



植物の生物機能を用いた金属回収技術

コケ植物を用いた金属回収技術の開発と展望

はじめに：金属資源の回収に関する背景

ハイテク電子機器や電気自動車の部品には、希土類元素などさまざまな希少金属が使用されている。それらの生産を基幹産業とする日本では、希少金属は産業のビタミンとも呼ばれ、経済発展のためにはなくてはならない重要な資源である⁽¹⁾。しかし、希少金属資源の埋蔵地域は地球上に偏在しており、わが国では、現在その多くを輸入に頼らざるをえない。さらに資源保有国では、自国の資源開発と保持の主権を求める資源ナショナリズムの傾向が強まっており、輸出制限などによる国際市場の価格高騰が容易に生じうる状況となっている⁽¹⁾。このような希少金属の供給不足の危機を打開すべく、深海に眠る金属資源の探索や希少金属の代替技術の開発が推進されているが、これらの技術の実用化には、まだ多くの時間を要すると予想される。

一方、日本には、廃棄電化製品などに由来する金属資源が多く埋蔵されている。戦時中に、大規模な地下資源に恵まれていないわが国では“家庭鉱脈”という新語が作られ“まだある金属出せいまだ”のスローガンのもと鉄や銅などのベースメタルの回収、再利用を推進し、何とか金属資源の供給不足をしのごうとした経験がある。その後の著しい経済的発展の結果、現代、国内では電子機器が氾濫している。一般家庭には使わなくなった電子機器も数多く眠っており、そこには通常、天然鉱石に比べて濃度の高い状態で希少金属が含有される。このような背景から生み出されたのが、現代版の家庭鉱脈とも言える“都市鉱山”という考えである。都市鉱山では、戦時中のように鍋、やかんから玩具まで根こそぎ回収するわけではなく、不要になった廃棄物からの希少金属の回収と再利用を目的とする。2013年度からは、小型家電リサイクル法が制定され、ついに国策レベルで再資源化が

促進される状況に至っている。

他方では、産業活動の亢進に由来する環境中への重金属飛散による汚染も問題である。日本では、足尾銅山鉱毒事件に始まり、水俣病に至るまで、多くの重金属汚染による深刻な被害を経験しており、規制も厳しく定められているが、一部の諸国において急成長の裏での重金属汚染問題が顕在化している。国内においても、金属資源循環の活性化の裏で今後、カドミウム、ヒ素、鉛、アンチモン、クロムなどの毒性の高い重金属の環境中への流出が増大する可能性も推測される。また、かつて殖産興業と富国強兵を支えるために増設された廃坑から半永久的に生じる重金属を含む浸出水の低コスト管理も、わが国の抱えている課題である。

このように、産業上有益あるいは、生物毒性を有する金属元素を回収する技術開発の需要は高まっているが、現状では回収コストに見合う利益は少ないという問題があり、効率的な金属資源循環システムは達成されていない。しかし、将来的に、より安全で低コストな金属資源回収技術の導入が必要になってくるのは明白である。さらに昨今の持続可能な社会基盤構築の観点から、化石燃料に依存しない金属資源回収技術の開発が望まれており、生物機能を利用した技術が着目されている。このような廃棄物処理、土壌や水質浄化など環境に関連したバイオテクノロジーは、グレーバイオテクノロジーと総称されている。このなかでも、特に植物を用いた技術は、二酸化炭素の放出がなく、環境負荷が少ないことから最もニーズに即していると考えられる。主に達成すべき目的は、金属資源の効率的な再利用と重金属汚染環境の浄化の2つであり、どちらにおいても根底にあるものは特定の金属元素を吸着、濃縮する生物機能である。そこで、本稿では、まず植物を主とした重金属回収に関する生物機能、すなわち重金属耐性や蓄積にかかわる分子メカニズムについて概説する。さらに、われわれが着

オール基を介して、金属元素を結合し、無毒化する。植物においては、動物のものとはアミノ酸配列が異なるメタロチオネイン遺伝子 (MTs) が見いだされている⁽⁴⁾。現在、高等植物におけるMTsは、システイン残基の配置パターンの違いから4つのタイプに分類され、この配置パターンの違いにより、結合できる金属元素種の特異性が異なると考えられている。たとえばシロイヌナズナにおいて、タイプ1~3のMTsは、銅やカドミウムを、タイプ4のMTsは、主に亜鉛を結合しうることが酵母を用いた解析により明らかにされている⁽⁴⁾。

メタロチオネインなど金属結合能を有するタンパク質は、遺伝情報から直接翻訳されるため、遺伝子工学的的手法による構造などの人工的な改変が容易という利便性がある。実際に、多量体化およびアミノ酸置換による機能の向上に成功した例が報告されている⁽¹⁰⁾。また、メタロチオネインは細胞質および核に局在するため、結合のためには対象となる金属イオンが細胞内に取り込まれる必要があるが、遺伝子工学的的手法を用いた技術により酵母細胞への表層提示に適用した例もある⁽¹¹⁾。このように生物機能を用いた重金属回収技術では、メタロチオネインをはじめとした金属結合タンパク質の機能を利用するのが、最も人為的な制御が容易な方法の一つと考えられる。また、将来的には、人工的にデザインした金属結合能を有するタンパク質を用いた希少金属の選択的回収技術の開発も期待される。

3. 金属イオンの輸送と隔離による濃縮メカニズム

銅や鉄、亜鉛などに代表される金属元素は、生物機能にとって必須であり、細胞内外および各細胞内器官への取り込みと排出による制御を介し、恒常性が厳密に保持されている。植物による重金属回収には、特に許容量の大きい液胞への金属元素の取り込みによる隔離メカニズムの利用が適していると考えられる。陸上維管束植物において、液胞内への金属元素の取り込みには、多様な輸送体タンパク質が関与することが明らかになっており、これらの機構は、カドミウムやヒ素などの生物毒性の高い重金属の無毒化機構としても働く⁽¹²⁾。たとえばシロイヌナズナにおいて、ABCトランスポーターファミリーに属するAtABCC1およびAtABCC2は、ヒ素、カドミウム、水銀とのフィトケラチン複合体を液胞内に取り込むことで無毒化することが、明らかにされている⁽¹³⁾。

希少金属に属するニッケルやマンガン、生物毒性の高いヒ素に関しては、それらを高蓄積する植物種が知られており、それらの蓄積に関与する輸送体タンパク質を見

いだし、うまく利用することで、回収能を高めた植物体を作出できるかもしれない。たとえば、ヒ素を高蓄積することが知られているモエジマシダ (*Pteris vittata*) におけるヒ素輸送体PvACR3は液胞膜に局在し、液胞内へのヒ素蓄積に関与することが報告されている⁽¹⁴⁾。一方で、希土類の多くは通常、生命活動に関与しないことから、これらを輸送するトランスポーターはよく知られていない。一般的に、鉛やヒ素など通常は生命活動に必須でない金属元素は、カリウムやその他金属元素、リンなどと間違われて取り込まれることが知られており、活性は弱いかもしれないが、誤認識により希土類元素イオンを輸送できるものが潜在する可能性はありうる。また、今後研究が進めば、人為的な機能改変により希少金属の輸送体タンパク質を設計できる可能性も残されている。

