

# 福島第一原発から飛散した放射性セシウムの土壌への浸透

山 本 広 志

(地域教育文化学部)

山形大学紀要（教育科学）第15巻第4号別刷

平成25年（2013）2月

## 福島第一原発から飛散した放射性セシウムの土壌への浸透

山本 広志

地域教育文化学部

(平成24年10月1日受理)

### 要 旨

福島第一原発から北方におよそ100km離れた宮城県仙台市内の住宅地3地点で福島第一原発事故の1年半後に土壌を採取し放射性セシウムの深さ方向の分布を測定した。3地点のうち周囲から雨水の集まる1地点は地表から深さ1cmまでの放射性セシウムが $3100\text{Bq/kg}$ (乾土)あり、深さ9cmまで汚染されていた。残り2地点は地表から深さ1cmまでの放射性セシウムが $590\sim 680\text{Bq/kg}$ (乾土)で、汚染は深さ3cmまでだった。周囲から雨水が集まる地点を除外して単位面積当たりの放射性セシウムを求めたところ、 $1.4\times 10^4\text{Bq/m}^2$ であることが分かった。また、周囲から雨水が集まる地点を除外した残り2地点は、チェルノブイリ原発事故後に提案された放射性セシウムの土壌浸透モデルとよく一致した。このモデル計算によって、放射性セシウムの深さ方向の分布を30年後まで予測した。

### § 1. 序

2011年3月11日の東日本大震災をきっかけとして福島第一原発事故が発生し、飛散した放射性セシウムが広範囲の土壌を汚染した。大気中に放出された放射能の総量は $10^{17}\text{Bq}$ を超え、このうちセシウム137が $6\times 10^{15}\text{Bq}$ と推計されている。<sup>1)</sup> 土壌中の放射性セシウムは $\gamma$ 線を出して外部被曝の原因となる。また、農作物に移行して食事から人体に入ったり、土ほこりに混じって再飛散し呼吸によって人体に入り、細胞の至近距離から $\gamma$ 線や $\beta$ 線を出して内部被曝を引き起こす。セシウムと同様、大量に飛散したヨウ素131の物理的半減期が8.04日なのに対し、セシウム134の物理的半減期は2.07年、セシウム137は30.1年と長く、土壌中に長期間残存する。

従って除染によって土壌中の放射性セシウムを除去することが望ましいが、汚染された面積があまりに広大なために除染には莫大な労力と費用と時間を要する。そのため学校や住宅地や農地等人体に影響を与える度合いの高い場所を優先して、なるべく効率良く除染するという方法を採らざるを得ない。

椿は土壌を構成する粒子を粒径別に分離してから洗浄する実験によって、粒径が $25\mu\text{m}$ 以下の粒子に放射性セシウムが吸着していると結論づけた。<sup>2)</sup> 粒径の小さい粒子のみを土

壤中から効率良く除去する技術が実用化できれば、表土を丸ごと除去するよりも格段に廃棄物の量を減らすことができる。

表土を丸ごと除去するにせよ粒径で選別するにせよ、いずれにしても表面からどの程度の深さまで汚染されているかという情報が極めて重要であることに変わりはない。放射性セシウムの土壌への浸透は時間と共に進むため、一律に深さ何cmまでを除染対象にすべしとは言えない。1986年のチェルノブイリ原発事故でも同じ問題に直面し、多数の測定が行われた。<sup>3)他多数</sup> その結果、チェルノブイリ原発事故直後は地表にあった放射性セシウムが時間と共に地下に浸透して行く様子が定量的に明らかになった。そしてこれらの測定結果を基にして、放射性セシウムの土壌浸透モデルがいくつか提案された。<sup>4)</sup>

