

科学技術政策研究所

講演録—287

「ファイトレメディエーション」

～放射能汚染土壌の浄化技術としての有用性と課題～

渡部敏裕氏

北海道大学大学院 農学研究院 助教

山口紀子氏

(独)農業環境技術研究所 土壌環境研究領域 主任研究員

2011年10月

文部科学省 科学技術政策研究所

科学技術動向研究センター

本資料は、2011年10月27日に科学技術政策研究所で行われた、北海道大学大学院 農学研究院 渡部敏裕氏、(独)農業環境技術研究所 土壌環境研究領域 山口紀子氏の講演を当研究所においてとりまとめたものである。

編集 : 科学技術動向研究センター 赤坂一人 特別研究員
鷺見芳彦 客員研究官

問合せ先 : 〒100-0013 東京都千代田区霞が関 3-2-2
文部科学省 科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター
TEL : 03-3581-0605 FAX : 03-3503-3996

「ファイトレメディエーション」

～放射能汚染土壌の浄化技術としての有用性と課題～

渡部敏裕氏

北海道大学大学院 農学研究院 助教

山口紀子氏

(独)農業環境技術研究所 土壌環境研究領域 主任研究員

目次

[1]	講演概要	1
[2]	講演内容	2
	「土壌におけるセシウムの動態とファイトレメディエーション」	2
	渡部敏裕氏	
	「セシウムのファイトレメディエーション効率はなぜ低いのか」	17
	～土壌とセシウムの関係から～	山口紀子氏
[3]	質疑応答	29
[4]	発表資料	35
	「土壌におけるセシウムの動態とファイトレメディエーション」	35
	渡部敏裕氏	
	「セシウムのファイトレメディエーション効率はなぜ低いのか」	48
	～土壌とセシウムの関係から～	山口紀子氏

【1】講演概要

◆**演題:** 「ファイトレメディエーション」～放射能汚染土壌の浄化技術としての有用性と課題～

◆**講師:** 1. 渡部敏裕氏 北海道大学大学院農学研究院 助教
2. 山口紀子氏 農業環境技術研究所土壌環境研究領域 主任研究員

◆**日時:** 2011年10月27日(木)15:00～17:00

◆**場所:** 新霞が関ビル LB階 201D号室 NISTEP会議室

◆講演概要:

福島第一原子力発電所の事故により放出された放射性物質、特にセシウム134と137で汚染された土壌の除染が急務である。放射性セシウムで汚染された土壌を浄化する技術として植物に吸収させ除去するファイトレメディエーションが注目され市民レベルでの活動も広がっているが、植物によるセシウムの吸収効率は低く実用的ではないという指摘もある。この原因は土壌に含まれるある種の粘土鉱物とセシウムが極めて強く結合し、セシウムを固定するためと考えられる。

本講演会では、放射性物質の中でも特に放射性セシウムの除染を目的としたファイトレメディエーションの研究開発動向について説明いただく(講師1)とともに、ファイトレメディエーションの効率がなぜ低いかを土壌におけるセシウムの動態の特徴から解説いただき、植物機能利用の可能性を考える(講師2)。

◆講師略歴:

1. 北海道大学大学院農学研究科農芸化学専攻修了後、科学技術特別研究員として国際農林水産業研究センターに勤務。植物の酸性土壌耐性機構、植物における様々な微量元素集積およびその耐性、有機性廃棄物の作物栽培における利用などの研究を行なっている。現在は北海道大学大学院農学研究院助教。北海道大学より博士(農学)取得。
2. 東京農工大学連合農学研究科修了後、東京農工大学助手、日本学術振興会特別研究員、東京大学システム量子工学科講師等を経て、現在は独立行政法人農業環境技術研究所主任研究員。大気圏内核実験由来の人工放射性核種のモニタリング、動態解析、放射光源 X線を使った土壌中有害金属の植物への移行性解析などの研究を行っている。東京農工大学より博士(農学)取得。

◆講演内容についてのお問い合わせ:

科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター 赤坂一人/鷺見芳彦
TEL:03-3581-0605、Email: akasaka@nistep.go.jp

【2】講演内容

「土壌におけるセシウムの動態とファイトレメディエーション」

渡部敏裕氏

北海道大学大学院農学研究院 助教

2011年10月27日

【司会】 定刻になりましたので始めさせていただきます。今回の演題にありますファイトレメディエーションとは、植物を栽培して土壌中の有害物質を除去しようという技術でございます。特に、放射能を除染できる可能性のある技術として昨今注目されております。

そこで今回は、北海道大学から渡部敏裕先生、農業環境技術研究所から山口紀子先生、お二人の先生をお招きして、ファイトレメディエーションの技術と最近の動向についてご紹介いただく機会を設けることに致しました。質疑応答は最後にまとめて4時半あたりから30分くらい予定しておりますので、活発なご意見、質疑応答をお願い致します。最後にはこのファイトレメディエーションが、特に放射能の除去に有効なのかどうか、どういう目的で使うのがいいのか、そういうところがある程度共有できたらいいかなと考えております。

先生方のご略歴等につきましては、お知らせのほうに記載しておりますのでそちらをご覧ください。それではまず渡部先生からよろしくお願い致します。

【渡部】 よろしくお願い致します。北大の渡部と申します。

<スライド1>

今日はファイトレメディエーションの話ということなので、前半、私のほうでファイトレメディエーションが一般的にどういうものであるかということと、それからセシウムとの関わりについて少しお話ししたいと思います。土壌のお話は山口先生が詳しくされると思いますので、私はある程度触れますけれど少し飛ばしながら進めていきたいと思います。

<スライド2>

それでは始めさせていただきます。まず私の所属する研究室ですが、こういう植物栄養学という研究室にあります。植物栄養学という研究はどのようなことをやっているかと言いますと、もともとは肥料学と言って、肥料をどういうふうにあげたら作物はどれくらいたくさん取れるようになるかというような研究をしておりました。今は、主に植物による物質の取り込みを総合的に解析するというので、物質の取り込みで一つ大きなのが二酸化炭素でありますので光合成の関係をやっている人もいますし、植物の養分として必須である元素の吸収を研究している人ももちろんいます。それに加えて最近では、養分ではない、必須ではない元素の取り込みを研究している人も加わっています。

<スライド3・4>

本日の予定ですけれども、この流れに沿ってお話ししたいと考えております。

<スライド5>

最初にファイトレメディエーションとはですけれども、これは皆さんご存知だと思いますが、「phyto」というのは「植物」、「remediation」は「修復」ということで、植物によって環境を修復するということになります。土壌のファイトレメディエーションの場合は、広い意味では植物の根あるいは根の周りにはいる微生物などによって有害物質を分解するというのも入ってきますけれども、今回問題としている有害元素の場合は、植物に有害なものを吸収させて除去するという形になるかなと思います。

<スライド6>

それを絵で示すとこのようになります。土壌の中に有害な物質、主に元素があった場合に、植物を植えて有害な元素を吸収させて葉っぱと茎を刈り取るということになります。根っこを掘るということももちろんあるのですが、いろいろ労力的な問題もありますので、一般的には地上部を刈り取るということが多くなります。

<スライド7>

では、植物が元素を吸収するところを少しお話ししたいと思います。

<スライド8>

これは周期表で、教科書の裏などによく載っているものですが、黒字にしてあるのがそれぞれいわゆる必須元素と言われるもので、生育に必要な元素です。上が植物、下が人間ですけれども、植物では黒塗りのものが全部で17個あります。植物はこの17個の元素があれば一生を全うできまして、人間や動物と比較すると少なくても済みます。ただ植物が生育する土壌というのは、この黒塗りの元素だけがあるわけではなくて、他のいろいろなあらゆる元素が多かれ少なかれ存在しています。ですから、根はそういうものにいつもさらされているという状況にあると言えます。

<スライド9>

これはトウモロコシです。トウモロコシの葉っぱと土の中に含まれるそれぞれの元素の含有量の比率を調べたものです。横軸がトウモロコシの葉っぱで、縦軸が土壌の含有率となります。左側が植物にとって必要な必須元素、右が必須ではないもので、この点線が $y=x$ の直線です。対数表記になっていますが、必須元素は主に葉っぱ側に多くプロットされています。特に、カリウム・窒素・リン酸がそうですけれども、この右側に来ています。一方で、栄養にならない非必須元素を見てみると、ばらついていますが、多くの元素は点線よりこちら側で、土のほうに多いという分布を示します。

このように、必須元素が葉っぱのほうで多いということから、植物は栄養になるものを選択的に吸収して体の中で濃縮していくということがわかります。必須でないものについては排除したりあるいは特に何もしなかったり、一部は少し入ってくるものもありまして、そういうようなある程度の選択性を植物は持っているということになります。

<スライド10>

ここまでの要点ですけれども、先ほどのグラフにもありましたように、土壌中の濃度が高いほど植物体の葉っぱの濃度も高くなっているというのがわかります。土壌中の含有率が高い元素ほど植物体でも含有率が高くなっているのだけれど、必須元素は植物体含有率のほうが土壌より高くなっています。このことから、植物体では栄養となる元素をある程度濃縮しているということが言えます。植物というのは、ある程度選択的に養分となる元素を吸収して、輸送して、養分とならない元素を排除するというメカニズムを持っているのです。

<スライド11>

ただよく見ると、栄養分にならない元素の中でも、葉っぱのほうが濃度の高いものはいくつかあります。どうしてこういうことが起こるかという、一つの理由としては、必須元素と性質の似ている元素が吸収輸送されやすい可能性が考えられます。

<スライド12>

例えば先ほどナトリウムが少し高くなっていましたけれど、ナトリウムはカリウムと同じアルカリ金属ですので、同じような性質をもっていて入り込みやすいのではないかということが一つ考えられてきます。今日お話しするセシウムの場合、セシウムもカリウム・ナトリウムと同じ属の元素ですから、同じようなふるまいをして吸収されやすくなっている可能性が考えられます。

<スライド13>

これは、葉っぱにおける各種元素含有率の変動と書いてありますけれど、私は植物園の植物をいろいろと分析しています。そこで植物界全体にわたるいろいろな植物種をいくつか選んで、これまで600種以上になるのですけれど、その葉っぱを分析して植物の種類によって元素の含有率・濃度がどれくらい変動しているのかということも調べています。

これは縦軸が変動係数と言って、大きいほど植物の種類によって含有率が違うことを示す値です。必須元素を見てもらうと、特にカリウム・カルシウム・マグネシウム・リン酸といった植物にとって要求量が高い元素は、植物の種類によってもあまり変動していません。ここが微量必須元素と言って、鉄・マンガン・亜鉛・銅など養分なのですが量的には少なくても大丈夫という元素です。これらは、先ほどの多量必須元素と違ってちょっと変動はするのだけれど、やはりまだ低いです。

一方で必須ではないものについて見ると、変動係数が非常に高くなっています。ナトリウム・アルミニウム・ヒ素というのは非常に高いですし、カドミウムもある程度高い。ストロンチウムはやや例外であり高くはないですけれど、セシウムはカドミウムと同じくらいか、それ以上の値を出しています。

このことは何を意味するかというと、養分となるものは必要なので植物の種類によっても要求量はあまり変わらないのだけれども、養分にならない元素は、植物の種類によってたくさん吸収するものもあればあまり吸収しない植物も存在するということです。

<スライド14>

先ほどお話したようなまとめになりますけれど、植物は必須元素以外の元素も吸収してしまいます。そして、栄養でないものに対する吸収能力というのは、植物の種類によって大きく異なります。さきほどはトウモロコシの葉っぱのデータでしたけれど、他の植物だと必須ではないもののばらつき具合というのはまた変わってくると考えてよいです。

<スライド15>

ここまでが吸収の話でしたけれど、次に吸収の特性の話と超集積植物の話に少し入っていききたいと思います。

<スライド16>

集積特性ですが、さっき話していた必須ではない、栄養ではない元素について考えてみます。これは、横軸が土の中の金属元素の濃度、縦軸が植物の地上部つまり茎と葉っぱの部分に含まれる金属元素の濃度を示しています。Excluder というのは排除型の植物と呼ばれていて、土壤中で元素濃度が高まっていても葉っぱや茎での濃度はあまり変わらないで、ある一定の閾値を超えると高まります。多くの必須元素じゃないもの、特に有害な元素に対して、植物というのはなるべく体の中に入れ込まないようなメカニズムを結構持っていて、このように低く保つことができます。ただ植物の中には、逆に、土壤中の元素濃度が低くても体の中にたくさん取り込むものが存在しています。これはそんなに数は多くないのですが、いろいろな元素でこういうものが存在していて、土壌の濃度が低いところからかなり高い濃度の集積を示すというものがあります。これを超集積植物と言って、いろんな元素についての超集積植物が見つかっています。その中間的なものを indicator と言うのですが、これについて今日は説明しません。排除型と超集積型というのが、栄養素ではない元素に対しては存在するというのを覚えてください。

<スライド17>

では、実際どういう植物がどういう元素の超集積植物であるかということ調べるために、さっき言った植物園の分析結果を少し示したいと思います。北大の植物園で栽培されている植物を使っているのですが、結構原生林も残っています。

<スライド18>

ですから、原生林に由来するものも残っていたり外来のものを入れたり、いろいろなものを加えてほしい 4000 種くらいの植物があると言われていています。この中から、植物の種類上かなり広い範囲でいろいろな植物が網羅できるように、600 種程度をとりあえず選んで測定した結果を示したいと思います。

<スライド19>

まず、ここではアルミニウムの葉っぱにおける含有率を出しています。縦軸が含有率で、細かい線がたくさん見えますのは、一つ一つが異なる植物の棒グラフだと思ってください。ご覧のように、ほとんどの植物では非常に低い濃度なのですが、中には高いものがいくつか出ています。それらは、ナツツバキというツバキ科の植物ですとか、サワフタギという

これはハイノキです。ハイノキというのは、灰の中にアルミニウムが入っていて様々な用途で使われます。それからクリスマスブッシュですとか、高い濃度を示すものがいくつか出てきています。このように超集積植物は、全体の中でたくさんあるわけではないのですが、能力的に非常に高いものが見つかっています。

<スライド20>

アルミニウムの超集積種はツバキ・ハイノキ・クノニアなどのいろいろな科に渡っていたのですが、次にヒ素の場合を見てみます。ヒ素は非常に有害なので、植物はなるべく体の中に入れてないようにしています。ほとんどの植物ではヒ素の濃度はやはりこのように低いのですが、イノモトソウですとかマツザカシダですとかオオバイノモトソウのように、中には高いものがあります。ご覧になってわかるように、みな同じイノモトソウ科に属しています。ヒ素をたくさん吸収するものは、イノモトソウ以外では私もあまり知りません。特にアルミニウムの場合にはいろいろな植物が見つかるのですが、ヒ素の場合は限られた種類しか超集積植物は見つかっておりません。

<スライド21>

超集積植物の例ですけれど、先ほどのアルミニウムについては、他にもノボタン・アジサイ・お茶などが超集積植物です。ナトリウムも植物の栄養ではないですが、アッケシソウや食用のアイスプラントなどがナトリウムの超集積植物です。カドミウムの場合にはセイヨウカラシナやスラスピなどが見つかっていますし、ヒ素の場合は、両方ともイノモトソウ科の植物ですけれどもシダの仲間が超集積植物であるとわかっています。

<スライド22>

超集積植物はいろいろわかってきているのですが、この超集積植物を使えば、茎葉に溜まる有害な元素の量が多くなるので効率的に土壤から有害な元素を取り除けるのではないかと考えられてきます。

<スライド23>

そこで次に、超集積植物によるファイトレメディエーションについて少し話を進めたいと思います。

<スライド24>

これは、先ほどのイノモトソウ科のモエジマシダというシダの仲間です。普通の植物ではヒ素の含有率は高くてもたぶん1kgあたり数十mgにしかならないと思うのですが、この植物は葉っぱに1万mg以上、乾燥重の1%以上のヒ素を溜めることができると言われています。日本でも北海道では生育できないのですが、南の方だと普通に栽培できます。

<スライド25>

実際にこのモエジマシダを使ってファイトレメディエーションをやっているのが、会社だとゼネコンのフジタさんです。2003年のプレスリリースですけれど、ファイトレメディエーションにモエジマシダを使ってヒ素の汚染土壤を浄化しているということが報告されています。

<スライド26>

実際にどういふふうにやられていたかということを少しお示ししたいのですが、これは以前、フジタの北島さんという方がシンポジウムされたときのものをちょっと使わせていただいております。実際にこういう汚染土壌があつて、シダの場合は直接種を蒔くことはできませんが、別の所で作つてきた苗をこのように植えます。植えたら冠水チューブのようなものを埋めて栽培します。栽培してこれが3か月目です。その後こちらの収穫期まで栽培して、地上部を刈り取るという形になります。

<スライド27>

このモエジマシダという植物によるファイトレメディエーションが実際にどのくらい効率的かという点、1年間の栽培で100㎡あたり43.5gぐらいと聞いています。100㎡を1㎡にすると、100分の1なのでだいたい0.4gになります。高いと言えば高いですけど、1回の栽培ではなかなか減りませんので、何回も栽培することによって基準値まで下げていくような形になります。

ファイトレメディエーションというのは1年間で何とかなるものではなくて、ほとんどの場合、何年も繰り返すことによってやっと効果が出てくるようなものです。それはメリットではなくてデメリットかもしれないのですが、時間がかかるのはどうしても仕方のないことだと捉えてください。

