

## 福島原発事故による放射能汚染の広がり： 五年目の報告 (減衰するセシウム 134)

### Environmental contamination by radioactive materials originating from the Fukushima nuclear accident: the fifth-year report (decay of caesium 134)

大井万紀人  
Makito Oi

専修大学自然科学研究所

Institute of Natural Sciences, Senshu University, Tokyo

福島第一原子力発電所が事故を起こし、大量の（人工性）放射能物質を自然環境にばらまいてから5年が経過した。この間に行った放射能汚染の広がりについての研究では、東京の放射能汚染および東京圏のホットスポットの存在の確認 [1, 2]、内部被曝と半減期の関係の考察 [2]、福島県に伝わる伝統工芸「相馬焼」に用いる原料粘土等の汚染度合いの調査（その結果、相馬焼の伝統は続けられることになった） [3]、放射性セシウムによる汚染境界の調査 [4] など、様々な事柄について研究を行ってきた。今年度の研究で特に顕著に見えたのはセシウム 134 の減衰である。セシウム 134 の半減期はおよそ2年であり、事故直後の汚染レベルと比較すると、5年経った現在は  $2^{-5/2}$ 、すなわち約18%にまでその量は減少した。この減少の意味について、この小稿では議論してみたいと思う。

#### I. はじめに

2011年3月に東京電力福島第一原子力発電所から漏れ出した放射性物質のうち、環境を広域に渡って汚染した放射性核種としてセシウム 134, 137 があつたことはよく知られている。セシウム 134 の半減期は約2年、セシウム 137 の半減期は約30年である。原発事故によって漏れ出した量（事故直後の原子の数）を  $N_0$  個、そのうち時間  $t$  になっても残存している量を  $N(t)$  個とする。  $N(t)/N_0$  の比を計算すると、事故から5年経過した現在、セシウム 134 に関しては  $2^{-5/2} \simeq 0.176$ 、セシウム 137 に関しては  $2^{-5/30} \simeq 0.891$  である。すなわち、半減期の長いセシウム 137 は汚染当初の約9割が依然として環境に残っているのに対し、半減期の短いセシウム 134 の方は、汚染当初のわずか2割弱しか残っていないということになる。放射線強度に関しては、セシウム 134 とセシウム 137 を同時に考量する必要があるが、最初の論文で議論したように、その現象論的な式として

$$P(t) = \frac{1}{3.7} 2^{-t/30} + \frac{2.7}{3.7} 2^{-t/2} \quad (1)$$

が知られている [1]。ただし、時間  $t$  の単位は年である。この式を用いれば、空間線量の減少率を推測することができる。5年後の値を計算すると  $P(5) = (0.891 + 0.176 \times 2.7)/3.7 \sim 0.37$  となつて、おおよそ事故当初の37%にまで減少しているはずである。この計算に基づけば、原発事故の起きた2011年には、0.18-0.20  $\mu$  Sv/h ほどあつた東京都心部の地表面線量 [1] は、0.06-0.07  $\mu$  Sv/h 程度にまで減少していることになる。実際に今測定してみると平均で0.06  $\mu$  Sv/h という値を示す。理論で予想していた通りに、東京の空間線量は減じたといえる。

汚染地域の空間線量が低下するのはよいことではあるが、原発事故規模の調査に関してはセシウム 134 の減少は不利な要素である。ガンマ線スペクトルからセシウム 134 のピークが消えて見えなくなってくると、これまでに測定し蓄積してきたデータとの整合性、特に放射能汚染レベルの整合性がとれなくなってくる。たとえば、事故直後に測定した地点 A での土壌が 1000Bq/kg の放射能を示したデータと、今年測定した地点 B の土壌が 1000Bq/kg の結果を示したデータを、同時に直接利用した汚染地図は作れない。もちろん、再度測定すれば問題ないわけだが、関東甲信越や東日本という広域の調査を少人数（実質一人）で目指す以上、機動的な検体採集と測定は困難で、どうしても過去のデータを利用し、減少分を理論的に補正する必要がある。

