

13 植物のファイトレメディエーションの研究

1 背景

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発で事故が起こり、福島県の広範囲に大量の放射性物質が放出された。そうして積った放射性物質の処理方法が問題となっている。そこで植物の土壌を浄化する能力（ファイトレメディエーション）で放射能汚染土壌を浄化しようと考えた。しかし事故発生から半年後の農林水産省の研究結果では植物の中でも最有力候補であったヒマワリには土壌からの放射性セシウムの吸収量が 0.05%であり、除染効果がないという発表があった。では本当にヒマワリに除染効果がないのか、放射性物質を吸収できないのかという疑問が生まれた。ほとんどの先行研究では電気的な解析方法しか用いておらず、吸収した放射性物質の蓄積場所でさえ明らかにしていない。われわれは植物内部に放射性物質が吸収された証拠を捉えることに挑戦した。

2 本研究の独創性

他機関の先行実験では Ge 半導体検出器やサーベイメータなど電気的な解析をしているものが多い。本研究では原子核乾板という写真フィルムを用いて植物が吸収した放射性物質から出る放射線を検出し、除染を観測する。原子核乾板では放射性物質の蓄積部位を 1 μm の精度で特定する。この精度は他の検出器では不可能である。また、この方法で蓄積部位を特定し、その部位のみを処理する方法を提案することで放射性物質を吸収した植物の処理量を削減できると考えた。

3 目的

はじめに植物が吸収した放射性物質の輸送経路を調べ植物内部の蓄積部位を特定する。最終的に放射性物質を吸収した植物の処理方法を検討する。

4 仮説

今回使用する土壌に含まれる放射性物質は半導体検出器による解析の結果、主に ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{129}Te 、 ^{131}Ba などであることがわかった。現在は特に 30 年という長半減期の ^{137}Cs が問題となっている。セシウムは植物の栄養素であるカリウムと同じ 1 族元素であるためカリウムと同様に植物に吸収されると考えた。カリウムと同時に取り込まれていれば花卉や種子などの地上部までセシウムが輸送されると考えた。

5 実験方法

(1) 実験に使用した試料

ア 土壌

2011 年 4 月 8 日に福島第一原発から北西 20km 地点にある福島県双葉郡浪江町の地表 2 cm 付近から採取したものを使用した。福島の土壌に含まれている放射性核種を明らかにするために Ge 半導体検出器を用いて γ 線のエネルギーを測定した。過去に科学部の先輩が開発した世代鑑定法を用いて放射性核種の解析を行った。福島原発の事故についての報道ではおもに ^{131}I や ^{137}Cs のことについて問題にしているが、これら以外の放射性核種も漏れ出している可能性があるのではないかと

考えて、すべての核種を対象に解析を行った。その結果 42 種類の放射性物質が確認された。リファレンスとして静岡県静岡市のマサ土を使用した。

イ 植物

植物はヒマワリとイネを用いた。ヒマワリは農林水産省から発表された放射性セシウムの吸収率が正しいのかを検証をする。ヒマワリは双子葉類でありイネは単子葉類である。双子葉類は維管束が円形に分布しているのに対し単子葉類は全面的に維管束が分布している。植物内部の構造の差異から植物間の吸収経路の違いを比較検証する。ヒマワリとイネを福島で、室内で 16 日間栽培する。水温が上昇しないように、外水槽に水を溜め、水温が 30℃以下になるように制御する。ペットボトル内を好気状態に保つために、エアレーションを行う。イネでは、リファレンスの場合、2 L のペットボトル内に 1 kg のマサ土を入れ肥料は NPK を 1:1:1 の比で 0.1g/L の濃度で加える。苗床で育てたイネをペットボトル内に植える。福島で土での栽培は 500g を円筒形のプラスチック容器内に入れ、化学肥料を加えずに植えて育てる。放射線物質の飛散を防ぐために、容器の上をラップで巻く。風の当たらない室内で窓越しの直射日光を当てる。補助光として蛍光灯の光を照射し、3 日に 1 日の割合で夜は消灯する。温度コントロールはヒマワリと同様に行う。

