

土壌の放射性セシウム測定 目的と方法

日本環境モニタリング株式会社代表取締役 理学博士 圓入 敦仁

はじめに

複数の原子炉が同時にメルトダウンを起こし、大量の放射性物質が環境中に放出された平成23年3月の福島第一原子力発電所事故は^①、放射性物質による健康への影響に対する不安から、現状における外部被曝や内部被曝が安全か否かの議論を含め^②、我々日本人の生活に大きく影響を及ぼしている。

3・11以後の東日本では、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」^③による放射線管理区域の設置基準を超過する実効線量や表面汚染密度が認められる区域から、広範囲にわたる比較的低レベルの汚染区域まで、法と現実の矛盾を感じながら日常生活が営まれている。

平成23年3月まで一般の日本人

には馴染みがなかった「放射線」や「放射能」に対する見えない不安は、低線量被曝の健康への影響が未知であることに起因する^④。更には、人工放射性物質（特に放射性セシウム）の生物への移行機構についても、不明瞭な点が多い。すなわち、唯一の前例は旧ソ連時代のチェルノブイリのみであり、その情報は限られる。一方、 Fukushima は、インターネット環境が発達し情報の共有がリアルタイムで可能であり、誰もが高性能の放射能測定装置を手にすることができ、環境下では、史上初の大規模な原子力事故である。

科学的に未知である事象を理解するために、継続的にデータを収集し記録することが不可欠である。この作業は、いつ、どこに、何が、どれだけあるか（あったか）を記録することにより、我々が調

査の対象とする人工放射性物質の挙動を推測することができる。現在の東日本において、空間放射線量率（ガンマ線）が平常時^⑤よりも高い理由は、福島第一原発事故により環境中に放射性セシウム（ ^{137}Cs 、 ^{134}Cs ）が放出され地表に沈着したことによる^⑥。地表に降下・沈着した放射性セシウムは風雨や河川により移動し集積（堆積）する^⑦。すなわち、広範囲にわたる土壌、河川・湖沼・沿岸域の堆積物、及び動植物を対象とした放射能測定データの記録が、放射性セシウムの挙動を理解する為の第一歩である。

本稿では、福島第一原発から環境中に放出された人工放射性物質が最初に移動を停止する場、すなわち地表、特に土壌に含まれる放射性セシウムの測定につき、その目的と方法を、放射能測定の初心者でもわかりやすいように概説する。

土壌の放射性セシウム測定 の目的

土壌の放射性セシウム測定には、大きく分けて2つの目的がある。1つ目の目的は、単位面積あたりに降下・沈着した放射性セシウムのアクティビティ（放射能）を推測することである。原子力事故後に我々が先ず知りたいことは、どれだけ放射性物質が降り空

次の目的は、土壤に含まれる放射性セシウムの動植物への移行を考察することである。この場合、植物が根を張る深度、または動物が生息する深度を考慮し、土壤表面に沈着した放射性セシウムの90%が表層3cm程度に存在する⁽⁸⁾⁽⁹⁾ことから、適切に土壤採取の深度を決定することが重要である。土壤から動植物への移行係数を求める場合、単位質量あたりの放射能から計算する。放射性セシウムの移動・集積(堆積)過程を調査する場合も同様で、単位質量当たりの放射能を求める。

土壤サンプルの採取法

放射能測定を目的とした土壤のサンプル採取法については、福島第一原発事故直後に文部科学省が詳細な手法を提案した⁽¹⁰⁾。同資料では単位面積当たりに降下・沈着した放射性物質の量を推測することを目的としている。

この場合に留意すべきは、表面に沈着した放射性セシウム全量を得るための深度を考慮することである。上に紹介したように⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、

土壤表面に沈着した放射性セシウムの9割が表層3cm程度に存在し、それより深部には拡散・移流しないものと考えられる。例えば複数の地点にてサンプルを採取し放射能マップを作成する場合、同一条件にて採取しデータを比較する為には、サンプル採取の深度を統一し記録することが重要である。

土壤を採取する際、サンプルが砂質であるか、泥質であるかに留意することにより、土質による放射能測定値のバイアスを回避することができ。例えば、横浜市内において採取したサンプルの測定例では、公園の砂場の砂は放射性セシウム合計(Cs-137、Cs-134)が100 Bq/kgのオーダーであるが、すぐ隣の植え込みの土壤表層では1,000 Bq/kg、更に道路脇に集積した砂塵は10,000 Bq/kgのオーダーであることを筆者は確認している⁽¹¹⁾。つまり、近接する場所でも、サンプルの種類により測定結果は大きく異なる。