福島第一原発事故については、Yamaguchiらが事故から1ヶ月近く経った2011年4月7日に茨城県つくば市で土壌を採取測定し、深さ方向の分布を明らかにした。その結果、セシウム134、セシウム137、ヨウ素131の9割が地表から3cm以内にとどまっていることが分かった。<sup>5)</sup> また、Tanakaらは2011年4月13日に福島県内の3地点で土壌を採取し、同様の測定結果を得た。<sup>6)</sup> 長坂らは事故3ヶ月目の2011年6月に福島県飯舘村で事故後放置されていた水田と畑から土壌を採取測定し、水田では放射性セシウムの9割が地表から2cm以内に、畑では放射性セシウムの8割が地表から2cm以内にとどまっていることを明らかにした。<sup>7)</sup>

しかし、福島第一原発事故に起因する放射性セシウムの土壌への浸透に関する報告はまだまだ少ない。今後数十年に渡って継続した観測が望まれる。

## § 2. 研究目的および方法

### 2. 1 目的

序で述べたように、放射性セシウムが土壌に浸透している実際の深さを知らなければ適切な土壌除染はできない。そこで本研究は土壌除染に役立てるため、放射性セシウムが土壌にどの程度の深さまで浸透しているか調べることを目的とする。

### 2. 2 方法

福島第一原発から北方におよそ100km離れた宮城県仙台市内の住宅地で東日本大震災以降一度も掘り返されていない3地点を選び、土を採取した。3地点の特徴は表1の通りだった。

土の採取は深さ毎に分けて行い、表面から深さ10cmまで1cm刻みで1地点につき10層の試料を採取した。土の採取前に植物の地上部分を切り取り、枯れ草等も除去した。植物の根は採取した土を十分に乾燥させてから、小石等と共に取り除いた。試料の放射性セシ

表1 土壌を採取した各地点の特徴

| 地点名 | 特徴  |
|-----|---|
| A地点 | 裸地。人が通るため草は少ない。黒土。                          |
| B地点 | 草地。黒土。                                      |
| C地点 | 周囲と比較して少し低く、周囲から雨水が集まり雨の度に水溜まりになる。草は少ない。黒土。 |

ウムはベルトールド社LB200によって測定した。カリウム40の影響を除くため、汚染されていない土壌をバックグラウンドとして差し引いた。

以上の試料採取と測定を2012年8月から9月にかけて行った。

### § 3. 結果及び検討

測定結果を図1に示す。最大値はC地点の最上層（深さ0～1cm）で、3100Bq/kgだった。それに較べてA地点、B地点の最上層は590～680Bq/kgで、C地点だけが突出して高い値だった。これはC地点の特徴に原因があると考えられる。表1に示したように、C地点は周囲よりも少し低いため周囲の雨水が集まって、雨が降るたびに水溜まりになる。そのため周囲の放射性セシウムが雨水と共に流れ込み、濃度が増したと考えられる。C地点はいわゆるマイクロホットスポットに相当する。

どの地点も最上層のセシウム濃度が最も高く、深さが増すに従って濃度が下がる。A地点、B地点が深さと共に単調に減少して行くのに対し、C地点は深さ3cmから8cmにかけて放射性セシウムの濃度があまり変化せず、平坦な形を示している。C地点は周囲から雨水が集まりしばしば水溜まりとなって他の地点よりも多量の雨水が地下に浸透して行くことから、そのことによって放射性セシウムが他の地点よりも深くまで浸透した結果と考えられる。

A地点とB地点の結果はあまり差がない。B地点は裸地で人が通るため草は少ない。福島第一原発事故当時、放射性セシウムは直接地面に到達したと考えられる。A地点は陽当たりの良い草のだが、B地点の値と比較して草の影響は認められなかった。微粒子のまま、あるいは雨に含まれて降下した放射性セシウムが当初は草に付着したとしても、その後の雨で洗い流されて結局は土壌に到達し、土壌汚染の度合いに違いは現れなかったと考えられる。

