

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03908

研究課題名(和文)植物チェレンコフ光イメージング技術の開発

研究課題名(英文)Development of a Cherenkov light imaging system for plant study

研究代表者

河地 有木(Kawachi, Naoki)

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)

研究者番号：70414521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：植物体内における放射性同位元素の動きを捉える技術として、チェレンコフ光を活用したイメージング技術の開発に着手した。ベータ線放出核種からのベータ線は植物組織中でチェレンコフ光が発する。このチェレンコフ光は可視光であるため、高感度CCDカメラによって既存技術より高精細な画像が得られる。実験の結果、ダイズの育成環境を数日間維持しつつ、高精細な放射性セシウムの動態を撮像することに成功した。一連の動画データから、Cs-137が節に蓄積される様子が明解になった。植物チェレンコフ光イメージング技術は、放射性セシウムのみならず、様々なRIトレーサの動態撮像に有効な手法であることが実証された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で技術的実証に成功した「植物チェレンコフ光イメージング技術」は、放射性同位元素が測定対象でありながら、放射線を直接計測するのではなく、副次的な可視光を計測する、という独自の着想からはじまった。その結果、既存の非接触タイプの放射線イメージング技術では到達不可能なレベルの高い空間分解能を獲得しつつ、植物個体全体での組織-組織間の元素動態をとらえる大視野が可能となり、農学を目的とした植物研究に大きなインパクトを与えた。

研究成果の概要(英文)：After the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, large areas of agricultural fields were contaminated with radiocesium. As a result, high-resolution images of radiocesium distribution are required in order to facilitate the study of cesium kinetics in plants. Through Cherenkov light imaging, we can visualize fine distributions of radionuclides that emit beta particles by using an optical camera. We have used this method to develop an imaging system that allows us to study radiocesium movement in live plants. To demonstrate the use of this system for radiocesium detection in plants, an imaging experiment was performed with a live soybean plant. The images of Cs-137 distribution in the soybean plant indicate that Cs-137 was transported into the shoot and accumulated at the node. The results of the experiments described above lead us to conclude that Cherenkov light imaging may be a promising method for studying the kinetics of radioisotopes in live plants.

研究分野：RIイメージング技術

キーワード：放射性同位元素 RIイメージング 放射線計測 元素動態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

植物体内をめぐる物質の動態解明を目的とした、同位元素を用いた分析技術は、農学分野で多くの成果を挙げてきた。特に、放射性同位元素をトレーサとして用い、非接触で対象植物の育成環境下で行う放射線イメージング技術は、栽培条件が作物の生産性に及ぼす影響といった生産現場が抱える多くの問いに対して、明快な解答を提示できる有力な研究手法として、近年大きな発展を見せていた。

申請者らは、放射線イメージング技術の開発と体内物質の動態解析技術を駆使して、植物の生理機能の解明研究を行ってきた。このような植物を対象とした放射線イメージング技術の開発において、空間分解能の向上は最重要課題である。細胞レベルの元素動態イメージング、もしくは植物個体全体を対象とした大視野での元素動態イメージングへの要求は高い。しかしながら、従来法では物理的限界があり、これを克服するためには計測原理に対する発想の転換が必要であった。これまでの放射線イメージング技術の基本概念は、体内に投与した放射性同位元素が発する放射線を直接計測することであった。これに対して本研究では、放射線を発する際の副次的な可視光の計測を提案する(図1)。この光は、荷電粒子が物質中を運動し、その速度が物質中の光速よりも大きい場合に発生する、チェレンコフ光である。チェレンコフ光は微弱であるが、昨今の高感度・低ノイズ化した CCD カメラを用いれば撮像可能である。このような技術は医療分野でも応用が試されてきたが、チェレンコフ光(波長: ~390 nm)は組織透過性が低いため、人・動物実験への適用は難しい。しかし、厚みが少ない植物が対象であれば、光は容易に体外へと透過するため、植物の物質動態の詳細なイメージングが非接触で実現できるという考えから本研究を着想した。

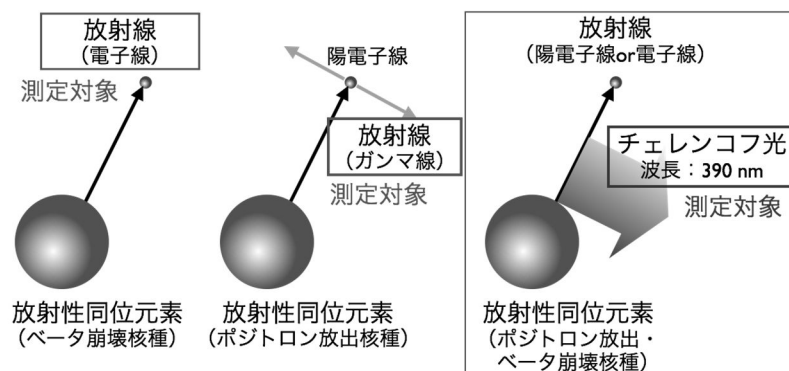


図1 チェレンコフ光イメージングの測定原理。(左、中央)にあるように放射性同位元素からの放射線を直接測定するのではなく、(右)にあるように副次的に放出される微弱な光を測定する。測定対象が光であるため、光学レンズの使用が可能となる。また、CCD カメラは放射線イメージング装置に比べ安価である。

