

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05109

研究課題名(和文) 経時的撮影可能なオートラジオグラフィ技術の開発 -セシウム動態可視化を目指して-

研究課題名(英文) Development of autoradiography technique capable of sequential imaging -Toward visualization of radioactive cesium dynamics in botanical bodies-

研究代表者

酒井 卓郎 (Sakai, Takuro)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究主幹

研究者番号：70370400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来のオートラジオグラフィ法では困難であった植物内における放射性同位元素(RI)の経時的な変化を観察できる測定技術の開発を行った。  
具体的には、RIが放出する線を蛍光板に当て、RI分布を可視光像に変換して高感度カメラで連続的に撮影するシステムである。本システムにより、植物体(ダイズ)における放射性セシウムの移行・蓄積過程を10分間隔で連続的に撮影することに成功し、本手法が植物研究に非常に有用であることを証明出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法により、植物内におけるセシウムの動態を可視化することが可能になった。これにより、植物におけるセシウムの吸収が阻害/促進される条件を見出すための研究を進める目処が立ち、今後、農作物の安全や新たな除染技術の開発などに資することが見込まれる。  
さらに、本手法はセシウムだけでなく、線を放出する核種には原理的に適用可能であり、既に複数の植物研究者と連携して、新たな研究も開始している。本課題を完遂したことで、蛍光板を用いたオートラジオグラフィ法が、新たな計測技術として一般化することも現実的になっており、その意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Autoradiography technique is widely used in order to observe radioisotope-based tracer distributions in botanical organism. However, the technique is not suitable for observing changes over time, because a series of procedures such as transferring and reading the radiation distribution is required. In this issue, we developed novel autoradiography system which visualize the process of radioactive cesium migration and accumulation in plants continuously. Specifically, the radioisotope distribution is converted into a visible light image by using a fluorescent plate, and sequentially captured by a high-sensitivity camera. The experiment was successfully performed and the cesium migration process in the plant (soybean) was clearly observed. The images were taken with an exposure time of 10 minutes, confirming that this method works effectively.  
The next step of this work is the contribution of the safety of crops and the development of new decontamination technology.

研究分野：放射線計測学

キーワード：オートラジオグラフィ 植物イメージング トレーサー 放射性同位元素 蛍光板 経時観察 元素動態

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故により放射性セシウムが広く環境中に拡散し、植物体におけるセシウムの移行・蓄積過程を解明することは急務になっており、その観察技術の開発が強く望まれている。これに対して、オートラジオグラフィ法は、観察対象とする試料から放出される電離放射線の強度分布を写真乾板やイメージングプレート (IP) 等で観察する手法であり、放射性同位元素 (RI) を用いたトレーサーによる植物研究などに広く利用されている。しかしながら、放射線分布の転写・読み取りの一連の作業が伴うことから、経時的な変化の測定には多大な労力が必要であり、移行・蓄積過程を観察する上での問題の一つになっている。

他方、研究代表者(酒井)・分担者(飯倉)らは長年にわたり中性子ラジオグラフィ (NRG) 技術の開発・高度化を行ってきた。NRG においては、観察対象とする試料を透過した中性子の強度分布を、中性子捕捉体を含む蛍光板で可視光に変換、カメラで撮影する方法が一般的である[1]。検出器である蛍光板は、得られるラジオグラフィ像の質に大きく影響するため、その高性能化に取り組んできた[2]。

以上の背景のもと、研究代表者は「RI が放出する  $\beta$  線を蛍光板で観察する」着想を得た。具体的には、トレーサーである RI を吸収した被写体の前に蛍光板を設置し、その発光を高感度カメラで撮影する方法である。この手法の実現性を確認するため、量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 (QST・高崎研) において、研究分担者 (栗田、河地) の協力の下、放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) を吸収した濾紙とダイズの葉のイメージング実験を行い (図 1 参照)、現実的な時間内 (<30 分) でオートラジオグラフィ像が撮影できることを確認した (図 2 参照)。

