

原著

イメージングプレート及び医療用CTの福島県帰還困難地域 における土壌の放射能分布解析への応用

高久 圭二¹⁾ 木村 英理¹⁾ 大島 かれん¹⁾ 荒谷 真帆¹⁾
井上 爽¹⁾ 大西 悠生¹⁾ 清水 暉翔¹⁾ 竹本 瑞希¹⁾

Application of Imaging Plate and Medical CT to soil radioactivity distribution analysis in areas where it is difficult to return zone in Fukushima Prefecture

Keiji TAKAHISA¹⁾, Eiri KIMURA¹⁾, Karen OHSHIMA¹⁾,
Maho ARAYA¹⁾, Saya INOUE¹⁾, Haruki OHNISHI¹⁾,
Akito SHIMIZU¹⁾, and Mizuki TAKEMOTO¹⁾

要旨

東日本大震災による福島第一原子力発電所事故の放射能による土壌汚染は、現在も帰還困難地域が存在する。放射能が土壌の深さ方向にどう分布するかは、除染による復興のためには必要不可欠な情報である。

大阪大学が例年行なっている、福島県浜通り研修では、土壌の深さ方向の放射能の分布測定を続けている。

本学では、イメージングプレート (Imaging Plate: 以下 IP) 及び医療用の X 線 CT 装置を診療放射線技師養成のため、教育目的で使用しているが、それらを土壌の深さ方向の放射能分布の測定に応用する研究を行い、放射能が土壌の深さ方向にどのように浸透しているかが初めて明らかになった。また、X 線 CT 装置により取得した画像による測定と組み合わせることで、土壌内部に放射線を出す小石があるのか、放射能がしみ込んだのかも明らかにすることができた。

この研究は IP 及び X 線 CT 画像の土壌の放射能分布解析への応用へのパイロットスタディであり、定性的に明らかにした。

キーワード：放射能分布、IP、CT

1) 保健科学部診療放射線学科

Abstract

There are still areas where it is difficult to return to soil contaminated by radioactivity from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident caused by the Great East Japan Earthquake. Examining the distribution of radioactivity in the depth direction of the soil is essential for future recovery through decontamination.

At the Hamadori training program in Fukushima Prefecture, which is conducted annually by the Osaka University Research Center for Nuclear Physics, we continue to measuring the distribution of radioactivity in the depth direction of the soil.

At our university, we use IP(Imaging Plate) and medical CT for educational purposes to train radiology technicians, but we conducted research to apply them to measuring the radioactivity distribution in the depth direction of soil.

Using IP, it was revealed for the first time how radioactivity penetrates soil. In addition, by combining it with CT measurements, we were able to determine whether there was a stone that emitted radiation or whether it had been soaked in radioactivity.

This was a pilot study for the application of IP and CT to soil radioactivity distribution analysis, and was qualitatively clarified. Quantitative analysis will be considered in future research.

Key words: Radioactivity distribution, IP, CT

はじめに

2011年3月11日に起こった東日本大震災による福島第一原子力発電所事故の放射能による土壌汚染は、原発から北西方向の地域に分布しており、今もなお帰還困難地域が存在する。事故から12年が経過しているが、放射能が土壌の深さ方向に対して、現在どのような分布をしているかを調べることは、今後除染による復興のためには必要不可欠な調査研究である。

大阪大学核物理研究センターは、原発の事故直後から、全国の原子核実験を研究している研究機関の団体である原子核談話会が中心となって、いち早く福島に行って文科省のバックアップの元、放射線量の現地調査を行ってきた。当時大阪大学核物理研究センターの放射線取扱主任者であった筆頭筆者は、その後方支援を行っていた。大阪大

学核物理研究センターが主体で例年行っている福島県浜通り研修は、本学は2021年から3年間のべ11人の学生とのべ6名の教員が参加している。帰還困難地域において、大熊町役場を介して地権者の許可を得て、ライナー採土器で土壌をふた付きサンプルライナーチューブに30cm採取し、それを2.5cmごとにU9容器に入れて、NaI(Tl)検出器による放射能の深さ方向の分布の測定や、NaI(Tl)検出器による植物や果物の放射線レベルの測定を続けている。また、学生に福島第一原発見学や中間貯蔵施設見学、住民の方との懇談会を体験してもらうことにより、他大学の学生たちと、これらについての議論をしてもらっている。今回は処理水放出から、間もない時期の福島第一原発見学となったが、放射線の知識のある人間からしてみれば全く問題ないことを、放射線のことを知らない人々にどうわかりやすく説明するかが問われて

