

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04296

研究課題名（和文）ポジトロン放出核種Cs-127を用いた動植物体内のセシウム動態の解明

研究課題名（英文）Elucidation of cesium dynamics in animals and plants using the positron-emitting nuclide Cs-127

研究代表者

鈴木 伸郎（Suzui, Nobuo）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・上席研究員

研究者番号：20391287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：ポジトロン放出核種Cs-127を用いて、生きた動植物体内の生きた動植物におけるセシウム動態の非破壊的イメージングを実施した。ダイズの根にCs-127を投与し、根粒中のセシウムの挙動を可視化した結果、根粒にセシウムが貯留することを明らかにした。ヒメリンゴの放射性セシウムの経皮吸収を可視化した結果、新芽側への移行量が主茎側よりも高いことを明らかにした。PET装置で撮像したラットのセシウム動態を用いて複数の臓器のクリアランスを評価したところ、腎臓、心臓、小腸については従来のICRP体内動態モデルの予測と一致したが、肝臓と大腸については異なっていた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、ポジトロン放出核種Cs-127を用いた非破壊的イメージングが、生きた動植物体内におけるセシウム動態の解析に有用であることが示された。本研究で明らかにされた、ダイズやヒメリンゴなどの作物におけるセシウムの貯留や、新芽側への移行量の高さなどの知見は、作物栽培におけるセシウム汚染対策に役立つことが期待される。さらに、PETイメージングを用いた臓器クリアランスの評価により、従来のICRP体内動態モデルにおける肝臓や大腸の予測が異なることが判明したことから、放射性物質の内部被ばく評価のより正確な予測において、Cs-127を用いたイメージング技術が貢献できることが示された。

研究成果の概要（英文）：Non-destructive imaging of radiocaesium (rCs) dynamics in living plants and animals has been carried out using the positron-emitting radionuclide Cs-127. Cs-127 was administered to soybean roots and the behavior of rCs in the rhizoids was visualized, showing that rCs is sequestered in the rhizoids. Visualization of the transdermal absorption of rCs in apple showed that the amount transferred to the shoot side was higher than that to the main stem side. The clearance of several organs was assessed using rCs dynamics in rat imaged with a PET scanner, and the results for the kidney, heart and small intestine were in agreement with the predictions of the conventional ICRP pharmacokinetic model, but differed for the liver and large intestine.

研究分野：植物栄養学

キーワード：放射性セシウム PET ポジトロンイメージング

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2011年3月の東京電力福島第一原子力発電所事故により、様々な放射性物質が広範囲の地域に降下し、特に半減期30年のCs-137は被災地に深刻な影響を与えた。福島原発から放出された放射性物質の環境動態についての顕著な研究成果が国内の研究者から数多く出され、大気・海洋・森林・農地における放射性物質の環境(マクロ)レベルの動態モデルが構築された。土壌中のCs-137の動態については、セシウムが粘土層への取り込まれる分子(ミクロ)レベルのメカニズムも放射光分析などの最新の計測技術により解明された。作物におけるCs-137の動態研究においては、セシウム吸収時のカリウム拮抗作用の知見が活用され、Cs-137の吸収を抑制するカリウム施肥量の指針が2012年に逸早く策定された。加えて、突然変異育種によりCs-137をほとんど吸収しないイネ品種2系統が国内の研究者によって2017年に作出され、その原因遺伝子も同定された。

しかしながら、Cs-137の動態の全てが明らかとなり農林畜産物におけるCs-137の汚染問題の全てが解決しているとは言えない状況であった。ダイズではカリウムを十分施肥したにも関わらず基準値を超える例が見られるなど、作物体内のセシウムの輸送メカニズムにはなお未知な部分が多かった。森林内においてCs-137の分布の季節変動が観察されているが、樹木体内のCs-137の短期的な動態については手付かずのままであった。また、動物体内のCs-137の動態については、2011年以降にいくつかの研究がなされたが、核実験やチェルノブイリ原発事故を契機に実施された研究を凌駕するほどの詳細な実験結果は得られていなかった。すなわち、環境(マクロ)レベルと分子(ミクロ)レベルの領域を繋ぐ「個体レベル」のCs-137の動態については、未だに数多くのなすべき研究があった。そして、個体レベルの元素動態を解明する研究において、生きた動植物体内における元素動態を非破壊で可視化する技術が非常に強力なツールであると考えた。