これは、セシウムが粘土鉱物や有機物に固定されやすいことに起因する⁽¹²⁾。セシウムは周期表において第一族のアルカリ金属元素であり、カリウムと類似した挙動を示すものと考えられる。土壤中では負電荷を持つ珪酸塩シートにカリウムと同様に固定され、更には表面積が大きい有機物に固定されると考えられる。このため平成23年3月以降の東日本では、有機質の細粒土壤や泥から高い放射性セシウムが検出される傾向にある。

で表す。

放射能測定の留意点

(1) HPGeとNaIの相違点

ガンマ線スペクトロメトリによる放射能測定には、主にヨウ化ナトリウム結晶(NaI)シンチレーション検出器を用いる場合と、高純度ゲルマニウム半導体検出器(HPGe)を用いる場合がある。両者の大きな違いは、検出効率及びガンマ線スペクトルの分解能である(図1)。すなわち比較的安価なNaIシンチレーションは、効率は良いものの分解能が相対的に低く、近接した光子ピークを明瞭に分離することができない。

一方、HPGeは分解能が圧倒的に良好であるものの検出効率が低く、その性能は3x3インチNaI検出器に対する割合(パーセント)で表す。分解能が高いことによりHPGe検出器では近接する光子ピークを明瞭に分離し、より正確な測定値を得ることができ。例えば、サンプル中に自然放射能が含まれ放射性セシウムと共に

一方、HPGeは分解能が圧倒的に良好であるものの検出効率が低く、その性能は3x3インチNaI検出器に対する割合(パーセント)で表す。分解能が高いことによりHPGe検出器では近接する光子ピークを明瞭に分離し、より正確な測定値を得ることができ。例えば、サンプル中に自然放射能が含まれ放射性セシウムと共に

存する場合、NaI検出器であれば放射性セシウムの分離が困難であるものの、HPGe検出器では両者が明確に独立したピークとなる。

このため、NaI検出器によるガンマ線スペクトロメリーにおいては、放射性セシウムが含まれない、又は数10Bq/kg程度以下のサンプルの場合、バックグラウンドに福島第一原発事故以前に採取した放射性セシウムに汚染されていない土壌サンプルを用いる等、自然放射能の影響を考慮するための工夫が必要である。

(2)土壌サンプルの処理と測定

ここでは、野外で採取した土壌サンプルの扱いにつき述べる。土壌表層からサンプルを採取する際、小石が混入する場合があります。放射能の値Bqは質量で標準化する為、表面積が小さく密度が高い石が混入すると、サンプル質量に対する粘土鉱物や有機物量の比率が低くなり、計算されるBq/kg値は低くなる。このため、採取した土壌サンプルは、2mmメッシュのふるいにかけることが望ましい¹³⁾。

土壌は水分を含む。土壌の放射

能測定では、先ず単位質量当たりの値を求めることから、必然的に測定値は含水率に依存する。測定の目的、すなわち水を含む状態で測定値を得るか、又は通常の化学分析のように乾燥状態に標準化して分析するかに依るが、一般的にはオーブン等で乾燥したサンプルを測定することが望ましい。ただし、培土等の製品は乾燥処理の必要が無いと考えられる¹⁴⁾。

土壌を乾燥することによりサンプルの密度が低くなることから、比重が1の計数効率校正用線源とは異なる自己吸収率になる可能性があり、厳密な測定を希望する場合には、これによる測定値の不確実性に留意する必要がある。特にHPGe検出器によるガンマ線スペクトロメリーにて測定する場合には、乾燥土壌サンプルと同等の密度である標準試料を用いた計数効率校正の実施や、土壌標準試料¹⁵⁾を用いて測定値の確認をすることが望ましい。

測定データの取り扱い

放射性セシウムの測定結果は、

通常のガンマ線スペクトロメリーであれば単位質量当たりのベクル値が出力される。測定した土壌サンプルに含まれる放射性セシウムのアクティビティを知ることが目的であれば、測定結果を記録し、放射性セシウムの移動・集積過程や、土壌から動植物への移行係数を考察する。