いるのではないかと感じた。

本学では、福島県浜通り研修に参加した学生が母体となって、2年前に福島県帰還困難地域の地権者の許可を得て採取した土壌や果物等の放射線レベルを調べ、学生として何ができるのか、友達、家族、親戚にどう伝えるのかを考えるベクレル同好会が発足した。

本学では、医療用のX線CT (Computed Tomography 以下CTと略す) 装置及びイメージングプレート (Imaging Plate 以下IPと略す) を診療放射線技師養成のため、教育目的で使用しているが、そのIPを使用して、土壌分布を測定し、さらに放射線を出す部分が小石なのか、土壌にしみ込んだ放射能なのかを判断するために、X線CT装置により取得した画像による測定を組み合わせる測定を行った。

本研究は今後の研究のためのパイロットスタディであり、定性的に有用であることを明らかにした。定量化は今後の研究となる。

原理

IPは、主に医療機関において、X線撮影用の写真フィルムに代わる放射線画像測定器として用いられており、体の外からでは観察することできない体内の様子を画像化することができる。フィルムと異なり、繰り返し使用できること、カセットに入れることによって明室での処理が可能であること、ダイナミックレンジが広いこと、デジタルデータのため画像処理が可能であることなどから、医療のみならず、非破壊検査など工業の分野でも利用されている¹⁾。本学の診療放射線学科では、教育目的で、診断X線エネルギー領域において、主にファントムを用いて使用されている。本学には富士フィルムの医療用IPが合計8枚存在し、読み取り装置が存在する。IPは、写真乳剤の1,000倍程度の感度を持ち、オートラジオグラフィと呼ばれる微量放射線の検出が可能である。輝尽発光

(PSL) 現象を示す特殊な蛍光体 (BaFX : Eu²⁺) をプラスチックの支持板上に塗布した放射線2次元センサであり、富士フィルムによる純国産技術で、レーザスキャナを用いた画像読み取り装置を含めたシステムをCR (Computed Radiography) と命名、輝尽性蛍光板はIP (Imaging Plate イメージングプレート) と商標登録している²⁾。輝尽性蛍光板はX線フィルムに相当するものであり、画像読み取り装置はかつての自動現像機に相当するものである。輝尽発光体に用いられているBaFX : Eu²⁺ (X=Cl, Br, I) に放射線が照射されると、結晶中に電子と正孔が生成される (吸収線量に比例)。正孔は結晶中の発光センサであるEu²⁺ イオンに捕獲されてEu³⁺ イオンとなり、電子は伝導帯に持ち上げられる。結晶中に存在していた格子欠陥であるFイオン空格子およびBrイオン空格子はこの電子を捕獲し、準安定状態の着色中心 (潜像) を形成 (着色中心の形成はハロゲンの性質による) する。準安定状態は熱励起がなく、また光が当たらない限りこの状態は保存される。放射線情報の読み出しには、He-Ne レーザや半導体レーザなどのPSL励起光 (600nm 付近の赤色光) を照射し、励起光はFセンターに吸収され、捕獲電子は再び伝導帯に持ち上げられる。Eu³⁺ イオンに捕獲されていた正孔と再結合することでEu²⁺ イオンの励起状態となり、平均寿命約0.6 μ sで基底状態に戻る際に400nm 付近の輝尽発光 (青紫色) が発生する。この輝尽発光の位置および強度を計測することで、輝尽性蛍光板に蓄積された放射線強度分布を得ることができる。

しかし、IP等で得られた画像は、2次元画像であり、X線照射方向から見て重なった構造物は影絵のように映し出される。そのため、詳細な形状や位置関係の把握が困難な場合がある。X線CT装置は、X線を利用して人体などの物体を走査し、コンピュータを用いて処理することで、物体の内部構造を断層画像として得ることができるものである。ドーナツ状の機器 (ガントリ) の中に、X