<スライド28>

次に、このファイトレメディエーションの技術が放射性セシウムに応用できるかどうかという話をしたいと思います。私は放射性元素の話を学生実験の機会などでしかやったことがないのである程度ご勘弁いただきたいのですが、植物が元素としてセシウムをどういふふうに吸収するのかという話をこの後少ししたいと思います。

<スライド29・30>

ご存知の通り、福島第一原発の事故で放射性元素の中でも特にセシウムが大きな問題になっていて、土壌の汚染が今でも問題視されています。これも私は専門ではないのですが、ウランの核分裂によって出来る放射性物質の中で、今のところ特に問題になっているのが、放射性のセシウム137であるとかセシウム134とされています。ストロンチウムも計測されたというのが話題になったりしていますけど、今日はセシウムを中心にお話ししたいと思います。

<スライド31>

前にも申しあげましたが、セシウムは必須元素のカリウムと同族です。植物は、カリウムを非常にたくさん必要とします。植物の乾燥重の中でも、無機元素の中で一番多いかあるいは2番目に多い元素です。それぐらい必要されるカリウムと同じような性質を持っているセシウムは、植物も吸収してしまいます。天然のセシウムはセシウム133が100%なのですが、放射性セシウムであっても天然のセシウムと同じように吸収します。ただ、土壌中における存在形態は、天然のものと新たに入ってきた放射性のものとはかなり違つ

できます。私が研究している領域は天然のセシウムの話ですので、放射性の場合と多少違うところもあるとご理解ください。

<スライド32・33>

事故があった直後ぐらいから、過去のテレビ番組ですとかちょっとした論文のようなもので、チェルノブイリの事故の時にヒマワリを使って汚染土壌を浄化したとか、あるいは実際に今でもナタネなどを植えてそこからバイオ燃料を生産しているとか、そういうようなことが報道されました。4月のうちに研究者というよりもむしろそうでない人たちで栽培活動が非常に活発に行われるようになってきて、5月になると実際にヒマワリの種が非常にたくさん蒔かれたというのは、皆さんもご存じの通りだと思います。少しインターネットで検索するだけで、いくつもそういうプロジェクトを立ち上げているサイトが引っかかってくるという状況でした。

<スライド34>

植物園の分析でセシウムを測っていましたので、それではということで、セシウムを効率よく吸収する植物は見つかるかどうか植物園のデータをもう少しきちんと解析してみました。

<スライド35>

先ほど変動の話をしましたけれど、セシウム含有率の変動は、アルミニウムやヒ素ほどではありませんがカドミウムぐらいには大きいので、ある程度能力の高いものが存在するということが予想はされます。そこで実際に調べてみて、高い順に先ほどと同じ棒グラフで並べたものがこちらの図です。横軸は植物の種類を示していて、600本のバーがあります。縦軸は葉っぱのセシウムの含有率ですけど、これは天然のセシウムであって放射性ではありません。

<スライド36>

ヒマワリがどの辺にくるかという、結構よくてこのあたりにきます。植物園でヒマワリを植えているわけではないですけど、植物園と同じような土壌の性質で、しかも肥料をあげてないところに栽培しているヒマワリがありましたので、その含有率を比較しています。ヒマワリがこの辺で、ヒマワリよりも高い植物というのも結構あります。ただ、同じ植物種について詳細に何回も分析しているわけではないので、もう少し信頼性を上げるために植物を分類して、同じ科に存在するものの平均を出したものが次のグラフになります。

<スライド37>

これを見ると一番よいのはトクサ科ですが、サンプル数が少ないので今回は無視してください。2番目にきているのがタデ科の植物で、8種類の植物を分析した平均値として表示してあります。特にこの中でも、大型のタデ科の植物が比較的セシウム濃度の高い傾向にありました。これは何か理由があるとは思いますが、ここでは特に考察は致しません。その他に、ファイトレメディエーションにあまり使われないかもしれないですけど、シ

ダやクルミもあります。これらの中では、栽培するならタデ科ができるかなという感じですが。ただ、栽培しやすいヒマワリのようなものと比べれば、タデ科であっても実際にはやや難しいところがあります。

<スライド38>

それから、ついでに元素含有率の相関をとって見たのがこの図です。これは葉っぱのセシウムとナトリウム、それからカリウムについて相関をとったものです。こちらは横軸にカリウム含有率を、縦軸にセシウム含有率をとっています。これを見ると、一般的にカリウムをたくさん吸収する植物がセシウムをたくさん吸収するのではないかということを言っている人がいますけれど、実際はそんなことはなくて、カリウムをたくさん吸う傾向があったとしてもセシウムは吸わないことが結構多いです。中には少しセシウムが高いものがありますけど、こういうのはシダなどの植物で、一般的な植物にはそういう傾向はほとんど見られません。

ナトリウムの場合も同様です。ナトリウムをたくさん吸収する植物はセシウムも吸うのではないかという話がありましたけれど、そういうことは全くありません。むしろ、ナトリウムを吸う植物はセシウムを吸わないし、セシウムを吸収する植物はナトリウムをあまり吸わないという傾向がここからわかります。

これはそれほど関係ないですが、ストロンチウムについて見てみると、ストロンチウムは完全にカルシウムと同じような傾向が認められます。横軸がカルシウム濃度で、縦軸がストロンチウム濃度を表しています。それぞれ葉における濃度を示しておりますけれど、このようにきれいな正の相関があって、カルシウムを吸っている植物はストロンチウムも吸ってしまう傾向がありそうです。カルシウムをたくさん吸う植物はストロンチウムを溜めやすいということは、まず間違いがないのかなと思います。

<スライド39>

これまで濃度の話ばかりしてきましたけれど、超集積植物でありさえすれば必ずしも有利というわけではありません。やはり体の大きさも問題で、含有率が高くても体が小さい場合は、吸収する量が少なくなってしまうます。一方で、体が大きくて含有率が低い植物でも総集積量が大きくなることがあるので、ファイトレメディエーションを考える場合に濃度ばかりを考えてはいけないというように思います。生育速度が早いとか体が大きくなるという性質も、ファイトレメディエーションの効率にとって非常に重要です。

<スライド40>

それでは実際に、ファイトレメディエーションをセシウムに応用する場合にどういう課題があるかという話をしていきたいと思います。

<スライド41>

先ほど申し上げたように、市民やNPOなどでヒマワリを植えようという活動が広がっていったわけです。そういう活動の広まりもあったと思うのですが、農水省は実際ヒマワリを栽培してどういう効果があるか、もちろんヒマワリ栽培だけではなくて表土の除去

ですとかいろいろな考えられることをもって、土壌からセシウムを減らす効果がどれくらい違うのか調べる試験を5月の終わりぐらいに始めたと思います。ヒマワリを蒔いたことが結構ニュースにもなりましたが、農水省もどれくらい効果があるのかというのを調べていきました。

<スライド42>

結果は皆さんご存知だと思うのですが、ヒマワリには除染の効果が認められませんでした。一番よいのは表土を除去したりあるいは芝みたいなものを植えて土ごと剥ぎ取ったりする方法で、ヒマワリの効果はほとんどありませんでしたという結果が出てきたのが9月の半ばぐらいでした。これに対しては、実際に植えてきた市民の方とかNPOの方とかやはりいろいろな思いがあったと思うのですが、事実としてこういう結果がきちんと出たのが2か月ほど前の話です。

<スライド43>

なぜそういうことになるかということ、セシウムは土壌との結合力が非常に強く浄化に時間がかかってしまうというのが一番大きな問題なのかなと思います。土壌の専門家ではないのでこの考え方で良いのかどうかわからないのですが、土壌中のそれぞれの元素について、そのままでは水に溶けない状態ですが硝酸分解によって溶け出してくる元素の濃度に対して、すでに水に溶ける状態にある元素の濃度の比率を出しています。これは、土壌に含まれている元素の水への溶けやすさを示す指標に一応なるかなと考えて計算してみたもので、ナトリウム・カリウム・セシウムという同じ属の元素、こちらはカルシウム・ストロンチウム・バリウムについて示しています。

これを見ると、ナトリウムなどは水の中に非常に溶けてきやすいです。カリウムも結構溶けやすいのですけれど、セシウムは水に全然溶けてこないというのがわかると思います。放射性セシウムの場合は少し変わってきますけれど、天然のセシウムではこうなります。カルシウム・ストロンチウムは比較的溶けてきますが、バリウムはあまり溶けてきません。元素によって同じような性質を持っていると言われていても、土壌との相互作用においては結構違っているということがこれらの結果からわかると思います。

<スライド44>

水に溶けにくいセシウムについてシミュレーションをしてみると、農水省で実際やっているの程度計算は出てきますけれど、例えば、1kgあたり1万ベクレルのセシウムが含まれる土壌で深さ10cmまでをこの植物の除染範囲と考えます。この中には、大体100万ベクレルぐらいの放射性セシウムが含まれます。ここで植物を年2回栽培して、仮に50kg取れたと考えます。本当は50kgがこの1m²で取れるということはほとんどあり得なくて、だいたい大きなヒマワリ1株が新鮮重として5kgぐらい、ここに1回の栽培で何本植えられるかというせいぜい1本か2本ぐらいだと思うのですが、仮に希望として年2回栽培して50kg取れたとします。そして、移行係数を0.007とします。

<スライド45>

移行係数は何かという、これもニュースなどでやっているのご存知の方は多いと思いますけど、土壌の放射性セシウム濃度に対して植物体の放射性セシウム濃度がどのくらいあるかという割合を示しています。文献から見たもので、野菜などでは事故の後すぐくらいに出てきていましたが、ホウレンソウはこういう低い値、カラシナは少し高かったりします。レタスは0.0067と書いてありますが、ヒマワリと同じキク科の植物で、実際に農水省が行った試験で出てきたヒマワリの移行係数も同じ0.0067だったと記憶しています。

<スライド46>

ヒマワリも0.007で計算してみると、1年間で50kg取れたとしても吸収するのはせいぜい3500ベクレルくらいなので、全体の僅か0.35%しか減らない。これであれば10年~20年やってもほとんど効果は期待できません。そんなことを待っているうちに半減期がきてしまって半分になる、あるいは雨が降って流出するといった方が、大きな影響があるくらいです。その程度の効果しかないということが一つ大きな問題になります。

<スライド47>

皆さんは、超集積植物を使ってもっと吸収させればどうかとおっしゃるかもしれません。そこで考えてみますと、だいたい移行係数が0.1くらいあったときにやっと5%くらい減るかなと、1年間で5%くらい減るかなというくらいの効果です。

<スライド48>

1年間に5%で実際にどのように減少していくのかグラフにしてみました。これも私の計算が合っているかどうか分からないのですが、半減期を考慮して年5%の除染で30年間かけてどれくらい減っていくかというのを見てみると、5年程度でそれでも7割強くらい、20年で2割くらいにまで減ると考えられます。放射性セシウム137の半減期と言われている30年でこれくらい、10%くらいなるかなと。半減期なので本当は何もなければ50でしょうけれど10%くらいまで、つまり移行係数が0.1くらいまでになれば効果があると言ってもいいのかもしれないですけど、そこまでいかないと難しそうです。やる価値がどこまであるかという、少し問題になるかなという気がします。

<スライド49>

これは、植物の吸収の効果よりも、本当は雨が降ったり土埃で飛んでいったりすることによる減少効果が実際には大きくて、普通の植物のファイトレメディエーションでやってもあまり効果がなさそうだと示した模式図です。

<スライド50>

では、移行係数を0.1くらいまでにするにはどうしたらいいのかということのを少し考えてみたいと思います。一つは先ほどから申し上げているように高集積性の植物を利用するという方法があります。ただ、ヒ素などの場合と比べれば非常に吸収する植物はあまりなくて、そこまで高集積性のものがないということが一つ問題になります。あともう一つ考えられるのは、土壌のセシウムを植物が吸収しやすいような状態に変えてあげることが考えられると思います。

<スライド5 1>

こちらのお話を少し考えたいと思います。なぜ植物がセシウムを吸収しにくいのかという理由の一つに、土壌との結合が強くて吸収しにくいということがありました。これをヒ素とカドミウムについても見てみると、ヒ素とカドミウムも実は水の中にはあまり溶けてこない元素です。ではなぜ植物が吸収するのかというと、ヒ素やカドミウムを溶かす能力を持っている植物がいる、これらの元素を溶かして吸収できる植物がいるというのが一つあります。

それではセシウムを溶かして吸収する植物がいるかということ、実はそういう植物はあまりないと思います。次に人為的にセシウムをある程度溶かすことができないかということを考えてみる前に、植物自体の能力について少しお話したいと思います。

<スライド5 2>

土壌とセシウムは非常に強く結合していますけれど、では土壌がない時に植物によるセシウムの吸収はどうなるのか。水耕栽培、つまり水だけで植物を栽培する方法で、そこにセシウムを溶かして植物がどれぐらい吸収するのかを調べる実験をしています。

これはミヤコグサというマメ科のモデル植物で、植物生理の実験などによく使われます。ミヤコグサについては、植物園ではロータスジャポニカに似たセイヨウミヤコグサを栽培しています。それでセシウムを測りましたが、特に高くはありませんでした。むしろ、低い方の部類に入る植物です。

<スライド5 3>

これを水耕栽培した時、つまり土壌で栽培する植物園とは違って水だけで栽培したらどうなるかというのを見たのがこの結果です。このデータが何を示しているかということ、茎と葉っぱ、つまり地上部の元素含有率を、培養液中の元素濃度で割ったものです。この値が大きいほど植物の体の中にその元素が移送されやすい、吸収されやすいということを示しています。

ナトリウムを見ると、これは必須元素ではないものですが、ほとんど茎と葉っぱには移行していません。カリウムは養分となるので非常にたくさん移行しています。セシウムを見ると、セシウムも培養液から植物の葉っぱのほうに結構移動しているのがわかると思います。マグネシウムやカルシウムはセシウムよりむしろ悪いぐらいです。これらは植物にとって結構たくさん必要な養分となる元素ですが、こういう元素よりもセシウムをよりたくさん吸収していました。同じ実験でヒ素とカドミウムも調べているのですが、これらはほとんど移行しません。ヒ素やカドミウムよりもセシウムのほうがずっと吸収されやすいということが、この結果からわかります。

<スライド5 4>

これは培養液中のセシウム濃度を変えて行った実験で、1リットルあたり7mgの場合と40mgの場合ですけれど、濃度に対応して植物体の葉っぱのセシウムの含有率が高まっているのがわかります。1リットルあたり40mgでは、乾燥重量のだいたい0.5%ぐらいまで高

まることがわかると思います。これは、だいたいカリウムの濃度の 10 分の 1 よりもやや多いぐらいです。

<スライド 5 5 >

これくらい高い濃度を示しますので、植物は、どうも本質的にセシウムをすごくたくさん吸収することができるようです。それが吸収できないでいるというのは、やはり先ほど述べましたように、土壌中で土壌溶液の中にセシウムが溶けていかないというのが大きな問題なのです。ここを溶かしてさえあげれば、どんな植物であっても、おそらくセシウムを吸収することができるであろうということがわかります。

<スライド 5 6 >

では、効率的にセシウムを吸収させるためにはどうしたらよいかということですが、これは後で山口先生からきちんと話があるのでここでは簡単に触れたいと思います。土壌でセシウムがどのようにになっているかという、2:1 型の層状ケイ酸塩の層間にセシウムが入り込んでしまって、それがなかなか出てこないために植物が吸収できないというふうに分かっています。

<スライド 5 7・5 8 >

では、そこにセシウムと性質の似ているアンモニウムイオンが入ってくるとどうなるか。アンモニウムは窒素肥料として植物に普通に与えられています。これを与えるとセシウムが置換されて出てきて植物が吸収できるようになるということが以前から言われています。

<スライド 5 9 >

次に、実際にこれを畑でやった時にどうなるかということです。北大農学部は、カリウムをあげなかったり窒素・硫酸・アンモニウムをあげなかったり、肥料をそれぞれのあげ方で 100 年ぐらい与え続けてきた畑を持っています。そこで硫酸を 100 年ぐらいあげていない畑と硫酸を普通の畑と同じくらいあげているところで栽培したトウモロコシについて、トウモロコシの葉のナトリウムとセシウムの含有率を見ました。ナトリウムの吸収、これは葉っぱの含有率です。ナトリウムの葉っぱの含有率は、硫酸アンモニウムを肥料として与えた場合と与えない場合とでほとんど変わらないのですが、セシウムの場合、硫酸アンモニウムを与えたほうが与えない場合と比べて非常に高くなっているのがわかります。もちろん、あくまでも自然界にあるセシウムのことであって、放射性セシウムではありません。

<スライド 6 0 >

それともう一つ、アンモニウムの他に効果があるものとしてカリウムがあります。カリウムを与えると逆にセシウムが下がる傾向にありますし、カリウムはナトリウムに対しても同じような効果を示します。カリウムを 100 年間ぐらい与えていない畑と比べて、ずっと与えている畑で栽培したトウモロコシの葉っぱでは、ナトリウムの含有率が半分くらいになります。セシウムの場合も同じ傾向で、カリウム与えない畑のほうが、葉っぱのセシ

ウム含有率が高くなるという傾向があります。

<スライド6 1>

これらをまとめると、硫酸を与えてなくてカリウムを与えた場合と硫酸を与えてカリウムを与えない場合とでは、葉っぱのセシウム含有率がかなり違ってくるので、肥料の与え方によってもかなり影響を受ける可能性というのがあります。ただし、北大が持っているのはこのような肥料のあげ方を100年ぐらい継続している圃場ですので、普通の畑ではこれだけの効果はほとんど出ない可能性が高いと思われます。

