

まえがき



2011年3月、東日本大震災を引き金とする原発事故により福島県内の多くの地域が放射性セシウムで汚染されました。私は農業土木学のなかでも土壌物理学を専門に研究する科学者として、農地の汚染が気がかりでした。このままでは農作物まで汚染されてしまうのではないかと心配になったのです。そこで私は土粒子と放射性セシウムの吸着特性との関係に注目しました。そして開発したのが誰にでもできる簡単な除染法でした。しかし、この除染法を理解するには土が持っている「吸着特性」と放射線について正しく理解する必要があります。

くしくも2015年は国連が主導して土の大切さを訴える国際土壌年でした。私は大学で働いている教え子たち（農業農村工学会土壌物理研究部会の若手科学者）に呼びかけ、小学生が実験を通して楽しみながら土（粘土）の性質を理解できる教育プログラムと一緒に考えました。そして福島県の小学校や科学館で「ドロえもん博士の土はマジシャン!」という出前授業*を始めました。すると保護者や小学校の先生方から「もっと多くの小学校で実施できる教材にしてほしい」という要望ができました。そこで、東方通信社の協力を得て本書を出版することにしました。

本書はこどもが楽しめる絵本であると同時に保護者向けの解説本です。本書に紹介されている簡単な実験や解説を通して、土の吸着特性と放射性セシウムの関係をより多くの方が正しく理解し、地域再生のパワーの源にいただければ幸いです。

*出前授業は JST（科学技術振興機構）の平成26年度科学技術コミュニケーション推進事業機関連携推進 ネットワーク形成型によるプロジェクト「復興農学による官民学連携協働ネットワークの構築と展開」の一環で実施されました。



「セシウム」？「放射線」？ なんだろう？

むずかしいけど、この絵本でいっしょに勉強しよう！



テレビや新聞で「セシウム」や
「放射線」ってよく聞くけど、何のこと？
もっとよく知りたいけどむずかしそう・・・。



みんなで
勉強しながら
いっしょに
考えてみよう！

ドロえもん博士
大学で土の研究をする先生。
得意技はどろだんごづくり。



ほうしゃせん

放射線はどこにあるの？

身のまわりのいろんなところから
出ていて、いろんな事に役立っているよ。

どうしてこんなに
騒がれてるの？



目に見えないから分からなくて
心配する人も多いけど、
実は身の周りにも
たくさんあるんだ。



日常生活における放射線量

身の回りの放射線	放射線の量 (mSv)
ガラバリ (ブラジル) での自然放射線	10 (年間)
胸部X線コンピューター断層撮影検査 (CTスキャン)	6.9 (1回)
自然放射線の世界平均	2.4 (年間)
一般公衆の線量限度 (医療は除く)	1 (年間)
胃のX線集団検診	0.6 (1回)
東京—ニューヨーク飛行機旅行	0.2 (1往復)
胸のX線集団検診	0.05 (1回)

カリウム 40 を含む食品の放射能

カリウム 40 を含む食品例	放射能 (Bq/kg)
干しシイタケ	700
生ワカメ	200
ホウレン草	200
牛肉	100
魚	100
白米	40

引用元：一般社団法人広島県医師会 (<http://www.hiroshima.med.or.jp/pamphlet/245/2-2.html>)

身の周りにも放射線があります



大人の方へ

放射線の単位は目的に応じて使い分けます。「Sv (シーベルト)」は人が放射線でどれだけの影響を受けるか、「Bq (ベクレル)」は物質の放射能 (→p.9) の強さを表します。

放射線は、宇宙、大地、空気、食物など、身のまわりのあらゆるところから出ており、私たちは日常的に、年間約2.1mSv (日本平均) の自然放射線を受けています。この他に、高度の高い位置ほど宇宙からの放射線量が高く、飛行機で東京—ニューヨークを往復すると約0.2mSvの放射線を受けます。ミネラルの一種、カリウムには放射線を出す「カリウム40」がわずかに存在し、食物とともに体内に取り込まれます。カリウムが多い食品の例として、干し昆布 (2,000Bq/kg)、干しシイタケ (700Bq/kg)、ポテトチップ (400Bq/kg) などがあります。また、現代では人工的に放射線が作られ、医療をはじめ様々な場面で利用されています。たとえば、胸部X線検診を一回受診すると、約0.05mSvの放射線を浴びます。



地震と関係あるの？ あのとき何があったの？

2011年の大地震のとき、福島原子力発電所で
事故が起きて、セシウム137が出てきたんだ。



東日本大震災のとき
何があったの？



福島の原子力発電所で
事故が起きて、
「放射性物質」が
たくさん飛び出したんだ。



文部科学省及びアメリカエネルギー省による
航空機モニタリングの結果
(セシウム134、137の地表面への蓄積量の合計)

引用元：原子力規制委員会 HP 2011年4月5日公開資料
(http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/4000/3710/24/1305820_20110506.pdf)

原発事故で飛び出した問題物質は セシウム137です



2011年3月11日の東日本大震災で起きた福島第一原子力発電所の事故で、大量の放射性物質(→p.9)が発電所の外に漏れだしました。放出された放射性物質は風に運ばれ、雨や雪とともに地上に降りそそぎました。事故で放出された放射性物質には、ヨウ素(ヨウ素131、ヨウ素132、ヨウ素133)、セシウム(セシウム134、セシウム137)などが含まれていたことが確認されています。そのなかで私たちの生活環境に大きな影響を与えているのは、放射性セシウム(セシウム137)です。これは、半減期(→p.13)が約30年と、同時に放出された他の放射性物質と比較して長いからです。



ほうしゃせいぶしつ...?