線管と検出器が対に配置され、それらを連続的に回転させながら透過データを取得する。1回転当たりのデータ取得数をview数といい、現在のX線CT装置では、装置や回転速度、画像再構成法によっても異なるが、約600～4600view（約0.08～0.6度間隔）の透過データを収集し断層画像を得ている。X線CT装置の検出器部は、シンチレータとフォトダイオードから構成される固体検出器(SSD: Solid State Detector)がチャンネル(XY)方向と体軸(Z)方向に二次元配列となっており、複数のデータ収集システム(data acquisition system: DAS)を装備することにより、短時間で、スライス厚0.5～8mm程度の複数の断層画像を得ることが可能である。また、寝台を移動させながらデータを収集するヘリカルスキャンを行うことにより、体軸方向に連続した詳細なボリュームデータを取得することが可能となった。性能の高いCPUやグラフィックが搭載されたワークステーションを用い、これらのデータを処理することにより、様々な方向からの断面や立体表示、画像加工、大きさや体積などの計測もでき、医療において診断や治療効果などを行う上でなくてはならない医療技術の一つとなっている。本学の診療放射線学科では、IP同様、教育目的で、診断X線エネルギー領域において、主にファントムを用いて使用されている。また、IP同様、様々な画像処理が可能であることなどから、医療のみならず、部品のヒビやキズなどを検出する工業領域、土器や文化財などの構造を把握する人文科学領域における非破壊検査にも利用されており、その有用性が実証されている³⁾。

方法

IPで、微量な放射線を測定するためには、測定物以外からくる自然環境放射線であるウラントリウム系列や、⁴⁰Kなどのバックグラウンドを減らす必要があり⁴⁾、本学ベクレル同好会では、陸奥鉄を使用した放射線シールドシステムを構築した。陸

奥鉄とは、戦艦陸奥の鉄であり、戦前の鉄として、国内で放射線シールドとして使用されているものである⁵⁾。戦後の鉄は、溶鉱炉の厚さを測定するために、少量の⁶⁰Coを鉄に混ぜており、放射線バックグラウンドが高いものになっている。そのため、低放射線バックグラウンドの測定を行う場合は、戦前の鉄である陸奥鉄が重宝されている。図1は放射線シールドシステムの写真である。陸奥鉄は20cm×10cm×1cmのもので、表面がさびているので、アルミホイルで覆った状態で使用した。また、IPの測定中は遮光しなければ、準安定状態の着色中心が状態を保持しなくなる。さらに、読み出しのためのカセットに入れる作業は暗闇で行う必要がある。



図1 ベクレル同好会が構築した陸奥鉄を用いた放射線シールド

図2は昨年度測定した福島県帰還困難地域の地権者の許可を得て採取した松の葉と栗と神戸の松の葉による1カ月間のIPによるオートラジオグラフィである。図3の写真との比較をすると、福島県帰還困難地域の松の葉と栗からの放射能レベルが高いことが明らかになった。また、ベクレル同好会により、栗の身ととげの部分分離し測定したところ、NaI(Tl)検出器での測定では、栗の実はND(Not Detected)となった。食品衛生法に定められた放射性セシウムの基準値は一般食品では100Bq/kg^{注1)}となっているので、基準値は下まわっていることが測定できた。松の葉はカリウムが含まれており、カリウムの0.012%がカリウムの

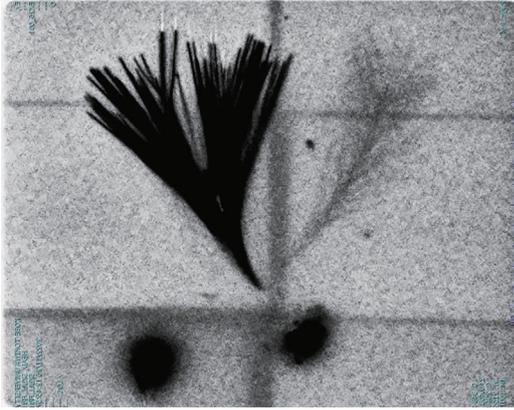


図2 福島県帰還困難地域の松と神戸の松のIPによるオートラジオグラフィー



図3 福島県帰還困難地域の松と神戸の松の写真

同位体である ^{40}K （半減期注²⁾13億年）が含まれているので、1カ月間の測定でIPにて測定可能となった。黒線は放射線シールドの隙間からの外部の自然環境放射線である。この測定以降は陸奥鉄による自然放射線バックグラウンドからのシールドを強化した。