この論文では、減衰してしまったセシウム 134 の放射能強度を補正する方法を考察し、いままでのデータと整合性を保ちつつ、放射能測定を引き続き続けて、2011 年の原発事故による東京圏の放射能汚染地図を拡大する方法について議論したい。

## II. 補正理論

放射性物質の半減期を表す基本的な式は

$$N(t) = N_0 2^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

である。 $\tau$  が半減期を表す。時間  $t$  および  $\tau$  の単位は任意でよいが、ここでは便宜的に「年」にとる。セシウム 134 および 137 の半減期をそれぞれ  $\tau_{137} = 30$ ,  $\tau_{134} = 2$  と表すことにする。放射能強度  $B(t)$  は、単位時間に発せられる放射線の数に対応する。放射性セシウム同位体は  $\beta$  崩壊およびそれに引き続く電磁崩壊によって放射線（ $\beta$  線と  $\gamma$  線）を出す。  $\gamma$  線に関しては、一回の  $\beta$  崩壊に対し  $\gamma$  線一個の割合である。これは、 $-dN(t)/dt$  で表す事ができるから、

$$B(t) = \ln 2 N_0 \tau^{-1} 2^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

とかける。セシウム 134 と 137 の両方を考慮した放射能強度は両者の和によって

$$\begin{aligned} B_{\text{total}}(t) &= B_{137}(t) + B_{134}(t) \\ &= \ln 2 \left( \frac{N_0(137)}{\tau_{137}} 2^{-\frac{t}{\tau_{137}}} + \frac{N_0(134)}{\tau_{134}} 2^{-\frac{t}{\tau_{134}}} \right) \\ &= \ln 2 \left( \frac{N_0(137)}{30} 2^{-\frac{t}{30}} + \frac{N_0(134)}{2} 2^{-\frac{t}{2}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

と表す事ができる。事故当初の放射能強度は  $t = 0$  を代入することにより、

$$\begin{aligned} B_{\text{total}}(0) &= \ln 2 \left( \frac{N_0(137)}{\tau_{137}} + \frac{N_0(134)}{\tau_{134}} \right) \\ &= \ln 2 \left( \frac{N_0(137)}{30} + \frac{N_0(134)}{2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

である。ここでセシウム 134 と 137 の数の比  $x$  を導入する。

$$x = \frac{N_0(134)}{N_0(137)}. \quad (6)$$

セシウム134は、原子炉中の核分裂に特有の核種であり、ウラン235の核分裂生成物ゼノン133が、ベータ崩壊と中性子捕獲を1回ずつ経過することによって生成される。すなわち、原子炉の運転時間が長く、核燃料の再装填までの時間が長いほど、その量は増加する。福島原発の場合は、核燃料の交換直前の事故だったこともあり、 $x \simeq 1$ と考えられている。上式を $x$ を用いて書き直し、 $N_0(137)$ を消去すると、 $B_{\text{total}}(t)$ を次のように書くことができる。

$$B_{\text{total}}(t) = \frac{2^{-t/30}/30 + x \cdot 2^{-t/2}/2}{1/30 + x/2} B_{\text{total}}(0). \quad (7)$$

### III. 補正公式の適用例

この補正式を用いて、先ほどの例を考えてみる。現在1000Bq/kgの放射能レベルを示す土壤が、事故直後の5年前には、どの程度の放射能レベルだったか、補正式を用いて推定してみる。 $t = 5$ ,  $x = 1$  および  $B_{\text{total}}(5) = 1000$  を代入すると、

$$\begin{aligned} B_{\text{total}}(0) &= \frac{8/15}{0.891/30 + 0.176/2} \times 1000 \\ &= \frac{8}{15} \times \frac{1}{0.117} * 1000 = 4.558 \times 1000 \\ &\simeq 4558.4 \end{aligned} \quad (8)$$

となる。つまり、現在1000Bq/kgの結果が出る場所は、事故直後は4倍以上の放射能汚染があったということになる。

この補正公式が信頼できるかどうかは、実験によって確認する必要がある。残念ながら、今回の論文の締め切りまでにこの検証実験を間に合わせることができなかったので、次回に報告したいと思う。