こうした背景の元、研究代表者は科研費・基盤研究C「動植物におけるセシウム動態解析のためのポジトロンイメージング技術の開発(2016年度~2018年度)」を実施し、短半減期(6.25時間)のポジトロン放出核種であるCs-127トレーサの製造・精製方法を確立し、植物用ポジトロンイメージング装置(PETIS)と小動物用PET装置を用いて生きた植物と動物におけるセシウムの動態を非破壊的に可視化することに成功した。

2. 研究の目的

ポジトロン放出核種Cs-127を用いた非破壊イメージングにより、作物・樹木・動物の短期的なセシウム動態を調べ、これまでの放射性セシウムの動態研究に欠けていた個体レベルの動態解明の一助とすることを本研究の目的とした。具体的には、ダイズ・リンゴ・ラットのセシウム動態に関する個別の課題に焦点を絞って研究を進めた。

3. 研究の方法

(1) 作物(ダイズ)のセシウム動態

播種時に根粒菌を接種したダイズ(エンレイ)を水耕栽培により約1ヶ月栽培し、Cs-127を用いたリアルタイムイメージング解析に用いた。作物のセシウム吸収量は共存するカリウム濃度の影響を強く受けるため、実験開始前72時間の水耕溶液中カリウム濃度を通常濃度(K+条件)および無添加(K-条件)とし、各カリウム濃度条件への順化を行った。ダイズ根系からCs-127を12時間吸収させ、その後Cs-127を含まない水耕液に交換するパルス-チェイス試験の過程をPETISで撮像し、根系のセシウム吸収および地上部へのセシウム輸送挙動を解析した。

(2) 樹木(リンゴ)のセシウム動態

経皮吸収初期を想定したリンゴ樹体のCs-127動態観察に応用した。供試植物は春季条件(長日、25℃)で栽培したヒメリンゴで、新芽が生長している側枝と主茎を撮像範囲とした。側枝の外皮のみを0.5mm幅で除皮し、同日に製造したCs-127溶液を塗布した。連続光条件、25℃が維持された育成庫にリンゴを設置し、PETISを用いてCs-127動態を36時間継続して撮像した。

(3) 動物(ラット)のセシウム動態

静脈投与後3.4時間のラット体内におけるCs-127のPETイメージングデータとX線CT画像、およびラットの臓器ファントムを用いて、各臓器のPETシグナル値を抽出し、取込みと2系統の排出を持つコンパートメントモデルにより臓器クリアランスを評価した。また、ICRPの体内動態モデルに関しては、ICRP Pub.137をベースとしたコンパートメントモデルをPythonの科学計算ライブラリを用いて作成した。ただし、大腸と小腸についてはLeggettらのコンパートメントモデル[2]を用いた。さらに、大腸と小腸については、臓器に該当する領域に半径3mmの球型のROIを上流から下流に向けて、各々8箇所もしくは2箇所設定し、各箇所におけるPETシグナル値の変化と、CT値との相関を調べた。

4. 研究成果

(1) 作物（ダイズ）のセシウム動態

画像解析の結果、K-条件ではダイズ根全域および根粒部分に Cs-127 が急速に吸収され、特に根粒部分へ集積する様子が確認された。一方、K+条件では、根全域への顕著な Cs-127 吸収は見られなかったが、根粒部分への集積は確認された。また、K+および K-条件で根および根粒部位に取り込まれる Cs-127 量が大きく異なり、K+条件の根および根粒では、K-条件と比較して数倍から 10 倍程度低い Cs-127 シグナルが得られた。これは、カリウム共存により、根だけでなく根粒表面からのセシウム吸収量も大きく制限されたためと考えられ、根系から地上部への輸送されるセシウム量も相対的に減少したことが示唆された。

