

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26550067

研究課題名(和文) 土壌深部への放射性物質の効果的誘導と固定-廃棄土壌を伴わない放射線量低減技術-

研究課題名(英文) Transport and immobilization of radioactive fallout using artificial macropore  
-Reducing radiation without surface soil disposal-

研究代表者

森 也寸志 (MORI, Yasushi)

岡山大学・環境生命科学研究科・教授

研究者番号：80252899

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災時に発生した福島第一原子力発電所の事故によって、福島をはじめとして複数の地域に放射性物質が降下した。表土はぎや天地返しが除染として有効とされているが、廃棄土壌の扱いは社会問題になっている。そこでブルーベリー畑を対象として、人工マクロポアによって表層にある放射性セシウムをバイパス的に下方移動させて固定し、植物による吸収を回避することを試みた。結果として放射性セシウムを移動させるには、セシウムを溶出させて可動状態にするプロセス、人工マクロポアによる下方移動を促進させるプロセスが必要であるとわかった。さらにカリウムはセシウムの植物による吸収抑制になると考えられた。

研究成果の概要(英文)：Fukushima nuclear power plant damaged by the East Japan Great Earthquake caused radioactive fallout around the Tohoku region. Because radioactive fallout was positively charged, it was reported to be adsorbed to soil surface. Surface soil scraper and deep plowing would be, therefore, effective for the removal of radioactive materials. However, these scraped surface soils caused another issue for disposal. Therefore in this research project, artificial macropore which imitated the natural soil pores were installed in agricultural soils to transport the radioactive Cesium to deeper profile and adsorb on the mineral soils. Results showed that elution process by Ammonium Sulfate, transport process by artificial macropore and absorption inhibition process by Potassium Chloride were needed for the effective management in agricultural field.

研究分野：土壌環境工学

キーワード：放射性物質 環境保全 放射性セシウム 浸透現象 除染技術

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災の地震と津波に続いて起こった福島第一原子力発電所の事故によって、福島をはじめとして複数の地域に放射性物質が降下した。主な物質は放射性セシウム<sup>137</sup>Csで、除染のための農学的手法としては、表土はぎや天地返しが有効と認められている。しかし、重機を使った土木工事を必要とするため、水田や校庭などの一部の平地はともかく、森林、果樹園、傾斜圃場など傾斜地、狭矮な土地では実施が難しい。また、廃棄土壌が発生した場合は、その扱いが二次的な社会問題にすらなっている。

人工マクロポア(図1)という自然の間隙構造を模した技術を使うと、浸透性が悪く有機物量の少ない土壌でも下方浸透が促進され、土壌中の有機物が増加し、植生の回復が見られた。この技術を応用し、年千数百ミリの降雨を活用して放射性物質を土壌深部に導入できれば、土壌中で鉱物に強固に吸着し、廃棄土を伴わずに土壌内部に放射性物質を留めることが可能で非常に有効である。土壌表層ではセシウムは有機物に弱く結合し、降雨による表面流出や有機物分解に続く植物の吸水によって物質循環の中に取り込まれているが、鉱物割合の高い土壌深部で土壌に吸着させれば循環から切り離すことが可能になる。

