

# 1. 基本情報

区分	農地	担当者名	井上隆信、横田久里子
タイトル (英文)	Factors affecting vertical distribution of Fukushima accident-derived radiocesium in soil under different land-use conditions.		
タイトル (和文)	異なる土地利用条件下の土壌において福島原発事故から派生した放射性セシウムの垂直分布に影響を与える要因		
キーワード	Radiocesium ( <sup>137</sup> Cs and <sup>134</sup> Cs); Fukushima Dai-ichi nuclear power plant; Vertical distribution; Soil physicochemical properties; Soil organic matter; Land-use type		
著者	Koarashi J.; Atarashi-Andoh M.; Matsunaga T.; Sato T.; Nagao S.; Nagai H.		
文献	Science of The Total Environment, 431, p.392-401, 2012		

## (1) 対象地域

2 km×2 kmの研究対象地域は福島市の南西部 (37.71°N, 140.36°E)、福島第一原発の北西70 kmまでに位置する。福島市には阿武隈高地と奥羽山脈の間の南と北に平野が位置する。

この地域は、小さいけれども農耕地、草地、森林のすべての土地利用を含んでいる。この地域内から放射性セシウムの調査のために15ヶ所を選んだ (Fig. 1、Table 1)。15のうち6ヶ所は休閑地やリンゴ園を含む農耕地であった。CP-1\*、CP-3\*、CP-4\*の土壌は事故後有意に深く耕されていた (\*土壌かく乱を示す)。4ヶ所は草地で、そのうちの1つは公共公園内のよく手入れされた芝地で、その他は畜産研究所によって維持されている牧草地であった。3つの牧草地全てで事故後に刈り取りがあったが、土壌は未かく乱のまま維持された。残りの5ヶ所は森林であった。FR-1とFR-2は広葉樹が優占している森林で、公共公園に続く散歩道がつながっている。FR-3はアカマツが優占する針葉樹の森林であった。FR-4とFR-5はスギによって優占されている比較的高密度の針葉樹林で、小さい山の道に沿って高度が異なる場所に位置していた。

サンプリングは、原発事故から3か月後の2011年6月18-20日の間に行われた。農耕地と草地の植生のサンプリングは900 cm<sup>3</sup> (30cm×30cm)、もしくは2500 cm<sup>3</sup> (50cm×50cm) の範囲からはさみを使って行われた。森林では、のサンプリングが900 cm<sup>3</sup>の範囲から手によって注意深く行われた。土壌のサンプリングは、3 m×3 mの範囲内で地上の植生や落葉落枝層を除去した後6ヶ所から行われた。

## (2) 重要な図表

土壌のかさ密度は3つの森林土壌で0.45 から 1.15g cm<sup>-3</sup>の低い値であった。GL-4を除いて砂利の含量は平均して10%以下であった。すべての物理化学性は土地利用との間に有意な違いを示さなかった。

調査対象地域の土壌中および土壌の上に堆積した<sup>137</sup>Csの総量は平均して37.9-72.2kBq m<sup>-2</sup>の範囲で、標準偏差は58.4±9.6 kBq m<sup>-2</sup>であった (Fig. 2)。農耕地 (60.6±8.1 kBq m<sup>-2</sup>, N=6)、草地 (55.6±5.8 kBq m<sup>-2</sup>, N=4)、森林 (57.9±14.1 kBq m<sup>-2</sup>, N=5) 間で<sup>137</sup>Csの総量に有意な違いは見られなかった。この<sup>137</sup>Csの総量はほとんどが福島原子力発電所の事故に由来し、核実験による降下物の寄与は高くても3