(2) 実験に使用した検出器

本研究は、電気を使用した解析とは異なり写真フィルムを検出器として使用し解析を行った。使用した写真フィルムはイメージングプレート（以下 IP）と原子核乾板である。IP は β 崩壊の際に放出される γ 線に感度を持った写真フィルムで 100 μ m の位置分解能を持ち、植物に吸収された放射性物質の大まかな蓄積場所を特定する。原子核乾板は荷電粒子に感度を持った写真フィルムで、1 μ m の位置分解能を持ち、狭い範囲で解析を行うことができる。原子核乾板は、IP で特定した放射性物質の蓄積場所をさらに狭い範囲で特定する。原子核乾板は検出した荷電粒子の種類ごとに異なった飛跡として記録し可視化することができる。福島の土壌に含まれる放射性物質はすべて β 崩壊をするため β 線に感度を持つ原子核乾板を使用する。 β 線の本数をカウントすることにより吸収量を定量化する。

(3) β 線のカウント方法

原子核乾板に写った β 線は黒い点線の飛跡として記録される。この黒い点は銀粒子で大きさは 0.8 μ m である。この点が半径 3 ~ 4 μ m 以内に 3 つ以上連なっているものを 1 本の β 線としてカウントする。ランダムな銀粒子のノイズも現像後の原子核乾板には存在するが、これらが数 μ m の近傍にまとまって存在する確率は低く、ノイズと β 線のシグナルとの区別ができる。 β 線はすべて表面的なものをカウントしている、被写界深度が 3 μ m のレンズを使用しているため Z 軸の位置を変えながら β 線を捕捉する。

(4) 実験手順

はじめに、福島県の土壌を使用してヒマワリとイネを 16 日間育成する。その際、土壌内には放射性物質が含まれているので、空気中に飛散することを防ぐため、ラップで容器に蓋をする。また、土壌中の放射性物質から放出される放射線を遮蔽するため、水の遮蔽率についての検証を行った。その結果、水の厚みが 20cm 以上あれば、環境放射能のレベルまで遮蔽できることが判明した。大きな容器に水を満たし、その中にヒマワリとイネをそれぞれ植えた小さな容器を入れ、安全に実験を行った。結果を図 1 に示す。

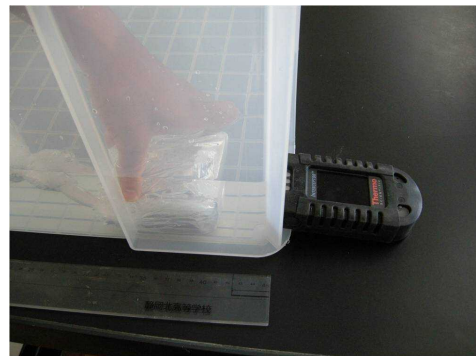
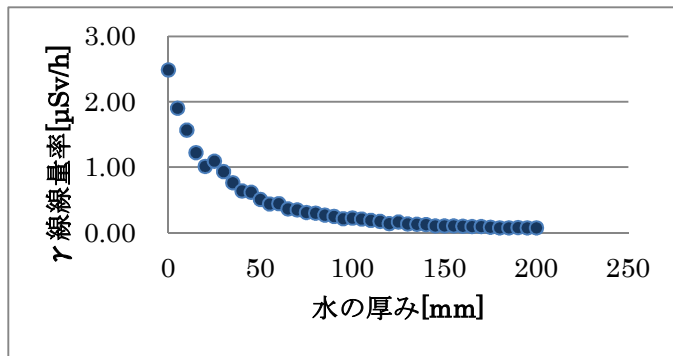