また、一般に売られている野菜の放射能レベルを調べたのが図4左である。ほうれん草、昆布、マンゴウ、わかめを1月間IPによるオートラジオグラフィーで測定した結果である。図4右の写真と比較すると、昆布からの放射能レベルが高いことがわかる。これは ^{40}K が含まれているからである。昆布は2000Bq/kgと食品の中では高レベルであるものの一つである。ほうれん草は200Bq/kgであるが、ほうれん草の葉脈にそって高いことが確認できた。

福島第一原発の処理水のトリチウムの濃度は、放出前のトリチウム濃度と希釈水量で評価し、1,500



図4 ほうれん草と昆布、マンゴウ、わかめのIPによるオートラジオグラフィー（左図）、ほうれん草と昆布、マンゴウ、わかめの写真（右図）

ベクレル/リットル未満としている。この濃度は、国の安全規制の濃度限度である60,000ベクレル/リットルおよび世界保健機関（WHO）の飲料水水質ガイドラインである10,000ベクレル/リットルを十分下回る。食卓に出て毎朝味噌汁に入っているかもしれない昆布は2,000Bq/kgであることから問題ないことが理解されるかと思うが、更には昆布に含まれている ^{40}K は1.4MeVの γ 線なのに対し、トリチウムは0.017MeVが最大エネルギーで、最頻値が0.06keV程度の β 線であり、放射能はエネルギーに比例することから、エネルギー的には1/100程度と安全サイドに考えるべきものである。

今回はヨモギが除染に有効との情報から⁶⁾、ヨモギを根から採取し、土を洗浄した状態で、IPによるオートラジオグラフィーで一週間測定したのが図5であり、その写真が図6である。この結果からヨモギの根本付近の放射能レベルが高いことと、葉にもホットスポットがあることが確認できた。

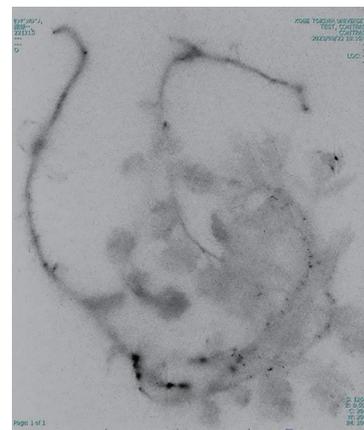


図5 ヨモギのIPによるオートラジオグラフィー



図6 ヨモギの写真

さらに、一般的に岩石から放射線が放出されることは知られているが、それを確認するため、22種類の岩石標本を、構築した放射線シールドシステムで1週間IPによるオートラジオグラフィで測定した。岩石は地域によって同じ名前の岩石に関しても放射線レベルが違うが、本測定では、放射線を出す小石が存在することを確認することを

目的として測定した。図7は22種類の岩石標本のIPによるオートラジオグラフィであり、図8はその写真である。このように長石、流紋岩、花崗岩等は、放射線を出すので、土壌の放射線測定をする前に、あらかじめ岩石を測定した。

大熊町役場を介して地権者の許可を得た帰還困難地域である休耕田から、ライナー採土器で、ふた付きサンプルライナーチューブ（直径5cm 長さ30cm）2つに土壌を採取した（以下、今回ライナー採土器で採取した2か所の土壌のサンプルを「ふた付きサンプルライナーチューブ1、2」とする）。ふた付きサンプルライナーチューブ1、2を、IPを密着させる状態で、円筒の半分ずつを2日ほどIPによるオートラジオグラフィで測定した。IP自体は読み取り時に曲げられるので、曲げられても問題ない素材であるが、実習に使用している大切なものであるため、半面ごとに測定を行った。また、2日間では、曲がりかもとに戻ることも確認できた。