ほうしゃせん ぶしつ
放射線を出す物質を

「ほうしゃせいぶしつ」というんだよ。

ほうしゃせいぶしつ ほうしゃせん
放射性物質は放射線を出すと最後には安定するよ。

ほうしゃせいぶしつ ほうしゃせん
放射性物質と放射線は
同じものなの？



ふ かいじゅう
火吹き怪獣の例で考えてみよう。

ほうしゃせん
放射性物質を「火吹き怪獣」とすると、
放射線は「火」のようなイメージだよ。

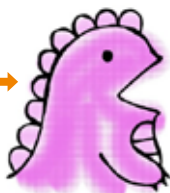
ほうしゃせん
放射線はわたしたちの体の中の
細胞をきずつけるんだ。

セシウム 137
ほうしゃせいぶしつ
(放射性物質)

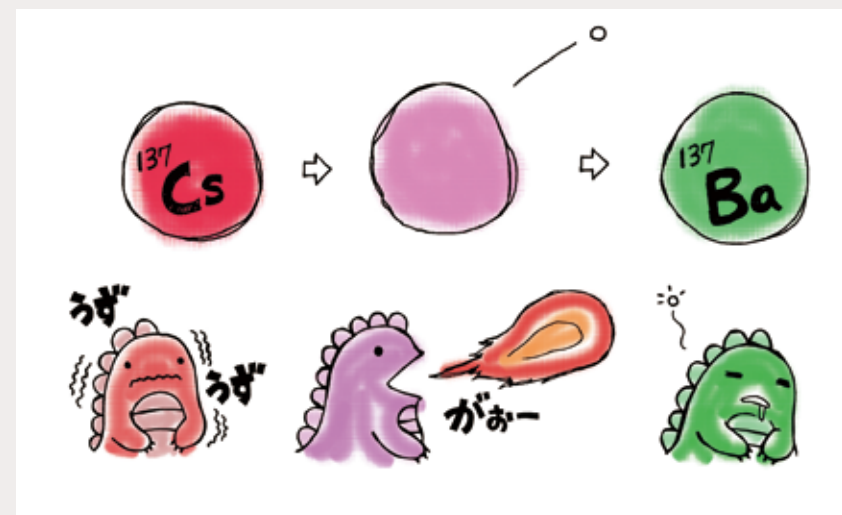


ほうしゃせん
放射線

ふ かいじゅう
火吹き怪獣



ふ ひ
吹いた火



放射性物質って何ですか



大人の方へ

私たちの身のまわりの「物」はすべて、原子という小さな粒がたくさん集まってできています。福島第一原子力発電所の事故で放出された物質には、「放射性セシウム」の原子が含まれていました。放射性セシウムは自然に壊れてバリウムという別の原子に変わり、原子が壊れるときに、放射線が飛び出します。このように放射線を出す物質のことを「放射性物質」といいます。放射性セシウムが壊れてできたバリウムは安定しており、それ以降、放射線は飛び出しません。

物質中に、放射性の原子（たとえば放射性セシウム）の数が多いと、壊れる原子の数も多くなり、飛び出す放射線が多くなります。放射線を出す力の強さを「放射能」といい、「Bq（ベクレル）」（→p.5）という単位で表します。Bqは、放射性の原子が1秒間に何個壊れるかを表しています。

放射線にはアルファ（α）線、ベータ（β）線、ガンマ（γ）線、エックス（X）線など複数の種類があり、放射性セシウムから出るのはβ線とγ線です。α線やβ線に比べて、γ線やX線は物質を通り抜ける力（透過力）があります（→p.23）。