図1 遮蔽体の水の厚みとγ線線量率の関係

線源として福島のと 100g を使用した。右は測定に使用した簡易半導体検出器。

育成後、土壌からヒマワリとイネを取り出し流水で5分間十分に洗い流し、土壌を完全に落とす。その後、放射性物質がヒマワリやイネのどの部位に存在しているのかおおまかに調べるため、IP を用い植物全体から出るγ線強度マップを作成する。

その結果、ヒマワリでは地下部(育成時、土壌中に埋まっている部分)に放射線量の多い部分が集中していた。地上部(育成時、地上に出ている部分)ではほとんどβ線が見られなかった。しかし、イネでは全体でほとんどγ線が見られなかった。このことから、ヒマワリでは地下部に多くの放射性物質が集中して存在していることが確認できる。

さらに狭い範囲で放射性物質の存在部位を突き止めるために、原子核乾板を用いる。ヒマワリではIPの結果から地下部に放射性物質が集中していることは分かっているので、地下部に着目して、地上部で1つ、地下部で7つの合計8つのポイントに分け、それぞれのポイントを2～3mmの厚さに薄くスライスし、原子核乾板に張り付ける。また、イネはIPの結果を見ても、放射性物質の存在部位が判明しなかったため、地下部と地上部に分け、それぞれを原子核乾板に張り付ける。比較用に、何も貼り付けていない原子核乾板をリファレンスとしたものと福島県の土壌を張り付けたものを用意する。これら全てのサンプルを暗室で3日間感光した後、現像する。

6 結果

原子核乾板に福島のとを直接貼り付けて現像したものは1視野(70μm×70μm)内に135本のβ線が確認できた。比較用として何もつけずに現像した乾板では、1視野内に10本のβ線を確認できた。このことから福島のとが放射性物質によって汚染されていることがわかる。

図2に示すように、ヒマワリのスポットの断面の外側にβ線が濃縮している部位を見つけた。この濃縮している部分をスポットと呼ぶ。スポット部分では福島のと約3倍の濃縮が起こっていた。スポットが植物のどのあたりに位置するのかを調べるためにスポットの断面のβ線量の分布をとった。現像した原子核乾板を1cm×1cmの領域で光学顕微鏡を使い全面の観察をした。β線が多くみられた部分が楕円形の形になって表れた。この部分がヒマワリの断面のどのあたりになるかの対応をつけるために、ヒマワリの断面を電子顕微鏡で観察した。電子顕微鏡によって観察した結果β線量の多い部分が維管束の導管部分に位置していることがわかった。このことからヒマワリは維管束の導管部分で放射性物質を吸収し蓄積していることが判明した。ヒマワリの断面の電子顕微鏡写真を図3に示す。イネは地上部より地下部のほうが多くのβ線の飛跡を確認できた。地下部では広範囲でβ線の飛跡を記録しているため、肉眼で原子核乾板が黒くなっていることを確認できた。流水で表面についた泥をこすり洗いしてあるので、表面に付いた土の影響ではない。イネの地下部で

は福島の水の 18.7 倍の濃度で β 線を出していることを確認した。また地上部は福島の水の 0.7 倍であることから地上部までは放射性物質が輸送されていないことがわかった。結果を図 4 に示す。