<スライド6 2>

次のまとめのところにも書きますけれど、カリウムは畑に非常にたくさん入れられていて、これを減らすのはまず難しいでしょう。カリウムは、普通の畑にかなり過剰に入っていますしアンモニウムについてももう既にかなり入っています。どこまで効果があるのかわからないですけれども、具体的にはカリウムを与えないでそれからアンモニウムを与えるというのは、セシウムのファイトレメディエーションを考える場合には行う必要があるのかなと思います。逆に言えば、作物を栽培する場合にセシウムを吸収させたくない時は、アンモニウム態窒素は与えないほうがよいかもかもしれません。

それから、これはあるかどうかかわからないですけれど、アンモニウム以外にセシウムを遊離させるようなものがあるかどうか、もしあればそういうのを探していくというのも一つの手かなと思います。また、あとで山口さんからお話があると思うのですが、アンモニウムは土壌中で微生物の作用によって亜硝酸になってすぐに硝酸になるという、硝酸化成作用というのが広域的な畑では起きてしまいます。それを抑えるような方策も必要になってくると思います。

<スライド6 3・6 4>

それから効率性のお話ですけれど、今回問題になっている放射性セシウムは土壌の表層数センチに留まってしまいます。これはどうしてかということ、土壌はセシウムとの結合力が強いということもありますので、土壌の表面の数センチに留まることが結構多いのです。そうなってくると、その数センチよりも下にたくさん根を張るような植物では、いくら吸収力が高くても除染の効率は低いだろうと言われていています。大きな植物の場合、深くまで根が生えてしまうと放射性セシウムの富む層のところには根があまりないので、いくら根が大きくてもダメだろうということです。そういったものよりも、たとえ吸収量が高くなくても根が浅い方が有効なのではないかという考え方があります。

<スライド6 5>

これはタデ科の緑化用のソバですけれど、実際にどのくらいの根の深さがあるかというと、だいたい10cmぐらいです。こういう根の浅いものを使うとよいのではないかというのが一つです。

<スライド6 6>

一方でヒマワリですけれど、ヒマワリはこんなに大きくなります。この学生さんの身長

は 160cm ぐらいで、大型のヒマワリですと 3 m ぐらいになります。これで新鮮重として 5 kg ぐらいあるのですが、こういう植物で根っこはどういうふうに張っているかという、結構表面に多いのです。深い所にももちろんありますが、表面に結構多く張ります。酸素の濃度が表面のほうが高いので、できるだけそういう所に張ってくるのだと思います。

<スライド 6 7 >

これは北海道立の農業試験場の結果ですけれど、ヒマワリとトウモロコシについて根っこが深さ 100 cm までの範囲でどのくらい根が分布しているのか見ると、やはり表面が多いです。ですから、大型の植物であっても量的には実際は根っこの表面のほうが多くて、根っこの分布と放射性セシウムの分布という観点で考えればヒマワリでもそれほど間違いでもなかったと、今から考えればそう思えてきます。

<スライド 6 8 >

それからこれも言われるのですが、特に農地の場合は繁殖力や生命力が強過ぎるのも困ります。先ほど述べたタデ科の植物というのは、結構生命力が強かったりしていつまでも畑に残ってしまう可能性があります。そういう周辺環境に影響を及ぼす植物というのはまず使えません。それから、広い範囲でやる場合は苗でやるよりも種で蒔いたほうが栽培しやすいということがあります。シダの場合もそうですけれど、直播が難しい植物というのも広い範囲の栽培には難しいというように考えられています。

<スライド 6 9 >

あともう一つ、これが大きな問題ですけれど、もし仮にファイトレメディエーションが上手くいったとしても、その処理の問題があります。一つには、ナタネの時もそうですが、バイオ燃料にするという考えがあります。バイオ燃料にするというのは、ファイトレメディエーションの効率が低くても植物自身が燃料として使えるので一つの利点かなと思います。微生物で分解させるということを行っている人もいますし、また、焼却はどうしても必要になってくるプロセスであると私は考えています。

<スライド 7 0 >

エネルギー作物のようにバイオ燃料になるものはもちろん、エネルギーにならないものでも場合によっては栽培していいと思います。状況によってそれは変えてよいと思うのですが、基本的にはエネルギーになるものはバイオ燃料を作って残渣を焼却に回す、エネルギーにならないものはどんどん焼却して容積を減らしていく、というようなことが行われていくと考えられます。

<スライド 7 1 >

それから森林の汚染についても問題になっていますが、これは直接バイオマス系の燃料として使えないかということでは考えています。

<スライド 7 2 >

森林に生えている野生のキノコから非常に高濃度のセシウムが検出されたという話があります。キノコ自体はファイトレメディエーションに使えるわけではないですけれど、関

連する内容として菌根菌の話をしたと思います。

<スライド73>

菌根菌というのは植物に感染するカビの一種ですけど、それ自身もキノコを作ったりします。菌根菌は、植物と共生してリンなどの元素を植物に供給していき、セシウムも供給するのではないかとということで研究している専門家が海外に結構います。

<スライド74>

その結果をまとめたのがこの最後のスライドですけど、菌根菌が感染することによって、セシウム吸収が減少するという報告も上昇するという報告も効果がないという報告もあって、どうもはっきりしません。もしかしたら有効なのかもしれないけれども、菌根菌が感染するかしないか、あるいは感染する菌根菌の種類によってセシウム吸収にどのような影響が出るのかがはっきりしないので、今のところファイトレメディエーションに使えるかどうか分からないというのが現状です。以上で私の講演を終わりたいと思います。

【司会】 ありがとうございます。では、ご質問もあるかとは思いますが引き続き山口先生のご講演に移らせていただきます。

「セシウムファイトレメディエーション効率は何故低いのか」

～土壌とセシウム関係から～

山口紀子氏

農業環境技術研究所土壌環境研究領域 主任研究員

2011年10月27日

【山口】 農環研の山口と申します。引き続き私のほうから土壌に関するお話をさせていただきますと思います。

<スライド1>

先ほど渡部先生からファイトレメディエーションの効率というのはそれほど高くありませんでしたが、この効率がなぜ低いのか、これを土壌とセシウム関係から考えてみたいと思います。

本題に入る前に私の自己紹介も兼ねまして、私たちの研究所で行っている放射能のモニタリング調査で出てきた結果を簡単にご紹介させていただきますと思います。

私たちの研究所は農業環境を調べている研究所なのですが、1957年から文部科学省の放射能調査費というのをいただきまして、農耕地の土壌とそこで栽培していた米や麦の放射性セシウムやストロンチウムの濃度をずっと分析してきました。

放射性のセシウム・ストロンチウムというのは人工の放射性核種ですから、もともと環境中には存在しませんでした。人間が核実験・核爆発をやるようになって初めて環境中に現れた放射性元素なのですが、少なくとも原爆が落ちてくる前の日本には来たことはなかったのです。こういった元素が、アメリカやフランスやソ連などで行われていた大気圏内の核実験によって、これグローバルフォールアウトというのですが、地球全体に拡散しました。そういった放射性セシウムの影響を日本も少なからず受けていました。それがピークとなったのが1960年代の前半ぐらいです。核実験が禁止されてその濃度も徐々に減少してきたわけですが、また今回の福島原発事故によって、地域によってはこういった核実験でも経験がないような高濃度の放射性セシウムが土壌中に暴露されたというわけです。核実験の時は、放射性セシウムが大気から直接植物体に降り注いでいて、土壌を介することなく葉っぱや稲穂などに付着しました。今回の事故でもかなり高濃度の放射性セシウムがハウレンソウであるとかいろいろな野菜から検出されて問題になったわけですが、それも全て土壌から吸い取ったものではなくて、大気から降ってきたものが直接沈着して検出されたものです。セシウムというのは土壌に一回降ってしまうとほとんど植物体には移行し難くなります。

先ほど渡部先生からご紹介があった移行係数ですね、これは実は土も植物と同じようにいろいろな種類があります。土壌の性質だけではなかなか一義的に移行係数、植物への吸

収し易さは決まっていなくてもいいわけですが、それでも幾何平均値を無理やりとって比較してやると、黒ボク土が、これは火山灰を母体とする土壌で福島にももちろん分布しているような土壌ですが、若干移行係数が高い傾向があります。

土壌によって植物に吸収される元素の濃度が変わってくる、それはなぜかということをお示ししていきたいと思えます。

<スライド2>

3つの話題に分けてご説明しようと思えます。

最初に、セシウムは1価のプラスの電荷を持つものであって、一般的に土壌にどうやって相互作用するかということをご紹介します。次に、実は土壌にはセシウムを非常に強固に特異的に吸着する、というか固定して閉じ込めてしまうかなり特殊な負電荷のサイトを持っていますので、これがどういったものであるかということをご説明します。そして最後に、こういった負電荷サイトに一旦ついてしまったセシウムを植物が吸えるような形、すなわち水ですね、土壌溶液への溶け出しやすさに影響を与えるような因子について簡単にご説明させていただいて、セシウムのファイトレメディエーションの効率がなぜこんなに低いのかということを考えてみたいと思えます。

<スライド3・4>

まず一般的な話ですが、セシウムは水に入れると一価の陽イオンとなります。そして、土壌中にあるマイナスの電荷にトラップされるわけです。この土壌中にどれだけマイナスの電荷があるかという指標を陽イオン交換容量と呼んでいまして、土壌分野の人たちは非常によく測定する一般的な項目です。これは植物の生育などにも非常に影響するので、土壌を調査しているところではこの陽イオン交換容量のデータをだいたい持っています。

<スライド5>

実際にはこの負電荷は、常にセシウムのために空いているわけではありません。負電荷は、もともと土壌の中にたくさん存在するカルシウム・カリウム・マグネシウムといった他の陽イオンで通常占有されています。ここにセシウムが入り込むためには、もともとあったイオンを追い出してやらないといけない、ということがあります。

<スライド6>

そして他のイオンを追い出してセシウムがその場所を占有できたとしても、ここからまた他の陽イオンがたくさんやってきて追い出されてしまったら意味がないわけですね。だから土壌にセシウムがトラップされ続けるためには、土壌の負電荷に親和性が高いという必要があります。

<スライド7>

ではどういったものが土壌中の負電荷を占有できるのかというと、それにはイオンの絶対量と親和性、この二つが重要となってきます。一般には量の多い方が勝ちます。これをセシウムとしますと、セシウムよりも圧倒的に量の多いカルシウム・マグネシウムのほうが負電荷を占有する率というのはもともと高いです。

ベクレルという単位でいろいろ報道がされていますけれども、耳にするのは千とか一万とかかなり大きな数ですよね。そうするとものすごい量が存在するのではないかと受け取るかと思うのですが、ベクレルという単位は1秒に1回放射線を出すという単位です。ですから、グラムとかモルとか一般に物の量を表す単位と比べて桁違いに小さいものです。例えば、稲の作付け制限となった土壌1キロあたり5000ベクレルという放射性セシウムがあったとしても、それは土壌中の陽イオン交換容量の100億分の1に過ぎないわけです。だから、放射性セシウムというのは量的には他の陽イオンにはとてもかなわない、本当に少ししか存在しない、そういったものの放射能を我々は問題としているわけです。

土壌に一度ついたセシウムがなぜ容易に離れられないのかを考えると、土壌にセシウムを閉じ込めることができるような特異的な負電荷が存在するということが、この負電荷がどこで発現しているのかということが、電荷の絶対量よりも重要になってくるわけです。そこで、そのお話を少しさせていただきたいと思います。このお話は結構難解でして、土壌学を専門とするような学生さんでもかなり理解するのに苦労するものなので、少しわかり難かったら申し訳ありません。

<スライド8・9>

その負電荷はどこで現れるのかというのを理解するためには、土壌がどういうふうでできているのかということを知っておいていただきたいと思います。まず岩石とか火山灰とか原料となるものが物理的作用によって粉々になって、一次鉱物と呼ぶものがあります。次に、水を少し保持することができるようになってきたところで植物や微生物といった生物が入ってきます。その過程で一次鉱物が一回溶けて沈殿するというような化学的な、そして生物的な作用を繰り返して二次的な鉱物があります。この二次鉱物の中に粘土鉱物や金属水酸化物というのが含まれます。そして、植物や微生物が入ってきますので有機物も土壌の中に含まれてきます。この中で、一次鉱物や金属水酸化物はセシウムを保持する力はほとんどありません。セシウムを保持するポテンシャルがあるのは、粘土鉱物と有機物です。この粘土鉱物と有機物の量と質というのは、この土壌がどうやってできてきたのか、母材と私たちは呼ぶのですが、その原料が何であるか、それができてきた地域の降水量であるとか気温であるとかそういった気候、どういった植物が入ってきたか、その地形が何であるか、そしてどれだけの時間をかけてできたものか、そういった要素によって支配されるわけです。

ですから、例えばチェルノブイリで用いた対策をそのまま日本に持って来ようとしても、日本とチェルノブイリでは土壌を生成してきた環境が全く異なるわけです。含まれる粘土鉱物・有機物の質も量も全然違います。ですから、海外でやられた知見を日本に導入してもなかなかそのまま生かせないというのは、土壌が日本特有の性質を持っているということも関係しています。

<スライド10>

粘土鉱物や有機物に存在している負の電荷ですが、セシウムの挙動を理解するためには、

大きく 2 種類に分けて考えるとわかりやすくなります。土の中の pH によって発現量が変わるような電荷と、それから pH によっても変わらない土壌構成成分の構造に由来するような電荷、この 2 種類です。pH によって変わる電荷は、セシウムを捕まえることはできるのですがすぐに手放してしまいます。セシウムの保持に有効なのは構造由来の電荷のほうです。
<スライド 1 1 >

まず、この pH 依存性の電荷のほうから簡単にご説明します。pH というのはプロトン、つまり水素イオンがプラスの電荷を帯びています。このプロトンの量が多いほど pH が低い、それから少ないほど pH が高いと言います。プロトンはプラスの電荷を運ぶキャリアとして働きますので、pH が低いところでは土壌の有機物の表面などがプラスを帯びてきます。プラスを帯びているときは、セシウムはプラスのイオンですからそこは反発して吸着できず、保持されません。pH が高くなってプラスが減る、すなわち負の電荷を帯びてくることによって、こういった pH 依存性の電荷はセシウムを緩くですけれども保持することができる電荷となるわけです。

<スライド 1 2 >

pH 依存性の電荷に保持されるかどうかは、土壌中にたくさんある陽イオン同士の競合によって決まります。こういったものが負電荷を奪い取ることができるのかということ、それにはこのような法則があります。

まず、価数が高いほど負電荷に保持されやすい。すなわち、カルシウムなどは 2 価の陽イオンであるのに対しセシウムは 1 価の陽イオンですから、カルシウムと比べるとセシウムが不利です。次に有機物の官能基、これは単純にプラスとマイナスの力だけで結合するわけではなくて錯形成反応と言って少し化学的な相互作用が入ってくるのですが、そういった化学的相互作用をしやすいものほど有機物に保持されやすくなります。セシウムは、そういった化学的な相互作用が、カルシウム・アルミニウムのような多価イオン、2 価とか 3 価のイオンに比べて弱いのです。ですから、有機物のセシウムの保持力は非常に弱いのです。

こういった多価イオンには太刀打ちできないので、同じ価数のもので比較してやろうということで同じ 1 価のアルカリ金属同士で比較してやると、原子番号が大きいほど保持されやすい傾向があります。ナトリウムやカリウムに対してセシウムは若干有利です。ですが、先ほどとの繰り返しになりますけれど、こういった負電荷に保持されるためには、保持される側のイオンの量がそれなりにないと、どうしてもアタックする確率が低くなってしまいうので保持されにくいことになります。逆に、たくさんあるイオンほど表面にアタックする確率が高いので保持されやすくなります。放射性セシウムの場合は量的に非常に少ないので、こういった pH 依存性の負電荷へのアクセスというのは非常に不利となります。
<スライド 1 3 >

では、本題にあたるわけですが、セシウム保持に有利な負電荷についてお話しさせていただきます。これが少し難解ですと言った部分なのですが、なるべく概念的なお話をしようと思います。もしわかり難いところがあったら、あとで聞いていただければと思います。

<スライド14>

粘土鉱物の構造というものを少し知っていただく必要があります。粘土鉱物には層状ケイ酸塩鉱物というのがあります、これはケイ素四面体シートというものとアルミニウム八面体シートというものからできています。このケイ素四面体シートというのは、ケイ素原子を4つの酸素が取り囲んで四面体のような形を作っています。ちょうどこの三角に見える一つ一つが四面体にあたります。このケイ素と酸素からできた四面体が6個で輪を作り、それが平面上に連なってシートを作る、これがケイ素四面体シートと呼ばれるものです。この一枚のシートのこういったところにポツポツ穴が開いているのですが、これが重要なものなのであとでもう一度ご説明したいと思います。

アルミニウム八面体シートというのは同じような様子なのですが、アルミニウム原子の周りを6個の酸素が取り囲んで八面体を作り、さらにやはりシート状に連なってできた構造です。こういったケイ素四面体シート、アルミニウム八面体シートというものが層状ケイ酸塩鉱物の基本単位になります。

<スライド15>

最も単純には、ケイ素四面体シートとアルミニウム八面体シートが1対1で重なった1:1型鉱物というのがありますが、これはpH依存性の電荷しか効いてこないののであまり重要ではありません。渡部先生からも少しご紹介がありましたけれど、重要なのは2:1型鉱物です。こういった構造をしているかという、酸素を一部共有する形で、ケイ素の四面体シートがアルミニウムの八面体シートをサンドイッチしています。ケイ素四面体シートが2に対してアルミニウム八面体シートが1あるので2:1型と呼びます。これを基本単位として、このシートが何枚も何枚も連なって層状構造を作っているものが2:1型の層状ケイ酸塩というものです。