原子力事故後における放射性セシウムの地表への沈積量を推定する場合、測定結果(Bq/kg)から単位面積当たりのアクティビティ(例えばBq/m²)を計算することが必要である。これを計算する際に必要なパラメーターは、サンプルの密度及び地表からの深度である。放射性セシウムは表層3cm程度の深度に固定されることから¹⁶⁾、地表からのサンプル深度はこの程度で十分である。

土壌は固体(土粒子、粘土鉱物、有機物)、液体(水)、気体(空気)の3相から構成される。上記のように土壌サンプルを乾燥処理した場合、密度は土壌の質量(固体)及び体積(固体+気体)から求める。サンプルの体積は、容積が既

知の容器に土壌サンプルを充填す

ることにより得られる。

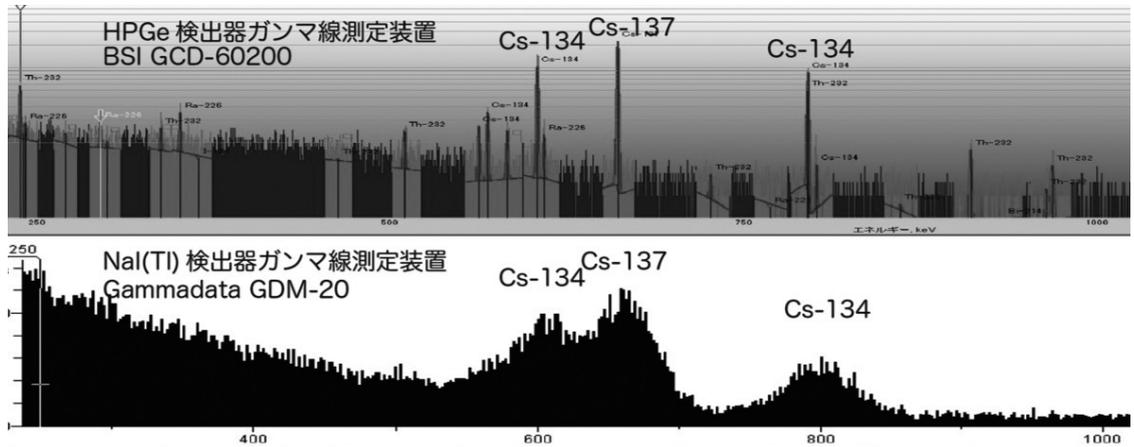
いま、サンプル密度を ρ (g/cm³)、サンプルの深度を d (cm)、放射能測定結果を A_0 (Bq/kg)とする。この場合、単位面積当たりの放射能 A_1 (Bq/m²)は次式から計算される

$$A_1 = 10 \times \rho \times d \times A_0$$

このように計算された単位面積当たりの放射性セシウムの沈着量は、サンプル採取の段階で表面が攪拌されていない土の表面を選択することにより、或る程度は地理的な代表値と仮定することができ。しかしながら、原子力事故後から1年半以上経過した現在、風雨による微細粒子の移動により、局所的に実際の沈着量とは異なる可能性があることに留意する必要がある。

広範囲にわたる土壌のセシウム汚染調査の例としては、農林水産省¹⁷⁾や文部科学省¹⁸⁾による成果が挙げられる。それぞれの目的により土壌サンプル深度等の手法や測定結果表記法は異なるが、大局的には同様の地理的傾向が見られる。

図1 HPGe 検出器と NaI(Tl) 検出器によるガンマ線スペクトル比較



おわりに

福島第一原発事故以降、土壤の放射性セシウム調査例は、公的機関により東北・関東において実施されてきた⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。これに併せ、航空機を使用した空間線量率モニタリング⁽⁶⁾により、東北・関東における放射性セシウムの沈積量分布が明らかになってきた。しかしながら、これらの資料に表現される10,000 Bq/m²以下の放射性セシウム沈積量については、その分布は不明である。

一方、放射性セシウムの地表への沈積は、少量ではあるが神奈川県や静岡県まで確認されている⁽¹⁹⁾。このような地域においても、放射性セシウムの局所的な移動・集積により、例えば道路脇や側溝に放射性セシウムが集積する例が報告されて

いる⁽²⁰⁾。

航空機モニタリングでは把握することが不可能な低レベルの表層放射性汚染分布調査は、シミュレーション結果⁽²¹⁾を検証し福島第一原発事故による放射性汚染の影響を詳細に考察する為にも、今後重要な課題となる。全国における詳細な放射性セシウムの沈着量分布を把握するためには、関連分野の研究者による地道な調査が不可欠である。