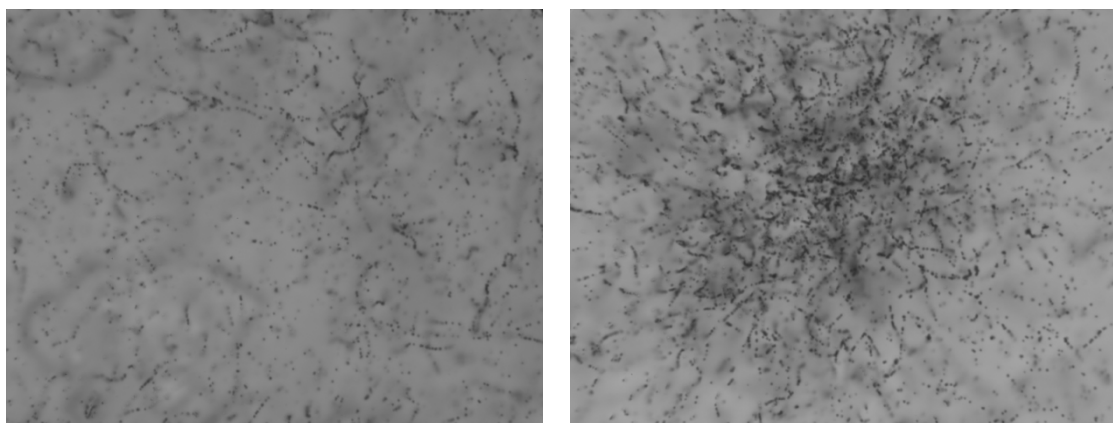


図 2 現像した原子核乾板の光学顕微鏡写真

左図は福島の水を直接貼り付けて現像したものである。1 視野内 ($70\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$) に 135 本の飛跡が確認できた。右図はヒマワリ内部の放射線の多く出ているスポットである。1 視野内 ($135\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$) に 394 本の飛跡が確認できた。ヒマワリの断面の外側では 1 視野内 ($135\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$) に 78 本の飛跡を確認できた。

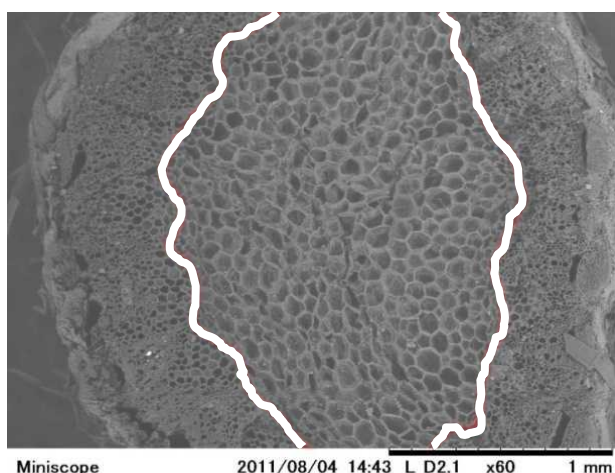


図 3 断面の電子顕微鏡写真

β 線が多く出ているスポットは維管束の導管部分付近であることが分かった。白い線は維管束に相当する。

8 考察

植物は維管束の導管部分で放射性物質を吸収していることがわかった。また、放射性物質は地上部では吸収されていなかった。ヒマワリでは地下茎部分に集中して放射性物質を蓄積している兆候を得た。さらに原子核乾板の結果から花や種子まで放射性セシウムが輸送されていなかったことが分かった。現時点では私たちの仮説は正しくなかったといえる。

今回の実験結果から、導管から放射性物質を吸収すると考えると、水に比べて輸送速度は極端に遅いことがわかる。水は数日で花まで水分を吸収するのに対し、16 日間後でも地上部まで β 線源が運ばれていないからである。この傾向から、福島の水をヒマワリで除染すると仮定すると、ヒマワリの地上部分は切り落とし一般ゴミとして処理