### IV. 2015年に測定した土壤が示す $\gamma$ 線スペクトルの例：那須塩原市

那須塩原市のハロープラザ（市立図書館を中心とする公共施設）付近の山林で採取された土壤を、2016年2月に測定したので、その $\gamma$ 線スペクトルをここでは紹介したい（図1）。

測定は専修大学が所有するBerthold LB2045  $\gamma$ 線スペクトロメータを用い、4.5時間ほどかけておこなった。測定の設定の詳細については、前回の報告書を参考にさせていただきたい[4]。ただし、ひとつだけ、ここで特記しておきたいことがある。それは、測定時間を4.5時間にした理由である。この検体の最初の測定では、前回までの測定基準に合わせて18時間の測定時間を設定したが、 $\gamma$ 線の強度が強かったせいか(12,115Bq/kg)、早い段階で測定値が収束してしまった。この状態で長時間測定を継続すると、この装置は動作が不安定になるようである。スペクトルの形が歪み、不自然な形状となったため、そのデータは棄却した。そこで、計測精度を確保しつつ、装置が不安定になる前に測定時間を切り上げることにした。モニターをみながら、放射能強度値が十分収束し、スペクトルの形状が変わらなくなった時点で測定を終了した。それが4.5時間という測定時間を選んだ理由である。

那須塩原は、日光と共にホットスポットであることが知られている。以前（2012年）に法学部の学生の持ってきてくれた栃木県の土壤検体を測定したことがあるが、その結果是那須塩原駅周辺

が2,973Bq/kg、さくら市周辺が1,408Bq/kg、矢板駅周辺が1,735Bq/kg という結果となっている。今回の測定は奥塩原温泉付近のものが892Bq/kg、そして図1に掲示した那須塩原市の図書館（ハロープラザ）周辺のが12,115Bq/kgという桁違いに強い放射能を示した。ハロープラザの値が塩原周辺の平均値とは考えにくく、おそらく局地的なホットスポットになっているか、あるいは除染がいまだにされていないのであろうと予想される。（この地域の詳しい調査は、専修大学商学部3年生の根元君の協力を得て、これから実施する予定である。）いずれにせよ、栃木県的那須塩原周辺の汚染は見逃せないレベルであり、現在も強い汚染がある場所が点在している可能性が高い。

測定されたハロープラザの値を補正し、原発事故直後の汚染レベルを推定すると12,115×4.558～55,220Bq/kgとなる。この補正が正しいとすると、この場所はこの5年間の研究においてもっとも汚染の高い地点である。（ちなみに、福島県相馬市の相馬焼宗家である田代家の庭土は2013年の測定でも2020Bq/kgであった[3]。)

2012年に測定した那須塩原駅周辺の値が2,973Bq/kgだったので、これを今回の奥塩原温泉の値892Bq/kgと比較してみよう。これら2つの値が測定時の付近の平均値であると仮定すれば、その比は、上の補正公式で得た補正係数に近い値となるはずである。計算してみると、 $2973/892=3.33..$ となり、おおよそ補正係数4.558に似たような数字となる。もう少し時間に関する扱いを丁寧に見てみると、 $2973/892$ と放射能強度の比は $B_{total}(1)/B_{total}(5)$ に相当しているから、補正公式を用いて

$$\frac{B_{total}(1)}{B_{total}(5)} = \frac{2^{-1/30}/30 + 2^{-1/2}/2}{2^{-5/30}/30 + 2^{-5/2}/2} = \frac{0.978/30 + 0.707/2}{0.891/30 + 0.176/2} \sim 3.28 \quad (9)$$

を得る。もちろん、この比は異なる場所の検体を比べたものだから、かなり乱暴なものである。とはいえ、係数値の検証の準備くらいにはなるであろう。

総セシウム量(Cs134+Cs137,450keV-850keV) : 12115 Bq/Kg<sup>※</sup> 誤差±11.38 Bq/Kg 検出限界(MDA) : 7.438Bq/Kg