C地点は周囲から放射性セシウムが流入しているため除外し、A地点、B地点の深さ3cmまでの放射性セシウム量から単位面積当たりの放射性セシウムを求める。乾燥させた土壌試料を測定用容器に詰めたところ、比重は1.3あった。乾燥させて詰めた土壌試料が採取前と同体積であるとして計算すると、単位面積当たりの放射性セシウムは $1.4 \times 10^4 \text{Bq/m}^2$ となる。文部科学省による土壌調査<sup>8)</sup>では深さ方向の分布が調べられていないものの、仙台市内の6地点で、単位面積当たりのセシウム134は $10 \sim 30 \text{kBq/m}^2$ が2地点と $10 \text{kBq/m}^2$ 以下が4地点、セシウム137も同じく $10 \sim 30 \text{kBq/m}^2$ が2地点と $10 \text{kBq/m}^2$ 以下が4地点となっており、本研究の測定結果と矛盾しない。

また、土壌試料採取前に各地点の地上1mにおける $\gamma$ 線量を測定したところ、A地点、B地点が $0.06 \mu \text{Sv/h}$ 、C地点が $0.08 \mu \text{Sv/h}$ であった。放射性セシウムが $1.4 \times 10^4 \text{Bq/m}^2$ 分布している場合の $\gamma$ 線当量を物理的に概算してみる。福島第一原発事故当時のセシウム134とセシウム137の比率を1:1とすると、セシウム134の半減期が2.07年、セシウム137の半減期が30.1年と違いがあるため、本研究を行った1.5年経過後には0.63:1の比率になる。この比率で放出される $\gamma$ 線の平均エネルギーは崩壊1回あたり $0.92 \text{MeV} = 1.5 \times 10^{-13} \text{J}$ である。従って $1.4 \times 10^4 \text{Bq/m}^2$ の地表から放出される $\gamma$ 線のエネルギーは、 $7.7 \mu \text{J/h} \cdot \text{m}^2$ となる。ここで $\gamma$ 線の吸収体として1kgの水の立方体を想定する。水は密度が1であるから

立方体の1辺は10cmになる。10cmの水に吸収される $\gamma$ 線が50%として、 $0.038 \mu\text{Gy/h} = 0.038 \mu\text{Sv/h}$ という結果が得られた。一方、経験則  $[\text{kBq/m}^3] = 282 \times [\mu\text{Sv/h}]$ <sup>9)</sup> から概算してみると、 $0.051 \mu\text{Sv/h}$ となる。物理的概算も経験則からの概算も、実測値と大きな乖離はなかった。なお、仙台市の自然放射線量は福島第一原発事故前に $0.03 \mu\text{Sv/h}$ であったと報告されている。<sup>10)</sup>

さて、除染に役立てる観点で図1を見ると、A地点、B地点は放射性セシウムの汚染が概ね地表から3cm以内にとどまっていることが分かる。深さ方向の分布はチェルノブイリ原発事故の経験から得られた浸透モデルに合致する。ここでは3cmの表土を処理すれば除染は完了する。しかし雨水の集まるC地点は9cmまで放射性セシウムが浸透していて、しかも深さ方向の分布がモデルに合致しない。このことから、地形の影響でモデルによる予測が当たらない場所のあることが分かる。実際に除染する場所ごとに土壤の測定をすることが望ましい。

モデルが合致する場所では、時間と共に放射性セシウムが深く浸透して行くことが定量的に予測されている。A地点、B地点の浸透がチェルノブイリ原発事故の場合と同様に推移すると仮定し、モデル<sup>11)</sup>の式

$$C = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \left( e^{-\frac{(x-vt)^2}{4Dt}} + e^{-\frac{(x+vt)^2}{4Dt}} \right)$$

を使って今後の浸透を予測した結果を図2に示す。式中の $t$ は時間、 $x$ は深さ、 $M$ 、 $D$ 、 $v$ は定数を表す。放射性セシウムが崩壊して減少する効果も加味した。この結果からは、除染をするのであれば早い方が効率的であるということが一見して分かる。時間と共に放射性セシウムが深く浸透し、処理しなければならない表土の厚みが増す。福島の除染が遅れているのが気掛かりである。一方で時間と共に深く浸透する結果、地表の放射性セシウムは減少して行き、福島第一原発事故後5年で本研究の測定時（事故後1.5年）の1/4に、