kBq m<sup>-2</sup>と予測され、ほとんど見られなかった。

ほとんどの調査地で、地上の植生や落葉落枝層は最も高い<sup>137</sup>Cs濃度（最大で 60,600 Bq kg<sup>-1</sup>d.w.）を示した。しかしながら、森林での落葉落枝層と農耕地および草地の地上の植生とは、<sup>137</sup>Csの総量に対する寄与が異なった（Fig. 2）。森林では堆積した<sup>137</sup>Csのうち 50-91%が落葉落枝層に見られた。対照的に、農耕地および草地の地上の植生の寄与は 0-35%で、植生の寄与の程度の変化は穀物の成長の時期や下生え、牧草に部分的に依存すると考えられた。すべての農耕地は事故以来刈り取りされていなかったが、3ヶ所の草地（GL-2、GL-3、GL-4）では牧草の上層は一度刈り取られている。それゆえ、これら3ヶ所の草地の<sup>137</sup>Csの地上の総量は牧草の成長の時期や収穫の程度によって多かれ少なかれ少なめに見積もられている。地上の植生のタイプや土地利用に関わらず、植生や落葉落枝の地上量と<sup>137</sup>Csの地上の総量には正の相関が見られた（Fig. 3; r<sup>2</sup>=0.86, p<0.0001）。

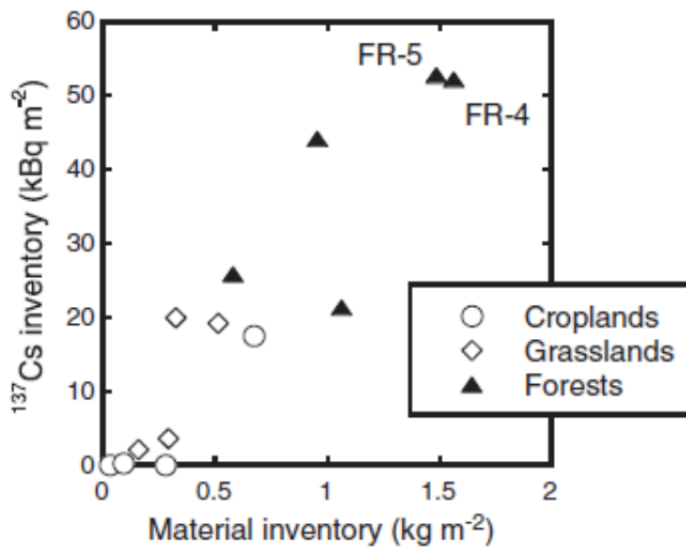


Fig. 3. Aboveground <sup>137</sup>Cs inventory versus aboveground mass of vegetation (at cropland and grassland sites) or litter (at forest sites) materials.

土壌表層での<sup>137</sup>Csの保持率は3つの土壌の物性（かさ密度、シルトサイズ粒子の含量、粘土サイズ粒子の含量）と正の相関が見られた（Table 4、Fig. 6a-c）。<sup>137</sup>Csの保持率は土壌有機炭素含量との相関は見られなかったが、粘土含量あたりの土壌有機炭素含量（kgC kg<sup>-1</sup>-clay）とは高い負の相関が見られた（Table 4、Fig. 6d）。<sup>137</sup>Csの保持率とその他の土壌物理化学性との間に相関は見られなかった。

**Table 4**  
Correlation analysis between  $^{137}\text{Cs}$  retention and physicochemical properties in the surface soil layers (0–1 cm and 1–3 cm) at undisturbed sites across all land-use types.

Soil properties	$^{137}\text{Cs}$ retention <sup>a</sup>			
	0–1 cm layer		1–3 cm layer	
	r	P-value	r	P-value
<i>Physical properties</i>				
Bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	+ 0.56	n.s.	+ 0.63	<0.05
Particle density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	+ 0.48	n.s.	+ 0.43	n.s.
Porosity (%)	– 0.17	n.s.	– 0.24	n.s.
Gravel ( $\text{kg m}^{-2}$ )	+ 0.02	n.s.	+ 0.55	n.s.
Coarse sand ( $\text{kg m}^{-2}$ )	+ 0.03	n.s.	+ 0.16	n.s.
Fine sand ( $\text{kg m}^{-2}$ )	+ 0.57	n.s.	+ 0.36	n.s.
Silt ( $\text{kg m}^{-2}$ )	+ 0.60	<0.05	+ 0.52	n.s.
Clay ( $\text{kg m}^{-2}$ )	+ 0.60	<0.05	+ 0.57	n.s.
<i>Chemical properties</i>				
pH	+ 0.42	n.s.	+ 0.09	n.s.
CEC ( $\text{cmol m}^{-2}$ )	+ 0.32	n.s.	+ 0.21	n.s.
Exchangeable Ca ( $\text{cmol m}^{-2}$ )	+ 0.19	n.s.	+ 0.21	n.s.
Exchangeable Mg ( $\text{cmol m}^{-2}$ )	+ 0.56	n.s.	+ 0.21	n.s.
Exchangeable K ( $\text{cmol m}^{-2}$ )	+ 0.54	n.s.	+ 0.27	n.s.
Base saturation (%)	+ 0.02	n.s.	+ 0.27	n.s.
Organic C inventory ( $\text{kgC m}^{-2}$ )	– 0.49	n.s.	– 0.27	n.s.
Organic C/clay ( $\text{kgC kg}^{-1}\text{-clay}$ )	– 0.79	<0.005	– 0.81	<0.005