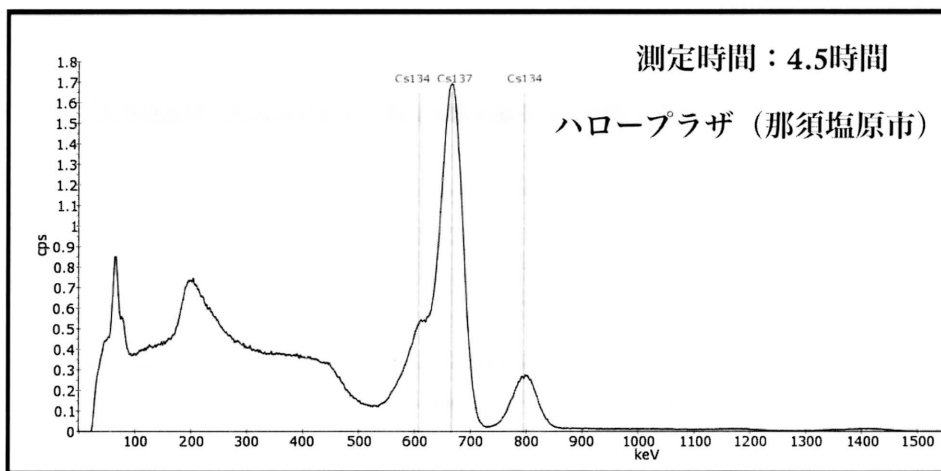


FIG. 1: ハロープラザ（栃木県那須塩原市）周辺の山林で採取した土壌のγ線スペクトル。検体採集：2016年1月、検体測定:2016年2月

図1の特徴を見て見よう。まずは、セシウム137に相当する662keVのγ線ピークが顕著である。一方、セシウム134に相当するのが、606keVと796keVのところにあるγ線ピークである。606keV

のピークが消えかかっているのが、2015年度に測定したスペクトルの特徴であり、この傾向はさらに強まって行く。796keVのピークは依然として明瞭で、まだしばらくは観測可能のように思える。500keV付近に放射性セシウムの $\gamma$ 線由来のものと思われるコンプトン散乱の端(コンプトンエッジ)が確認できる。また、200keV付近のピークは後方散乱ピークと考えてよいだろう。1400keV付近に自然放射性物質のカリウム40の微小なピークがわずかに確認できる。また、ピークが目立たないエネルギー領域をみるとほぼ零値に見えるので、バックグラウンドの強度レベルは、この検体の $\gamma$ 線の強度に比べて、「無視できるほど弱い」と見なせる。

このように、バックグラウンドや天然核種のピークが無視できるような、強い汚染地帯における検体の測定は、教科書に出てくるような典型的な $\gamma$ 線スペクトルを呈示してくれるため、その解釈に誤解の余地はない。問題となるのは、汚染の程度が低く、個々のスペクトルの高さがバックグラウンドと同じ程度の場合である[4]。図2を見てみよう。