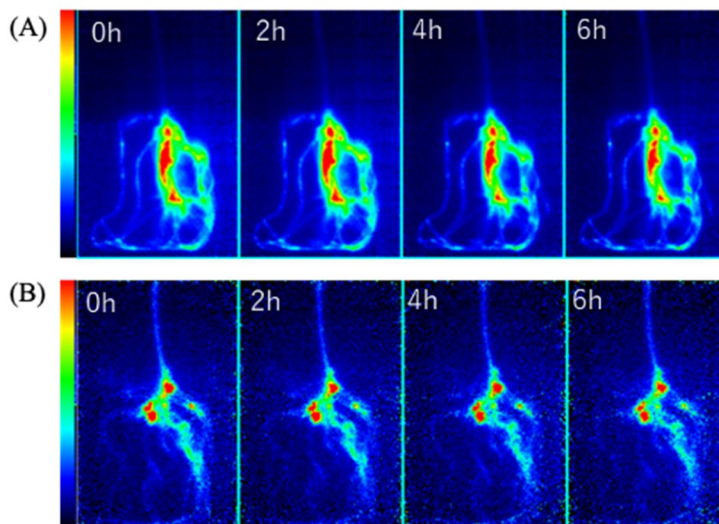


図1 チェイス実験時における Cs-127 の PETIS モンタージュ画像
(A) カリウム通常 (K+) 条件 (B) カリウム無添加 (K-) 条件

(2) 樹木（リンゴ）のセシウム動態

側枝から浸透後に新芽と主茎双方へ輸送される Cs-127 を可視化することに成功した。新芽側への Cs-127 の移行量は主茎側よりも高い傾向が見られた。オートラジオグラフィーの結果から、主茎では側枝から運ばれた Cs-127 が主茎の下部かつ側枝側に偏在していた。本結果はフィールド調査によって得られた知見である、Cs が主に若い器官に集積されていくことや一部が根に向けて輸送されることを経時的に定量化できたことを示している。また、ラボスケールの本研究手法が野外環境における樹木の Cs 動態予測に資する実験系であること、野外環境では困難な正確な動態解析に有効であることが示唆された。

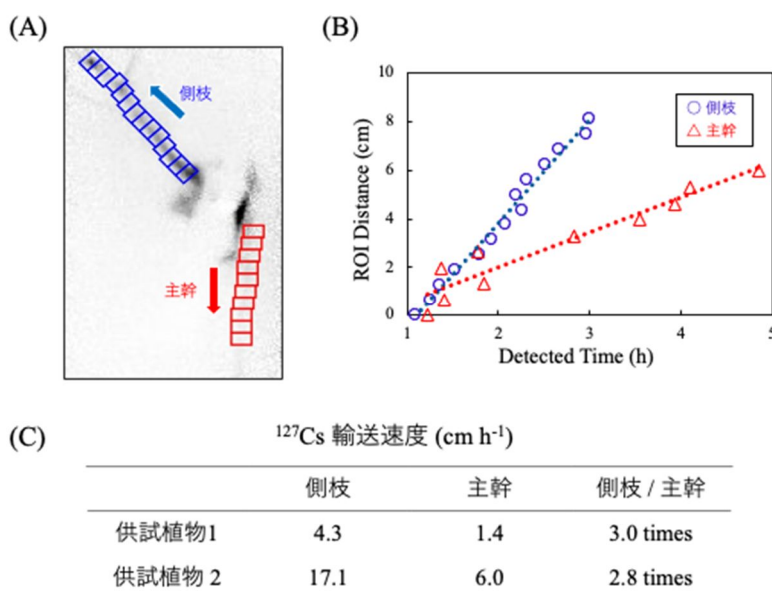


図2 リンゴの側枝と主幹における Cs-127 の輸送速度
(A) 供試植物 1 における関心領域 (ROI) の位置 (B) 側枝と主幹の各 ROI において 0.5 kBq の Cs-127 が検出された時間と上流の ROI からの距離 (C) 2 個体の供試植物の側枝と主幹における Cs-127 の輸送速度