## 2. 研究の目的

すなわちこの交換態の放射性物質を循環か

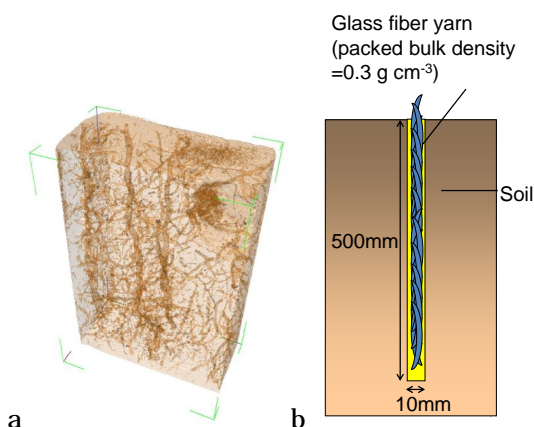


図1 a.土壌間隙構造のX線CT写真と  
b.透水性不良改善のための人工マクロポア

ら切り離すことが大きな研究対象となる。そこで本研究の目的は、

- (1) 表層にある溶質を効果的に下方へ移動させる人工マクロポア技術を開発すること、
  - (2) カラム実験によって放射性物質の下方移動の程度を評価すること、
  - (3) 現場で実際の農地に見立てた管理実験を行い、地上における放射線濃度の軽減率を評価すること、
- である。

## 3. 研究の方法

### (1)表面被覆型人工マクロポア-放射性物質の下方移動促進技術-

人工マクロポアとは、自然の土壌に見られる土壌動物の移動跡や植物根によって形成された土壌粗大間隙を人工的に作るもので、中に繊維を挿入することで自然のマクロポアより溶質移動の制御が容易になり、年千数百ミリという降雨が下方浸透を促す。

今回の修復技術では、浸透水は根群域では拡散せずに下方まで運ばれることが肝要であるから、易分解性材料などで外側を被覆した「表面被覆型」人工マクロポアを作成する(図2)。これは人工マクロポアで表層の水分を下方浸透水として誘導したあと、根群域では土壌マトリックスに触れないように浸透させ、根群域下で土壌全体に広がるように設計するものである。

浸透実験では、表面被覆型人工マクロポア、従来型人工マクロポア、土壌構造を変えない

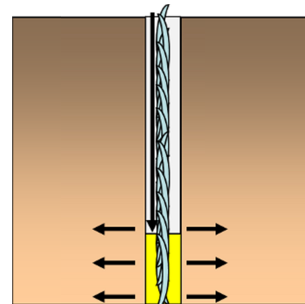


図2 表面被覆型人工マクロポア  
根群域を易分解性材料で被覆した構造を新たに開発する。

対照区の3管理を設け、浸透実験をそれぞれ3反復行った。高さ20cmの円筒形土壌カラム表面にカリウムを散布し、灌水を2週間(50ml×4回)行い、排水と土壌中のカリウム含量を測定した。

### (2) 放射性物質の下方移動実験(土壌カラム)

ブルーベリー栽培を対象としたカラム実験を行った。カラムは、無処理区と表面被覆型人工マクロポアを導入した人工マクロポア区を用意し、2反復した。直径8.34cm、高さ30cmの塩化ビニル管に土壌表層から15cmまではピートモスを乾燥密度 $0.1g/cm^3$ で、15cmから22cmまでは鉍物性土壌を乾燥密度 $1.14g/cm^3$ で充填し、表層に放射性セシウムの代替としてカリウムを130mg施用した。灌水を1か月間毎日70.99ml行い、排水のカリウム量と実験後土壌の水溶性カリウムと交換態カリウムの分布を原子吸光光度計で測定した。

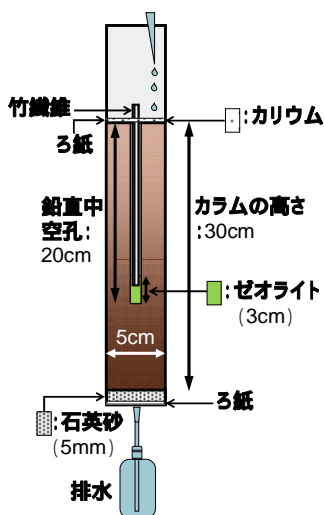


図3 放射性物質の下方誘導・固定実験。

### (3) 放射性物質の下方移動実験(現場)

放射性物質量の低減対象にはブルーベリー畑を想定した。ブルーベリーは酸性土壌を好むため根群域にはピートを施用する。しかしながら、ピートは有機質であるため、鉍物土壌と違って、放射性物質は表層土壌では固定されない可能性がある。さらに体積収縮をするため、その上にまた新たなピートを施用す