福島第一原発事故は、日本の国土をフィールドとした同位体、粒度鉱物、土壌、堆積学、火山学、大気・海洋循環を含めた地球科学、生物学や医学を包含した学際的な研究分野を創出した。その中でも、放射性物質の一次的な挙動を研究对象とする同位体地球化学は、放射性セシウムを同位体トレーサーとした研究分野を開拓する機会を得た。今後数10年間にわたり、学際研究分野として放射性物質の挙動につきモニタリングを継続することが、我々日本人の課題である。

参考資料

- (1)株式会社東京電力プレスリリース「東北地方太平洋沖地震の影響による福島第一原子力発電所の事故に伴う大気および海洋への放射性物質の放出量の推定について」(2012年5月24日)
http://www.tepco.co.jp/cc/press/2012/1204619_1834.html
- (2)例えば厚生労働省「食への放射性物質のはなし」
http://www.mhlw.go.jp/xseisaku/nitsuite/bunya/kenkou_iryuu/shokuhin/houshasei/
- (3) e-Gov法令データ「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則」
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S35/S35F03101000056.html>
- (4) Science 誌「Fukushima Revives The Low-Dose Debate」(2011年5月20日)
<http://www.sciencemag.org/content/332/6032/908.summary>
- (5) 日本地質学会「日本の自然放射線量」
<http://www.geosociety.jp/hazard/content/0058.html>
- (6) 文部科学省「文部科学省(米国エネルギー省との共同を含む)に

- よる航空機モニタリング結果」
<http://radioactivity.mext.go.jp/ja/list/258/list-1.html>
- (7) Science 誌「Tracking the Fukushima Radionuclides」(2012年6月1日)
<http://www.sciencemag.org/content/336/6085/1115.summary>
- (8) Tanaka et al, 2012, Geochemical J., 46, 73. <http://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/abstract/2012e/46010073.html>
- (9) Ohno et al, 2012, Geochemical J., 46, 287. <http://www.terrapub.co.jp/journals/GJ/abstract/4604/46040287.html>
- (10) 文部科学省「土壤濃度マップの作成に向けた土壌試料採取の方法について」(案)
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/017/shiryo/_icsFiles/afiledfile/2011/05/30/1306566_2.pdf
- (11) 圓入、2012、産業と環境
 (4)、59「ヨウ化ナトリウムシンチレーション検出器を用いた土壌の放射性セシウム測定」
 (12) 津村ほか、1984、農技研報 B 36、57「土壤及び土壤・植物系における放射性ストロンチウムとセシウムの挙動に関する研究」
http://www.nias.affrc.go.jp/sinfo/publish/nias/nias_b36_57_113.pdf
- (13) 文部科学省「ゲルマニウム半導体検出器等を用いる機器分析のための試料の前処理法」
http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/main_pdf_series_13.html
- (14) 農林水産省「培土中の放射性セシウム測定のための検査方法」
<http://www.maff.go.jp/j/press/seisan/kankyo/110901.html>
- (15) IAEA 標準試料カタログ
<http://nucleus.iaea.org/rpst/ReferenceProducts/ReferenceMaterials/index.htm>
- (16) 日本分析化学会「放射能分析用土壌認証標準物質」
<http://www.jsac.or.jp/srm/RDJSAc0471.pdf>
- (17) 農林水産省「農地土壌の放射性物質濃度分布図等のデータについて」
<http://www.s.affrc.go.jp/docs/map/240323.htm>
- (18) 文部科学省「東京電力株式会社 福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果について」(2012年3月13日)
http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/distribution_map_around_ushimanPP/5600_201203131000_press.pdf
- (19) たとえば、伊東市「伊東市における放射性物質濃度の測定結果について」
<http://www.city.ito.shizuoka.jp/ct/other000010000/sokutei1.pdf>
- (20) たとえば、横浜市記者発表資料「瀬谷区内の廃水路敷周辺の一部から高い値の放射線量が測定されました」(2012年2月3日)
<http://www.city.yokohama.jp/ne/news/press/201202/images/pbjA4A8.pdf>
- (21) Yasunari, 2012, PNAS, 108, 19530. <http://www.pnas.org/content/108/49/19530.full>