

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24780251

研究課題名(和文)汚染土壌 - 植物における放射性セシウム動態の画像解析技術の開発および農業への応用

研究課題名(英文)Development of a new imaging system to analyze radiocesium dynamics from contaminated soil to plant

研究代表者

尹 永根 (Yin, Yong-Gen)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究員

研究者番号：50609708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、土壌 - 植物系の放射性セシウムの移行と分布を連続的に捉える画像化技術を開発し、植物の放射性セシウムの挙動を系統的に解明しようとするニーズに応えることを目的とした。具体的には、汚染土壌と栽培環境を再現し植物の栽培が可能な「根箱装置」を開発し、これと放射線計測技術を組み合わせて植物体内の放射性セシウムの動態を可視化する「RIイメージング技術」を開発した。また、ポジトロンイメージング(PETIS)のために、ポジトロン放出核種である ^{129}Cs トレーサの開発を行った。開発した技術は農産物や食品の安全評価、放射性セシウム高/低吸収品種の育種選抜、最適栽培条件の検討などに幅広く応用できるものである。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a live-imaging method which visualizes radiocesium movements and distribution from soil to a living plant for agricultural studies such as the control of radiocesium transport into plants. In this study, a "rhizobox" specially designed for the imaging experiments was developed. This rhizobox reproduced the polluted soil environments and grew plants properly. Combining this rhizobox with radioisotope (RI) measuring techniques, I developed a new "RI imaging method" to visualize the dynamics of radiocesium in soil and plants. Furthermore, we developed a positron-emitting radiocesium, ^{129}Cs , in order to visualize radiocesium dynamics using the positron-emitting tracer imaging system (PETIS). These techniques can be widely applied to safety evaluation of food and agricultural products, to selection of agricultural crops which take up high or low radiocesium, and to studies of the optimum cultivation conditions which prevent plants from taking up radiocesium.

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：放射性セシウム RIイメージング技術 根箱装置 画像化 動態解析

1. 研究開始当初の背景

東京電力福島第一原発事故により、広範囲の農地が放射性物質（主に ^{134}Cs 、 ^{137}Cs ）で汚染された。こうした農地では生産者と消費者の双方が、作土中に残存する放射性セシウムが収穫物へ移行する不安を今後数十年にわたり持ち続けることになる。したがって長期的視野に立った取り組みが必要とされている。そこで、現在、様々な分野の研究者たちが、植物による農地の除染、あるいは、汚染物質を作物の地上部に移行させない栽培条件の確立や育種などに取り組んでいる。これら両者には、放射性セシウムの土壤中での挙動と、植物根系から地上部・可食部への移行過程を理解し、それを人為的に制御しようという、共通のニーズがある。従来の研究は放射性物質が植物体内に最終的に蓄積した量を分析するだけの観察的研究にとどまっていたが、上記の目標のためには、放射性物質が土壤から植物体地上部に移行する過程を逐次的に追跡し、環境条件に対する応答を解析する研究が必要である。そのためには、土壤—植物系における放射性物質の分布を非破壊的かつ連続的に捉える計測技術が必要不可欠である。

これまで、申請者の所属研究グループでは、植物体内の RI の分布の変化を画像として捉える「RI イメージング技術」の開発を行ってきた。例えば、イネの体内におけるカドミウムの吸収・移行・蓄積の様子を ^{107}Cd トレーサとポジトロンイメージング装置（PETIS）を用いて撮像し、動画像データを元にカドミウムの定量的動態モデルを構築することに成功している（Fujimaki *et al.*, 2010, *Plant Physiol.*, 152, 1796-1806）。

そこで申請者は、この撮像対象を土壤と植物根域に拡張し、適切な放射性セシウムトレーサと RI イメージング技術を組み合わせて開発すれば、目標とする技術を実現することができるかと着想した。

2. 研究の目的

本研究は、福島第一原発事故由来の放射性降下物による土壤中および植物中の放射性セシウムの分布と移行を連続的に捉える画像化技術を開発し、様々な環境条件下における土壤・植物中の放射性セシウムの挙動を系統的に解明しようとするニーズに応えることを目的とする。具体的には、汚染地域の土壤環境および栽培環境を再現する「根箱装置」を開発し、これに適した「RI イメージング技術」を開発・応用することにより、様々な植物の根域周辺におけるセシウムの移動と植物体への吸収・移行・蓄積を可視化する。開発した画像化技術を農産物や食品の安全評価、セシウム低吸収（或いは高吸収）品種の育種選抜、最適栽培条件の検討に応用する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために、以下の開発