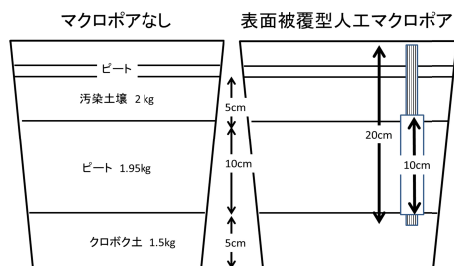


図4 表面被覆型人工マクロポア設置図



図5 ポット栽培の様子(2014年5月)

ることが多い。そのため、汚染物質そのもの、また、汚染部位が徐々に下方移動する可能性がある。可動性の高い状態で汚染部位が根群域まで降下した場合、収穫物を汚染する可能性がある。そこで、人工マクロポアを使って、交換態の放射性物質を根群域下に移動させ、鉍物に固定させることを考えた。また、通常のマクロポア(図1)では下方浸透促進中に周囲の土壌に汚染物質を拡散させる可能性があるため、人工マクロポアを被覆し、根群域層で汚染物質が拡散しない工夫をした。

図4に示すように10cmのピート層の直上に汚染物質層5cmをつくり、事故後の状態を仮定した。ブルーベリーを移植するとともに、マクロポアの有無の違いを作り、下方浸透に対する効果を検討した。人工マクロポアの充填物として竹繊維を挿入した。肥料には、セシウムと交換する効果のある硫酸アンモニウム、

植物によるセシウムの吸収抑制に効果のあるカリウムを施用した。また、最下層にはセシウムの吸着固定のために黒ぼく土を施用した。苗の移植は2014年5月に行い（図5）、ポットの解体を2015年9月に行った。ポットを汚染土壌層、ピート上層、ピート下層、黒ぼく土壌層の4層に分け、ピート上層はさらに上層と下層に分けて放射能の計測を行った。また、浸透水のバイパス効果を精査するためにマクロポア周辺部を別個に採取して放射能計測を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 表面被覆型人工マクロポア

図6上を見ると、表層にあるカリウムはマクロポアを通じて下層まで輸送されていることが確認された。さらに、排水が促進されることで、周縁部の透水量が減少し、マトリックスを通じたカリウム輸送が妨げられることがわかった。この傾向は土壌断面の深度別カリウム割合（図6下）でも示され、特に土壌内のカリウム総量を見ると対照区よりマクロポア区の方が、より多くのカリウムを系外に排出していた。

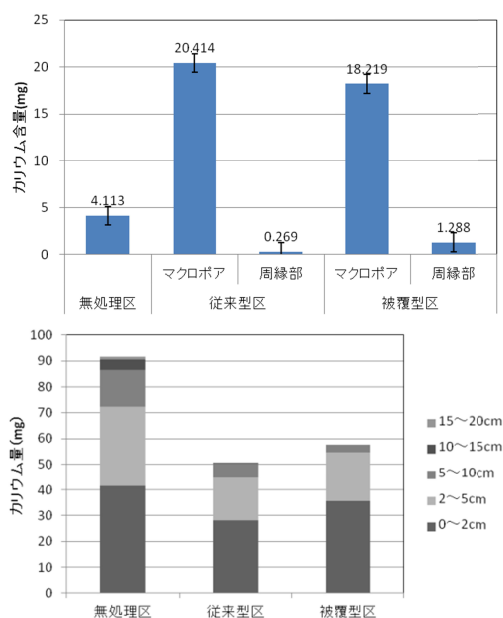


図 6 排水中に含まれる総カリウム量 (上)と土壌断面のカリウム分布 (下)