n.s.: Not significant.

<sup>a</sup> Cesium-137 retention is defined as a ratio of  $^{137}\text{Cs}$  inventory in a thin, target soil layer to the total  $^{137}\text{Cs}$  inventory in and below the layer.

## 2. 提言につながる情報

### (1) モニタリングへの活用

該当なし。

### (2) 流出挙動・経路

地上の落葉落枝量が高いほど林床での  $^{137}\text{Cs}$  の蓄積が高かった (Fig. 3)。これは、林床の落葉落枝層の厚さが非森林土壌の草の植生層よりも効果的に  $^{137}\text{Cs}$  の土壌鉱物層への侵入を物理的に防いでいることを示唆している。

土壌表層において、 $^{137}\text{Cs}$  の保持率は3つの土壌の物性（かさ密度、シルトサイズ粒子の含量、粘土サイズ粒子の含量）との間に正の相関が見られ、有機物含量との間には負の相関が見られた (Table 4, Fig. 6)。一般的に、土壌の孔隙はかさ密度の低さに関与する主な要因である。孔隙率が高いと水分含量および浸透性が増すことから、 $^{137}\text{Cs}$  はより土壌の深部に移動しやすい。一方で、 $^{137}\text{Cs}$  の保持率と土壌の孔隙率との間に正の相関は見られなかったことから、2 mm 以下の乾燥土壌から孔隙率を計測する方法では、実際の土壌の孔隙率を反映できないことが想定された。シルトや粘土のような粒径の細かい土粒子への  $^{137}\text{Cs}$  の堆積はこれまでの報告にも見られ (Livens and Baxter, 1988; Spezzano, 2005; Tsukada et al., 2008)、負に帯電している粘土鉱物への  $^{137}\text{Cs}$  の選択的な吸着によることが確認されている (Sawhney, 1972; Dumatet et al., 2000)。

粘土鉱物のように、有機物も負に帯電していることから  $^{137}\text{Cs}$  を吸着しやすいことが考えられる。しかしながら、粘土鉱物とは対照的に、有機物は  $^{137}\text{Cs}$  の選択的な吸着性がほとんどない (Cremers et al., 1988)。また、その他の陽イオンと競合によって可逆的であることから (Valcke and Cremers, 1994; Chibowski and Zygmunt, 2002; Rigol et al., 2002)、有機物は  $^{137}\text{Cs}$  の保持と浸透に直接的な役割を果たさないことが示唆されている。一般的に有機物の 50-75% は粘土粒子に結合している (Christensen, 2001)。粘土あたりの有機物含量の高さが有機物によって鉱物表面の大部分が覆われていることを示しているならば、鉱物表面の大部分を覆っている有機物によって吸着箇所が制限されることにより、 $^{137}\text{Cs}$  の吸着が抑制されると考えられる (Rigol et al., 1999; Dumat et al., 2000; Rigol et al., 2002)。この妨害効果は間接的に  $^{137}\text{Cs}$  の粘土への吸着を弱め、移動性と生物利用性を高めていると考えられている (Rigol et al., 2002)。

### (3) 除染の際の留意点

該当なし。

### (4) 担当者のコメント

本文献で示されている  $^{137}\text{Cs}$  の総量は、福島第一原発の事故から3か月後の土壌の実態調査の結果であり、今後の  $^{137}\text{Cs}$  の土壌中の変化をモニタリングする際の参考になるだけでなく、生物利用性について検討する際にも重要な知見となりうる。