(3) 動物（ラット）のセシウム動態

Cs-127 の PET の実測データから算出した複数臓器のクリアランスを、ICRP 体内動態モデルの予測と比較した結果、腎臓、心臓、小腸については、ファクター2 の範囲で時間変化の傾向がよく一致した。しかし、肝臓と大腸においては、大きく異なった。肝臓については、ROI 設定の不確かさが原因かもしれない。大腸については、ROBY ファントムで設定した臓器 ROI 内でのシグナルに不均一性が観られた。そこで、複数箇所の球型 ROI と CT 値を調べたところ、PET シグナル値と CT 値が共に高い領域が一致した。CT 値の高い領域には固形の内容物が存在していたと考えられ、大腸内の血流の高い領域にセシウムが集積したものと示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Noda Yusaku, Yoshihara Toshihiro, Suzui Nobuo, Yin Yong-Gen, Miyoshi Yuta, Enomoto Kazuyuki, Kawachi Naoki	4. 巻 198
2. 論文標題 Visualization of the initial radiocesium dynamics after penetration in living apple trees with bark removal using a positron-emitting 127Cs tracer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Radiation and Isotopes	6. 最初と最後の頁 110859 ~ 110859
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apradiso.2023.110859	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Enomoto Kazuyuki, Hoshina Hiroyuki, Kasai Noboru, Kurita Keisuke, Ueki Yuji, Nagao Yuto, Yin Yong-Gen, Suzui Nobuo, Kawachi Naoki, Seko Noriaki	4. 巻 460
2. 論文標題 Flow filtration/adsorption and simultaneous monitoring technologies of radiocesium 137Cs in river water	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 141696 ~ 141696
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cej.2023.141696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Parvin Sunzida, Billah M. Masum, Khandker Mahmudul H., Hossain M. Ismail, Haque M. M., Shahmohammadi Beni Mehrdad, Watabe Hiroshi, Haque A. K. Fazlul, Uddin M. Alfaz	4. 巻 11
2. 論文標題 A Theoretical Study of Scattering of e^{\pm} by TI Atom	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Atoms	6. 最初と最後の頁 37 ~ 37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/atoms11020037	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Islam Md. Rafiqul, Shahmohammadi Beni Mehrdad, Inamura Akihito, Safakatti Nursei, Miyake Masayasu, Rahman Mahabubur, Haque Abul Kalam Fazlul, Ito Shigeki, Gotoh Shinichi, Yamaya Taiga, Watabe Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 A Feasibility Study on Proton Range Monitoring Using 13N Peak in Inhomogeneous Targets	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Tomography	6. 最初と最後の頁 2313 ~ 2329
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/tomography8050193	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Zarei Hajar, Bahreinipour Mostean, Sefidbakht Yahya, Rezaei Shokouh, Gheisari Rouhollah, Ardestani Susan Kabudanian, Uskokovi? Vuk, Watabe Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Radioprotective Role of Vitamins C and E against the Gamma Ray-Induced Damage to the Chemical Structure of Bovine Serum Albumin	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Antioxidants	6. 最初と最後の頁 1875 ~ 1875
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/antiox10121875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Sakashita Tetsuya, Matsumoto Shojiro, Watanabe Shigeki, Hanaoka Hirofumi, Ohshima Yasuhiro, Ikoma Yoko, Ukon Naoyuki, Sasaki Ichiro, Higashi Tatsuya, Higuchi Tetsuya, Tsushima Yoshito, Ishioka Noriko S.	4. 巻 8
2. 論文標題 Nonclinical study and applicability of the absorbed dose conversion method with a single biodistribution measurement for targeted alpha-nuclide therapy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 EJNMMI Physics	6. 最初と最後の頁 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40658-021-00425-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Suzui Nobuo, Shibata Takuya, Yin Yong-Gen, Funaki Yoshihito, Kurita Keisuke, Hoshina Hiroyuki, Yamaguchi Mitsutaka, Fujimaki Shu, Seko Noriaki, Watabe Hiroshi, Kawachi Naoki	4. 巻 10