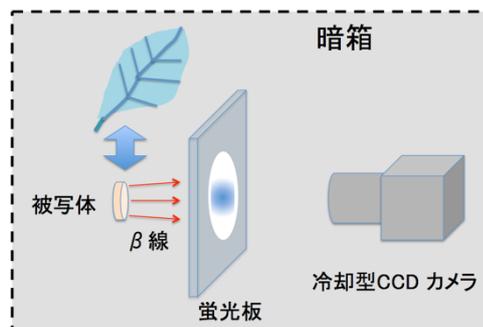


図1 蛍光板によるオートラジオグラフィ模式図

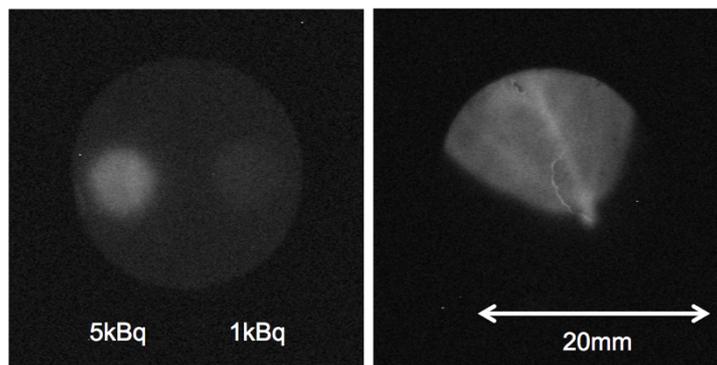


図2 本手法により観察した標準線源 (左) とダイズの葉 (右) のオートラジオグラフィ像。使用した蛍光板の有効径が  $\phi 20\text{mm}$  のため、葉の根元部分しか撮影できていないが、葉脈に集積した  $^{137}\text{Cs}$  がはっきりと画像化できている。

## 2. 研究の目的

従来のオートラジオグラフィ法では困難であった植物内における RI の経時的な変化を観察するため、研究代表者らが研究開発に取り組んできた中性子ラジオグラフィの測定技術を応用し、植物中の RI 移行・蓄積過程を連続的に撮影する技術開発を行う。具体的には、

RIが放出する $\beta$ 線を蛍光板に当て、RI分布を可視光像に変換して高感度カメラで連続的に撮影するシステムの開発を行う。さらに、本システムを用いて植物体における放射性セシウム( $^{137}\text{Cs}$ )の移行過程を観察し、農作物の安全や新たな除染技術の開発などに貢献することを目的とする。

### 3. 研究の方法

「蛍光板によるオートラジオグラフィ技術」を確立するため、 $\beta$ 線を可視光に変換する検出素子である蛍光板の開発を行った。蛍光体材料としては、発光効率の良い $\text{ZnS:Ag}$ を使用した。 $^{137}\text{Cs}$ からの $\beta$ 線の最大エネルギーは、 $514\text{keV}$  (94.4%)、 $1176\text{keV}$  (5.6%)であるため、入射の窓材として、市販の $20\mu\text{m}$ 厚のアルミ箔を利用した。この厚さであれば、大多数の $\beta$ 線は入射面を透過し、蛍光体を発光させることが可能である。蛍光体層の厚さに関しては、厚さ $0.1\text{mm}$ 、 $0.3\text{mm}$ 、 $0.5\text{mm}$ の試験蛍光板を作成し、 $^{137}\text{Cs}$ からの $\beta$ 線で発光試験を行った。その結果、 $0.4\text{mm}$ 程度の厚さで十分な発光効率を有することを確認した。

以上の結果から、被写体からの $\beta$ 線を可視光像に変換する蛍光板は、支持枠にアルミ箔(厚さ $20\mu\text{m}$ )を貼り付け、蛍光体粉末( $\text{ZnS:Ag}$ )を塗布することで作製した。蛍光体層の厚さは $0.4\text{mm}$ 、有効視野は $96\text{mm}\times 96\text{mm}$ である。さらに、カメラに入射する光量を増強するため、蛍光体層の上にBEF(Brightness Enhance Film) [2]を貼り付けた(図3参照)。光学系・カメラを設置する暗箱はL字型とし、蛍光面はミラーを介して観察、被写体からカメラに入射する $\gamma$ 線を遮蔽できる構造とした。また、焦点距離 $500\text{mm}$ の凸レンズを蛍光面との焦点位置に設置し、カメラから臨む蛍光面を無限遠の虚像とする光学系とした(図4参照)。こうすることで、レンズ交換時などのフォーカス調整を簡便に行うことが可能である。カメラに関しては、QST-高崎研が保有するEM-CCDカメラ(浜松ホトニクス製 ImagEM X2)を利用した。蛍光板・カメラを含む測定系全体は、外部から完全に遮光されており、植物育成環境を妨げることなく測定できる。濾紙に $^{137}\text{Cs}$ を吸収させた標準線源を撮影した結果を図5に示す。露光時間2分で、十分明るい画像が取得出来ており、本手法がシステムとして有効に動作することが確認出来た。

このシステムを用いて、植物が実際に育成できる環境において、「植物体における放射性セシウム移行過程の観察」を行った。



図3 作成した蛍光板の模式図(左)と写真(右)