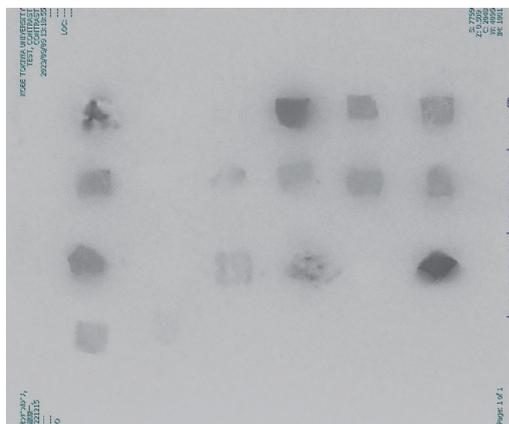


図7 22種類の岩石標本の一週間のIPによるオートラジオグラフィ



図8 22種類の岩石標本

表1 図7の岩石名

①花崗岩	②閃緑岩	③斑れい岩	④流紋岩	⑤玄武岩	⑥安山岩
⑦凝灰岩	⑧石灰岩	⑨チャート	⑩泥岩	⑪砂岩	⑫礫岩
⑬ホルンフェルス	⑭結晶質石灰岩	⑮結晶片岩	⑯片麻岩	⑰石英	⑱長石
⑲黒雲母	⑳角閃石	㉑虧	㉒かんらん石		

次にふた付きサンプルライナーチューブ内の土壌の内部構造を把握するために、X線CT装置にてデータを収集した。X線CT装置およびデータ収集条件を表2に示す。

結果

図9は昨年度大熊町役場を介して地権者の許可を得て、ライナー採土器で、ふた付きサンプルライナーチューブに採取した土壌を、2.5cmごとに

U9容器に分け、NaI (Tl) 検出器で測定した放射能濃度の分布であり、土の重さを測定しているもので、kgで割った値となっている。2.5cmごとの放射能濃度の測定は、土壌の放射能濃度の偏りを平均化するため、U9容器に入れる前に、土壌をビニール袋の中で良く混ぜる作業をした。

図10がふた付きサンプルライナーチューブ1の深さ方向のIPの2日間によるオートラジオグラフィの測定である。図11がふた付きサンプルライナーチューブ1の表裏の写真である。今回の結

表2 X線CT装置およびデータ収集条件

装置名	全身用 X 線 CT 診断装置 CT スキャナ Aquilion Lightning (TSX-035A) キャノンメディカルシステムズ株式会社
主な仕様	Gantry Rotation Speed (max) : 0.75 sec/rot Detector : 800 channels×16 rows PURE Vision Hybrid-type 0.5mm×16 1.0mm×4 Slices/rotation : 16 Scanlength/rotation : 20 mm FOV(field of view) diameter : 180/240/320/390/500 mm Gantry opening size (diameter) : 780 mm X - ray tube voltage : 80/100/120/135 kV X - ray tube current : 10 - 300 mA
データ収集条件	X - ray tube voltage : 120 kV X - ray tube current : 100 mA FOV(field of view) diameter : 99.8mm (SS) Gantry Rotation Speed : 0.75 sec/rot Slice thickness : 1mm×16 Pitch Factor : 0.938 reconstruction functions: : FC30 (for internal ear and bone images)

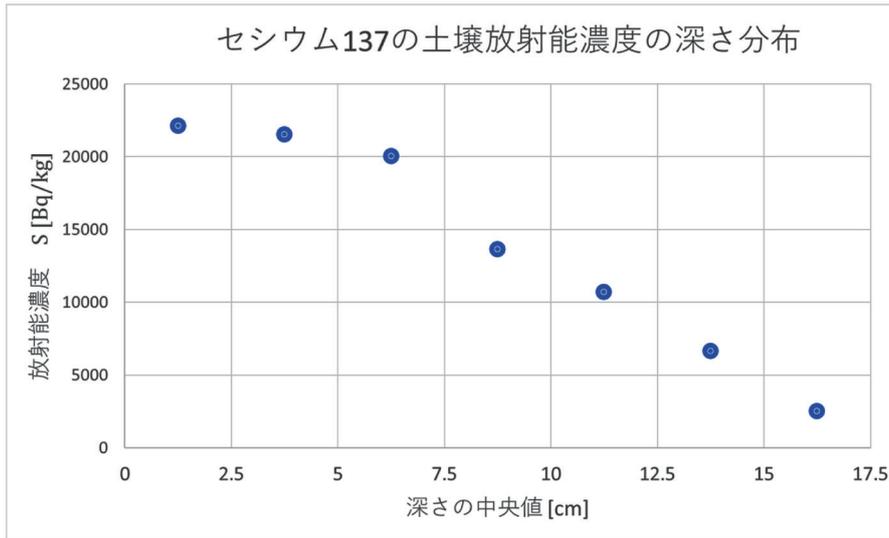


図9 セシウム 137 の土壌放射能濃度の深さ分布

果から、今までは2.5cmごとの平均化した放射能濃度しか測定していなかったが、IPによるオートラジオグラフィーを用いることで、放射能が土壌の深さ方向にホットスポット的に浸透している状態もあることが初めて明らかになった。