参考： 澤田哲生 監修 「目で見て分かる!放射能と原発」（双葉社）



かいじゅう

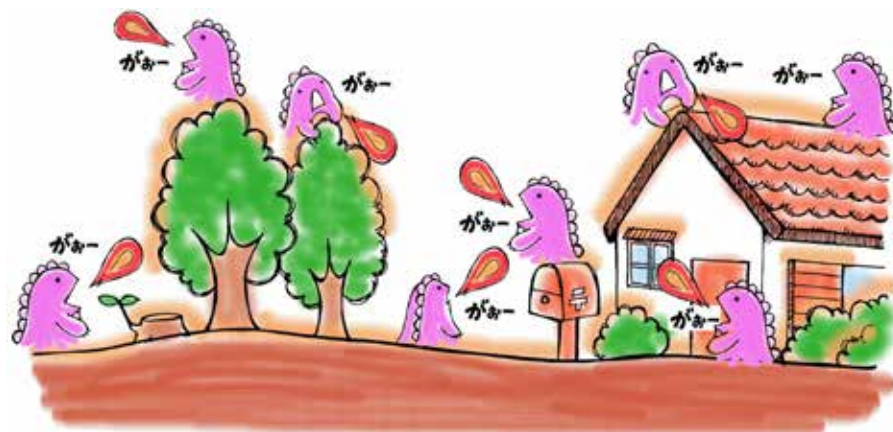
怪獣はどこにいるの？

空から落ちて来て、
いろんな場所の表面にかくれているよ。



ふ かいじゅう
火吹き怪獣は

外のどんなところにいるの？



と ふ かいじゅう
大氣中に飛び出した火吹き怪獣
(放射性物質 セシウム137) は、
地面や家の屋根などに落ちたんだ。
そして火(放射線)を吹いたんだ。

森林の空間線量を
自動計測するためのシステム



いろんな所に放射線を出すセシウム



原子力発電所の事故で放出した放射性セシウムと放射性ヨウ素などの放射性物質は、山林、田畑、住居などあらゆる場所に降りそそぎました。事故から時間が経ち放射性ヨウ素の影響はなくなりましたが、放射性セシウムは家屋や土、植物の枝葉などにくっつき、今も放射線を出しています。一方でセシウム自体は気体ではないため、細かいチリにくっついて空气中を舞うことはあっても、自ら空气中を漂うことはありません。また、新たに増えることもありません。そのため、線量が高い場所を知り、重点的に除染することが効果的です*。セシウムは屋根や地面に多くくっついているため、セシウムから出る放射線量は、家の中より外の方が、家の中では上の方が、家の外では地面に近い場所の方が高い傾向にあります。

※現在も、畑や森林の線量を測定して、線量の変化や除染の効果を調べる研究が進められています。

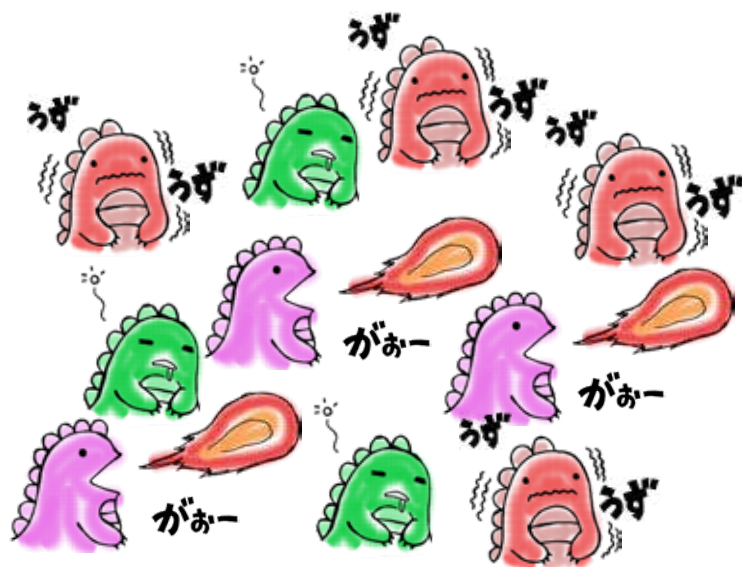


かいじゅう 怪獣はいつまでいるの？

30年かかってやっと今の半分になるよ。
100年でようやく10分の1になるんだ。



火吹き怪獣（セシウム137）は
火を吹くと（放射線を出すと）
無害怪獣（別の物質）になるんだ。
火吹き怪獣の数が半分になるには
30年もかかるんだ。



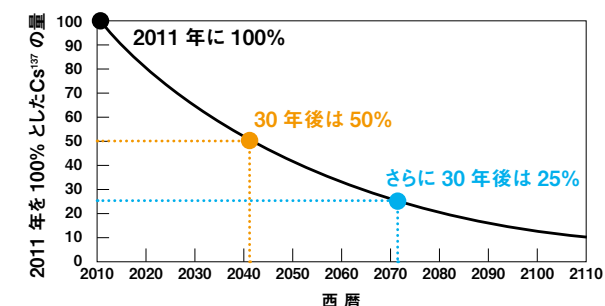
30年も!?大人になるまで
長く考えないといけない
問題なんだね。

主な放射性物質の半減期

放射性物質	半減期
ヨウ素 131 (131I)	8.0 日
△ セシウム 134 (134Cs)	2.1 年
ストロンチウム 90 (90Sr)	28.8 年
○ セシウム 137 (137Cs)	30.1 年
ラジウム 226 (226Ra)	1,600 年
プルトニウム 239 (239Pu)	2.4 万年
ウラン 238 (238U)	45 億年