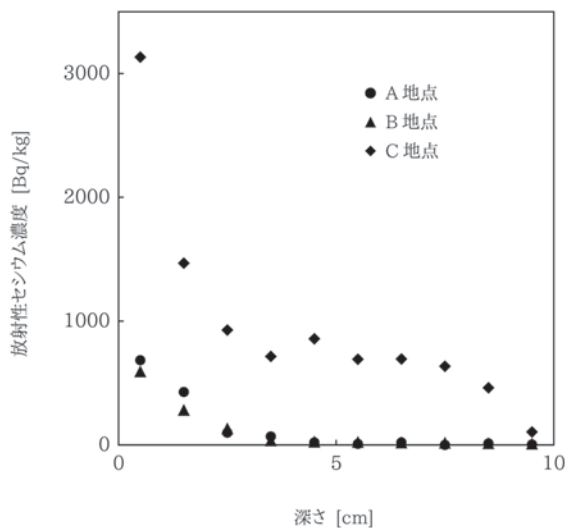
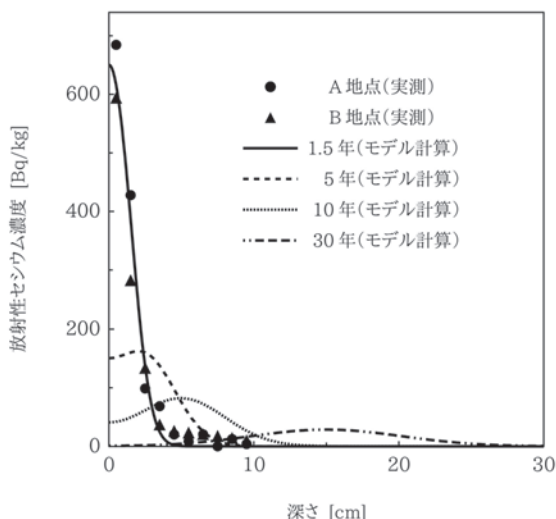


図1 放射性セシウム濃度の測定結果



モデル計算は  $C = \frac{M}{2\sqrt{\pi Dt}} \left( e^{-\frac{x-\nu t}{2Dt}} + e^{-\frac{x+\nu t}{2Dt}} \right)$  で、 $M=1500$ 、 $D=0.45$ 、 $\nu=0.50$  <sup>1)</sup>

図2 放射性セシウム濃度の将来予測

10年で1/16に、30年で1/740になる。つまり除染せずに放置したとしても空間放射線量は減少し、外部被曝の影響は小さくなると予想される。しかしこれはあくまでも土を掘り返さない場合の外部被曝の話であって農地には全く当てはまらない。当たり前のことであるがYamaguchiらは農地を耕せば放射性セシウムが均一に混ざることを実測で示した。<sup>5)</sup>放射性セシウムは農作物に移行して内部被曝の原因となる他、繰り返し耕すことによって常に地表に放射性セシウムが戻されて再飛散の危険が消えない。掘り返さない土地であっても植物が根から放射性セシウムを吸収する効果はまた別問題である。

図2で、本研究の測定時には地表から1 cm以内の最上層の放射性セシウム濃度が最も高かったが、5年で深さ2 cmがピークに、10年で深さ5 cmがピークに、30年では深さ15 cmがピークになり、ゆっくりと深く浸透すると予測された。時間と共にピークの形はなだらかになり、深さ方向に汚染範囲が広がって行く。物理的半減期が30.1年のセシウム137は30年後にもまだ半分が残っている。

#### § 4. まとめ

福島第一原発から北方におよそ100km離れた仙台市内の住宅地3地点で福島第一原発事故の1年半後に土壌を採取し放射性セシウム濃度を測定したところ、次のことが分かった。