図10では真ん中から2cm程度下方のところに、放射能の塊が観測される(青矢印)。ここまで、放射能が浸透しているのか、放射線を出す小石があるのかを非破壊で調べるため、X線CT装置により、断層写真の撮影を行った。図12はX線CT装置により取得した断層写真である。X線CT画像で

は密度が高いものは白く、空洞は黒色となる。上から5cm付近が一番上、真ん中よりも2cm下付近が中、下から5cm付近が下となっている。真ん中よりも2cm下付近がちょうど図10で放射線の塊が観測される付近であるが、小石のようなものではなく、むしろ空洞になっている状態であり、放射能が浸透していることが確定できた(青矢印)。図12の下画像は、本測定地の休耕田は20cmより深いところが粘土層になっているので、図中上と中とは空洞が少ない質の異なった画像となっている。

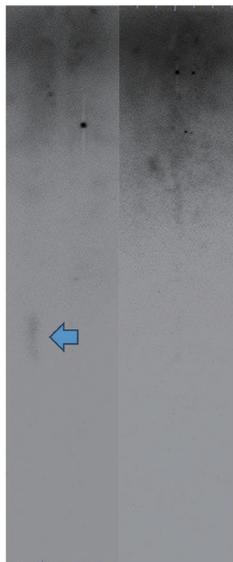


図10 ふた付きサンプルライナーチューブ1のIPを密着したオートラジオグラフィーの測定



図11 ふた付きサンプルライナーチューブ1の写真 右側の写真は左側の反対から撮影したもの

本研究において、IP と X 線 CT 画像の測定と組み合わせることで、放射線を出す小石があるのか、放射能がしみ込んだのかを明らかにすることができた。

図 13 はふた付きサンプルライナーチューブ 2 の IP によるオートラジオグラフィーの測定であり、

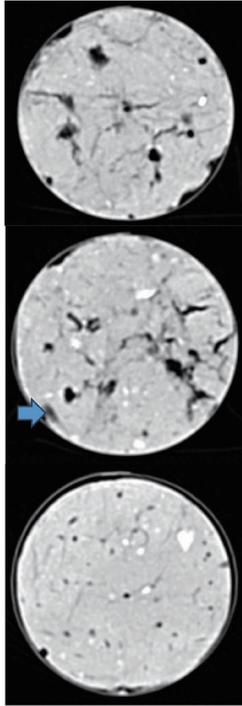


図 12 ふた付きサンプルライナーチューブ 1 の CT 画像
上：上から 5cm 付近、中：真ん中よりも 2cm
下付近、下：下から 5cm 付近

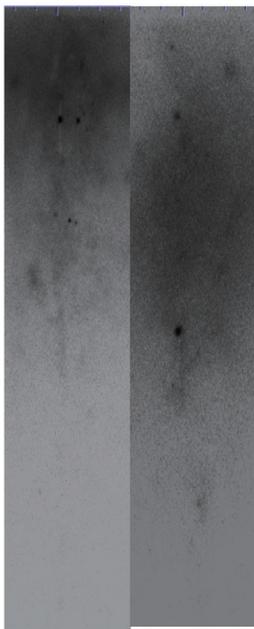


図 13 ふた付きサンプルライナーチューブ 2 の IP を
密着したオートラジオグラフィーの測定

ふた付きサンプルライナーチューブ 1 の結果が、特殊な結果ではなく、ふた付きサンプルライナーチューブ 2 も同じようにホットスポットが観測された。

考察

休耕田の土では、ホットスポットがあることがわかった。今までは 2.5cm ずつの土壌の分布を測定していたが、ホットスポット的に深く浸透している状態も存在することがわかった。