2. 研究の目的

これまでの放射性同位元素を対象とした放射線イメージング技術開発の経験を元に、次のステップで植物チェレンコフ光イメージング技術を確立していく。高感度 CCD カメラを用いてシステムを構築し、植物体内の放射性同位元素が発するチェレンコフ光による定量的なイメージングを可能にする。ノイズ低減、環境光のフィルタリング、光学機器の活用、といった植物チェレンコフ光イメージング技術の高度化を行う。放射性セシウム(Cs-137)などのベータ線放出核種を用いて、関心物質の植物体内動態の撮像を目的とした実験を行う。取得した動画データを数理解析し、供試した植物の生理機能を明らかにできることを示す。

3. 研究の方法

まずイメージングシステムの構築を行った。高感度 Charge-Coupled Device (CCD) カメラを基盤とした植物研究用のチェレンコフ光イメージングシステムを設計し、植物イメージング実験が可能な植物育成庫の中に設置した。これで、温度・湿度・空気組成を厳密に管理した状態での植物イメージング実験が実現できる環境が整った(図2)。また、本イメージングシステムの放

放射性同位元素に対する定量性や解像度といった撮像スペックを非密封放射性同位元素を用いて評価した。この評価値をもとにして、実際の植物実験における、最適な実験セットアップ、放射性同位元素の投与量、投与方法、撮像対象とカメラ本体との相対距離、撮像プロトコル等を検証した。また、本イメージングシステムから掃き出される多量な画像データを処理し、動画像をアニメーションで表現したり、画像の定量性を損ねるスパイクノイズを低減することを可能にした。この他に、チェレンコフ光の波長領域における光の撮像を得意とする、紫外（200nm）から可視光までの領域で対応可能な、ペルチェ冷却と水冷方式を併用できる冷却型 CCD カメラのシステムへの導入も検討し、感度が上昇するなど良好な結果が得られた。これら分光能のあるカメラの導入は、本手法で活用している放射性同位元素が発する電子が植物体内を走ることによって生じる光、これがいわゆる「チェレンコフ光」であるのかといった、基礎的な物理過程の解明につながり、医用応用のあらたな道も開けた。

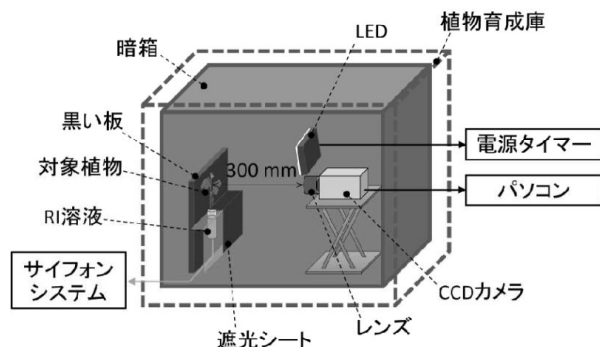


図2 開発したチェレンコフイメージングシステム。植物育成庫内に暗箱で暗環境を作り、その中に撮像対象と CCD カメラを設置することで、植物体内で発生した微弱なチェレンコフ光を検出可能にした。

4. 研究成果

構築した高感度 CCD カメラを基盤とした植物研究用のチェレンコフ光イメージングシステムを用いた植物実験を一つのデモンストレーションとして実施した。植物に対しチェレンコフ光イメージングを行うには、微弱なチェレンコフ光の撮像に必要な厳密な暗環境と、植物の育成に必要な植物育成環境の両立が必要である。このため、植物育成庫内に暗箱を設置し、さらに暗箱内に光調整用の LED を設置することで、暗環境と植物育成環境を両立した。ここで、植物自身が発する遅延発光がチェレンコフ光検出の阻害要因となる。よって、撮像対象植物を暗環境で1時間馴化させ、その影響を排除する実験プロトコルを作成した。

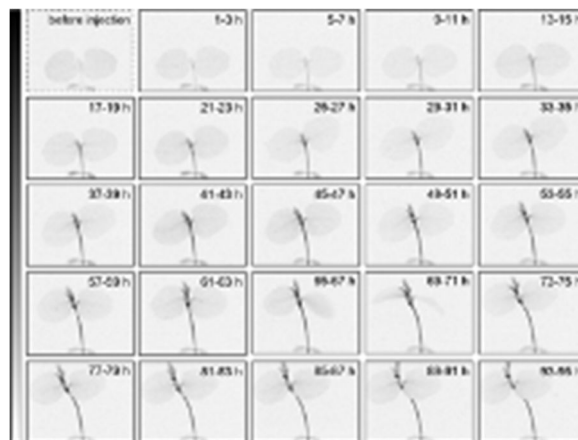


図3 生きたマウス体内における Cs-137 由来のチェレンコフイメージング画像。図は4時間ごとに2時間の撮像を行った結果であり、マウス体内での Cs-137 の動きが可視化できている。