<スライド16>

ところが環境中というのはなかなかうまくいかないもので、ケイ素四面体とアルミニウム八面体からシートを作りたいのですが、なかなか作っていく段階で適当な材料がないことがあります。仕方がないので、アルミニウム八面体のアルミニウムの部分を大きさがよく似ている他の元素で置き換えてしまうことがあります。アルミニウムの代わりに鉄やマグネシウムといった2価のイオンを使ってしまうことが、それからケイ素の代わりにケイ素とやはり大きさがよく似ているアルミニウムを使ってしまうことがあります。そうすると、もともと4価のプラスの電荷が必要だったところが3価になってしまったり、3価必要だったところが2価になってしまったり、このシートではプラスの電荷が足りなくなってマイナスの電荷を帯びている状態になる、これが構造由来の負電荷です。

<スライド17>

こういった2:1型のシートがマイナスの電荷を帯びて何枚も何枚も連なっていますので、そのマイナスを中和するために重なり合った層と層の間、これを層間と呼ぶのですが、層間の部分にプラスの陽イオンを挟んでやらないと電気的な中和を保てません。ですから、

こういったところは多くの場合、カルシウム・マグネシウムあるいはナトリウムなどが土壌中では挟まれています。そういったイオンは、他の陽イオンによって、イオン交換反応と呼ぶのですが置き換えが可能です。そしてセシウムはプラスの陽イオンですから、この中に保持されることができます。

<スライド18>

では、この層間にセシウムが有利に入り込めるのかということ、実は電荷の量があまり十分でない時は、もともと電荷の高いカルシウムのほうがこういった層間には入りやすい傾向があります。ただ、この層と層の間というのは空間的な制約がありますので、一つセシウムにとっても有利なことがあります。それは、セシウムが他の元素と違って水和イオン半径が非常に小さいというか水和しにくいので、次のスライドでご説明しますが、ここに入りやすいという傾向があります。これはとてもセシウムに有利な性質です。

<スライド19>

水和というのはどのようなものかということ、高校の化学などでご存知の方もいらっしゃるかと思うのですが、水分子は分極して酸素の部分がマイナスを、水素の部分がプラスを帯びています。ですから、水の中に塩でも入れて、それが解離している状態でプラスイオンを見てやると、酸素が分極したマイナスと作用して水分子を引き寄せています。水に溶けているということは、水分子をイオンの側に引き寄せている、水和イオンとして存在していることとほぼ同義です。多くの陽イオンは水和イオンになって水に取り囲まれてしまうことで、もともと持っていた正の電荷を外に伝え難くなっています。そして、もともとのイオンのサイズが小さいもの、それから電荷が大きいものほど水和しやすい傾向があります。ですから、カルシウムやマグネシウムなどはもともとの元素が小さいのですが、水の中に入れると途端に大きくなります。これに対して、セシウムはもともとのイオンはそれなりに大きいのですが、ほとんど水和しませんので大きくなってしまいうことがほとんどありません。

<スライド20>

こちらはアルカリ金属イオンですね。ナトリウムとかカリウムとかリチウムとか、こういったものが、先ほどお話しした2:1型の層状ケイ酸塩の層と層の間、層間にどれだけ親和性が高いかということを示したグラフがこちらになるのですが、セシウムはこれらの中で最も水和しにくいので、他の陽イオンに比べて格段に層と層の間に挟まりやすい性質を持っています。

<スライド21>

もう一つセシウムに有利な構造的特徴があります。先ほどの一般的な話で、層と層の2:1型の単位層が負の電荷を持っている場合、その負の電荷がそれほど強くないで、しかもこのアルミニウム八面体シートという、この真ん中に挟まれているところがマイナスを持っているような場合というのは、この層間にプラスのイオンを挟み込むことは可能なのですが、その力はそれほど強くありません。ですから、入ってきたイオンを適当に閉じ込めて

において、また他の陽イオンで置き換えてしまうことが可能になってきます。こういった粘土鉱物ではセシウムは比較的入りやすいのですが、入った後で他の陽イオンによって置き換えられてしまいます。

<スライド22>

ところが、この負の電荷がアルミニウムの八面体の部分ではなくて、外側のケイ素の四面体シート、つまり層と層の間に近い部分にあると、様相が異なってきます。

マイナスの電荷とプラスの電荷の距離が近くなりますので、ここにプラスのイオンが入ってくると非常に強い力でマイナスとプラスが引きつけ合うようになります。そしてさらにケイ素四面体シートには、これは層に面する部分を二次元的に上から見たような図になりますが、直径0.26ナノメートルぐらいの孔が開いています。ですから、この層と層が2枚ぴったり重なりあったところに球状の空洞ができます。これはちょうど水和していないセシウムイオンがジャストフィットする大きさです。何が起るかと言いますと、こういったケイ素四面体シートという外側に負電荷を持つような粘土鉱物の中に、ここの孔の大きさに相当するようなセシウムのイオンが入ってくることによって、層と層がひきつけあって、がっちり層間が閉じてしまう。これが一旦閉じてしまうと容易には層と層が引き剥がせなくなります。こういった形でセシウムが入り込んでしまうと、ケイ素六員環と言うのですが、この穴の部分にセシウムががっちり固定される。そしてセシウムが取れなくなる。これがセシウムの固定現象というものです。

<スライド23>

実際はこんなにたくさんセシウムはありません。層を全て覆うようなセシウムはないので、どうなっているかという、先ほど渡部先生からもお話がありましたが、環境中にたくさんあるカリウムが、これも比較的水和しにくいイオンで層間に入ってしまうと完全に水分子を失ってしまうのですが、ここに入り込んでいるということがほとんどです。このカリウムが入り込んでがっちり層間が閉じた鉱物として、雲母という鉱物があります。先客としてカリウムがいる場合は、新たにここにセシウムが入り込む余地はありません。

<スライド24>

ところが土壌ができていく過程で、雲母が風化してこの端っこの部分がほつれてくることがあります。そうすると、これは電子顕微鏡の写真なのですが、ほつれた部分には割と大きな原子も入り込むことができるようになって、そこにもともとあったカリウムなども溶け出てしまいます。そうすると、セシウムが外からアクセスできるようになります。そして一方はカリウムでしっかりと留まっているのに対して、一方は開いていてセシウムが入れるようになっている。ここにセシウムが入ってくると、再びここの層と層の間ががっちり閉まるのです。これをフレイド・エッジサイトと我々は呼んでいて、イライトとかパーミキュライトとか呼ばれる鉱物に含まれています。フレイド・エッジサイトはセシウムに極めて選択的であり、一度捕えたセシウムを離さない、土壌中において特異なセシウムの吸着先となります。

<スライド25>

このフレイド・エッジサイトにアクセスできるのは非常に限られたイオンです。セシウムの他にはカリウムとアンモニウムしか入り込むことが出来ません。そして、親和性としてはカリウムやアンモニウムに比べてセシウムが圧倒的に高いです。ただこの形状をご覧になって容易に想像できますように、土壌の全体的な負電荷に占めるフレイド・エッジサイトの負電荷の割合は極めて僅かです。全体の容量、イオン交換容量ですね、負電荷の0.001から1.4%程度ではないかとだいたい見積もられています。

こんなに少しのものでセシウムがトラップできるのかということ、ここで実は放射性セシウムということがキーポイントになります。放射性セシウムの存在量というのはごく微量です。全体のイオン交換量の幅を示していますが、10億から1兆分の1ぐらいしか存在しないような放射性セシウムですから、このような僅かにしか存在しないようなフレイド・エッジサイトでもセシウムの選択性が非常に高いので、放射性セシウムを閉じ込める支配要因としてはとても重要になってきます。そして土壌中に入り込んだセシウムは最終的にはこのフレイド・エッジサイトに閉じ込められると言えると思います。

<スライド26>

こちらに、構造由来の電荷をまとめて一枚の図に示しました。いろんな電荷があるのですが、あまり電荷が強すぎるとセシウムが入り込むことができないし、電荷が弱すぎたり遠すぎたりするとセシウムが入ったとしても追い出されてしまう。一番セシウムに特異的に作用するサイトというのはこのフレイド・エッジサイトで、四面体シート側に負電荷を持っていて一部結晶の端っこのところが開いているような、バーミキュライト・イライトといった鉱物がセシウムを非常に強く固定します。

<スライド27>

それがどのくらい入っているかという評価手法は結構難しいのですが、私たちはフレイド・エッジサイト以外のものはある程度試薬などを使って抽出できるのではないかと考えています。結局アンモニウムとカリウムしかセシウムを追い出すことはできないのですが、アンモニウムイオンやカリウムイオンを使って追い出されるセシウムイオンを交換態あるいは置換態のセシウムと定義しています。一旦水に溶けて植物に吸われるポテンシャルがあるようなセシウムのことです。例えば事故の直後のように降って来たばかりの時は、ある程度はアンモニウムと交換できるような状態で存在しています。ただこのフレイド・エッジサイトにあるようなものは抽出できません。

このフレイド・エッジサイトの量を評価する手法というのがありまして、ラジオセシウムインターセプションポテンシャルと呼んでいます。RIPと私たちは略していますが、これは手法としてとてもややこしいので今日は説明を省かせていただきますが、このRIPという指標を使うととても便利です。

<スライド28・29>

RIPと書いてあるのは、つまり先ほど述べたフレイド・エッジサイトの量であると単純

ですが置き換えて考えて下さい。この RIP は土壌から植物への移行係数と非常に良い相関があります。これはベルギーでの実験結果ですが、土壌からライグラスへのセシウムの移行の割合は、ほぼその土壌の持つ RIP と直線的な関係がある、RIP が小さいものほど植物に移行しやすいという傾向があります。

<スライド30>

ところがこの RIP という指標なのですが、土の中のポテンシャルを測る手法なのでフレイド・エッジサイトの全量を測ってしまいます。特に今回のように放射性セシウムが降ってきて1年経っていないぐらいの時は、まだセシウムがフレイド・エッジサイトまで到達していない可能性があります。というのは割と奥まったところにフレイド・エッジサイトは存在するので、ここに到達するまでには時間がかかるわけです。だからもしもセシウムを溶かし出したいと思ったら、早いうちがチャンスということになります。

<スライド31>

さらにフレイド・エッジサイトも常にセシウムが入り込みやすくなっているわけではなく、ここのフレイド・エッジサイトの手前をアルミニウムの水酸化物とか有機分子とかがこの孔を塞ぎ込んでしまって、セシウムのアクセスを制限しているような場合もあります。日本の褐色森林土などはよくそういう現象が起きているのですが、こういった場合、せっかくフレイド・エッジサイトがあったとしてもセシウムは強くは固定されないで、このような鉱物に富むような場合は、ひょっとしたらセシウムはある程度溶かし出すこともできるかもしれません。

<スライド32>

こちらは、日本での実験結果ではないのですが、オランダの博物館に保存されているいろんな種類の土壌を使って、それぞれフレイド・エッジサイトがどれくらい含まれているのかを実験したものです。いろいろな植物の種類があるように、いろいろな土壌の種類があるわけですが、フレイド・エッジサイトの量がどれくらいあるのか調べていくと、土壌群一つを見ても大きな幅があって、どの土壌であるとフレイド・エッジサイトがたくさんあってどの程度であるかというのは、明確な指標なかなか見つかっていないのが現状です。ところが、明らかにフレイド・エッジサイトの量が少ない土壌というのが存在しています。この一番端にあるのが、アンドソルと書いてあるのですが、黒ボク土という土壌です。最初にお見せした、米や麦への移行係数が若干高めに出たのが黒ボク土ですが、これは若干他の土壌に比べてフレイド・エッジサイトが少ない傾向があります。

<スライド33・34>

黒ボク土は火山灰由来の土壌ですが、そういった黒ボク土の分布するようなところでは、比較的セシウムが他の土壌に比べて動きやすい傾向があるかもしれません。

ただ日本の黒ボク土はそこにある母材だけでできているわけではなくて、実は中国大陸から飛んでくる黄砂のようなもの、風成塵と呼ぶのですが、そういった塵が土壌表層に降り積もっていて、そこに入っているものが土壌中のセシウムの吸着サイトとしても非常に

効いている場合があります。時に風成塵というのはイライトとかバーミキュライトを含んでいますので、その風成塵由来で RIP が高くというか、フレイド・エッジサイトの量が増えてしまう場合もあります。このように土壌分類だけで単純にフレイド・エッジサイトが多いとか少ないとかなかなか言いづらい部分もあるのですが、概ね黒ボク土は他の土壌に比べれば少ないと言えるかもしれません。

<スライド35>

それを支持できるかどうか分からないですけど、黒ボク土・グライ台地土・灰色低地土を使って、これはかなり大量に入れているのですが3万4000ベクレルのセシウム137を添加して、稲を3回湛水栽培して玄米の放射能を測定するという実験をNIAESの先輩が行った結果をお示しします。そうしますと、やはり黒ボク土は移行係数が高いです。全く同じ条件で比較しても黒ボク土では植物体へ行きやすいのですが、一度土壌を乾燥させてしまうと移行係数の差というのは割と小さくなってきます。すなわち、黒ボク土といっても僅かにフレイド・エッジサイトが存在しますので、そういう所に入り込んでしまっただけで二年目にはかなり移行係数が下がってしまうという傾向が見てとれます。

<スライド36>

最後になりますけれど、土壌から一旦セシウムを追い出して植物が吸えるようにするために影響を与える因子とは何かということを考えていきたいと思います。先ほどまでお話ししてきたように、土壌中にセシウムをトラップするには、土壌鉱物の種類・量・接触時間が重要になってきます。

一度ついてしまったらなかなか取れないのですが、フレイド・エッジサイトからセシウムを奪うことができるような候補として考えられるのは、アンモニアとカリウム、これだけです。

<スライド37>

その効果と言っていいかわからないのですが、影響を示した実験例がいくつかあります。六ヶ所の環境研の塚田さんという方のデータなのですが、土壌中のカリウム濃度に対して、ジャガイモへのセシウムの移行係数を示したものです。土壌中のカリウム濃度が高いほど移行係数が小さい。すなわち、カリウムが高いほど吸われにくいということです。これは先ほど渡部先生が示してくれた結果と一致するものです。

さらにセシウム137、つまりグローバルフォールアウト由来のセシウムと安定のセシウムを比較しているのですが、もともと土壌中に長い間存在していたセシウム133と比べて、後から入ってきたセシウム137は吸われやすい傾向にあります。土壌中での滞在時間というのも植物に吸われるかどうかを支配する重要な因子です。

<スライド38>

ただカリウムに関してですが、カリウムをたくさん入れてやればセシウムの吸収を抑えられるのではないかというような考え方もあったのですが、実は単純ではなくて、だいたいその上限は土壌溶液中のカリウム濃度が1ミリモルまでだという実験結果があります。1

ミリモルを超えると、それ以上カリウムの濃度をいくら増やしてやってもセシウムの吸収量に影響は現れません。

<スライド39>

もう一つ影響を与える因子としてアンモニアがありますが、先ほど渡部先生からも少しお話がありましたが、アンモニアは肥料として硫酸アンモニウムの形で施肥します。そのアンモニアが入ってくると確かにセシウムは少し土壤溶液中に遊離してくるのですが、同時にアンモニアは微生物の活動によって割と速やかに硝酸になってしまって、土の中になかなか残りにくい。ですから、アンモニアを施肥することの効果はなかなか現れにくくて、対策として窒素の施肥というのはあまり真剣に検討されてきませんでした。特にヨーロッパでは畑状態としての土地利用が中心ですので、アンモニアはそんなに効かないだろうというふうに考えられてきました。

ところが日本には水田があります。水田は水を張りますので、水を張っている間、微生物によって酸素が消費されて土壤が還元状態、酸素が不足するような状態になります。こうなってくると、硝化が遅れて割とアンモニアが土壤の中に残りやすい。最終的には脱窒してしまったり抜けてしまったりすることもあるのですが、アンモニアの形態として割と保持されやすい傾向が水田ではあります。

<スライド40>

こうなると、これは非常に古い実験結果ですが、水稻を陸稲と比較して、水稻のほうがセシウム 137 の吸収力が高いという研究結果があります。これは水田の状態によってアンモニアの量が多いことが関連しているのではないかと、というふうに考えられています。

<スライド41>

もう一つ、少し外れてしまうのですが、植物がセシウムを吸う時、少なくとも根から吸う時はカリウムと似たようなメカニズムで吸うだろうとだいたい考えられています。植物の中には、カリウムが不足するような条件では、もともとは土から溶けにくく利用しにくいようなカリウムを積極的に吸収するような力を持ったものが存在します。

私の同僚がやった実験ですと、陸稲やトウモロコシをカリウムが割と少ない条件で栽培してやると、ケイ酸が溶けてくるということがわかりました。どうやら、雲母のようなケイ酸塩がカリウムをしっかり固定したものを、粘土ごと溶かしてカリウムを吸収しているということが示唆されます。

カリウムが不足していると、そういったところにあるセシウムを吸収するようなこともあるかもしれません。実際セシウムではどうかというと、あまり実験例がないのですが、パーミキュライトという雲母にセシウム 137 をしっかりと固定してやっ、それを植物がどの程度吸うことができるかというのを実験された方がいます。固定されたセシウム 137 は、こういった植物によって多少吸収されるようです。ただし吸収量というのは非常に僅かです、例えば雲母を数 10%溶かしてしまうということは無理なのですが、僅かですがそういった固定されたセシウムを溶かし出す力があるとなれば、このようなケイ素を溶か