を行った。

(1) 「根箱装置」の開発：汚染土壤と植物根系を実験室内に再構築し、ポジトロンイメージングにより撮像し、解析するための、「根箱装置」を開発した。

(2) ^{129}Cs トレーサの開発：ポジトロン放出核種であるセシウム 129 (^{129}Cs , 半減期 32 時間) をトレーサとして利用するためのサイクロトロン施設における製造と精製方法の開発を行った。

(3) 植物 RI トレーサ実験系の開発：(1) で開発した「根箱装置」と RI トレーサを組み合わせた RI イメージング技術の開発を行った。RI イメージングの装置として PETIS、ガンマカメラ、イメージングプレート等を利用した。

4. 研究成果

(1) 「根箱装置」の開発

放射性セシウムの土壤、植物根系と地上部における分布を経時的に捉える RI イメージング技術の研究開発は、様々な環境条件下におけるセシウムの吸収・移行・蓄積を系統的に解明するために不可欠である。そのために汚染土壤と植物根系を実験室内に再構築し、RI イメージング装置で撮像し、解析するための数種類の「根箱装置」を新たに開発した。これらを用いてアマランサス、ヒエ、ダイズなどのセシウム高吸収候補植物の栽培試験を行ったところ、正常な生育を示した（図 1）。これを用いて、RI イメージング実験方法の検討を行った。まず、土耕栽培した植物の地上部に $^{11}\text{CO}_2$ トレーサ投与を行い、PETIS で土壤中の根系へ ^{11}C が転流して行く様子を動画画像化し、土壤中の根系分布を捉えた。次に、得られた根系分布の画像をもとに土壤中の根系周辺へ $^{22}\text{Na}^+$ を投与し、土壤中および植物体内の $^{22}\text{Na}^+$ の移行の様子を画像化することに成功した（図 2）。この根箱装置を使ったトレーサ実験系は、土壤中の放射性セシウム（さらには一般の金属イオン）の挙動研究に有効であることが示唆された。

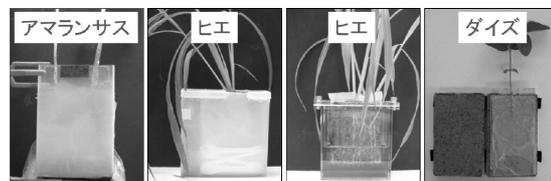


図 1 植物や用途に合わせて開発した「根箱装置」

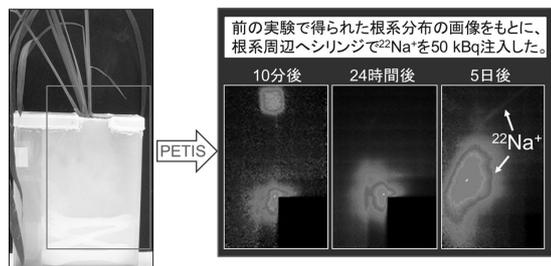


図 2 根系および土壤中 $^{22}\text{Na}^+$ の移行の連続画像

(2) ポジトロン放出核種であるセシウム 129 トレーサの精製条件の検討

セシウム 134 および 137 はポジトロン放出核種でないため、PETIS を用いた撮像は不可能である。そこで、ポジトロン放出核種であるセシウム 129 (^{129}Cs , 半減期 32 時間, ポジトロン放出割合 0.0027%) トレーサを利用することができれば、植物のセシウムに対する吸収特性を経時的・空間的に解析できる。 ^{129}Cs はヨウ化ナトリウムなどをターゲットとして約 50 MeV のヘリウムイオンビームで照射することにより、 $^{127}\text{I}(\alpha, 2n)^{129}\text{Cs}$ 反応によって生成することが知られている。