し、地下部分のみを処理すれば放射性廃棄物の処理量を大幅に減らすことができるであろう。

ここで、ヒマワリの除染能力を定量する。スポットの β 線数の視野ごとの結果を積分して、断面全体から出る β 線数を計算する。その結果 $2.3\text{cpm}/\text{cm}^2$ であった。スポットの切片の厚さが 2mm であり、根の長さが 10cm としてヒマワリの地下茎全体の 1 分あたりの計数率(cpm)を求める。各地点の茎の直径が分かっているので断面の結果を積分していくと、地下茎全体で約 11.4cpm となった。カウントした β 線を全て ^{137}Cs の崩壊により生じた β 線と仮定すると $120\text{cpm}=1\mu\text{Sv}/\text{h}$ なので、 $11.4\text{cpm}=0.0948\mu\text{Sv}/\text{h}$ となる。ヒマワリを育てる前の時点での福島の水の放射線量率は $6\mu\text{Sv}/\text{h}$ であったので、全体の約 1.6%の放射性物質を吸収したと考えられる。2011 年 9 月 14 日に農林水産省が発表した、ヒマワリのセシウムの吸収率は 2000 分の 1(0.05%)であったが、それは実際に現地で育てたヒマワリの結果である。福島の水は表層 5cm のところに全セシウムの 95%が蓄積して

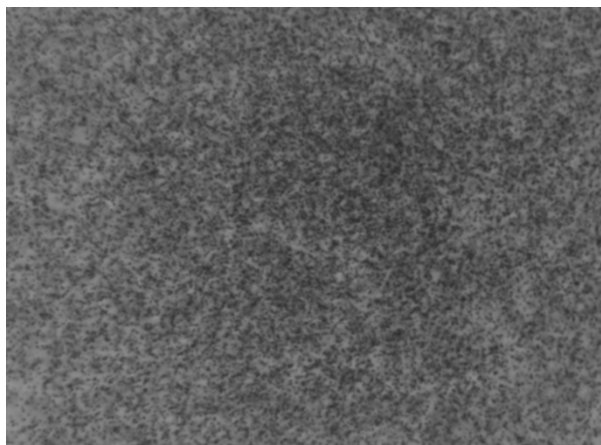


図4 イネの現像結果

図4がイネの地下部分を現像ものである。地下部では1視野内に 2520本の飛跡が確認できた。また、地上部では 90本の飛跡が確認できた。

いるという。本校で育てたヒマワリは表層 2 cmの土のみを使ったので、約 30 倍の高効率となっている。報道では「ヒマワリには除染効果なし」とのことであった。福島で表層の汚染土壌のみを使ってプラントを作り、植物を植える方法を採用れば植物によるファイトレメディエーションも可能性があるのではないか。

9 今後の研究

本研究は 16 日間の実験期間で行った。その結果、放射性物質は地下部に留まるという結果を得られた。しかし条件を変えた場合、吸収した放射性物質が地下部に留まるとは断定できない。したがってわれわれはセシウムの濃度、植物の種類、栽培期間など条件を変えた場合の吸収率や蓄積部位を検証していく。また、ヒマワリの花やイネの米粒に遺伝的な要因で放射性物質が蓄積されたか原子核乾板による精密測定により検証していく。

10 謝辞

本研究を推進するに当たり静岡大学理学部附属放射科学研究施設の奥野健二教授、大矢泰久准教授から研究方法に具体的なアドバイスを頂きました。名古屋大学理学部物理学科の方々には原子核乾板の現像の際にお世話になりました。イネの栽培方法は滋賀県立大学の長谷川博教授に教えていただきました。ありがとうございました。

11 参考文献

- [1]中田祥順,他, 岐阜県土岐市の花崗岩に含まれる放射性核種同定(2010 年, 静岡北高等学校科学部)
- [2]松田茂,他, 岩石の放射能と応用～岩石から出る放射線で物の内部構造を見る～ (静岡北高等学校科学部)
- [3]C. F. Powell, The Study of Elementary Particles by the Photographic Method, PERGAMON PRESS., 1959.
- [5]Radioisotope Pocket Data Book, Ten ed, 日本アイソトープ協会
- [6]アイソトープ手帳
- [7]高等学校 物理Ⅱ 教科書(数研出版)
- [8]福島第一原子力発電所の事故と影響—原子力防災と原子力政策の視点から—山名元、京都大学原子炉研究所
- [9]朝日新聞朝刊 9 月 15 日
- [10]読売新聞朝刊 9 月 15 日