

植物による土壌浄化の可能性と課題

北海道大学大学院 農学研究院 植物栄養学研究室 渡部 敏裕

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、福島第一原子力発電所が大きな損傷を受け、大気中に多量の放射性物質が放出された。放出された放射性物質は風に乗って広がり、東日本を中心とした広い範囲で、放射性物質による土壌の汚染が確認されている。原発事故発生直後に問題となった野菜等の汚染は、おもに雨と共に降下した放射性物質が直接付着したことによる汚染である。しかし、土壌に付着した放射性物質は、原発からの放出が収まった後にも残る。

このようにして土壌が有害物質によって汚染されると、土壌に含まれる水やそこに生育する植物も汚染されてしまい、最終的に我々人間の健康にも大きな影響を及ぼす。汚染された土壌を浄化するためには汚染された部分の除去や土壌洗浄などの手段が有効であるが、広範囲にわたる汚染土壌を浄化する場合は、より低コストな浄化法が必要とされる。その方法の一つに、ファイトレメディエーション(phytoremediation)がある。ファイトとは植物を、レメディエーションは修復を意味する。広義のファイトレメディエーションは、土壌に含まれる有害化合物の分解を植物により促進することも意味するが、一般的に、ファイトレメディエーションとは植物に土壌に含まれる有害物質、特に有害元素を吸収させ土壌から除去することを指す(図1)。

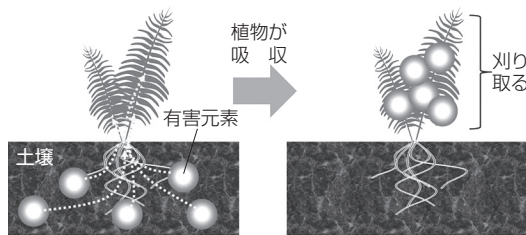


図1 ファイトレメディエーションの原理

2. 植物の必須元素と非必須元素

植物は光合成により大気中の二酸化炭素を固定して炭水化物を獲得し、その他の成長に必要な元素は根をととして土壌から獲得している。植物の生育に必要な元素は、炭素、酸素、水素、窒素、カリウム、リン、カルシウム、マグネシウム、硫黄、鉄、マンガン、亜鉛、銅、塩素、ホウ素、モリブデン、ニッケルの17種類が知られており、これらの元素は必須元素と呼ばれている。必須元素はそれぞれ特異的な役割を持っており、一つでも欠くと正常に生育することができない。

一方、土壌には植物の必須元素だけでなく、様々な種類の元素が含まれる。植物は自分の養分となる必須元素を選択的に吸収・輸送するメカニズムを持つことが知られているが、必須元素以外の元素(非必須元素)も吸収してしまうことがある。この性質を利用して土壌のファイトレメディエーションが可能である。

3. 植物の元素集積特性と超集積植物

植物は土壌に存在する全ての元素を吸収することができるが、元素種および植物種によりその傾向は大きく異なる。

必須元素は、植物の正常な成育に必要とされる元素であるため、植物種間での含有率の変動は比較的小さい。特に、多量に必要とされる元素(窒素、カリウム、リンなど)は、異なる植物種間でも含有率はあまり変わらない。

一方、植物の成育に必要とされない非必須元素は、植物種間の元素含有率の変動がかなり大きい。この非必須元素の含有率多様性には、植物の進化との関連性も認められている。

例えば、ノボタンやツバキの仲間は、アルミニウムを非常に高濃度に葉や茎に集積する性質をもつ。アルミニウムは酸性土壌中に多く含まれ、植物にとって有害な元素であるため、ほとんどの植物ではアルミニウムを選択的に排除し、含有率は低く保たれている。しかし、酸性土壌に適応して進化してき

表1 特定の元素をよく吸収する植物(超集積植物)の例

元素	超集積植物種
アルミニウム	ノボタン、アジサイ、茶の木
ナトリウム	アッケシソウ、アイスプラント
セレン	<i>Stanleya pinnata</i>
カドミウム	セイヨウカラシナ、 <i>Thlaspi caerulescens</i>
ヒ素	モエジマシダ、イノモトソウ