本研究では、ヨウ化ナトリウム (NaI) とヨウ化カリウム (KI) をターゲットとし、各々 TIARA で照射した産物から ^{129}Cs を精製する方法を検討した。厚み 0.55 mm のターゲットにヘリウムイオンビームを 20 分間照射し、12 時間放置後ターゲットを水に溶かし、Ge 検出器を用いて数日間連続測定した。その結果、 ^{129}Cs の生成が確認でき、未同定の複数の RI 副産物も検出された。まず、NaI をターゲットとした生成産物の精製を検討した。ターゲットの水溶液を陰イオン交換カラムで精製したところ、 ^{129}Cs の回収率は 81%、収量は約 1.2 MBq であった。PETIS により 1 コマあたり 1 時間の連続画像を得るには、約 13 MBq の ^{129}Cs が必要であると見積もられ、3 時間程度のビーム照射でイメージングを実現できることが示唆された。同時に、NaI をターゲットとした場合は生成産物中に ^{129}Cs と同じくポジトロン放出核種である ^{22}Na が含まれることが分かった。次に、KI をターゲットとした生成産物から数種類の精製カラムを用いて ^{129}Cs を精製する方法を検討した。精製した ^{129}Cs トレーサをイネの水耕液に投与し、PETIS を用いて 96 時間連続撮像を行ったところ、ポジトロン放出割合が極めて低いにも関わらず、根系における ^{129}Cs の分布を示す画像の取得に成功した。しかし、イネの根が水耕液中の ^{129}Cs を吸収し、地上部に移行させる様子は殆ど捉えることが出来なかった。その理由として、投与した ^{129}Cs トレーサ溶液中に照射ターゲット由来の K^+ が大量に存在しており、植物体内の Cs^+ の吸収・移行に大きく影響した可能性が考えられた。

そこで、独立行政法人日本原子力研究開発機構が放射線グラフト重合技術を活用して開発したセシウム捕集材を用いることで、 K^+ 濃度が低い ^{129}Cs トレーサ溶液の精製を試みた。照射後の KI ターゲットを 1 ml の純水に溶解させ、陰イオン交換カラムに通液させることで、ヨウ素イオンを除去した。得られた溶液を 100 ml の純水に希釈し (K^+ 濃度: 8 mM)、 Cs^+ を特異的に吸着するグラフト捕集材を充填したカラム (容量: 1.35 ml) に 272 ml/h の流速で通液させた。カラムを 100 ml の水で洗浄した後、270 ml の 5 mM $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ を通液させることで、 $^{129}\text{Cs}^+$ の溶

出を行った。溶出液は 20 ml ずつ分画し、放射エネルギーを Ge 半導体検出器で、 K^+ 濃度を原子吸光分光光度計で、それぞれ測定した。グラフト捕集材を充填したカラムによる ^{129}Cs の精製過程を PETIS を用いて撮像したところ、 $^{129}\text{Cs}^+$ が本カラムに吸着する明瞭な動画像を得ることに成功した。また、5 mM $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液の通液により、本カラムから $^{129}\text{Cs}^+$ を溶出可能であることが確認できた。さらに、溶出液中の K^+ 濃度が 3 μM 以下であったことから、本方法による ^{129}Cs トレーサの精製が有効であることが確認できた。現在、本カラムからの $^{129}\text{Cs}^+$ の溶出効率を向上させて、PETIS によるイメージング実験に必要な量の ^{129}Cs トレーサを精製するための条件検討を行っている。

(3) ガンマカメラを用いた植物の ^{137}Cs トレーサ実験系の確立

申請者の所属研究グループでは ^{137}Cs の観測を目的とした高エネルギーのガンマ線に対応するピンホールコリメーター型のガンマカメラの開発が進んでおり、利用可能である。そこで、ガンマカメラと ^{137}Cs (購入 RI) を組み合わせた植物トレーサ実験系の確立を行った。福島県内で収穫された作物の中で特にダイズの放射性セシウムの基準値超えのケースが比較的多かったことを受け、ダイズを本研究の対象に選んだ。播種後 4 週目のダイズの水耕液 20 mL に約 1 MBq の ^{137}Cs を投与し、地上部に対してガンマカメラで 22 時間の撮像実験を行った。その結果、ダイズの地上部へ ^{137}Cs が徐々に移行する様子画像化することに成功した。ダイズの地上部に関心領域を設定し、得られた連続画像における ^{137}Cs の経時変化を解析したところ、根に投与した ^{137}Cs がわずか半日後 (約 15 時間後) には根に投与した ^{137}Cs の 2 割が地上部の関心領域内に到達したことが明らかになった。このように、ガンマカメラを用いて植物体内への ^{137}Cs の動態を可視化し、定量的に評価できる実験系を確立した (図 3)。