##### (2) 放射性物質の下方移動実験 (カラム)

図7に排水中のカリウム量を示した。170時間で発生しているピークは、元から土壌中に含まれていたカリウムの排出だと考えられ、両区とも同じ傾向を示している。それに対して、無処理区で620時間、人工マクロポア区で450時間に発生しているピークは施用したカリウムの排出だと考えられ、人工マクロポア区で早く発生しており、下方移動促進効果がみられる。また、両区ともに排出量は4.5mg程度であり、施用量と比較して大幅に小さい数値であった。すなわち原子吸光で検出できる濃度よりはるかに低濃度で汚染している放射性セシウムが排水から観察されないことが容易に推測できる。

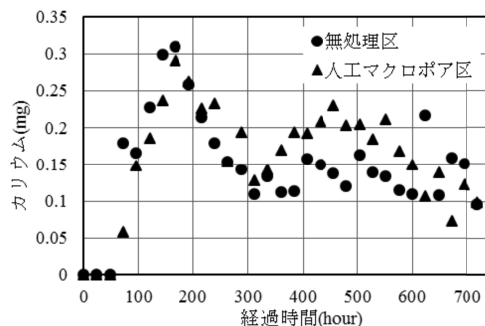


図 7 カラム下方浸透実験におけるブレイクスルーカーブ

##### (3) 放射性物質の下方移動実験 (現場)

放射能の計測結果をマクロポア無しのポット（図8）、マクロポア設置ポット（図9）と分けて表示した。さらにマクロポア周辺での計測結果を図10に示した。グラフ全体の縦方向への伸びからマクロポアがないものよりマクロポアがある方が、下層部での放射能検出が大きくなる傾向があった。また、アンモニウムを施すと特にマクロポア周辺部で著しい下方移動傾向が観察された（3rd, 4th層での検出）。カリウム施用区でも、アンモニウムほどではないが、下方移動効果は見られた（3rd層での検出）。両者とも図10で3rd層への拡散はないため、側方拡散を防ぎつつ、バイパス移動させていると考えた。

一方で、ブルーベリーの葉からはアンモニウム施用区で放射能が検出され、カリウム施用区では検出されなかった。アンモニウムは土壤中における放射性物質の交換・移動の効果が大きいと思われるが植物に吸収されるリスクもあるとわかった。一方カリウムは植物への吸収抑制が働くことがわかった。

なお、アンモニウムは図9、10で最表層濃度が低下傾向にあり、植生を考えずに移動・固定させることだけが目的であれば有力な選択肢になりうると考えた。

総じて成果をまとめれば、放射性セシウムを効果的に移動させるには、土壤中に吸着された放射セシウムを溶出させて可動状態にするプロセスと、人工マクロポアによる下方移動を促進させるプロセスが必要である。さらに、カリウムを施肥することで植物に吸収させずに下方に移動させることができると考えられた。なお、移動後は粘土鉱物に吸着されるため、排水から放射性セシウムが検出されることはなかった。

管理状態の比較によって人工マクロポアと硫酸アンモニウムの施用で定性的には下方移動促進効果が見られ、一般には土壤表層から移動しにくいと言われている放射性セシウムを土壤表層から下方へ移動させ、かつ排水からは観察されないという結果を得た。しかし、十分な量が鉱物層まで移動したわけではなく、植物による吸収の回避に併せて除染という意味では、さらに効果的な移動プロセスを吟味する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

勝田洋平, 木村叡人, 市田知子, 森也寸志, 登尾浩助, 福島県飯舘村における水田土壌の物理性, 133: 29-36 (2016) 査読付き

〔学会発表〕(計 6 件)

Takagi, Y., K. Noborio, Y. Mori, Fixing

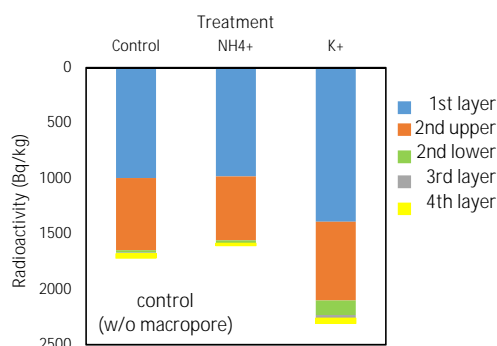


図8 土層毎の放射能(対照区)