たノボタンやツバキの仲間は、アルミニウムを大量に吸収する能力を持ち、体内でアルミニウムを無毒化するシステムを獲得している。これは、酸性土壌という環境に適応するには、アルミニウムを体内から排除するよりも、アルミニウムを無毒化するほうが効率が良いためと考えられる。このように、特定の元素を他の植物種よりも大量に(特に茎葉部に)集積する植物を「超集積植物」と呼ぶ。これまでに様々な元素の超集積植物が見つかった(表1)。

4. 超集積植物とファイトレメディエーション

超集積植物のうち、人間にとっても有害な元素を集積する植物種は、ファイトレメディエーションへの利用がしばしば検討されている。ここではまず、ヒ素により汚染された土壌の浄化にファイトレメディエーションが利用された例について述べる。

ヒ素は毒の王様とも呼ばれ、非常に毒性の強い元素である。自然環境では無機ヒ素(5価のヒ酸および3価の亜ヒ酸)と有機ヒ素(ジメチルアルシム酸など)が存在し、無機ヒ素の方が毒性が高い。ヒ素はリンの同族元素であり、ヒ素の化合物であるヒ酸は、リン酸と非常に構造が似ていて、生体内でリン酸と同じように動き、リン酸の作用を阻害する。また、ヒ酸は体内で還元されて亜ヒ酸となり、タンパク質などと結合し更に強い毒性を示す。

このヒ素で汚染された土壌を浄化する際に、ファ



図2 モエジマシダ(ヒ素超集積植物)

イトレメディエーションが利用されている。ヒ素の超集積植物は、シダ植物のイノモトソウ科およびその近縁種でのみ確認されている。その中でも特に葉におけるヒ素集積能が高い種として、モエジマシダ(図2)が知られている。モエジマシダは葉に最高で乾燥重ベースで2%ものヒ素を集積することが報告されている。このヒ素集積能力を利用し、国内でもモエジマシダを利用したヒ素汚染土壌のファイトレメディエーションが民間企業により行われている。

その企業の報告によると、モエジマシダを植えた土壌からは、一年間で1m²あたり約1gのヒ素を除去できるそうである。これは決して大きな値ではないが、栽培を繰り返すことで土壌浄化が可能である。

5. 放射性元素による土壌汚染とファイトレメディエーションの可能性

福島第一原子力発電所の事故後に土壌より検出されているおもな放射性物質の核種には、ヨウ素¹³¹Iとセシウム¹³⁴Csおよび¹³⁷Csがある。事故発生初期の時点では¹³¹Iも問題となったが、¹³¹Iは比較的半減期が短いため、現在はおもにセシウムが問題視されている。

セシウムは原子番号55のアルカリ金属であり、天然には唯一の安定同位体である¹³³Csのみ存在する。¹³⁴Csおよび¹³⁷Csは、半減期がそれぞれ2年、30年の放射性同位体であり、ウランの核分裂反応で生成するもので、天然には存在しない(¹³⁴Csは、核分裂反応から直接生成するのではなく、¹³³Csが中性子捕獲することにより生成する)。

それでは、この放射性セシウムに汚染された土壌をファイトレメディエーションにより浄化することは可能であろうか。植物は¹³³Csを吸収することが知られているが、放射性同位体である¹³⁴Csと¹³⁷Csについても同じように吸収すると考えられる。筆者らは、北大植物園に生育する600種を超える植物種(種子植物およびシダ植物)の葉に含まれる元素を網羅的に測定し、様々な元素の集積能と植物進化の関係を調査している。測定した元素にはセシウム(¹³³Cs)も含まれる。様々な植物のセシウム含有率のデータを解析したところ、種間で大きな変動が認められたが、同族元素であるナトリウムや前述のアルミニウム、ヒ素などと比べれば変動は小さかった。つまり、セシウムを非常に高濃度に蓄積する“超”集

積植物が存在する可能性は低いが、比較的高濃度に集積する植物種は多く存在することが示唆される。筆者らの研究からトクサ科、タデ科、クミ科、ウラボシ科などの植物種はセシウム集積能が高いことが認められており、放射性セシウムで汚染された土壌を浄化する際に利用できるのではないかと期待される。