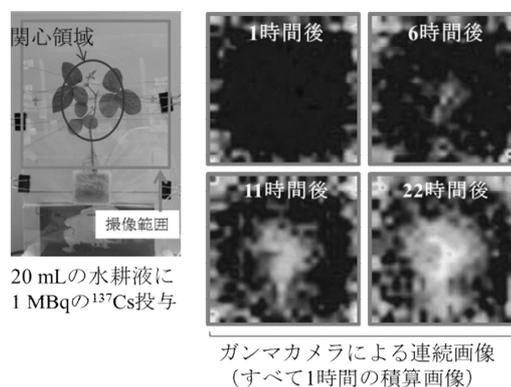


図 3 ガンマカメラを用いて撮像したダイズにおける ^{137}Cs の吸収・移行の様子

(4) 根が土壌へ分泌した有機物の可視化技術の開発

植物は、土壌中にある難溶性の元素(例えばリン、鉄など)を積極的に取り組むために、根から土壌環境中へ有機酸などを分泌し可溶化することが知られている。本研究では、植物のセシウム吸収の促進/抑制メカニズムの解明研究の一環として、(1)で開発した「根箱装置」を利用し、 ^{11}C ラベルした二酸化炭素($^{11}\text{C}\text{CO}_2$)とPETISによる根の分泌物(有機酸など)の可視化を試みた。まず、生きたまま植物根系と根圏土壌を簡単に分離できる構造をもつ「開閉式根箱装置」を用いて植物を土耕栽培した。次に、植物の地上部へ $^{11}\text{C}\text{CO}_2$ トレーサを投与し、PETISで地下部への ^{11}C -光合成産物の転流を撮像した。撮像開始65分後、根箱を開いて根系を含んだ植物全体だけ取り除き、「開閉式根箱装置」内の根圏土壌に対して撮像を続けた。結果、ダイズの根から根圏土壌中に分泌された有機物の分布を画像として捉えることに成功した。本実験系は、土壌粒子に固着した放射性セシウムを植物根からの分泌物が可溶化するのではないかという疑問を解明する道を拓くのみならず、不良環境下における作物の必須栄養素の獲得機構を解明する、一般的な農学研究にも有効であることが示唆された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Kawachi N., Yin Y.-G., Suzui N., Ishii S., Watabe H., Yamamoto S., Fujimaki S. (2014) RI imaging method to analyze a process of radiocesium contamination of plants and to develop phytoremediation techniques. JAEA-Review 2013-059:100. 査読無

尹永根、河地有木(2012) 土壌 - 植物系における放射性セシウム動態のイメージング、放射線と産業 **132**, 7-11. 査読無

〔学会発表〕(計 6 件)

尹永根、鈴井伸郎、河地有木、石井里美、小柳淳、中村卓司、信濃卓郎、藤巻秀・ダイズ根系が根圏土壌へ分泌した有機物のポジトロンイメージング(PETIS)による可視化と定量解析・第55回日本植物生理学会年会、2014年3月18日、富山市(富山大学五福キャンパス)

尹永根、鈴井伸郎、河地有木、石井里美、小柳淳、信濃卓郎、藤巻秀・ダイズ根系が根圏土壌へ分泌した有機物の可視化と定量解析・日本土壌肥料学会2013年度名古屋大会、2013年9月11日、名古屋市(名古屋大学東山キャンパス)

Fujimaki S., Kawachi N., Yin Y.-G., Suzui N., Ishii S., Watabe H., Yamamoto S., Live-imaging of Radiocesium Transport in Plants. 17th International Plant Nutrition Colloquium, 2013年08月19日, トルコ・イスタンブール(Istanbul Convention and Exhibition Center)

尹永根・RIイメージング技術が切り拓く土壌-植物系における放射性Csの動態解明研究・日本原子力学会 関東・甲越支部「第11回 若手研究者発表討論会」, 2012年11月12日、東京都狛江市(一般財団法人電力中央研究所狛江地区)

尹永根、鈴井伸郎、山口充孝、河地有木、石井里美、井倉将人、田野井慶太郎、中西友子、茅野充男、中村進一、渡部浩司、畑澤順、山本誠一、藤巻秀・放射性セシウムの計測技術の開発 - 農産物等の簡易分析法、土壌から植物への吸収移行の画像化 - . 第7回高崎量子応用研究シンポジウム、2012年10月11日、高崎市(高崎シティギャラリー)

河地有木、尹永根、鈴井伸郎、石井里美、渡部浩司、山本誠一、井倉将人、畑澤順、藤巻秀・RIイメージング技術を駆使した植物中セシウム動態の可視化 第7回高崎量子応用研究シンポジウム、2012年10月11日、高崎市(高崎シティギャラリー)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尹永根(YIN, Yong-Gen)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・量子ビーム応用研究センター・研究員

研究者番号: 50609708

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: