテクノロジー” 植田充美, 池道彦 監修シーエムシー出版, p.84-90 (2009).
- [3] Chen R., Smith B.W., Winefordner J.D., Tu M.S., Kertulis G., Ma L.Q., *Anal. Chim. Acta*, **504**, 199-207, (2004).
- [4] Lombi E., Zhao F.-J., Fuhrmann M., Ma L.Q., McGrath S.P., *New Phytol.*, **156**, 195-203 (2002).
- [5] Webb S.M., Gaillard J.-F., Ma L.Q., Tu C., *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 754-760, (2003).
- [6] Hokura A., Omuma R., Terada Y., Kitajima N., Abe T., Saito H., Yoshida S., Nakai I., *J. Anal. At. Spectrom.*, **21**, 321-328 (2006).
- [7] 柏原輝彦, 保倉明子, 北島信行, 小沼亮子, 斉藤宏之, 阿部知子, 中井 泉, *分析化学*, **55**, 743-748 (2006).
- [8] Kitajima N., Kashiwabara T., Fukuda N., Endo S., Hokura A., Terada Y., Nakai I., *Chem. Lett.*, **37**, 32-33 (2008).

- [9] Fukuda N., Hokura A., Kitajima N., Terada Y., Saito H., Abe T., Nakai I., *J. Anal. At. Spectrom.*, **23**, 1068-1075 (2008).
- [10] 三尾咲紀子, 柏原輝彦, 保倉明子, 北島信行, 後藤文之, 吉原利一, 阿部知子, 中井 泉, *X線分析の進歩*, **40**, 183-193 (2009).
- [11] Kashiwabara T., Mitsuo S., Hokura A., Kitajima N., Tomoko A., Nakai I., *Metalomics* (2010) in press.
- [12] Gumaelius L., Lahner B., Salt D.E., Banks J.A., *Plant Physiol.*, **136**, 3198-3208 (2004).
- [13] Kertulis G.M., Ma L.Q., MacDonald G.E., Chen R., Winefordner J.D., Cai Y., *Environ. Exp. Bot.*, **54**, 239-247 (2005).
- [14] Zhao F.-J., Ma J. F., Meharg A.A., MacGrath S.P., *New Phytol.*, **181**, 777-794 (2009).
- [15] Zhao F.-J., Dunham S.J., McGrath S.P., *New Phytol.*, **156**, 27-31 (2002).
- [16] Honjo T., Suganuma H., Satomi N., *J. Phytogeogr. Taxon.*, **32**, 68-80 (1984).
- [17] Yoshihara T., Tsunokawa K., Miyano Y., Arashima Y., Hodoshima H., Shoji K., Shimada H. Goto F., *Plant Cell Reports.*, **23**, 579-585 (2005).
- [18] Van T.K., Kang Y., Fukui T., Sakurai K., Iwasaki K., Aikawa Y., Phuong M., *Soil Sci. Plant Nutr.*, **52**, 701-710 (2006).
- [19] Kraemer U., Pickering I.J., Prince R.C., Raskin I., Salt D.E., *Plant Physiol.*, **122**, 1343-1353 (2000).
- [20] Huang Z.-C., Chen T.-B., Lei M., Liu Y.-R., Hu T.-D., *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 5106-5111 (2008).

(原稿受付日：2010年3月28日)

著者紹介

柏原輝彦 (Teruhiko Kashiwabara)

広島大学大学院理学研究科地球惑星システム学専攻 (D2), 日本学術振興会特別研究員 (DC2)

最近の研究：重元素の化学種変化と安定同位体比の変動の関係、微量元素の水溶性と生体必須性との関係。

E-mail: teruhiko-hekeke@hiroshima-u.ac.jp

保倉明子 (Akiko Hokura)

東京電機大学工学部環境化学科 准教授

最近の研究：重金属蓄積植物の放射光蛍光X線分析, 環境中微量元素の動態解明。

E-mail: hokura@mail.dendai.ac.jp

中井 泉 (Izumi Nakai)

東京理科大学理学部応用化学科 教授

最近の研究：放射光X線分析の新領域への応用, 物質史研究法の開発と考古学, 鑑識科学, 食品科学への応用。

E-mail: inakai@rs.kagu.tus.ac.jp