6. 実施する上での問題点

ファイトレメディエーションは、低コストで広範囲に適用可能であり環境に対してもやさしい技術である。しかし、実用化するにはいくつかの問題点がある。ここではそれらの問題点とその解決策案について、放射性セシウム汚染土壌を中心に解説する。

(1) 元素種によっては、浄化に時間がかかる

植物は、土壌中の元素を土壌に含まれる水分(土壌溶液)に溶けた形態で吸収するため、土壌溶液に溶けにくい元素の除去には相当の時間がかかる。

例えば、好気的土壌中では無機ヒ素の多くが5価のヒ酸として存在するが、ヒ酸は土壌鉱物に含まれる鉄などと非常に強く結合する性質があるため、土壌溶液に溶けにくい。また、セシウムは、土壌中では正の電荷を持つイオンとして存在しているため、土壌に含まれる2:1型層状ケイ酸塩の層間に存在する負の電荷を持つサイトに強く結合する。その結合力は同じアルカリ金属イオンであるカリウムやナトリウムよりもはるかに強く、植物にとって吸収しにくい。

それでは、どうすれば土壌溶液に溶けにくい有害元素を溶けた形態にすることができるだろうか。一つの解決策は、土壌に有害元素を溶かし出す物質を散布することである。ヒ素やカドミウムなどの重金属を土壌から浄化する際には、キレート剤を添加すると土壌溶液に有害元素を溶かし出され、ファイトレメディエーションの効果が上がると考えられている。放射性セシウムの場合、キレート剤を用いてもあまり効果は期待できないが、アンモニウムイオンによる置換作用を利用できる。セシウムを含む土壌に正の電荷を持つアンモニウムイオンを含む物質を加えると、アンモニウムイオンはケイ酸塩層間の負電荷に結合したセシウムイオンと入れ替わり、セシウムイオンを土壌溶液中に溶出させるのである。

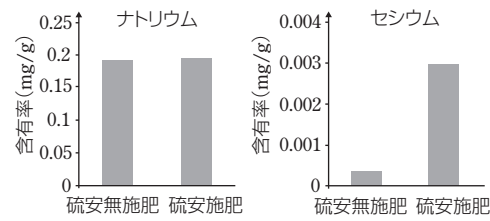


図3 トウモロコシ葉のNaとCs(安定同位体)の含有率

アンモニウムイオンは肥料の硫酸アンモニウム(硫酸)などに含まれるため、窒素肥料としてそれらを土壌に与えることにより植物のセシウム吸収を高めることができる。例として、トウモロコシに窒素肥料として硫酸アンモニウムを与えた時の葉におけるナトリウムとセシウムの含有率変化を図3に示す。同じアルカリ金属であるナトリウムの含有率は硫酸アンモニウム施肥の影響を受けないが、セシウムでは施肥により8倍に高まった。

(2) 根の届く範囲でしか効かない

当然のことではあるが、植物が吸収できる元素は、根の届く範囲に限られる。放射性セシウムの場合、特にこれが大きな問題となる。前述のようにセシウムは土壌との結合力が強いので、雨と共に降下した放射性セシウムのほとんどは、土壌の表層数センチに留まり、あまり深くは浸透しないと考えられる。このため、深いところに根を張る植物種では、セシウム吸収能が高い種でもファイトレメディエーションの効率は低い。逆に、根を浅くはる植物種では、吸収能がそれほど高くない種であっても、効率的に放射性セシウムを吸収できる可能性がある(図4)。

(3) 体の小さな植物では効果が小さい

茎や葉における有害元素の含有率が高い種であっても、必ずしもファイトレメディエーションに最適

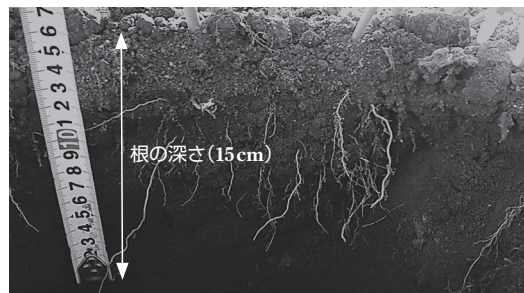


図4 根を浅くはる植物種(タデ科植物)の土壌断面写真

であるとはいえない。土壌から有害元素を除去するには、含有率だけでなくバイオマスの大きさや成長速度も関係するからである(図5)。たとえ含有率が高くても、体が小さく成長速度も遅い植物種はファイトレメディエーションには適さない。