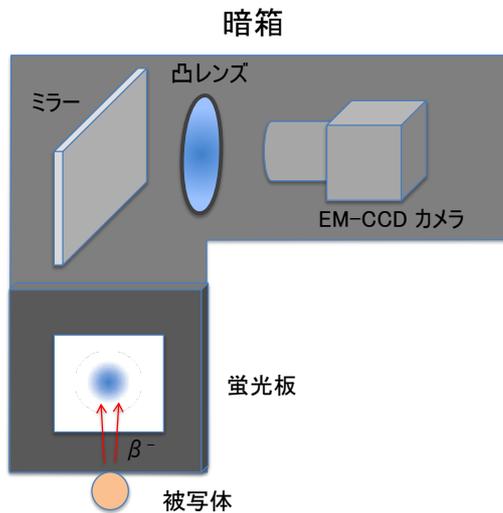


図4 測定系の模式図

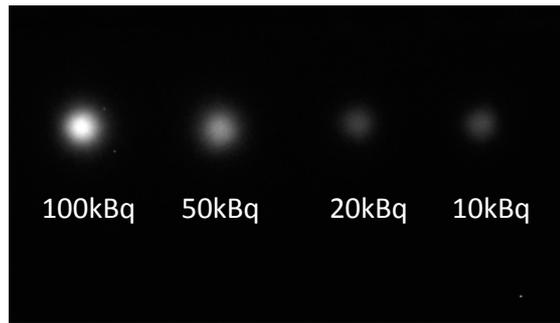


図5 標準線源を撮影した結果

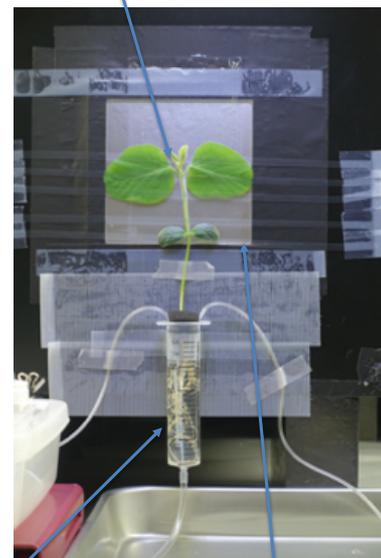
#### 4. 研究成果

植物育成環境（温度・湿度、光環境など）を維持しつつ、オートラジオグラフィ撮像を行うため、QST・高崎研の放射線管理区域内にある人工気象器内で実験を行った。播種 12 日目のダイズを試験体とし、トレーサーである  $^{137}\text{Cs}$  含有の水耕液を経根吸収させ、その移行・蓄積過程を観察した（図 6 参照）。試験体であるダイズは、蛍光板への汚染を防ぐための  $1.5\mu\text{m}$  厚のマイラー膜を通して蛍光板の入射面に軽く接触させている。水耕液投与後のトレーサーの移行過程を、露光時間 10 分の連続撮影で行った。その結果を図 7 に示す。

投与後 20 分程度から、 $^{137}\text{Cs}$  のダイズ地上部への移行が観察され始め、成長点にあたる新しい葉により多くの  $^{137}\text{Cs}$  が蓄積されているのが観察できる。本手法では、同じ個体を同一視野で連続的に撮影しているため、植物の各部位における  $^{137}\text{Cs}$  の蓄積量・速度を定量的に評価することが可能である。

本手法による撮影終了後、IP を用いて、試験植物体のオートラジオグラフィを撮影した（図 8 参照）。その結果、感度に関しては、ほぼ同程度であり、分解能に関しては、IP で撮影した方が良かった。これは、IP では植物体を密着状態で転写しているのに対し、本手法では、植物育成を妨げないように撮像面と軽く接触させているため、分解能が劣化しているためと考えられる。

ダイズ(ビニールで軽く固定)



$^{137}\text{Cs}$ 含有水耕液 汚染防止マイラー膜

#### 撮影対象・環境

- ・ダイズ(播種12日目)
- ・投与RI  $^{137}\text{Cs}$ (2MBq)
- ・温度/湿度 25°C 65%
- ・光環境  $200\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  24h明期
- ・露光時間 10min/frame