※セシウムに比べて他の放射性物質の放出量は圧倒的に少ない

半減期から予測したセシウム137の量の変化



放射能には半減期があります



大人の方へ

放射性物質は一度放射線を出すと、元とは異なる物質に変わります。ある放射性物質の半分の量が、異なる物質に変わるためにかかる時間が「半減期」です。原子力発電所の事故当時に注目された放射性ヨウ素（ヨウ素131）の半減期は8日です。そのため、8日で事故当時の2分の1、16日で4分の1の量と比較的速く数を減らしていき、2ヶ月で1%足らずの量となり、現在ではその影響はありません。一方で、セシウム137の半減期は約30年と長く、除染を行わなければ5年以上経過しても事故当時の90%近い量が残存することになります。10%の量にまで減少するには100年かかる計算になるため、長い目で問題に向き合っていく必要があります。なお、セシウムに比べると他の放射性物質の放出量は圧倒的に少ないので無視しても問題ありません。



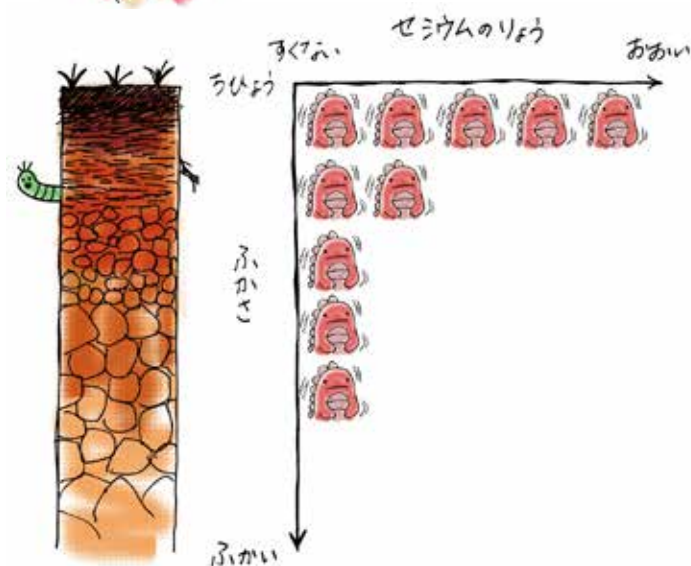
かいじゅう

怪獣は土の中にいるの？

地面の近くにかくれてて、
深いところにはあんまりいないんだ。



地面に落ちたセシウムは
どうなってるの？

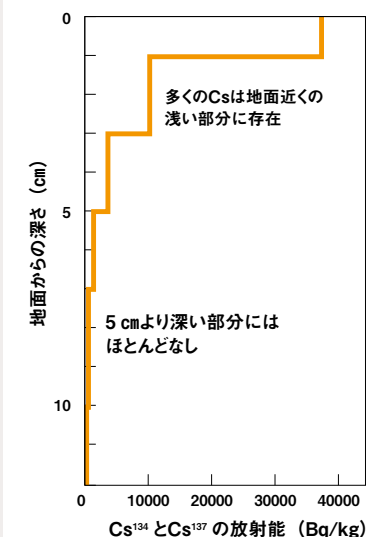


調べてみたら、
地面から深さ5cmの間だけから
見つかったんだ。



土壌の採取風景
(2012年10月飯館村佐須地区水田)

測定された水田土壌中の セシウム濃度



引用元：塩沢ら「福島県の水田土壌における
放射性セシウムの深度別濃度と移行速度」、
Radioisotopes 誌、8月号、2011

地面に落ちたセシウムはどこへいくのか



事故後の2011年5月24日に、福島県内の水田で土壌を採取して、放射性セシウムの測定が行われました。その結果、降りそそいだ放射性セシウムのほとんどは深さ5cmまでに存在しており、それより深くからは検出されないことがわかりました。通常、肥料などで土壌に散布された物質は、雨水に溶けて地中深くに流れていきます。しかし、水田の土の粒にはセシウムを他の物質より強く引き付ける力（吸着力）があります。土の粒も雨水とともに土中に流れていきますが、これらの粒は他の土の粒のすき間に引っかかって、地中深くに流れることはありません（ろ過効果）。この「吸着力」と「ろ過効果」という土の力について、次ページから解説します。