ホットスポットの原因について、

- (1) 図 12 の上と中の画像より、3月に事故が起こり、田植え前の耕されていない時期であったので、稲等の植物の根が張った後に、腐った状態の空洞ができていたのではないかと考えられる。それに沿って ^{137}Cs が浸透するのではないかと考察される。
- (2) 図 12 の上と中の画像及び図 6、図 7 の比較により、ヨモギなどの根に Cs 等の物質が集まる植物の性質から、根に集まった ^{137}Cs がホットスポットになった可能性も考えられる。

X 線 CT 装置を用いて解析を行ったことにより、IP によるオートラジオグラフィーで検出したものが、放射線を出す小石ではないことが明らかになった。このことから、IP によるオートラジオグラフィーと X 線 CT 画像を併用することにより、より精度の高い土壌分布の解析が可能であることが示唆された。また、上部からの空洞を追跡することもでき、ホットスポットのできる原因の解明と放射能がどう浸透するかのメカニズムの解明にも使用できるのではないかと研究中である。

また、今回 IP によるオートラジオグラフィーの測定において、除染に有効と考えられていたヨモギは、根にも放射能が多くあり、根こそぎ採取する必要がある。

今後の課題

IPによるオートラジオグラフィ及びX線CT画像を組み合わせて測定することが土壌分布の解析に役に立つことが初めて明確になったので、専用のIPを購入し、一度に360度測れるシステムを構築して、土壌の分布を総合的に調べるシステムを構築していくことを検討したい。

また、放射能濃度を定量化するために、 ^{137}Cs キャリブレーションソースによるIPによるオートラジオグラフィの濃度の関係を示す測定を行い、定量化の研究を行いたい。

ホットスポットのできる原因について、根が腐ることによる空洞による水の流れ込みによるのか、根が付近のセシウムを集めることによるのかを調べる必要がある。もし、植物の根であれば、ヨモギよりもより除染に適した植物の発見へとつながる研究となる。

現在、大阪大学が例年行なっている、福島県浜通り研修に参加している複数の大学の中では、本学しかできない特徴を活かした研究であり、福島の復興のために貢献できる新たな研究手法となれる可能性がある。

謝辞

この研究は大阪大学核物理研究センターが主催する福島県浜通り研修において大熊町役場の許可を得て採取したサンプルの解析です。大阪大学核物理研究センターに深く感謝いたします。また、この研修は福島イノベーションコースト構想「大学等の「復興知」を活用した人材育成基盤構築事業」、原子力人材育成等推進事業費補助金（原子力規制人材育成事業）の事業の補助を受けています。さらには全面的にご協力していただいた大熊町役場と本原稿に目を通して意見をいただいた大熊町役場の東さんに感謝いたします。

注釈

- 注1) 名称は、ウランの放射能を発見しノーベル物理学賞を受賞したフランスの物理学者アンリ・ベクレルに因んでいる。
- 注2) 半減期とはある放射性元素が、最初の半分の量が崩壊するまでの時間である。

文献

- 1) 放射線計測器としてのイメージングプレート、武部雅汎、応用物理 第65巻 第6号 (1996) p.601-607.
- 2) 放射線計測学、小山修司、加藤洋 共著、オーム社、P.106.
- 3) 医療用X線CT装置の人文科学への応用研究について、木村英理、高久圭二、伊藤彰、今井方丈、2020年度テーマ別研究
- 4) 大塔コスモ観測所におけるニュートリノ物理、高久圭二、The Conference on Neutrino Physics at Hachimantai 1998年、p.11-29.
- 5) 宇宙線ミュオンによる大型NaI (TI) 検出器を用いた非破壊研究手法の確立
～陸奥鉄の解析～、
荒久田周作（大阪大学理学部物理学科3年）、
高久圭二（核物理研究センター）、
甲田旭（核物理研究センター）、若林寛之（大阪大学理学部物理学科3年）
第二回 文理融合シンポジウム「量子ビームで歴史を探る」—加速器が紡ぐ文理融合の地平—、2019年12月25日～26日
- 6) 福島第一原子力発電所事故から1年後の放射能汚染農地に生育した野生植物99種における土壌から植物体への放射性セシウム移行係数の評価、山下 純、榎本 敬、山田 雅夫、小野俊朗、花房 直志、永松 知洋、園田昌司、山本洋子、Journal of Plant Research 127 (2014) doi:10.1007/s10265-013-0605-z