- (1) 2地点は放射性セシウムの汚染が深さ3 cmまでで、表面1 cmの濃度は590～680 Bq/kg (乾土) だった。放射性セシウム濃度は深さと共に単調に減少する。
- (2) この2地点の測定結果から計算した単位面積当たりの汚染は、 $1.4 \times 10^4$  Bq/m<sup>2</sup>だった。

- (3) この2地点はチェルノブイリ原発事故後に提案された放射性セシウムの浸透モデルに合致した。
- (4) 雨水の集まる1地点は放射性セシウムの汚染が深さ9 cmに達し、表面1 cmの濃度が3100Bq/kg(乾土)だった。放射性セシウム濃度は深さ3 cmまでは単調に減少するが、深さ3 cmから8 cmにかけてはあまり変化せず平坦な形を示した。
- (5) 雨水の集まる1地点はチェルノブイリ原発事故後に提案された放射性セシウムの浸透モデルに合致しなかった。

## 謝 辞

英文題名および英文要旨についての山口常夫教授の有益な助言に感謝する。本研究は筆者の私費および山形大学教育研究基盤校費によって行われた。

## 文 献

- 1) 原子力災害対策本部「原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－」(2011).
- 2) 椿淳一郎「放射能汚染土壌の大量その場除染技術の開発」*ケミカルエンジニアリング*, 57(6), 443-446 (2012).
- 3) B.S.Priester他「Migration of radionuclides in soil and their transfer to plants within the zone of the Chernobyl nuclear-power-plant accident」*Soviet soil science*, 23 (2), 76-86 (1991).
- 4) J.T.Smith, D.G.Elder 「A comparison of models for characterizing the distribution of radionuclides with depth in soils」*European Journal of Soil Science*, 50, 295-307 (1999).
- 5) N.Yamaguchi他「Radiocesium and radioiodine in soil particles agitated by agricultural practices:Field observation after the Fukushima nuclear accident」*Science of the Total Environment*, 425, 128-134 (2012).
- 6) Kazuya Tanaka他「Vertical profiles of Iodine-131 and Cesium-137 in soils in Fukushima Prefecture related to the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident」*Geochemical journal*, 46 (1), 73-76 (2012).
- 7) 長坂善禎、小林恭「農業機械を利用した表土除去技術」*農林水産技術研究ジャーナル*, 35 (3), 52-54 (2012).
- 8) 文部科学省「文部科学省による放射線量等分布マップ(放射性セシウムの土壌濃度マップ)の作成について」2011年8月30日報道発表
- 9) 河田東海夫「土壌汚染問題とその対応」第16回原子力委員会資料 (2011).
- 10) 湊進「日本における地表 $\gamma$ 線の線量率分布」*Journal of Geography*, 115(1), 87-95 (2006).
- 11) A.V.Kudelsky他「Mobility of Chernobyl-derived  $^{137}\text{Cs}$  in a peatbog system within the catchment of the Pripyat River, Belarus」*Science of the total environment*, 188(2), 101-113 (1996).

## Summary

### YAMAMOTO Hiroshi : Depth distribution of radioactive cesium in the soil from Fukushima Accident

Radioactive cesium density in the soil of three areas was measured in Sendai, 100km north of Fukushima Daiichi nuclear power plant, one year and a half after the accident. At the first measured area, lower-lying ground with rainwater gathering, the radioactive cesium density is 3100Bq/kg (dry soil) within 1cm of the surface. And the soil is contaminated in the upper 9cm of the surface. At the other two measured areas, radioactive cesium density is 590-680Bq/kg (dry soil) with 0-1 cm in depth. And the soil is contaminated within 3cm in depth. The radioactive cesium density per area is  $1.4 \times 10^4$  Bq/m<sup>2</sup> in the latter two areas with no rainwater gathering. The results of these two areas are consistent with a radioactive cesium penetration into the soil modeling after the Chernobyl nuclear power plant accident. The future radioactive cesium density regarding the depth in the soil are calculated with this model for 30 years afterwards.