しことによってついでにカリウムを吸う植物に期待ができるのではないかと考えられます。
<スライド42>

では、以上まとめさせていただきますと、少々難解で申し訳なかったのですが、セシウムが土壌に一旦入ると取り出し難くなるというのは、フレイド・エッジサイトが存在するからです。ここに入ってしまうとなかなかセシウムは容易に出てきません。フレイド・エッジサイトにアクセスする前の近いところにあるようなものは、カリウムやアンモニアによって追い出すことは多少可能ですが、それでもファイトレメディエーションの効率を劇的に増大させるような効果はありません。特に、カリウムは土の中からセシウムを追い出す力はあるのですが、過剰にカリウムがあると今度は植物の側が吸い難くなるという逆の効果があるので、セシウムの吸収を考えた場合にはなかなかカリウムのコントロールが難しい側面があります。

こういったことをまとめて、ファイトレメディエーションが有効となるには、土壌中にフレイド・エッジサイトを持つ鉱物がほとんど存在しないような場合、有機物のみでできているような場合は、植物によってセシウムを吸収することができます。

それから土壌にセシウムが接触する前ですね。例えば、土壌に流入してくる水に含まれるセシウムを水生植物に前もって吸着させて、それによって土壌が汚染されるのを防ぐという使い方は、ある意味ファイトレメディエーションと呼べるのではないのでしょうか。

また対照的なのは、先ほど渡部先生からお話がありましたが、森林では栄養分が制限されているので、そこにある栄養分をかなり効率的に使おうというサイクルが働いて森林内でぐるぐる利用しまわしている。そのため、セシウムが割と動きやすい傾向にあります。ただここに何か栽培用の植物を入れるというのは考えにくいので、森林のファイトレメディエーションは難しいのかもしれないです。

農耕地では、セシウムに汚染されているからといって何も栽培せずにただ放置しておく、雑草が繁茂して今後農地として使いたい時に制御不能な状態となります。そういったことよりも、むしろ単一の植物を栽培してやって、食用でなくても土壌浸食を抑えるというところで一定の効果があるのではないかと私は考えます。

では、以上でありありがとうございました。

【3】 質疑応答

【司会】 はい、どうもありがとうございました。今回は植物体へのいろいろな元素の吸収され具合から土壌の層構造とイオンの相互作用、特にセシウムについて詳細なお話をしていただきました。ご講演は以上ですけれど、質問ご意見等ございましたらこの場でお願い致します。

【質問者1】 今日はお忙しいところをありがとうございました。一点、お配りいただいた資料の中では、日本の土壌とか世界の土壌ということであったかと思えます。たぶん今のご説明だと、私の拙い理解では、フレイド・エッジサイトの量によって、例えば米でも作った場合に、そこにある土壌によってある程度移行が予測されるということになるでしょうか。そうすると、今ある日本の土壌が、どういう地域でどういうものがあるかということによって、例えば移行の問題であるとか、除去の今日ご説明になったことについても、若干対策などが違うと考えてもよろしいのでしょうか。

【山口】 一概に土壌の性質だけからは捉えにくいところはあるのですが、ただ吸着性、要はセシウムが溶け出しやすい土壌がどんなものか、具体的には黒ボク土ですが、何かであるかということは予想可能です。そういった土壌の分布は、どこにどのような土壌が分布しているかは、私たちの研究所はデータベースを持っていまして公開しています。福島県、それから関東でも、農耕地が中心ですが、どこにどのような土壌が分布しているのかデータベースを持っていまして、実際今回のモニタリングをした時にモニタリングをした地図と土壌の分布を重ね合わせています。

今のところ汚染状況と土壌の関係しか出ていませんけれど、今後、そこに作物を植えるときに注意した方が良い土壌なのか、それともほとんど溶けないから移行は気にしないで良い土壌なのか、そういった事は少し評価できるようなマップ作りを目指していきたいと考えています。

【質問者2】 今日はお二人のお話大変興味深く拝聴しました。まずあの、福島で現場でセシウムの除去、確かフランスのアルバのプラントでゼオライトを使っていると聞いています。このゼオライトの吸着のメカニズムは今日伺ったようなフレイド・エッジサイトとかそういう鉱物の吸着特性に関わるものなのか、それが一点目。

それからあと一点ですが、私どものセンターで、大震災の後、緊急の成果実証の公募を行いまして、採択された一つに東北大学の農学部の中井先生他がやっているのですが、農地の塩害対策のために菜の花の栽培をして、要は塩が固定されない状態になるべく吸い上げていこうというようなプロジェクトをやっています。彼らは特にセシウムとか分析はしないのですが、ひょっとすると放射性物質の除去にも使えるかも知れないという話をちらっと聞いたのですが、今日伺った話ですと、塩害のようなナトリウム主体の吸着固定のメカニズムとセシウムの構造は違うのかと理解しました。それで、いいのかどうか。

最後はお二人に関係するのかどうか、そもそも今日お話を伺っていると、土壌中にセシウムが固定されるメカニズムはかなりがちり層間に保持されるようなメカニズムだと理解しましたので、そうすると可食部分には移行し難くなるのですから、あえてファイトレメディエーションを行うこと、一生懸命吸い上げて、吸った植物をどうしようかと悩んで苦しむよりは、固定されたら固定されたでそれは土壌中には残るけれど可食の食糧には影響しないとある意味割り切る、そんな考え方もあるのではないかと思いますのでそのあたりのご意見があればお聞かせください。

【山口】 まず、ゼオライトについてですが、ゼオライトは孔がポコポコ空いている鉱物です。それが、ゼオライトもいろいろな種類があって、クリノプチロライトという鉱物が、一番セシウムの吸着に効くのですが、それがやはりセシウムがぴったりはまりやすいこと、そういった意味ではフレイド・エッジサイトとある意味メカニズムは似ているところがあります。福島の一部の水田でそのクリノプチロライトが水田中から検出されたりもします。ただ、土壌中にはたくさんあるような鉱物ではないです。

ナトリウムの除染とセシウムの除染がリンクするのかどうか、それは土壌に抛ります。例えばものすごく砂質で一次鉱物だけしかないようなところ、そういったところだと、先ほど渡部先生が水耕栽培で見せて頂いたデータと同じようなことが使えて、土と相互作用する前であれば、セシウム、やはり植物に吸われるということは十分考えられます。ただし、フレイド・エッジサイトを持つようなところに一回行ってしまうと、なかなか植物によって吸収するというのは効率が悪くなるかと思えます。

3番目なのですが、これは私の考えでよろしいですか？汚染状況によって整理して考える必要があると思えます、実際に農水省も整理して対策を考えている訳ですが、非常に汚染状況の高いところで、それでも植物は吸わないかもしれないのですが、濃度の高い土壌がそこにあるということで受ける外部被ばく、それから土が舞い上がることによって、そういった土の微粒子を吸入してしまうわけですね。それがヒ素やカドミウムなどの有害物質であれば、それが溶けることで吸収されて、それで初めて毒性が現れてくるのですが、セシウムのような放射性物質は体に入ることそのものが被ばくです。

ですから放射能の高いものが周りにあるというそのことが問題になりますので、そういったことからやはり汚染濃度の高いところは、植物は吸わないかもしれないですけど、ある程度の除染というのは必要になってくるかと思えます。ただし、もうちょっとレベルが下がってきたような所であれば、無理して除染をするよりは植物は吸わないということで割り切って共存していくと言えれば変な言い方かもしれませんが、コストとベネフィット、それからあとは野菜を、そこで出来たものをちゃんと放射能がなくて安全だということをやちゃんと伝えるという、このコミュニケーションをしっかりしたうえで、今のまま栽培を続けるというのも私は一つの選択肢だと思います。

【質問者3】 お話ありがとうございます。一点、材料化学的にフレイド・エッジサイトって大変興味があって特徴づけたいと思うのですが、実は私どもの持っている電子顕微鏡

で見るとかいろんな方法で見ると、どうしても同定できないのです。だからさっき教わった RIP とかそういう方法でそのサイトは本当に同定できるのか。あれは量的な話をされていたのですけれど、それが同定できるのかってすごく興味があるのですがそこはいかがでしょう？

【山口】 RIP という手法はベルギーのクレマーズさんという人が考案し、後で文献お持ちできますけれど、フレイド・エッジサイトの評価手法というのは割と確立されています。ですからどの程度定量したいのかというのは評価可能ですが、そこがどうなっているのかというのを電子顕微鏡で見るといえるのはどうでしょう。私は直接的に見たという研究例は知らないですけど、先ほど電顕写真を一つお見せしましたが、雲母の端のほうがちよっとほつれたような写真を見せたりとか。あと確かハンフォードかどこかアメリカの汚染サイトなのですが、手法はガンマ線カメラみたいなものを使っているかもしれないのですが、それでこの層と層の間のほつれていないところにセシウムがありますよと示したような論文を見たことがあります。

【質問者3】 それ、ラジオオートグラフかなんかですね。セシウム元素となるとオーダーがもうあと 10 の 3 乗ぐらいあってオーダーが違います。もう少し重要な材料のはずなのですが、そのところが十分特徴づけられていないのではないかと。

【山口】 これはバーミキュライトやイライトという鉱物にかなり多く含まれるのですが、そういった鉱物がどういうふうに変化していくか、フレイド・エッジサイトが増えてくるかということ、私たちは土壌という非常に大雑把なところで見ているだけであまり解明できていない部分ですので、少し材料学的に見て、ぜひやっていただけると研究が進むと思います。

【質問者4】 どうも興味深いお話をありがとうございました。渡部先生にお伺いしたいのですが、タデ科の植物が非常に、お調べになった中ではセシウムをよく吸収したというお話だったのですが、こういったことを何か特徴づけるようなこの科の植物に共通してみられるような特徴というのは何かあるのでしょうか？

【渡部】 タデ科だけではなくてアマランサスみたいなものも高いと言われてはいますが、大きなグループで言うと同じような分類に入ってくるのですが、ただタデ科の中でもすごく差があって、例えばソバはそれほど溜めないのです。大型のものが溜めるというのは、植物を取ってみると溜めているのですが、実際栽培をしてみて1年目でどのくらい溜まるかという、高いことは高いですけど実はそんなに高くない。多年草なので、初年度は低いんだけど冬に葉っぱが落ちるときに恐らく転流して、地下茎にもう一度セシウムを持って行って、次の年にもう一度葉っぱに移行してということを経繰り返すことによって、大型の植物というのは比較的濃縮が起きているのではないかなと考えてはいます。小型のもので多年草でないソバなどの場合にあまり吸わないというのは、そのあたりからきているのかなと思います。

【質問者4】 例えば、こういった植物が根から酸を出すとかそういった性質というのは

あるのでしょうか。

【渡部】 それは、必ずしもその植物が特異的にそうだということではないと思います。もちろん、植物というのはしばしば根圏にプロトンを放出して酸性化するのですが、そのためにセシウムの吸収が高くなっているとかそういう訳ではないと思います。

【質問者5】 非常にわかりやすい説明でありありがとうございました。お二方の先生に感觸というか少しお聞きしたいのですが、基本的に土壌中のカリウムが割と低い方が植物のほうに移行しやすいというのはわかるのですが、ただカリウムをコントロールするというのは日本の農地にはたくさん含まれているので考えにくいのですが、逆にカルシウムとかマグネシウムの濃度を上げるということで、苦土石灰の施用みたいなので植物に移行しやすいというアイデアは、やってみる価値がありそうかどうかお聞きしてみたかったのですが。

【山口】 ヨーロッパにチェルノブイリの対策をしてきた状況をまとめた EURANOS というハンドブックがあるのをご存じですか。WEB から入手可能で結構便利なのですが、その中で石灰施用を検討した例も出ています。実はなかなか安定しないのです。論文によっては pH を上げることによってセシウムの吸収が下がるというものがあったり、あとカルシウムを入れてやることで土壌中のカリウムが可溶化してしまうのでそれで吸収が上がったり、いろいろな考え方があります。

ただ一定しないということは、石灰の作用が直接効いているのではなくて、セシウムの挙動に効いてくるのはやはりカリウムとかアンモニウムなのですね。そういったところの挙動を同時に抑えて石灰の施用とかを研究していかないと、なかなか答が見えてこないというのが現状だと思います。

【渡部】 私が山口さんに質問なのですが、稲わらでセシウムが結構溜まっていて、野ざらしになって雨にあたっているのに濃度が高いということがあったと思うのですが、それは一体どうしてなのかという。有機物というのはセシウムをそんなに吸着しないのであれば、どうしてそんなふうに溜まった状態で残ってしまったのかというのを教えていただければと思うのですが。

【山口】 家畜に与えたときの話ですか？

【渡部】 はい、そうです。

【山口】 あの後、それを洗い流すのに十分な雨が降らなかったということなのではないかなと思うのですが。野ざらしになっていたのは確かに降ってきたセシウムをトラップしたものです。実は米に移行するセシウムの量というのは少なく、ほとんどのものが茎葉部に存在します。だから飼料稲などでさらに茎葉部を牛に与えるというのは、ひょっとすると飼料としてはあまり適さない可能性があるかもしれないです。

【質問者6】 山口先生にお聞きしたいのですが、セシウムで汚染されてフレイドエッジに固定されるのは時間がかかると。どのくらいの時間がかかると考えられますか。

【山口】 実験室でやると数日とかその程度で、土壌でやるとその鉱物そのものにアクセスするのもそれなりに時間がかかるので、数か月単位になります。それで、交換態と言

われる、アンモニアで抽出される量がどんなふうに減っていくのかを追いかけた実験をしている方がいらっしゃるのですが、最初の数日間がまあ数か月くらいまでは劇的にどんどん減ってくる。その後は割と定常的になる。だから、1年ぐらいまでは交換態の割合がだんだん減ってくる。それはすなわち、フレイド・エッジサイトへ徐々に徐々にアクセスして入っていくということだと、最終的には1年とかそのぐらいではないかと思います。

【質問者6】 そうしますと、1年以上経つと固定化されてしまうと。

【山口】 私はそのように考えていますが、それは農耕地などのように土にすぐに触れるような条件においてですけれど、例えば森林のように葉っぱの層のところにセシウムがトラップされているような、森林が今そういうような状態になっている訳ですけれど、そういった場合はまだ土壤に到達していない。そういったところのセシウムは、まだ動きやすい可能性があると思います。

【質問者7】 基礎的な方に戻るのでありますが、まず渡部先生、元素の吸収の仕方、必須元素を非必須元素のところについて、少し感覚的に把握したいのですが。必須元素の場合はトウモロコシの葉っぱに吸収されやすい、土壤中と比べて数百倍違ってきますね。オーダーも mg/g ですか。それと比べると、非必須元素の中で比較的植物体に吸収されやすいというものでも、恐らく土壤中と比べると数倍、選択性としては必須元素よりはかなり落ちるという感覚でよろしいですか？それから植物体側の濃度としても数 mg/kg ですから、必須元素と比べると 1000 分の 1 から 10000 分の 1 ぐらいのオーダーで違ってくると思いますけれど。

【渡部】 例えばセシウムとカリウムを例にしますと、カリウムが土壤から葉っぱまで行くまでの経路というのは実はたくさんあって、それぞれのところで違う輸送システムが関わってきます。カリウムとそれらは親和性がもちろん高いのですけれど、セシウムは全部で高いわけではなくて、あるところは高いけれどそうでないところもあるわけです。カリウムがたくさん入ってくるができるにしても、セシウムはどこか途中までしか行けないとか、そういうところというのがかなりあるというふうに思います。

これがヒ素の場合は、ヒ素はリン酸と非常に近い性質を持っていてリン酸と同じように入ってくることはできるのですが、植物体の中でリン酸は葉っぱまで行くことができるのですが、ヒ素の場合は根っこで止まってしまって上にはほとんど行かないという性質があります。同じようなことが、セシウムでもあるのではないかなという気がしています。

カリウムの多い植物が必ずしもセシウムが多くないというのは、そういうところにあります。あくまで葉っぱの話であって、根っこの一番入り口のところはもしかしたらセシウムとカリウムがすごく競合している可能性というのはあります。体の中では、そういう競合が起こっていないところももしかしたらあるかもしれない。実際に作物の場合はどうなってくるかというのはまた別の話です。作物の場合は少なくできるのなら少なくしたいわけで、その場合は根っこのところではなくてもっと上のところの話が重要になってくるかと思っています。

【質問者7】 いろいろなところで吸収の効率が違っているかもしれないというお話ですね。ただ少なくとも先生の水耕栽培の実験で、水耕にするとセシウムをもっとよく吸うようになるというデータがあるということになると、土壌中にあるからセシウムが吸われにくいという要素もあるかと思えます。そうすると、フレイド・エッジサイトに固定されてしまうという山口先生のお話に繋がるのですけれど、今度はカリウムとセシウムの違いについての質問です。カリウムも、セシウムと同じようにケイ素六員環に入ってフレイド・エッジサイトに固定される。それにも関わらず、カリウムは必須元素であって植物にかなりよく吸われる。だけれどもセシウムはやっぱり吸われにくい。この差がどういうところにあるのかなというところをお伺いしたいのですけれど。

【山口】 これは圧倒的に量の差です。雲母とかフレイド・エッジサイトのところにカリウムもあるので、それ以外のあらゆるところにカリウムがあって、特に農地だとカリウムを塩化カリみたいなもので施肥をしています。カリウムは必ずしもフレイド・エッジサイトだけにあるのではなくて、いろんな鉱物から溶けてきたりとか、もともと植物に吸われたものが戻ってきたりとか、自由に動くことができるようなカリウムが多く土壌中に存在しているからです。