2. 論文標題 Non-invasive imaging of radiocesium dynamics in a living animal using a positron-emitting 127Cs tracer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 16155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-73351-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sakashita Tetsuya, Watanabe Shigeki, Hanaoka Hirofumi, Ohshima Yasuhiro, Ikoma Yoko, Ukon Naoyuki, Sasaki Ichiro, Higashi Tatsuya, Higuchi Tetsuya, Tsushima Yoshito, Ishioka Noriko S.	4. 巻 35
2. 論文標題 Absorbed dose simulation of meta-211At-astato-benzylguanidine using pharmacokinetics of 131I-MIBG and a novel dose conversion method, RAP	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Medicine	6. 最初と最後の頁 121 ~ 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s12149-020-01548-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Bahreinipour Mostean, Zarei Hajar, Dashtestani Fariba, Rashidiani Jamal, Eskandari Khadijeh, Zarandi Seyed Ali Moussavi, Ardestani Susan Kabudanian, Watabe Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Radioprotective effect of nanoceria and magnetic flower-like iron oxide microparticles on gamma radiation-induced damage in BSA protein	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIMS Biophysics	6. 最初と最後の頁 124 ~ 142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/biophy.2021010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 井倉将人、鈴井伸郎、尹永根、三好悠太、榎本一之、河地有木
2. 発表標題 ポジトロン放射性セシウムを用いた植物体内イメージング
3. 学会等名 SATテクノロジー・ショーケース2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井倉将人、鈴井伸郎、尹永根、三好悠太、榎本一之、河地有木
2. 発表標題 ポジトロンイメージングを用いたダイズ根系内のセシウム輸送における共存元素の影響解析
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2022年度東京大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂下哲哉、鈴井伸郎、松本翔二郎、渡部浩司、河地有木、石岡典子
2. 発表標題 セシウムPETイメージングデータを用いた臓器クリアランスの評価
3. 学会等名 第59回アイソトープ・放射線研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 坂下哲哉、松本翔二郎、渡辺茂樹、花岡宏史、大島康宏、生駒洋子、右近直之、佐々木一郎、東達也、樋口徹也、対馬義人、石岡典子
2. 発表標題 核医学診断データと核医学治療薬剤の1回撮像から吸収線量を求める変換法の基礎的検討
3. 学会等名 第2回標的アイソトープ治療線量評価研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suzui Nobuo, Shibata Takuya, Yin Yong-Gen, Funaki Yoshihito, Kurita Keisuke, Hoshina Hiroyuki, Yamaguchi Mitsutaka, Fujimaki Shu, Seko Noriaki, Watabe Hiroshi, Kawachi Naoki
2. 発表標題 Development of the positron-emitting 127Cs tracer for non-invasive imaging of radiocesium dynamics in living animals and plants
3. 学会等名 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴井伸郎, 尹永根, 三好悠太, 河地有木
2. 発表標題 ポジトロンイメージングを用いた器官間の元素輸送の解析
3. 学会等名 日本土壤肥料学会2020年度岡山大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴井伸郎
2. 発表標題 植物体内のセシウム動態を可視化するポジトロン放出核種127Csトレーサの開発
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	井倉 将人 (Igura Masato) (80706630)	国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構・農業環境研究部門・主任研究員 (82111)	
研究分担者	渡部 浩司 (Watabe Hiroshi) (40280820)	東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・教授 (11301)	
研究分担者	坂下 哲哉 (Sakashita Tetsuya) (30311377)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・上席研究員 (82502)	
研究分担者	尹 永根 (Yin Yong-Gen) (50609708)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・主幹研究員 (82502)	
研究分担者	吉原 利一 (Yoshihara Toshihiro) (60371506)	一般財団法人電力中央研究所・環境科学研究所・上席研究員 (82641)	削除：2020年2月10日

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------