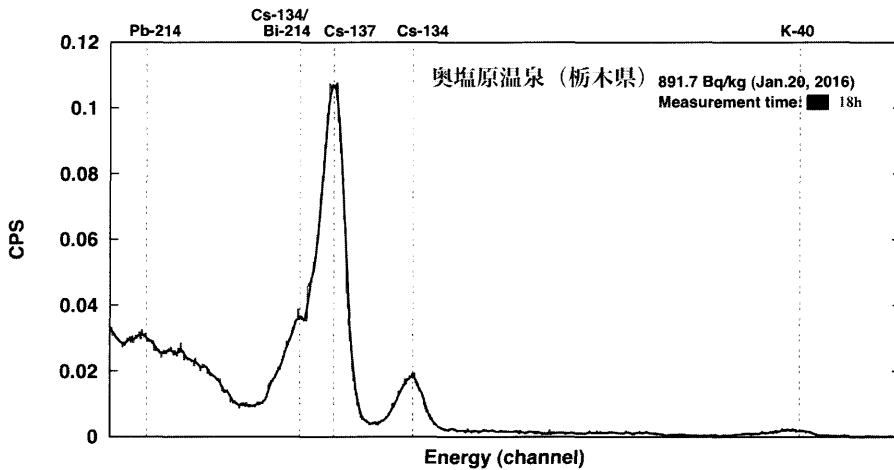


FIG. 2: 奥塩原温泉(栃木県)周辺の山林で採取した土壌の $\gamma$ 線スペクトル。検体採集：2016年1月、検体測定：2016年2月

図2に表示したスペクトルは、奥塩原温泉で採取した土壌検体の測定結果である。全体の放射能強度は891.7 Bq/kgである。補正公式を使って、事故当初の値を推定すると4064 Bq/kgとなる。測定時間は標準設定の18時間で行った。セシウム137の660keVのピーク、およびセシウム134の796keVのピークは明瞭である。一方で、606keVのピークがあるはずの場所にも小さなピーク構造が見える。しかし、352keVの場所に天然放射性物質である鉛214(Pb-214)のピークやカリウム40の1400keVのピークが確認できることに注意しなくてはならない。というのは、天然放射性物質のビスマス214(Bi-214)の放出する609keVの $\gamma$ 線の寄与が、セシウム134の606keVのピークと競合し始めているからだ。Pb-214もBi-214もウラン235の崩壊系列であり、おおそ同じ程度の自然放射能の寄与があると仮定すれば、606keV周辺においておおそ0.01CPS程度の減算が必要となろう。とはいえ、この検体の放射能強度はまだ十分強いので、Bi-214の補正を行ってもそれほど大きな修正はなされないだろう。

このような補正は、もっと汚染が軽微な「汚染境界」付近で重要になってくる。606keVのピークが消滅しつつあることによって、このピークから汚染の有無を判定することは困難となってきた。

しかし、セシウム 134 のもう一つのピーク (796keV) がまだよく見えるので、このピークが見える限り、セシウム汚染の境界の研究は可能である。このピークがバックグラウンドと同じ程度にまで減少してしまうと、そこはもはや汚染境界の外と認識されてしまい、正確な地図をつくることは難しくなってくるだろう。例えば、昨年の研究で、西側の汚染境界線は、名古屋から浜松の付近にあると推定した [4] わけだが、名古屋周辺は天然放射性物質が多くバックグラウンドが高めになっている。減衰するセシウム 134 の 796keV のピークは、この付近の境界の特定を困難にってしまったと思われる。

## V. まとめ

2015 年度の測定で顕著に見られるようになったセシウム 134 の減衰について考察し、事故直後の汚染レベルを推定し、過去のデータと比較できるように補正公式を導出した。この公式の信頼性については、これから検証して行く予定である。また、商学部の学生の協力を得て、栃木県那須塩原市の土壌汚染について簡単な考察を行う事ができ、汚染レベルが高い場所が残っていることがわかった。どうやら、除染の有無によって、大きな差が出ているようであるが、この付近の詳細な調査を近々行う計画である。

## VI. 謝辞

この研究は、専修大学の個人研究費により支援されたものである。

- 
- [1] 大井万紀人、水崎高浩、他、「福島原発事故による放射能汚染の広がり：一年目の報告」、専修自然科学紀要 No.43, pp41-60 (2012).
  - [2] 大井万紀人、「福島原発事故による放射能汚染の広がり：二年目の報告および内部被曝の影響について」、専修自然科学紀要 No.44, pp1-20 (2013).
  - [3] 水上和則、大井万紀人、「福島原発事故による放射能汚染の広がり：三年目の報告（相馬駒焼原料汚染についての報告）」、専修自然科学紀要 No.45, pp1-20 (2014).
  - [4] 大井万紀人、「福島原発事故による放射能汚染の広がり：四年目の報告（放射性セシウムの汚染境界）」、専修自然科学紀要 No.46, pp15-30 (2015).