一方、イノシシなどによって掘り返された場所では、より深くまでセシウムが混ざってしまうという報告もあります。

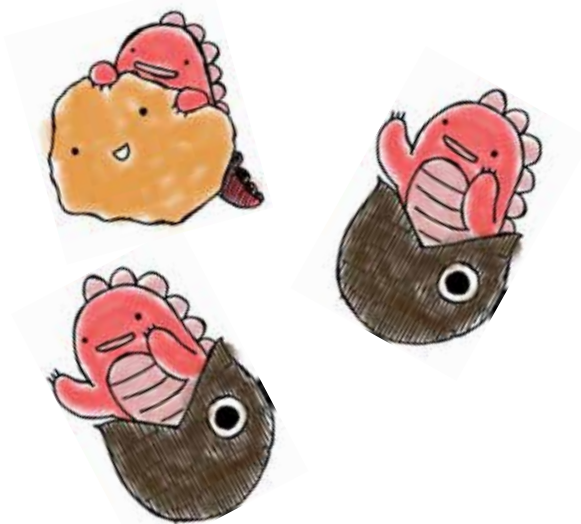


Q どうして 地面の近くだけにいるの？

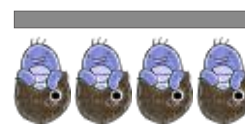
土がセシウムに対して
ふしぎな力をもっているからなんだ。



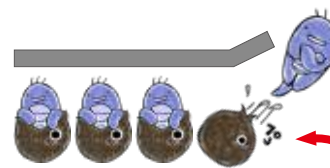
土の小さなつぶには
セシウムを強く引きつける
力があるんだ。
きゅうちやくげんしょう
これを「吸着現象」というんだ。



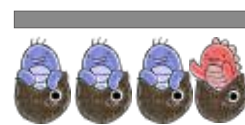
一度くっついたら
セシウムは
土のつぶから
はな
離れられないんだね。



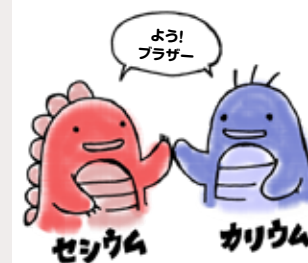
雲母にはカリウムが入っている。



セシウムが来ると・・・



セシウムが取り込まれる！



セシウムとカリウムは
よく似ている。

放射性物質も吸い付ける土の吸着力について



大人の方へ

土の吸着現象には粘土粒子が大きな役割をはたします。粘土は大きさが0.002 mmより小さい土粒子であり、長い年月をかけて岩石が破碎し（物理的風化作用）、水に溶解・変質する過程（化学的風化作用）で生成されます。このように生成された粘土が除染に関係しているのです。粘土の表面は、電気的にマイナス（負）に帯電していて、プラス（正）に荷電しているセシウムなどのイオンや極性を持つ分子を引き付ける吸着力を持っています。

粘土の一種である風化雲母（パーミキュライトやイライト）は、特殊な吸着力でセシウムを強く吸着します。風化雲母はカリウムをサンドイッチのように挟んだ層状構造をしています。その端面付近に、化学的な特徴がカリウムと似ているセシウムが近づくと、カリウムに置き換わって層の間に入り込み、極めて安定的に定着します。福島県阿武隈山系には、パーミキュライト、イライトが多く存在することが知られています。

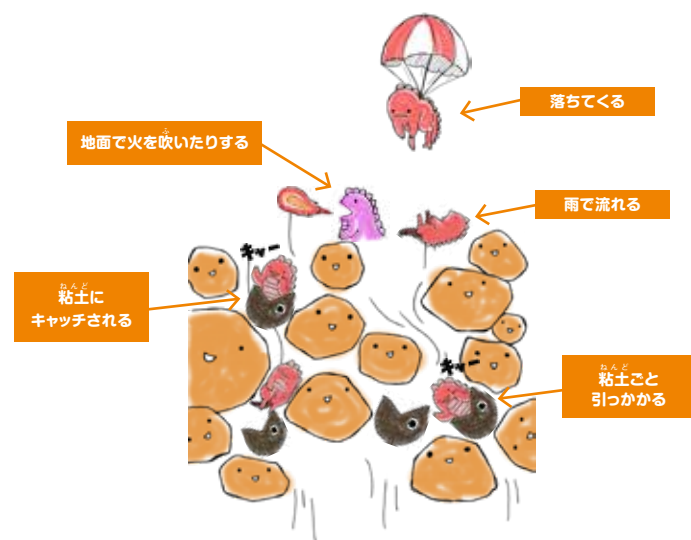


土のつぶといっしょに 雨で流れないの？

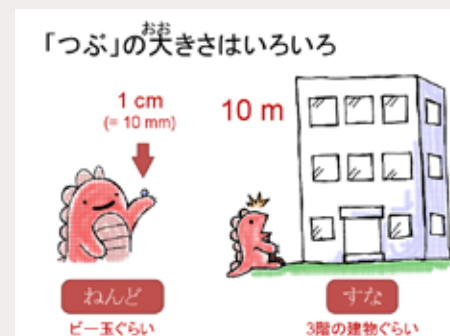
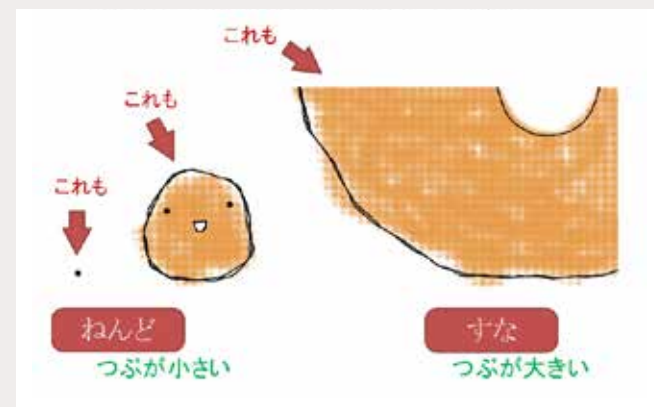
これも土の不思議な力なんだ。
土の中をのぞいてみよう！