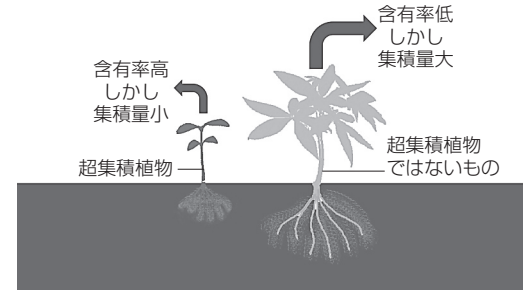


図5 植物のバイオマス生産力と有害元素除去能力の関係性

(4) 栽培困難な種・環境に影響を与える種は利用しにくい

有害元素を高濃度に集積し、成育速度やバイオマス量も申し分ない植物種であっても、必ずしもファイトレメディエーションに利用できるとは限らない。植物種によって成育に適する気候や土壌条件も異なるため、生育環境が適合するかどうかとも問題になる。例えば、筆者らの植物園での分析で見つかった放射性セシウム汚染土壌のファイトレメディエーションの候補となる植物種の多くは、日当たりや水はけのよいところでは生育しにくいシダ植物や、種子からの栽培が難しい植物である。

限られた面積で集約的に栽培する場合であれば、苗を育成しそれを移植することによる栽培は可能であるが、放射性セシウムのように広範囲にわたって土壌の浄化が必要とされる場合は、種子から容易に栽培できる植物種のほうが都合が良い。

逆に、繁殖力や生命力が強すぎる場合も周辺環境や栽培後の土地利用に悪影響を与える可能性があるため、注意が必要である。地下茎で繁殖するような繁殖力の強い多年草は、ファイトレメディエーション後に畑として利用する場合に根が残って雑草化し問題となるかもしれない。しかし、この性質を利用して地上部刈り取りを繰り返すことによって、播種の手間を省いた継続的な栽培も可能かもしれない。

(5) 有害物質を蓄積した植物の処理が必要

ファイトレメディエーションにおける最大の問題

は、有害物質を蓄積した植物をどのようにして処理するかである。刈り取った植物は有害な元素を含むため、堆肥として田畑に投入することはできない。そこで、バイオディーゼル燃料の原料となるナタネなどのエネルギー作物のファイトレメディエーションへの利用が考えられている。

エネルギー作物をファイトレメディエーションに利用できれば、同時にバイオ燃料を作出できるため、畑を使用できない期間中の収入源としても期待される。しかし、エネルギー作物は必ずしも有害元素の吸収力が高いわけではなく、燃料の回収後も残渣は発生するので根本的な解決にはならない。

さらに、今回の放射性セシウムによる土壌汚染のように広範囲にわたってファイトレメディエーションを行った場合、莫大な量の刈り取り植物が発生するため、焼却による減容が必要になる。刈り取った植物体を単に燃やすと、有害元素は気体となったり焼却灰とともに飛散するおそれがあるため、焼却処理を行う際はフィルターなどによる有害元素のトラップシステムが必要である。下水汚泥など有害物質を多く含む恐れのある廃棄物の焼却では、すでに有害元素のトラップシステムが確立されているはずであり、その規模を拡大して植物体を処理することは可能であろう。ただし、焼却処理が実現したとしても、植物体乾燥重量の10%程度の灰は発生するため、その灰の処分も問題となる。

7. おわりに

ファイトレメディエーションによる土壌の浄化は低コストで広範囲の処理が可能である反面、処理に長い期間がかかるという弱点がある。放射性セシウムに汚染された農地や住宅地の場合、そのような長期間にわたる処理が住民に許容されるであろうか。ファイトレメディエーションは様々な土壌浄化法の一つと考え、状況に応じて異なる処理法を選択したり、組み合わせる必要がある。

参考文献

日本土壌肥料学会「セシウム(Cs)の土壌でのふるまいと農作物への移行」

<http://jssspn.jp/info/secretariat/cs.html>