【質問者7】 もう一つよろしいですか。最後の方でトウモロコシでしたか、トウモロコシは、カリウムが少ない状態ではどうしても土壌から吸いたいから雲母などを溶かしてその中に閉じ込められているカリウムを吸うのだというお話がありました。しかし、なぜセシウムはできないのでしょうか。

【山口】 セシウムでできるかどうかというのは、実はあまり研究例がないということですね。もしその植物の機能を利用してセシウムを土壌から除去しようとしたら、カリウムが固定されて足りないがために植物が無理やりカリウムを吸収しようとするメカニズムをひょっとしたら生かせるかもしれないというふうを考えられます。

【質問者7】 そうおっしゃっておられましたよね。もしかしたらそのところがわかれば、土の中に固定されているセシウムも同じやり方で吸わせられるかもしれない。

【山口】 その辺はまだ研究が進んでいないところでもあるのですけれど、ぜひ植物の専門の方に頑張ってください研究を進めていただきたいなど。

【渡部】 解決するのは難しいですね。畑で。

【山口】 どうやって吸っているのかということがわかれば、ある程度制御できるのではないかと思います。

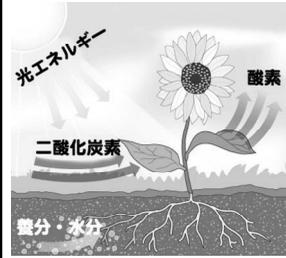
【司会】 もうそろそろちょうどいいお時間になりました。何か最後にご質問しておきたいという方がおりましたらどうぞ。よろしいですか。それでは今回の講演会はこれでお開きにさせていただきますと思います。どうもありがとうございました。(拍手)

終了

土壌におけるセシウムの動態と ファイトレメディエーション

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
nabe@chem.agr.hokudai.ac.jp

植物栄養学とは



植物の物質取り込みを
総合的に解析する

二酸化炭素

必須無機元素

非必須無機元素

本日の予定

- ファイトレメディエーションとは
- 植物の元素吸収
- 植物の元素集積特性と超集積植物
- 超集積植物によるファイトレメディエーション
- 放射性セシウムのファイトレメディエーション
- ファイトレメディエーションを実施する上での課題

本日の予定

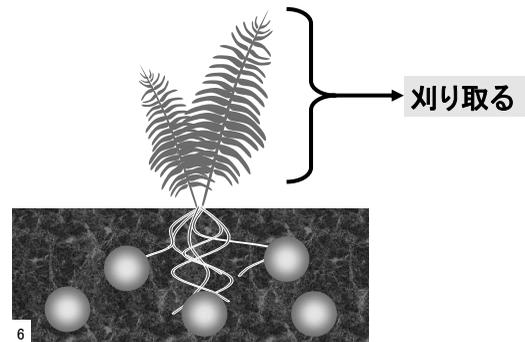
- ファイトレメディエーションとは
- 植物の元素吸収
- 植物の元素集積特性と超集積植物
- 超集積植物によるファイトレメディエーション
- 放射性セシウムのファイトレメディエーション
- ファイトレメディエーションを実施する上での課題

Phytoremediation

植物 修復

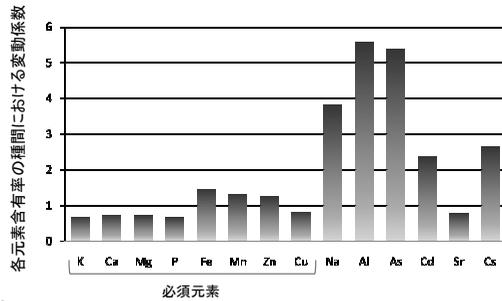
- 植物根による直接的あるいは根圏微生物活性化による有害物質の分解
- 植物による有害物質の
不溶化
可溶化・吸収除去

植物によって土壌をから有害物質を除去する



葉における各種元素含有率の変動

植物園に生育する600種超の植物の葉を分析



13

要点

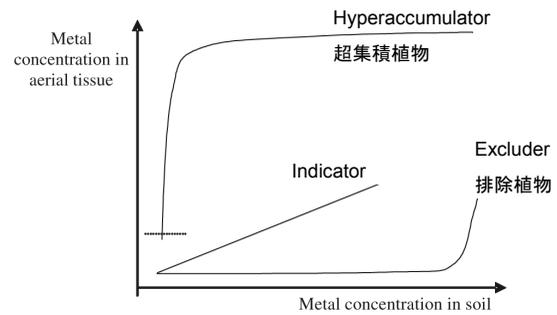
- 植物は必須元素以外の元素(非必須元素)も吸収してしまう
- ほとんどの場合、非必須元素の吸収能は植物種によって大きく変動する

14

本日の予定

- ファイトレメディエーションとは
- 植物の元素吸収
- 植物の元素集積特性と超集積植物
- 超集積植物によるファイトレメディエーション
- 放射性セシウムのファイトレメディエーション
- ファイトレメディエーションを実施する上での課題

15



Callahan et al., 2006

16

植物種間の元素蓄積傾向の違い



植物園の生物試料を利用

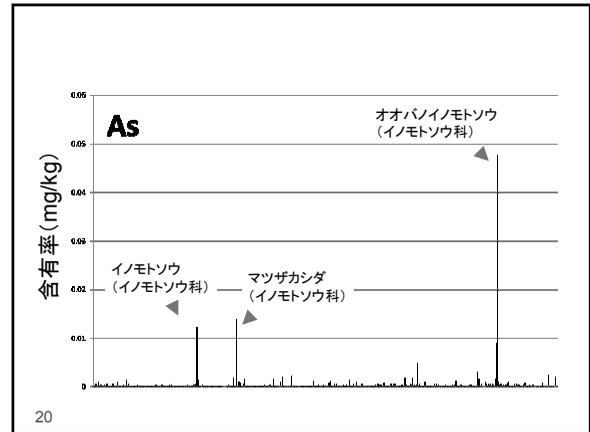
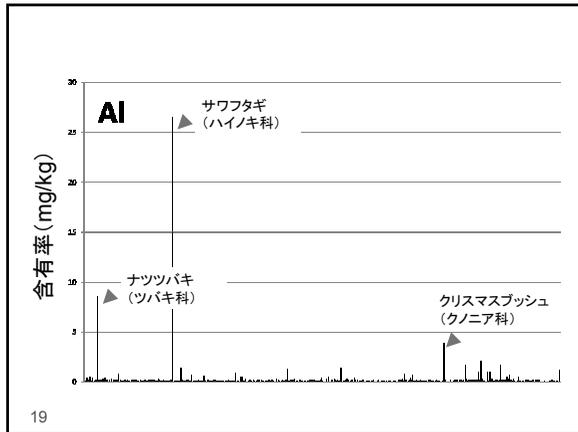
17



原生林も残っている

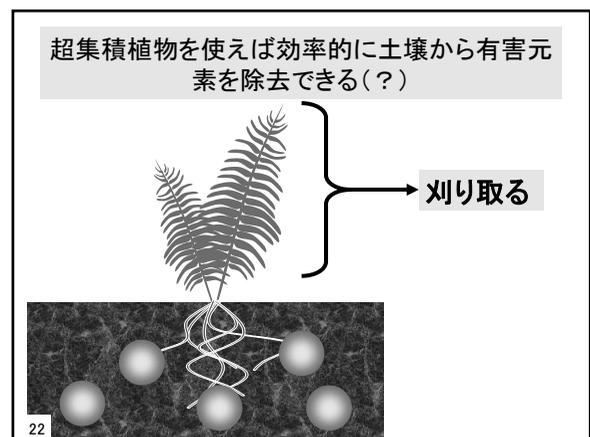
園内は広さ13万3千m²、130年前の自然地形に約4000種の植物を栽培・分類し生態学的展示を行なっています。(HPより)

18



元素	超集積植物種の例
アルミニウム	ノボタン、アジサイ、茶の木
ナトリウム	アツケシソウ、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

21



- ### 本日の予定
- ファイトレメディエーションとは
 - 植物の元素吸収
 - 植物の元素集積特性と超集積植物
 - 超集積植物によるファイトレメディエーション
 - 放射性セシウムのファイトレメディエーション
 - ファイトレメディエーションを実施する上での課題
- 23



お問い合わせ

検索

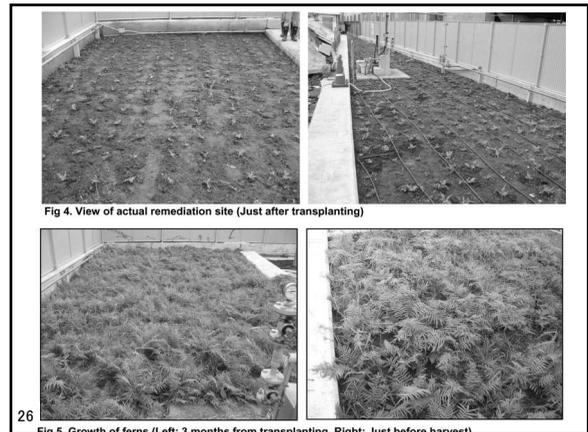
HOME 会社概要 ソリューション技術 実績紹介 財務情報 採用情報

インフォメーション

2003年9月17日

汚染土壌の植物による浄化(ファイトレメディエーション)事業を強化シタによる磁素汚染土壌浄化技術の実施編を取得

25



Pteris vittata (モエジマシダ)による
ファイトレメディエーションの実例

- 43.5g ヒ素 / 100m² / 年

(Kitajima, 2009)

27

本日の予定

- ファイトレメディエーションとは
- 植物の元素吸収
- 植物の元素集積特性と超集積植物
- 超集積植物によるファイトレメディエーション
- 放射性セシウムのファイトレメディエーション
- ファイトレメディエーションを実施する上での課題

28

放射性元素が環境に放出 → 各地の土壌を汚染

29

¹³³Cs セシウム133 (安定同位体)
¹³⁵I ヨウ素135 (半減期6.6時間)
⁹³Zr ジルコニウム93 (半減期153万年)
¹³⁷Cs セシウム137(半減期30.2年)
⁹⁹Tc テクネチウム99 (半減期21万年)
⁹⁰Sr ストロンチウム90(半減期28.9年)
¹³¹I ヨウ素131(半減期8.0日)
¹³⁴Cs セシウム134(半減期2.1年)
 など..

¹³⁴Cs、¹³⁷Cs(、⁹⁰Sr)が問題に

30

■セシウムは必須元素であるカリウムの同族元素
■植物はセシウムを吸収できる

天然のセシウムはセシウム133が100%
植物は放射性セシウムも安定セシウムと同様に吸収する

セシウム

31

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？

- ヒマワリ
- 菜種

➔ 市民レベルでの栽培活動が活発に

32

福島ひまわり里親プロジェクト
www.sunflower-fukushima.com

福島ひまわり里親プロジェクト
日本の食の未来の共創。福島が再び安心して暮らせる環境づくりを応援へ。

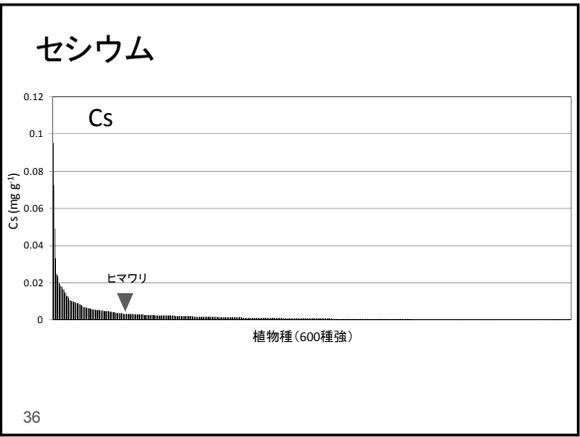
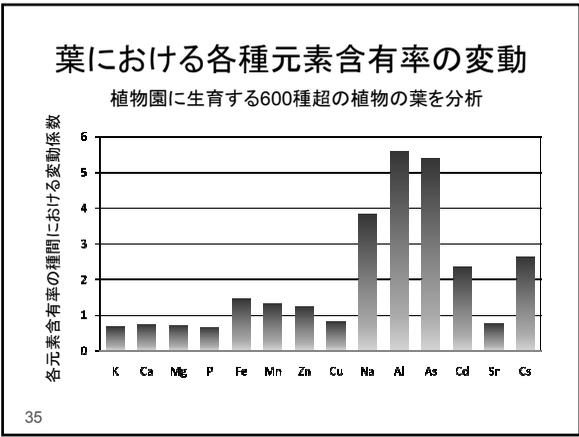
福島ひまわり里親プロジェクト

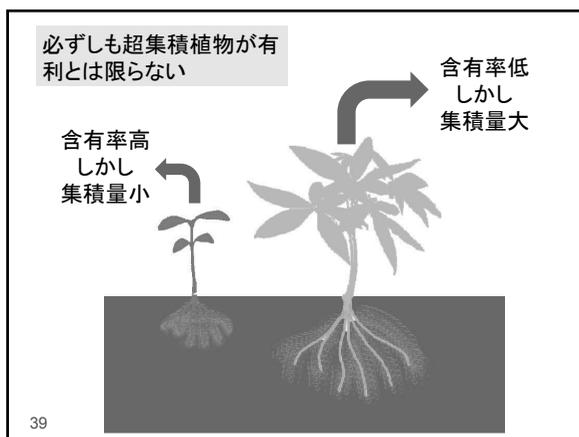
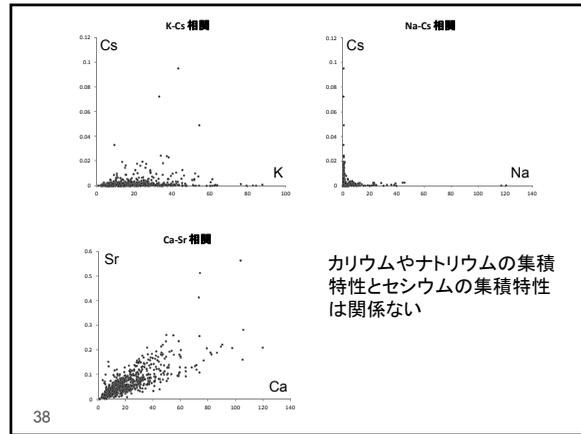
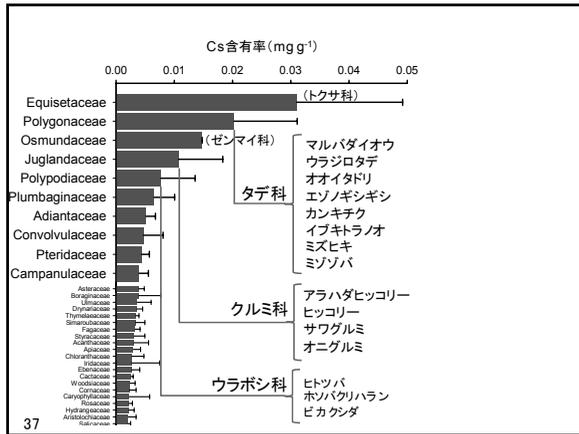
33

植物園の分析から効率良くセシウムを吸収する植物は見つかるか？

北大植物園へようこそ

34





本日の予定

- ファイトレメディエーションとは
- 植物の元素吸収
- 植物の元素集積特性と超集積植物
- 超集積植物によるファイトレメディエーション
- 放射性セシウムのファイトレメディエーション
- ファイトレメディエーションを実施する上での課題

現在位置: asahi.com > 環境 > 国内(市県・行政) > 記事

ヒマワリ栽培・表土除去 飯館村で土壤除染の実験実験

2011年6月29日 14時47分

東京電力の原発事故で農地が汚染された福島県飯館村で28日、土壌から放射性物質を除去するための実験実験が始まりました。飯館町農林水産部と飯館町農林事務所が、放射性物質を除去しやすくし、とれるとマウなどの雑草を減らした。

実験実験は農水省と福島県が共同で実施。同県内に計3ヶ所の実験用農地を確保し、ヒマワリなどを植えるほか、重機を使った表土の除去や水田の土壌洗浄なども行なう。8月末までに結果を見極める考えだ。

飯館町農水事務所は実験で結果を取りたいと意気込んだが、飯館村だけでなく水田は約1300ヘクタールある。飯館町農水事務所は「広大な農地を一つずつ除去できる方法がない。1ヶ所の超集積農地を優先して注水をつけた。農作物による放射性物質の吸着も時期がからず、ほ場取った表土の処理も難しく、今の課題を抱えている。(久末賢一)

PR情報
 ● 東京電力の6時間連続、ヒルネスと静電を両立するモノイールとレスポンド
 ● ZNet Japan 事業継続フォーラム開催 | 6月22日(水)東京日本橋にて開催

キーワード: ヒマワリ 飯館村 放射性物質 飯館町 東京電力

asahi.com

トップ ニュース エンタメ ライフ ショッピング Astand トピックス

社会 ビジネス 政治 国際 文化 サイエンス 社説 コラム 天気 交通 動画 マイタウン English

現在位置: asahi.com > ニュース > 社会 > その他(報道) > 記事

2011年6月14日 12時17分

ヒマワリは除染効果なし 農水省が実験結果公表

飯館村・飯館町

放射性物質によって汚れた農地をどのように除去するかが福島県内で検証してきた農水省が14日、これまでの結果を発表した。表土を除去する方法が有効に確認できた一方、ヒマワリを植えて放射性セシウムを吸い上げる方法にはほとんど効果がないことがわかった。