セシウムをくっつけた
小さな土のつぶは他のつぶの隙間^{すきま}
引っかかって動けなくなるんだ。
この土の力を「ろ過効果^{かこうか}」というんだ。



だから雨がふっても、
セシウムがくっついた土のつぶは、
深くに流れないのね。



土のつぶの大きさもいろいろです



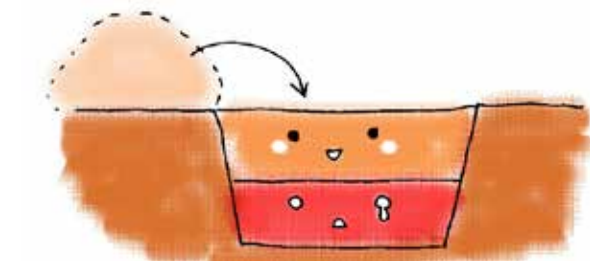
土粒子は、粒の大きさによって、粘土（直径0.002 mm未満）、シルト（直径0.002～0.02 mm）、砂（直径0.02～2 mm）に分類されます。例えば、粘土粒子を直径1 cmのビー玉とすると、砂の粒子は3階建ての建物ぐらいの大きさになります。このように大きさの異なる土粒子や有機物が土を構成しています。土の中には、粘土、シルト、砂の割合によって大きさや形の異なる隙間が存在していて、つながっていたり行き止まりになっていたり、多様に連結しています。土のろ過作用は、この網目のような隙間に物が引っかかる現象です。隙間は小さいものは0.001mm以下になるため、水と一緒に流れてきた粘土粒子は、小さくても途中でより小さな隙間に引っかかって土中に残されます。



汚れた土は どうしたらいいの？

土をはぎとったり、埋めたりすれば
放射線から身を守れるんだ。

汚れているのは
表面の土だけだから
はぎとったらいいの？



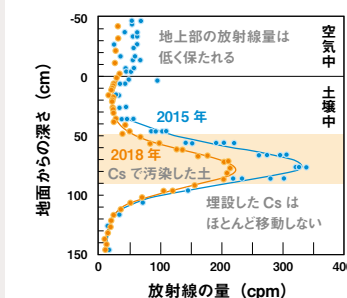
集めて袋に入れる方法のほかに、
地面深くに埋めてしまう
方法もあるよ。



汚染土の埋設実験風景

セシウム汚染土壌を埋設した時の放射線量

※cpm (Count Per Minute) は放射線計測器の表示値



引用元：溝口「飯館村の水田に埋設された汚染土壌から
放射性セシウムは漏出するか？」H30 農業農村工学会大会講演会

フレコンバックや天地返して セシウム汚染もなくなる!?



農林水産省は農地除染法として、放射性セシウムの汚染度に応じて、表土削り取り (10000 Bq/kg 以上)、泥水攪拌処理 (5000-10000 Bq/kg)、反転耕 (5000 Bq/kg 以下) の3つの方法を推奨しました。しかし実際に使われたのは表土削り取り法がほとんどでした。表土削り取りによって集められた汚染土は、フレコンバック (フレキシブルコンテナバック) と呼ばれる、穀物や土砂の輸送に利用するおよそ1m³の大型のバックに詰められ、仮置き場や仮仮置き場に保管されました。保管されたフレコンバックの外側には、周辺に拡散する放射線量を減衰させるために、汚染されていない砂を詰めたフレコンバックが置かれています (→ p.23 遮蔽)。仮置き場や仮仮置き場にはこのようなフレコンバックが大量に積み上げられていましたが、現状では中間貯蔵地に移動されつつあるため徐々に少なくなってきています。

反転耕 (天地返し) は、農業機械を使って上と下の土を反転させ、汚染土壌を同一敷地内の深部に埋め込む方法です。農林水産省の基準に従ってこの方法を採用していればフレコンバックの汚染土を大幅に減らせていたかも知れません。しかし、地中に残された放射性セシウムが地中を移動し地下水を汚染するのではないかという懸念から反転耕はほとんど採用されませんでした。

ドロえもん博士は、実際に汚染土を地中50-90cmの深さに埋設し、その上に汚染されていない土を被せました。今も定期的に放射線量を測定していますが、埋設した放射性セシウムがほとんど移動しないこと、地上部の放射線量が低いままであることを確認しています (右上図)。