コケ植物を用いた重金属回収技術

コケ植物は、蘚類、苔類、ツノゴケ類の3つに大別され、世界中で約18,000種が報告されている⁽¹⁵⁾。このなかでも、蘚類の原糸体が、水圏からの金属元素の回収・浄化に適した生物素材であると、われわれは考えている。原糸体は、主に蘚類の発達初期段階で見られる組織であり、細長い原糸体細胞が先端成長および分岐することで二次元的に成長する (図1)。液体培養系では、多くの種において、ほぼ原糸体の状態を保ったまま増殖させることが可能であり、破碎しても細胞一つから再生できるので、維持管理しやすい。この蘚類の原糸体を用いた水圏からの金属元素の回収技術は、バイオソープション (細菌、藻類を用いた細胞表層への吸着) やファイトフィルトレーション (植物の根を用いた水圏からの金属回収) の類と言え、われわれはブライオフィルトレーションと呼んでいる⁽¹⁶⁾ (図2)。陸上維管束植物を用いた金属回収技術の場合、地下部と地上部とでの物質輸送など複雑な背景を考慮する必要がある。一方で、蘚類の原糸体は、ほぼ均一な細胞種から構成され、個々が直接



図1 ■ 左: 蘚類 (ヒョウタンゴケ) の原糸体 bar=200 μm
右: 原糸体細胞の拡大像 bar = 40 μm

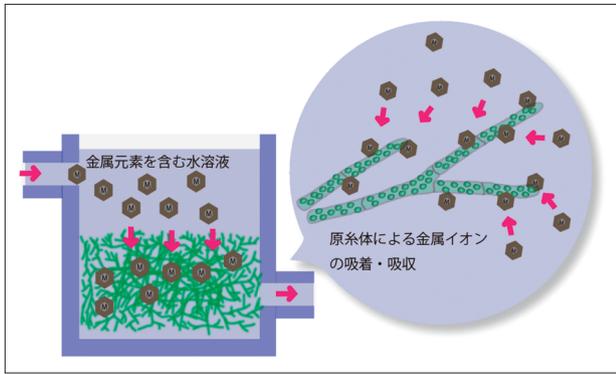


図2 ■ 蘚類の原糸体を用いた水圏からの金属回収技術（プライオフィルトレーション）のイメージ図

外界との物質のやり取りを行う。したがって、細胞レベルでの現象で、その分子メカニズムを説明でき、かつ機能の付加も容易という特性をもっている。さらに、前述のとおり、原糸体は繊維状の構造を取るため、工業的に使用されている化学合成イオン交換繊維のように水溶液中からの効率的な金属元素吸着と、吸着済み素材の回収が容易である。

これまでにわれわれは、焚き火後などアルカリ条件を好むヒョウタンゴケ (*Funaria hygrometrica*) の原糸体を用いて、産業廃液中からの鉛および金の回収に成功している。これらのヒョウタンゴケ原糸体への蓄積量は、鉛が乾燥重量あたり約74%、金が乾燥重量あたり約10%であった⁽¹⁷⁾。さらに、ヒョウタンゴケ原糸体は、強酸性溶液中からの、スカンジウムや水銀の選択的回収能をもつことも見いだしている⁽¹⁸⁾。これらの金属元素の集積に関する分子レベルでのメカニズムは、現段階でほとんど明らかではないが、蓄積部位の分析化学的解析などから金の蓄積に関しては、主に葉緑体内での還元反応が、鉛などの蓄積には細胞壁成分が関与すると考えている。加えて、われわれは、ヒョウタンゴケにおいて、外来遺伝子導入による安定的形質転換体の作出に成功しており、遺伝子工学的手法を用いた有用機能付加株の作出なども、実施可能な状況となっている。

● コケ植物における重金属超蓄積種（ハイパーアキュミュレーター）

コケ植物のなかには、長期間乾燥している岩上や、pH 2程度の強酸性環境など極限環境とも言えるような場所を専門に生育するようになった生き方をしている種も多い。ほかの植物が生育できない重金属汚染環境を専門とする種も存在し、それらは銅と関連しているものが多い

ので銅苔と総称されている⁽¹⁹⁾。このような重金属を好み、それを高蓄積する性質を有する植物は、ハイパーアキュミュレーターと呼ばれ、高等植物やシダ植物のなかに一定の割合で存在する。この特殊な能力をもった植物種のもつ知恵を拝借することで、植物を用いた金属回収技術の開発へのブレイクスルーが得られる可能性は高い。たとえば、このような植物種から、より洗練された独自の金属元素結合能を有する化合物やタンパク質を見いだせることが想定される。このような考えのもと、陸上維管束植物を主としたハイパーアキュミュレーターの重金属耐性や蓄積の分子メカニズムに関する研究が多くなされてきており、それらに關与する重金属輸送体や重金属結合タンパク質などが次々に明らかにされつつある。