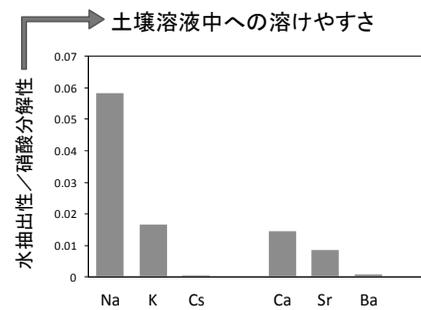
農水省は5月下旬から、東京電力福島第一原発に近い飯館村と川俣町の6ヶ所の田舎を調査し、除染方法を検証実験してきた。

表土を除去するほか、最も効果があったのは、農地の放射能を測定して、セシウムの減少率は97%に達した。このように表土を除去する場合は放射能が4センチで70%の減少、化学物質の吸収特性によって表土を除去する効果は90%と減少し、放射能が上がる。

関連リンク

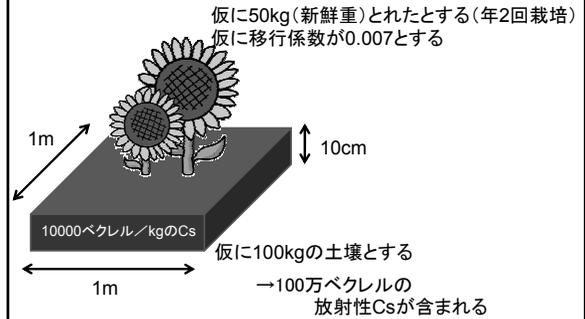
- 放射性物質の除去方法でマウス実験 土壌浄化などの効果期待(6/10)
- ヒマワリが放射性セシウムを吸い上げる 飯館村で土壌除染の実験結果(6/14)
- 農地の浄化、8月に再開 放射性物質の吸着特性が確認(6/14)
- 「バイオマス原料、自作した」と飯館町農林事務所(6/14)

(1) セシウムは土壌との結合力が強く浄化に時間がかかる



43

放射性セシウム汚染土壌浄化の簡単なシミュレーション



44

$$\text{移行係数} = \frac{\text{植物の放射性セシウム濃度 (新鮮重あたりBq/kg)}}{\text{土壌の放射性セシウム濃度 (乾土重あたりBq/kg)}}$$

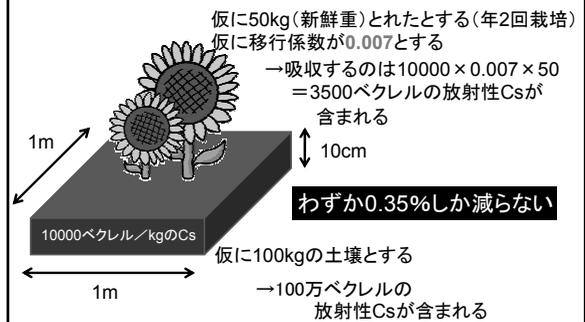
(農水HPより)

葉菜類の移行係数例(文献値の平均)

ホウレンソウ: 0.00054
カラシナ: 0.039
キャベツ: 0.00092
ハクサイ: 0.0027
レタス: 0.0067

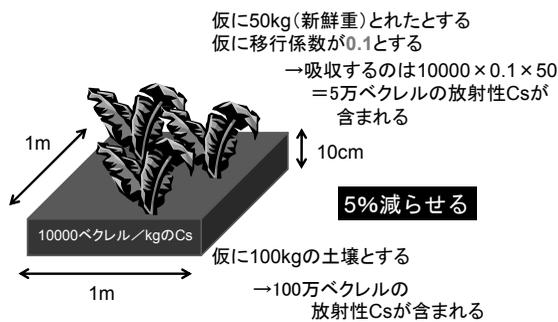
45

放射性セシウム汚染土壌浄化の簡単なシミュレーション



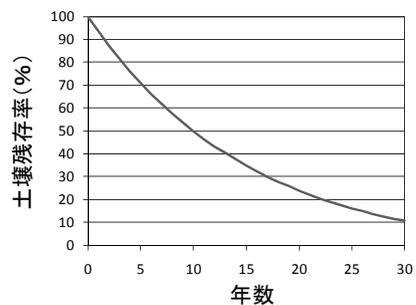
46

もっとセシウムを吸収する植物をつかったら

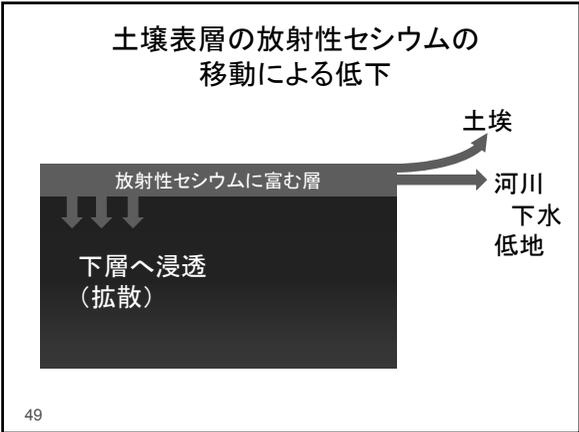


47

- ・年に1回栽培
- ・1回の栽培で5%除染
- ・半減期(30年)も一応考慮



48

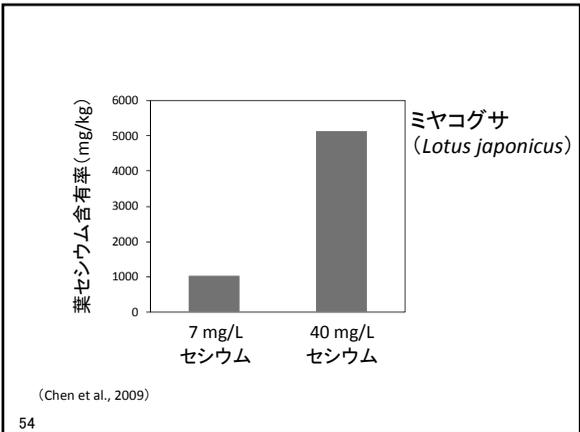
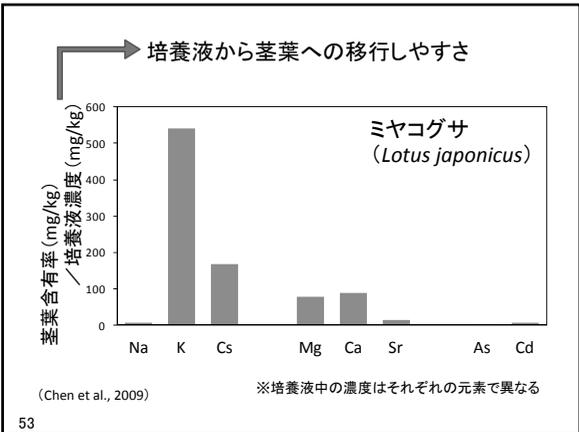
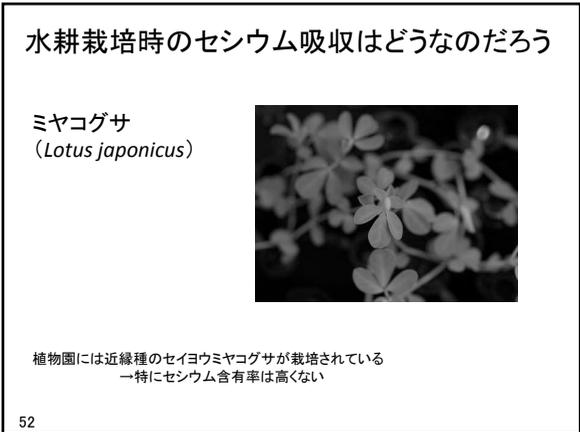
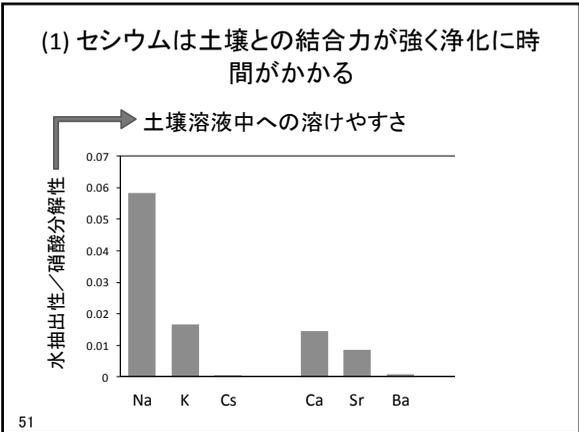


もっと効率的に植物に吸収させるためにはどうしたら良いか

↓

- セシウム高集積植物の利用
- 土壤セシウムの有効化

50



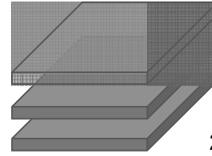
- 植物は本質的に水耕条件ではセシウムを極めて高濃度に集積するようだ

セシウム吸収の最大の制限要因は土壌中での溶けにくさ

55

効率的にセシウムを吸収させるためには

- 土壌鉱物に結合したセシウムを溶かし出す



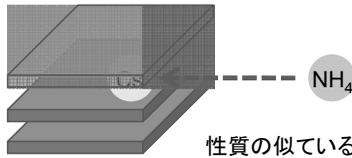
Cs

2:1型層状ケイ酸塩の層間に存在する負電荷を持つサイトにはまり込み、強く結合する

56

効率的にセシウムを吸収させるためには

- 土壌鉱物に結合したセシウムを溶かし出す

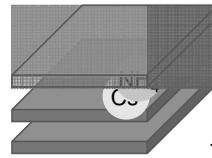


性質の似ているアンモニウムイオンを加えると・・・

57

効率的にセシウムを吸収させるためには

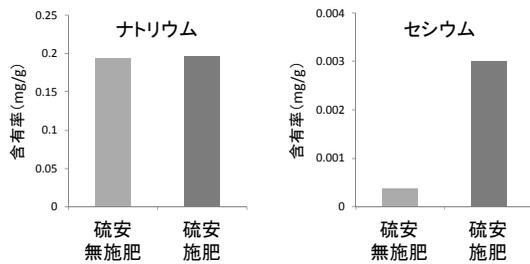
- 土壌鉱物に結合したセシウムを溶かし出す



セシウムは置換されて出てくる

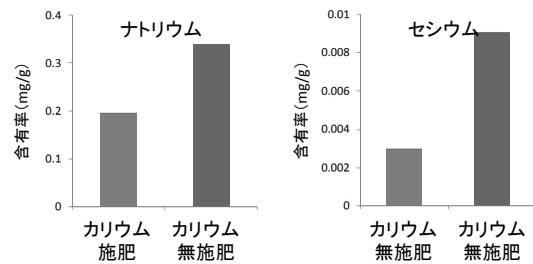
58

トウモロコシ葉の含有率に与える硫酸アンモニウム施肥の影響



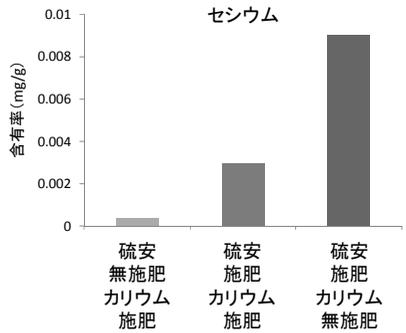
59

トウモロコシ葉の含有率に与えるカリウム施肥の影響



60

トウモロコシ葉のセシウム含有率に与える
施肥の影響まとめると



61

要点

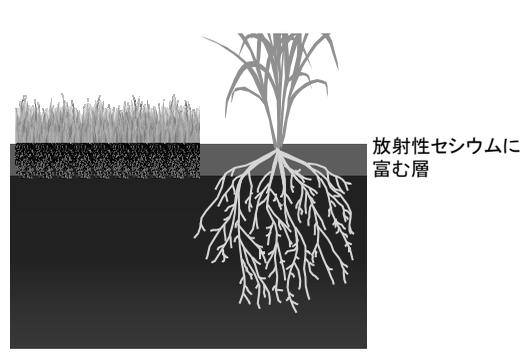
- 土壌に結合した放射性セシウムを遊離させる条件を作っけることで植物のセシウム吸収は増加できる
- 高集積植物とセシウム遊離剤の利用を組み合わせることでファイトレメディエーションの効率化は可能
- アンモニウム以外の有効なセシウム遊離剤を見つけなければいけない
- 十分に施肥された畑からカリウムを減らすのは難しい

62

(2) ファイトレメディエーションは根の届く範囲
でしか効かない

- 雨と共に降下した放射性セシウムのほとんどは土壌表層数センチに留まる
- 土壌の深いところに根を張る植物ではいくら吸収力が高くて除染の効率は低い

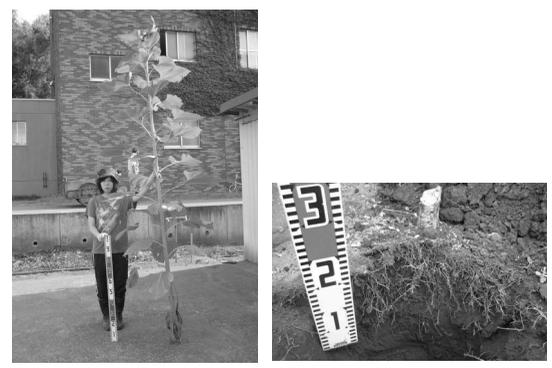
63



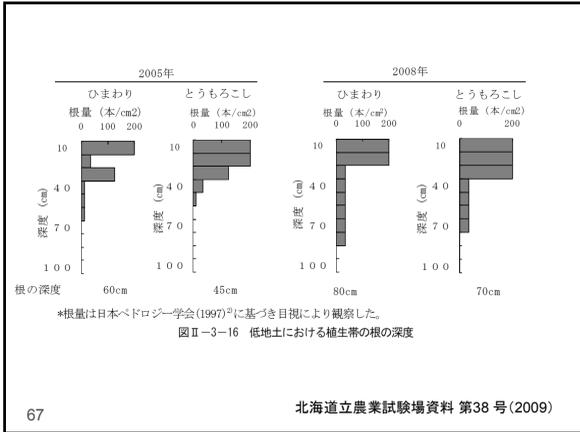
64



65



66



(3) 栽培に適した植物種の選定

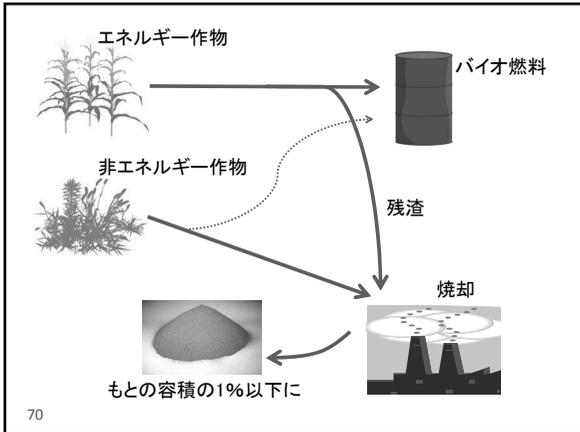
- 直播きが難しい植物種は広範囲の土壌浄化が必要とされる場合不向き
- 繁殖力や生命力が強すぎる場合も周辺環境や栽培後の土地利用に悪影響をおよぼす可能性

68

(4) 栽培後の植物体処理の問題

- バイオ燃料(バイオディーゼル、バイオガス)
- 微生物分解
- 焼却

69



最後に…森林の汚染

木質系バイオマス燃料として
(直接燃焼)

71

72

蛇足：菌根菌

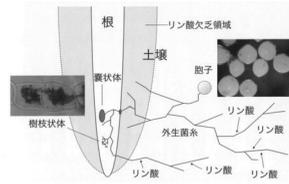


図3-48 アーバスキュラー菌根の構造と菌糸によるリン酸の吸収
(文栄堂 植物栄養学より)

- 菌根菌(外生菌根菌)もキノコを作る
- 菌根菌は植物と共生し菌糸を通じてリンなどの元素を供給する
- ではセシウムも植物に供給する？

73

植物種	菌種	セシウム吸収	文献
<i>Agrostis tenuis</i> (イネ科多年草)	<i>Glomus mosseae</i>	減少	Berrek and Haselwandter (2001)
<i>Calluna vulgaris</i> (ツツジの仲間)	土壌由来	減少	Dighton and Terry (1996)
<i>Trifolium repens</i> (シロツメクサ)	土壌由来	減少	Dighton and Terry (1996)
<i>Melilotus officinalis</i> (マメ科)	<i>Glomus</i> sp.	上昇	Rogers and Williams (1986)
<i>Allium porrum</i> (西洋ネギ)	土壌由来	上昇	Rosén et al. (2005)
ライグラス	土壌由来	上昇	Rosén et al. (2006)
<i>Calluna vulgaris</i> (ツツジの仲間)	<i>Hymenoscyphus ericae</i>	上昇または影響なし	Strandberg and Johansson (1998)
<i>Trifolium subterraneum</i> (クローバーの一種)	<i>Glomus mosseae</i>	効果なし	Joner et al. (2004)
トウモロコシ	<i>Glomus intraradiceae</i>	効果なし	Joner et al. (2004)
<i>Medicago truncatula</i> (マメ科)	<i>Glomus intraradiceae</i>	効果なし	Joner et al. (2004)

菌根菌感染のセシウム吸収に対する影響は
はっきりしない

74

ファイトレメディエーション
 ～放射能汚染土壌の浄化技術としての有用性と課題～

Csのファイトレメディエーション
 効率はなぜ低いのか？

～土壌とCsの関係から～

(独)農業環境技術研究所
 山口紀子

1

TOPICS

1. 負電荷への陽イオン保持の概念
2. 土壌で発現する負電荷の特徴
 ～放射性セシウムを強固に固定する負電荷サイト～
3. 土壌から植物への移行に影響を与える因子

↓

セシウムのファイトレメディエーション効率はなぜ低いのか

2

負電荷への陽イオン保持の概念

3

セシウムは1価の陽イオン

土壌の負電荷にトラップされる

↑

アクセス可能な土壌の負電荷の総量
 陽イオン交換容量
 (Cation Exchangeable Capacity, CEC)

4

負電荷は通常他の陽イオンに占有されている

セシウムが負電荷にトラップされるためには他の陽イオンよりも負電荷への親和性が高い必要がある

5

他の陽イオンから負電荷を奪いとれたとしても

セシウムが負電荷にトラップされ続けるためには他の陽イオンによって負電荷を奪い返されない必要がある

6

量が多いか非常に親和性が強い陽イオンが
土壌の負電荷を占有する。

放射性セシウムは、量的には他の陽イオンにとりまかなわれない
土壌には、セシウムを封じこめることができる負電荷サイトが存在!