ほうしゃせん 放射線から身を守るには どうすればいいの？

ほうしゃせん
放射線から身を守るには3つの方法があるんだよ！



次の3つに
気をつける必要が
あるんだ。



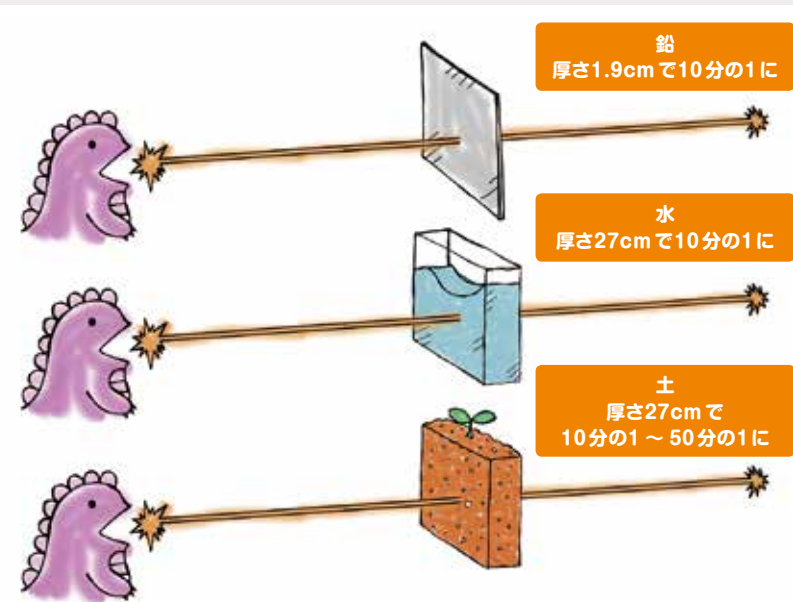
ほうしゃせいぶつしつ はな
①放射性物質から離れる



ほうしゃせん
②放射線にあたる時間を
短くする



ほうしゃせん
③放射線を通さない箱に
入れる



放射線から身を守るためにはどうするか



大人の方へ

①距離

光や音は、光源や音源から離れるほど暗く、あるいは小さくなります。放射線も放射性物質から離れるほど弱まります。放射線の強さは放射性物質からの距離の二乗に反比例します。

②時間

短時間なら涼しいと感じる部屋であっても、長時間いると身体の内まで冷えます。放射線もあたる時間が短いほどその影響は小さくなります。

③遮蔽 (しゃへい)

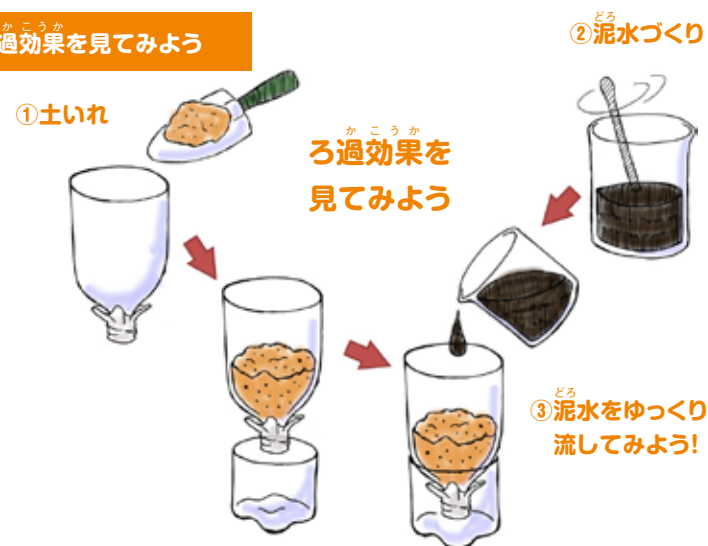
光がまぶしいとき、遮るものがあればそのまぶしさは軽減されます。放射線も遮る物があればその影響は小さくなります。紙一枚では光が明るく感じられても、百枚重ねれば暗くなります。金属板なら薄くても光は届きません。放射線も遮蔽物の厚さや種類により遮蔽効果が異なります。



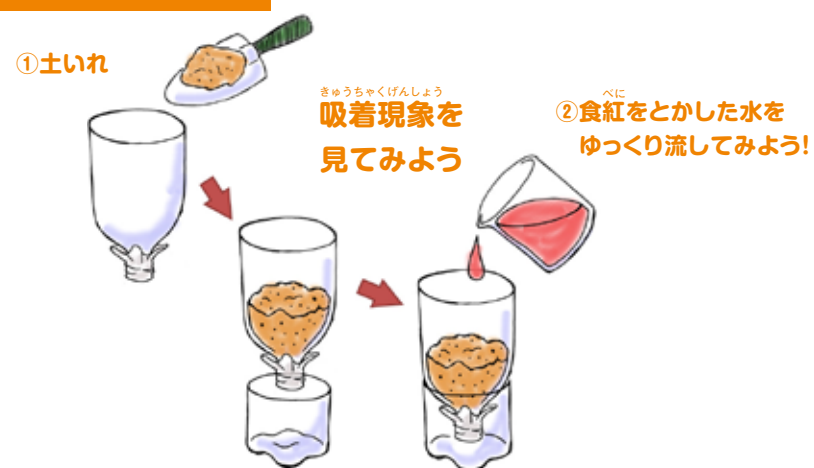
実験：土はマジシャン！

ペットボトルを使って土の不思議について
実験してみよう。

ろ過効果を見てみよう



吸着現象を見てみよう



ペットボトルを使った吸着実験の様子（左から、畑の土、山の土、海の砂、おがくず）

実験でわかる水の流れと土の役割



半分にカットしたペットボトルの飲み口に、ガーゼを輪ゴムでしっかりとめます。底の部分は水受けに使います。ガーゼは土の粒子が通り抜けない程度の目の大きさのものをを使うか、2重にして使ってください。