前述した銅苔の代表種として日本の寺社仏閣の銅屋根や銅製品の周辺および銅鉱山といった高濃度の銅汚染環境にのみ生育するホンモンジゴケ (*Scopelophila cataractae*) がよく知られている。この種のもつ注目すべき特徴として、通常植物種の数千倍（最大で乾燥重量の3%）というほかに類のない高い銅蓄積能が挙げられる⁽²⁰⁾。さらに、原糸体培養株を用いた解析から、この種の銅耐性能は非常に高く、数mMオーダーの銅添加に対する耐性能を確認できている⁽²¹⁾。加えて、ホンモンジゴケは、蘚類のモデル植物であるヒメツリガネゴケと比較して、銅以外にもいくつかの重金属に耐性を示すことが実験的に示されている⁽²¹⁾。また、ホンモンジゴケ以外にも、ホンモンジゴケの近縁種であるイワマセンボンゴケ (*Scopelophila ligulata*) は鉄を、強酸性環境に生育するチャツボミゴケ (*Jungermannia vulcanicola*) は、水銀やヒ素を蓄積することが知られている⁽¹⁸⁾。このような重金属蓄積能を有するコケ植物をモデルとして研究することは、コケ植物を利用した金属元素回収技術に利用可能な遺伝子資源や有用な情報の発見につながると考えられる。そこでわれわれは、ホンモンジゴケの培養株を用い、遺伝子情報の収集や形質転換系の開発などホンモンジゴケ研究のための研究基盤構築を進めており、現在、耐性や蓄積にかかわる分子メカニズムも一部見えてきている。

● 金属資源回収のための遺伝子工学的手法を用いた有用種の育種

これまでに環境浄化を目的とした多くの遺伝子組換え植物の創出が試みられ、実験環境内ではあるがその有効性が確認されているものも多い。このような遺伝子工学

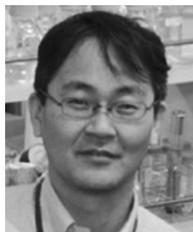
プロフィール



野村 俊尚 (Toshihisa NOMURA)
＜略歴＞2010年東京大学新領域創成科学研究科先端生命科学専攻博士後期課程修了／同年日本学術振興会特別研究員PD, 現在に至る＜研究テーマと抱負＞銅苔に関する謎（重金属耐性および蓄積メカニズムや銅環境への偏在性など）を明らかにしたい＜趣味＞料理, ほとんど実らないベランダ家庭菜園の観察, コケ植物の培養株コレクション



井藤賀 操 (Misao ITOUGA)
＜略歴＞2002年広島大学大学院理学研究科生物科学専攻博士後期課程修了／同年(株)セシア企画開発部／2003年理化学研究所植物科学研究センター／2013年同研究所環境資源科学研究センター上級研究員, 現在に至る＜研究テーマと抱負＞コケ植物原糸体を用いた金属除去・回収技術の研究および開発, コケ植物でグリーンイノベーションを実現すること＜趣味＞盆栽, 登山, 温泉



榊原 均 (Hitoshi SAKAKIBARA)
＜略歴＞1992年名古屋大学大学院農学研究科博士課程後期課程中途退学／同年同大学農学部助手／2000年理化学研究所植物科学研究センターチームリーダー／2006年同グループディレクター／2013年理化学研究所環境資源科学研究センターグループディレクター, 現在に至る＜研究テーマと抱負＞窒素栄養に対する植物の個体レベルでの応答機構の解明. 特に代謝レベル, 形態レベルの応答を協調的に起こし, 個体レベルで成長を最適化する仕組みを明らかにしたい＜趣味＞家庭菜園