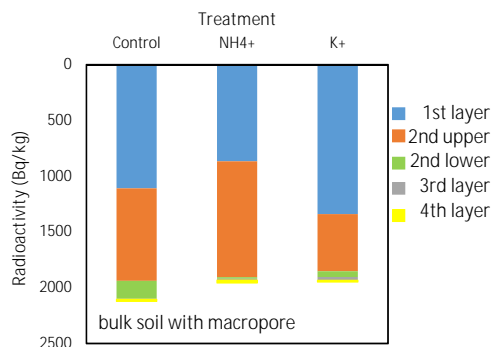


図9 土層毎の放射能(マクロポア区, バルク土壌)

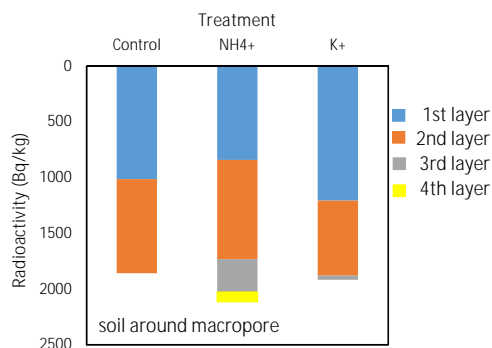


図10 土層毎の放射能(マクロポア区, ポア周辺部)

表1 ブルーベリーの葉から検出された放射能(横軸は構造の違い, 縦軸は施肥の違い)

	Control	Macropore
Control	N.D. *	41.35 ± 3.04
NH4+	180.47 ± 136.27	242.80 ± 55.73
K+	N.D.	N.D.

\*:1 サンプルで検出有り (Unit: Bq/kg)

Radio-Cesium(Cs-137) in Soil with Vermiculite in Fukushima 米国農・穀物・土壤科学学会, 2016.11.08, フェニックス(米国)

林 匡紘, 森 也寸志, 稲生栄子 ブルーベリーポットでの放射性セシウムの人工マクロポアによる移動効果, 土壤物理学会, 2016.10.29, 京都大学(京都)

Hayashi, M., E. Inao and Y. Mori,  
Installing Artificial Macropore in Blueberry  
Pot to Enhance Vertical Infiltration and Fix  
of Radioactive Cesium, Japan GeoScience  
Union, 2016.05.23, 幕張メッセ (千葉)

林 匡紘, 森 也寸志, 稲尾栄子, 登尾  
浩助, 人工マクロポアを用いた放射性 Cs  
の下方浸透と固定, 農業農村工学会  
2015.09.02, 岡山大学 (岡山)

森 也寸志, 佐藤直樹, 宮本珠未, 稲生  
栄子, 登尾浩助, 下方浸透促進による地  
表の放射性物質削減と根群域回避の試み,  
土壌物理学会, 2014.10.25, 宮城大学 (仙  
台)

Sato, N., T. Miyamoto, Y. Mori, E.Inao and  
K. Noborio, Enhancing Radioactive Fallout  
Removal from the Surface Soils by using  
artificial macropore transport system, Japan  
Geoscience Union, 2014.04.30, 幕張メッセ  
(千葉)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕(計 0 件)

〔その他〕

#### シンポジウム

土壌マクロポアによるセシウムの移動,  
明治大学科学技術研究所シンポジウム,  
2015.12.25, 明治大学生田キャンパス(川  
崎)

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

森 也寸志 (MORI, Yasushi)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・教授

研究者番号：80252899

##### (2)研究分担者

登尾 浩助 (NOBORIO, Kosuke)

明治大学・農学部・教授

研究者番号：60311544