ペットボトルに土を入れるとき、強く押し固めると水の通る隙間が狭くなり、なかなか水が出てこないことがあります。実験は何回か繰り返してできますが、繰り返すぎると、細かい土の粒子がもともとペットボトルに入れていた土の隙間を埋めてしまったり、水の重さで土が締め固まったりして、水が流れにくくなります。その時は、ペットボトルの中の土を入れ替えてください。よく観察すると、とくに地表面付近に粘土粒子がびっしりと溜まっていて、これが水の流れを遅くしていることがわかります。この現象を「ケーキろ過現象」といいます。

吸着実験の色水には薄い食紅液を使うとよいでしょう。濃すぎると土の吸着力を超えた色素が存在し、出てくる水の色の違いが判別しにくいことがあるので調整してみてください。砂では食紅色の水や泥水がそのまま流出し、畑の土では無色透明か色の薄まった水が流出します。



ほうしゃせいぶっしつ

放射性物質への土のはたらき、わかったかな？

ほうしゃせん
土は放射線から身を守るために
大切な力を持ってるんだよ。



ほうしゃせいぶっしつ

放射性物質とそれに対する
土の力についてわかった気がします。



ほうしゃせん

放射線について、
正しく理解して
自分で身を守ることが
大事だね。



おわりに



大人の方へ

放射性物質は年々減少しますが、その減少速度は徐々に遅くなります。また、セシウム137の半減期は30年と長く、長期にわたり向き合っていかななくてはなりません。

私たちは、福島県内の小学校や科学館で土の実験教室を開き、こどもたちに土の吸着現象と、ろ過効果を体験してもらうことにしました。その目的は土に吸着した放射性セシウムの挙動について正しく理解し、自分たちで考えて行動できるようなこどもを育てるためです。そして、広く全国の皆さんにも土の不思議を知ってもらいたい、という思いから出前授業で使った教材を出版することになりました。

こどもたちと保護者の皆さんがともにこの本を読み、実験を行い、土の吸着特性と放射性セシウムの関係を正しく理解してくれることを願っています。

放射性セシウムによる汚染は簡単に解決できません。しかし、怖がりすぎることは禁物です。しっかりと現実と向きあうことが問題解決の第一歩だと私たちは思っています。本書が少しでも役立つことができれば幸いです。

東京大学大学院農学生命科学研究科教授 「Dr.ドロえもん」こと溝口勝

〈編集委員〉

溝口 勝



1960年 栃木県に生まれる
1982年 東京大学農学部卒業
1984年 東京大学大学院博士課程中退
1984年 三重大学農学部助手
1999年 東京大学大学院
農学生命科学研究科助教授
現 在 同 教授

加藤 千尋



1985年 岡山県に生まれる
2007年 東京農工大学農学部卒業
2012年 東京大学大学院博士課程修了
現 在 弘前大学農学生命科学部
助教

西脇 淳子



1977年 福島県に生まれる
2000年 千葉大学理学部卒業
2006年 東京大学大学院博士課程修了
現 在 茨城大学農学部 助教

廣住 豊一



1977年 石川県に生まれる
1999年 三重大学生物資源学部卒業
2012年 三重大学大学院
博士後期課程修了
現 在 四日市大学環境情報学部
講師

坂井 勝



1979年 福岡県に生まれる
2002年 東京大学農学部卒業
2007年 三重大学大学院博士後期課程
修了
現 在 三重大学大学院
生物資源学研究科 講師

徳本 家康



1979年 熊本県に生まれる
2002年 佐賀大学農学部卒業
2013年 Ph.D取得
(テキサス A&M 大学)
現 在 佐賀大学農学部 助教

渡辺 晋生



1970年 愛知県に生まれる
1994年 三重大学生物資源学部卒業
1999年 三重大学大学院博士後期課程
修了
現 在 三重大学大学院
生物資源学研究科 教授

2019年3月11日 初版発行

著 者 — 編集委員会

発 行 者 — 古川 猛

発 行 所 — 東方通信社

発 売 — ティ・エー・シー企画

〒101-0054 東京都千代田区神田錦町1-14-4

電話：03-3518-8844 FAX：03-3518-8845

印刷・製品 — シナノ印刷

本 体 価 格 — 500円 (税込540円)