実験では、播種後 11 日目のダイズの根に Cs-137 を含むトレーサ溶液を投与し、地上部における Cs-137 由来のチェレンコフ光を 4 日間連続撮像した。トレーサ溶液は、K⁺を除いた水耕液に 10 MBq の Cs-137 を混合したものを使用し、投与から 24 時間後、K⁺を含む通常の水耕液へと交換した。撮像の結果、ダイズ体内の高精細なセシウム分布動画像の取得に成功した（図 3）。

また、放射線が媒質中を進行する場合の発光現象は、水中でのチェレンコフ光しきい値以下でも生じることから、チェレンコフ光以外の物理的メカニズムが存在することが示唆されてきた。このメカニズム解明とともに、この現象は、生命科学研究に向けた応用のみならず、医療、特に放射線治療に向けた医用研究に発展した。

その他の様々な応用に向け、C-11、As-74 等の放射性同位元素を対象とした検討を行い、応用先での研究成果の創出につなげた。特に、既存の非接触タイプの放射線イメージング技術では到達不可能なレベルの高い空間分解能を獲得しつつ、測定対象となる植物全体での組織-組織間の元素動態をとらえる大視野が可能となり、農学を目的とした植物研究に大きなインパクトを与えた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yabe Takuya, Komori Masataka, Toshito Toshiyuki, Yamaguchi Mitsutaka, Kawachi Naoki, Yamamoto Seiichi	4. 巻 63
2. 論文標題 Estimation and correction of produced light from prompt gamma photons on luminescence imaging of water for proton therapy dosimetry	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 04NT02 ~ 04NT02
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1361-6560/aaa90c	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 Yamamoto Seiichi, Koyama Shuji, Yabe Takuya, Komori Masataka, Tada Junki, Ito Shiori, Toshito Toshiyuki, Hirata Yuho, Watanabe Kenichi	4. 巻 883
2. 論文標題 Stability and linearity of luminescence imaging of water during irradiation of proton-beams and X-ray photons lower energy than the Cerenkov light threshold	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 48 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.11.073	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 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、渡部浩司、山本誠一、河地有木	4. 巻 54
2. 論文標題 Development of a Cherenkov light imaging system for studying the dynamics of radiocesium in plants	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Nuclear Science and Technology	6. 最初と最後の頁 662-667
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00223131.2017.1299051	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 S. Yamamoto, M. Yamaguchi, K. Okudaira, F. Kawabata, T. Nakaya, N. Kawachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Observation of Cerenkov-ring in water during irradiation of high-energy electron or X-ray beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Radiation Detectors and Their Uses : Proceedings of the Workshop on Radiation Detectors and Their Uses (KEK Proceedings)	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、渡部浩司、山本誠一、河地有木
2. 発表標題 植物体内物質の動態を可視化するチェレンコフ光イメージング技術の開発
3. 学会等名 日本土壤肥料学会2017年度仙台大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、渡部浩司、山本誠一、河地有木
2. 発表標題 Measurement of radiotracer movement in a living plant based on Cherenkov light imaging method
3. 学会等名 18th International Plant Nutrition Colloquium (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、渡部浩司、山本誠一、河地有木
2. 発表標題 高解像度で植物体内の元素動態を見る植物チェレンコフ光イメージング技術
3. 学会等名 東京理科大学アグリ・バイオ公開シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、渡部浩司、山本誠一、河地有木
2. 発表標題 植物チェレンコフイメージング技術で見る植物体内の放射性セシウム動態
3. 学会等名 日本土壤肥料学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 栗田圭輔、鈴木伸郎、尹永根、石井里美、渡部浩司、山本誠一、河地有木
2. 発表標題 Development of Cherenkov Light Imaging System for Studies of Radiocesium Dynamics in Plant
3. 学会等名 2016 IEEE NSS/MIC (国際学会)
4. 発表年 2016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	山本 誠一 (Yamamoto Seiichi) (00290768)	名古屋大学・医学系研究科(保健)・教授 (13901)	
研究分担者	井上 千弘 (Inoue Chihiro) (30271878)	東北大学・環境科学研究科・教授 (11301)	
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	藤巻 秀 (Fujimaki Shu) (20354962)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・本部 経営企画部・上席研究員(定常) (82502)	
連携研究者	鈴木 伸郎 (Suzui Nobuo) (20391287)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線生物応用研究部・主幹研究員 (82502)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	山口 充孝 (Yamaguchi Mitsutaka) (10375404)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線生物応用研究部・主幹研究員 (82502)	
連携研究者	尹 永根 (Yin Yonggen) (50609708)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線生物応用研究部・主任研究員 (82502)	
連携研究者	長尾 悠人 (Nagao Yuto) (60622545)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線生物応用研究部・技術員 (82502)	
連携研究者	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・原子力科学研究所物質科学研究センター・研究職 (82110)	