負電荷がどこで発現しているかが重要

7

土壌で発現する負電荷の特徴

8

土壌はどうやってできてきたか

岩石や火山灰(母材) → 物理的作用 → 一次鉱物 → 化学的・生物的作用 → 二次鉱物 → 粘土鉱物、有機物

Cs⁺の吸着部位としての寄与は小さい

粘土鉱物、有機物 → Cs⁺を保持できる土壌構成成分

土壌生成因子: 母材, 気候, 生物, 地形, 時間

土地利用(人為)

9

1. 土壌構成成分と水の界面に発現し、溶液のpHによって変化する電荷
(有機物の官能基、粘土鉱物の結晶端面)

pH依存性電荷

2. 土壌構成成分の構造に由来する電荷(粘土鉱物、層状ケイ酸塩鉱物の層間)

構造由来電荷

10

pH依存性電荷 表面水酸基、有機物の官能基に由来

プロトン(H⁺)はプラスの電荷を運ぶキャリア
表面水酸基上のプロトンの量で、電荷が決まる

高pHほど陽イオンが保持されやすい

低 ← pH → 高

pHが高いほど負電荷が増加

11

負電荷への陽イオンの保持されやすさ

- ✓ 価数が高いほど保持されやすい ← Ca²⁺に対してCs⁺は不利
- ✓ 有機物の官能基へは、錯体を形成しやすいイオンほど有利
- ✓ 同じ価数なら原子番号が大きいものほど保持されやすい ← Na⁺やK⁺に対してCs⁺は有利
- ✓ 溶液側に「保持されるイオン」が多いほど、表面にアタックする確率が高く、保持されやすい ← 放射性Csは不利

12

1. 土壌構成成分と水の界面に発現し、溶液のpHによって変化する電荷
(有機物の官能基、粘土鉱物の結晶端面)
pH依存性電荷

2. 土壌構成成分の構造に由来する電荷 (粘土鉱物、層状ケイ酸塩鉱物の層間)
構造由来電荷

13

層状ケイ酸塩鉱物(粘土鉱物)

ケイ素四面体シート

直径0.26 nmの穴

アルミニウム八面体シート

14

図 1.2.8 1:1型単位層(a)は、Al八面体シートにSi四面体シートが突き刺すような形で結合している。2:1型単位層(b)では、2枚のSi四面体シートがAl八面体シートを両側からサンドイッチする形で結合している。

雲母、パーミキュライト、スメクタイト

カオリナイト、ハロサイト

2:1型単位層

1:1型単位層

エッジ部分の拡大

エッジ部分の拡大

図 1.2.2 層状ケイ酸塩鉱物の構造の模式図。層状ケイ酸塩は単位層の積み重ねからなる。単位層には、厚さ1.0 nmの2:1型単位層と厚さ0.7 nmの1:1型単位層の2種類ある。

15

同形置換

鉱物ができていく過程で、大きさの似た元素を代用してしまう

3+

4+

2+

図 1.2.9 同形置換の模式図。Si四面体シートにAl³⁺が入ったり(a)、Al八面体シートにFe²⁺やMg²⁺が入ったりして(b)、永久電電を発現する。なお、土壌中の2:1型層状ケイ酸塩では、(a)に示したSi四面体シートでのSi⁴⁺→Al³⁺同形置換が主体である。

プラスの電荷が足りない→マイナスの電荷を帯びる

構造由来の負電荷

16

Si四面体のSi⁴⁺→Al³⁺、またはAl³⁺→Mg²⁺、Fe²⁺への同形置換により、正電荷が不足(負電荷を帯びる)

外部平坦面

pHなどに影響を受けない。

層間

2:1型鉱物の層間には同形置換由来の負電荷を中和するために陽イオンが必要

Na⁺やCa²⁺などの水和イオンを層間にはさみこんでいる

17

外部平坦面

層間の陽イオンは、他の陽イオンで置き換え可能

層間

電荷の高いイオンほど保持されやすい (Ca²⁺ > Cs⁺)

水和イオン半径が小さいほど保持されやすい

Csに極めて有利!!

18

「水和」とは？

水分子

イオンが水分子に取り囲まれる

水和イオン

一般に、イオンサイズが小さいほど、電荷が大きいくほど水和しやすい

Csはもっとも水和しにくいイオン

水和すると・・・
サイズが大きくなる
取り囲まれた元のイオンの電荷の影響が外側に伝わりにくくなる

19

アルカリ金属のイオン交換サイトへの選択性

Table 3.4. Cation Exchange Data for the Replacement of Na⁺ by Other Alkali Metals on Smectite

Replacing Ion (M ⁺)	Radius (Å)	Hydration Energy (kcal/mol)	K _d	Reaction Heat (ΔH) (kcal/mol)
Li ⁺	0.60	124	0.71	+0.019
K ⁺	1.33	77	2.9	-1.16
Rb ⁺	1.48	72	7.1	-1.92
Cs ⁺	1.69	66	29	-2.65

*K_d here has the mathematical form $K_d = \frac{[(Na^+) \cdot M_{(M^+) \cdot M_{(Na^+)}}]}{[M_{(M^+) \cdot M_{(Na^+)}}]}$, and the value reported is for a fixed exchanger composition of M_{Na+} = 0.5.

イオン半径が大きい陽イオンほど水和しにくい

水和しにくい陽イオンほど陽イオンの持つプラスの電荷と粘土鉱物のもつマイナスの電荷が接近できる

セシウムは、粘土鉱物層間の構造由来負電荷への選択性が特異的に高い

M.B. McBride, Environmental Chemistry of Soils, 1984

20

同形置換が内側の八面体シートでおきていると、負電荷が層間の陽イオンを保持する力が比較的弱い

膨潤性 (層と層をひきつける力が弱い)

モンモリロナイト

Csの選択性は比較的高いものの、他の陽イオンによって置き換え可能→一時的なトラップには有効

21

同形置換が内側の八面体シートよりも外側の四面体シートでおきていた方が、負電荷の発現位置が層間に近い

←層間に陽イオンを保持する力が強い

水合していないセシウムイオンがジャストフィット

直径0.26nmの穴 (ケイ素六員環)

バイデライト

22

層間にCsがはいると、層間に面したケイ素四面体の負電荷とCsの正電荷が引きあう

負電荷量が多い場合、層間が閉じる

Csはケイ素六員環にはまりこみ、“固定”される

ケイ素六員環は、鉱物生成の過程で環境中に豊富に存在していたKがすでに占有

雲母

Csが新たに入り込む余地がない

23

雲母

風化

層の末端がほつれて大きな水合イオンがはいるようになる

イライト
パーミキュライト

フレイド・エッジサイト

Csに極めて選択的、一度捉えたCsを離さない

24

イライト
パーミキュライト

フレイド・エッジサイトにアクセスできるのは、水和しにくいイオン

K^+, NH_4^+

フレイド・エッジサイト

親和性: $Cs^+ \gg NH_4^+ > K^+$

土壤中の負電荷に占めるフレイド・エッジサイトの割合は極めてわずか。
(陽イオン交換容量の0.001~1.4%程度)

放射性Csの存在量も、ごく微量
(5000Bq/kgのCs-137は陽イオン交換容量の1兆~10億分の1以下)

放射性Csにとっては十分すぎる量が存在。
極めてCs選択性が高いことから、放射性Csを封じ込める支配要因

25

構造由来負電荷

Al八面体シートに負電荷発現 → モンモリロナイト

膨潤性層間は閉じない

どの程度Csを強く保持できるかよくわかっていない。

バイデライト

Csが保持されるが、他の陽イオンにより交換可能

Si四面体シートに負電荷発現 → パーミキュライト、イライト

Csを固定 ⇒ フレイド・エッジサイト

雲母

Kの固定により層間が開かないため、他の陽イオンがアクセスできない

Ca²⁺などの水和イオン

Cs⁺, K⁺, NH₄⁺

負電荷量 少 ↑ 多

26

pH依存性負電荷 → 腐植物質の官能基、粘土鉱物構造末端等の表面水酸基

構造由来負電荷

Al八面体シート → モンモリロナイト

バイデライト

Si四面体シート → パーミキュライト、イライト

雲母

フレイド・エッジサイト (FES)

FESの量を評価
Radiocaesium Interception Potential (RIP)

「固定」されていないCsはNH₄⁺やK⁺と交換して追い出すことが可能

簡便にpH7の1M酢酸アンモニウム溶液で1時間抽出されたCsを、置換態あるいは交換態と定義

27

土壤に存在する粘土鉱物のRIP

RIP (mol kg⁻¹)

カオリナイト
スメクタイト
イライト(シルト)
イライト(粘土)
膨潤雲母
パーミキュライト

イライトのRIPに対し、カオリナイトやスメクタイト(モンモリロナイト)のRIPは無視できるほど小さい(腐植も同様に小さい)

パーミキュライトのRIPは未風化イライトよりも著しく大きい

(Nakao et al., 2008 in SSPN) 京都府立大 中尾氏提供資料を一部改変

28

移行係数 = $\frac{\text{作物可食部中}^{137}\text{Cs濃度}}{\text{土壤中}^{137}\text{Cs濃度}}$

RIPと移行係数に直線関係
RIPの値が一桁小さい
⇒ 移行係数が一桁大きい

土壤中のフレイド・エッジサイトの存在量がCsの植物への移行しやすさに関連

FIGURE 2. Log-log plot of rhizospheric ¹³⁷Cs transfer factor (TF) versus the radiocaesium interception potential (RIP) in soil. The different symbols refer to the different categories of carbon content. Ryegrassを土壤を変えて同じ条件で栽培 (Delvaux et al., 2000 in EST)

29

イライト
パーミキュライト

フレイド・エッジサイト

フレイド・エッジサイトは奥まったところにあるので、アクセスしにくい

Csが固定されるには時間がかかる

RIPで評価されるのは平衡状態→Cs固定の最大ポテンシャルを評価
経時的に交換態から固定態への形態変化がおこる
特に、乾燥・湿潤の繰り返しにより固定化が促進

30

イライト
パーミキュライト

フレイド・エッジサイト

フレイド・エッジサイトは奥まったところにあるので、アクセスしにくい

フレイド・エッジにアクセスするまでの道筋が、アルミニウム水酸化物や有機分子などによりふさがれていると、フレイド・エッジが存在してもCsがたどりつけない

31

土壌には、生成環境によってさまざまな種類

おおむねこの1/1000が[FES] フレイド・エッジサイトの量は、同じ土壌群でも大きな幅

RIP (mmol kg⁻¹)

(Vandebroek et al., 2009)

腐植物質や鉄・アルミニウム鉱物がCECの主体である土壌ではRIPが低い
黒ぼく土でRIPが低い傾向
日本の黒ぼく土では風成塵由来のイライト等がRIPを増加させる可能性？

京都府立大 中尾氏提供資料を一部改変 32

日本の土壌

日本の土壌(特に山地)の大部分が「褐色森林土」に分類される。

低地では、「黒ぼく土」と「沖積土」が卓越する。

この3土壌群が国土の約85%を占める。

(菅野均志・平井英明・高橋正・南條正巳：(2008))

京都府立大 中尾氏提供資料を一部改変 33

8/30農林水産省 プレスリリース
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/press/110830.htm>

福島県 農地土壌の放射性物質濃度分布図(参考)

黒ぼく土 主として火山灰を母材とし、有機物含量の高い表層をもつ土壌

灰色低地土 沖積低地に分布し、ほぼ全層が灰色または灰褐色の土層からなる土壌

グライ土 沖積低地に分布し、グライ層をもつ土壌

農業環境技術研究所 土壌情報閲覧システム
http://agrimesh.dc.affrc.go.jp/soil_db/index.phtml

34

各土壌に¹³⁷Cs添加 340000Bq/kg (1/5000 a ポット)
イネを3回湛水栽培→玄米の放射能測定

黒ぼく土
グライ低地土
灰色低地土

移行係数

土壌乾燥 土壌乾燥

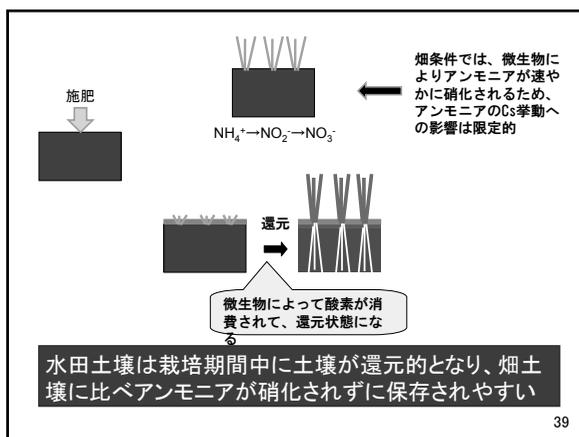
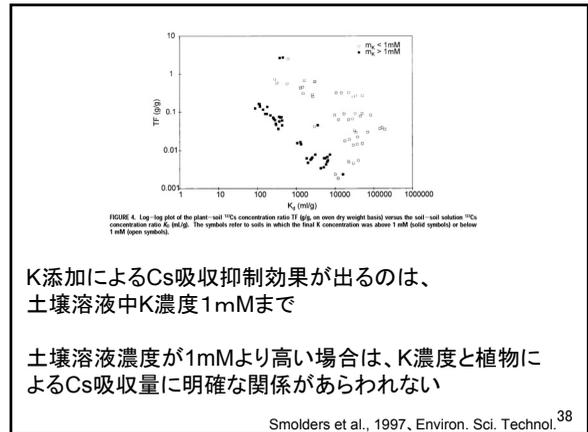
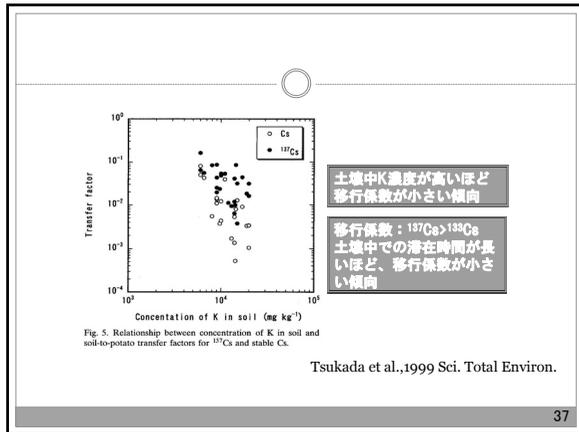
黒ぼく土で移行係数高
乾燥とエージングにより、移行係数が大幅減

津村ら 1984 農環研報告36より作図 35

土壌から植物へのCs移行に影響を与える三大因子

- ◆ 土壌鉱物の種類・量・接触時間
- ◆ アンモニア
- ◆ カリウム

36



第4表 水陸種の別及び¹³⁴Csの施用法の差異による¹³⁴Csの吸収量並びに¹³⁴Cs:K比の要動

作物	¹³⁴ Cs 施用法 cpm/pot	¹³⁴ Cs 全吸収量		¹³⁴ Cs:K	
		吸収率* (%)	cpm/mg K	指数	
水 稻	全層基施	590 × 10 ⁴	1.01	41.8	100
	表層基施	328 × 10 ⁴	0.55	24.3	58
	表層追施	715 × 10 ⁴	1.22	48.2	115
陸 稻	全層基施	285 × 10	0.049	4.04	9.7
	表層基施	195 × 11	0.033	2.57	6.1

*¹³⁴Csの施用量 100 μCi/pot (2.586 × 10⁶ cpm/pot) に当る。これを100とした値である。

¹³⁷Cs吸収量 水稲 > 陸稲
NH₄⁺ 水田状態 > 畑状態であることが関連

天正ら, 1959, 1961 土肥誌 40

K吸収に関する研究から～

ケイ酸塩鉱物を溶かして、Kを獲得

リクトウ、トウモロコシ栽培による非交換態Kの減少とケイ酸の可溶化、雲母からK吸収
杉山&阿江, 2000 土肥誌

ラッカセイ、ジャガイモは非交換態Kを吸収しない
杉山ら, 2000 土肥誌

パーミキュライト、雲母に固定された¹³⁷Cs吸収量
オオムギ > サツマイモ > トウモロコシ > イネ > エンドウ
小島ら, 1980 土肥誌

植物によってはKが不足する条件下でKを獲得するメカニズムにより、粘土鉱物に固定されたCsを吸収する可能性

41

まとめ

放射性Csは土壌鉱物のフレイド・エッジサイトに極めて強固に封じこめられるため、一度土壌に保持されたCsは容易に溶出しにくい。

土壌中に過剰のK⁺やNH₄⁺が存在することで、いったん保持されたCsが放出される割合が高くなるが、ファイトレメディエーションの効率を劇的に増大させるほどの効果はない。

42