図6 植物実験の写真と植物育成条件

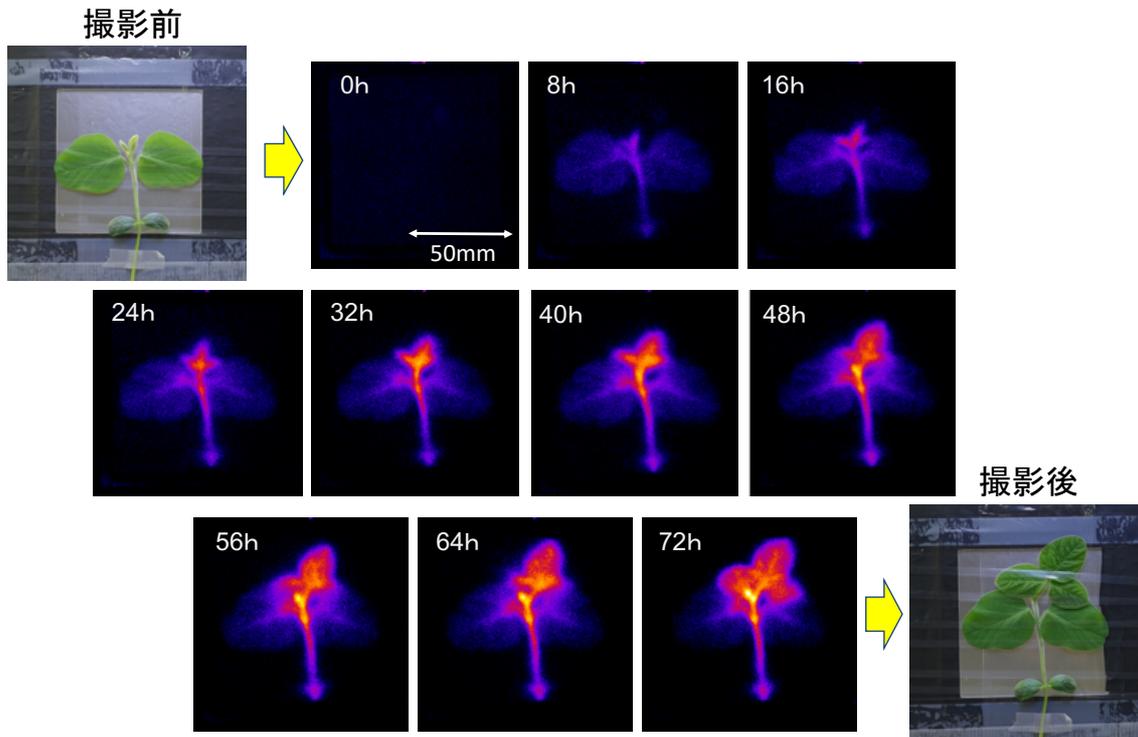


図7 本手法により、ダイズ中の放射性セシウムの分布を撮影した結果。露光時間10分で連続的に撮影している。同一個体を同じ視野で連続撮影しているため、植物中におけるセシウム動態を可視化できている。

これらの結果から、本手法が植物研究に有用であることを証明でき、作物やファイトレメディエーションの候補植物に対して、セシウムの吸収が阻害／促進される条件を見出すための研究を進める目処が立った。また、感度を向上させるため、ZnS:Agよりも発光効率の高い新規蛍光体の採用や、植物体全体を観察するために、大視野（□200mm）の蛍光板の開発も進めている。さらに、本手法は、原理的にセシウムだけでなくトレーサー用のRIでβ線を放出する核種には適用可能である。実際、既に複数の植物研究者と連携して、新たな研究も開始している。

本課題を完遂したことで、蛍光板を用いたオートラジオグラフィ法が、新たな計測技術として一般化することも現実的な話となっており、その意義は大きい。



図8 試験植物体とオートラジオグラフィ像

#### 参考文献

- [1] 「中性子ラジオグラフィ」、飯倉寛，酒井卓郎，松林政仁，*波紋*，**25**(4)，277-282 (2015)。
- [2] “Evaluation of the new LiF-scintillator and optional brightness enhancement films for neutron imaging”, H. Iikura, N. Tsutsui, T. Nakamura, M. Katagiri, M. Kureta, J. Kubo and M. Matsubayashi, *Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A*, **651** 100-104 (2011)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 酒井卓郎、栗田圭輔、飯倉寛、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、河地有木
2. 発表標題 広視野を有する植物観察用オートラジオグラフィ技術の開発
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗田 圭輔、鈴木 伸郎、尹 永根、石井 里美、飯倉 寛、河地 有木、酒井 卓郎
2. 発表標題 蛍光板を利用したオートラジオグラフィ技術で植物体内の元素動態を観る
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2019年度静岡大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井卓郎
2. 発表標題 植物観察用ライブオートラジオグラフィ技術の開発と応用
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、河地有木、飯倉寛、酒井卓郎
2. 発表標題 植物体内の元素動態を可視化する新たなオートラジオグラフィ技術の開発
3. 学会等名 日本土壌肥料学会2018年度神奈川大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井卓郎、飯倉寛、栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、河地有木
2. 発表標題 蛍光板によるオートラジオグラフィ技術の開発2
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018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	飯倉 寛  (Iikura Hiroshi)  (30414593)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・技術主幹  (82110)	
研究分担者	栗田 圭輔  (Kurita Keisuke)  (10757925)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 物質科学研究センター・研究員  (82502)	2017-2018年度：国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 2019年度：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
研究分担者	河地 有木  (Kawachi Naoki)  (70414521)	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(定常)  (82502)	