

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K19855

研究課題名（和文）野外での昆虫体内におけるRI動態可視化システムの開発

研究課題名（英文）Establishment for the Real-time visualization system of the radioactive material transfer in the small insect living outdoors..

研究代表者

中島 裕美子（Nakajima, Yumiko）

九州大学・アイソトープ統合安全管理センター（伊都地区）・教授

研究者番号：70244340

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：自然界に生息する微小昆虫が放射性同位元素（Radioisotope:RI）の付着した物質を食することでRIを体内に取り入れた場合、それらのRIが体内でどのような動きをするのかを、昆虫を殺傷せずにリアルタイムでそれらの動態を観察できる携帯可能なシステムを、市販のカメラ、PC、特注のシンチレータ、コリメータなどの組み合わせを駆使することで安価に構築することを目標として研究した。様々な試みを行い、福島第一原子力発電所の事故後現在も残留しているCs-137の（ガンマ）線の検知にターゲットを絞り、モデル生物カイコ幼虫を用いたモバイルガンマカメラの基礎研究を実施し、今後の開発における問題点を絞り込んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島第一原子力発電所の事故から約10年以上が経過した現在、環境中には物理的半減期が約30年で、核分裂反応によって生成される人工放射線核種の¹³⁷Cs（セシウム137）が残留しており、動植物中の体内に残っている、あるいは生物濃縮により溜まっている組織、臓器を持っている生物が存在するかもしれない。¹³⁷Csによる環境や生物に与える影響を評価するために、生物体内に存在する¹³⁷Cs（放出される主な放射線としては線）の存在の有無や体内での動態を検知するための持ち運び可能なモバイルガンマカメラは有効な手段となり得る。

研究成果の概要（英文）： By using a combination of commercially available cameras, PCs, custom-made scintillators, collimators, we aimed at investigating how radioactive isotopes (RI) moves in the body of minute insects that live in nature in real time by eating substances containing RI without killing them. The goal of the research was to build a portable system that can observe these dynamics in real time at low cost.

As a result of various attempts, we decided to focus on the detection of gamma rays from cesium-137 remaining after the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, and we conducted research on the construction of a gamma-ray camera using silkworm larvae. We could narrow down the problems and issues for future development of the portable gamma camera.

研究分野：応用昆虫科学、放射線影響額、進化生物学、放射線管理学

キーワード：カイコ5齢幼虫 ¹³⁷Cs（セシウム137）（ガンマ）線 モバイルガンマカメラ PHITS コリメータ シンチレータGAGG イメージングインテンシファイア(I.I.)

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

福島県周辺地域では現在でも¹³⁷Cs(半減期約30年)が環境中から検出されて、直後に放出された¹³¹I(半減期約8日)とともに、生物影響が問題視されている。日本でも福島原発事故以降、周辺の動植物への放射線の影響を調査した報告が多数なされてきた。生物種の中で、昆虫は一般的に放射線(外部照射)に耐性であると言われている。ヒトの半致死線量(LD50/60)は約4 Gyであるが、ユスリカやクマムシは、数千GyのX線、ガンマ線、重イオンビームの照射でも死なない。しかし、福島原発事故直後に行われた、生息動植物への影響評価調査の報告において、¹³⁷Csによって昆虫に突然変異などの異常が見られたという報告がいくつかなされ、社会的にも大きな反響を引き起こした。昆虫に対する放射線の内部被ばく影響の評価に関しては、あまり多くの研究がなされていないのが現状である。加えて組織内の放射性核種と放射能濃度(Bq/g)を特定、算出する方法として現状では、個体を殺傷し、ゲルマニウム半導体測定器での測定や、Imaging Plateによる可視化と測定が主流であった。

一方、放射線の測定、イメージングという観点から、核医学はRIやその化合物の生体内や試験管内の挙動を追跡し、診断、治療を行う医学分野である。核医学診断装置には、ガンマカメラ、SPECT、PETなどの画像診断装置があり、X線CTやMRIなどによる“形態画像”では得られにくい、代謝や血流などの生理学・生化学的な“機能画像”が得られることが特徴であり、更に定量性にも優れた特徴を持つ。この技術を応用し、生きた植物個体内での輸送機構解析を目的として、生理活性を保ったまま個体内におけるRIでラベルされた元素の動態を非破壊的にリアルタイムで追跡、可視的に解析する装置が、世界では初めて現量子科学技術研究開発機構と東京大学の共同研究として開発されている。観察方式は主に、短寿命陽電子放出核種をトレーサーとして用いたPETISイメージング技術、線放出核種をシンチレーション反応により放射線を光に変えて検出する方式等である。短寿命の陽電子放出核種を自前で作るサイクロトロン施設を持っていないと困難であり、従ってこれらの装置を野外で用いることは想定されておらず、大ききにも携帯はできない。

微小な昆虫を傷つけずに、体内微細構造を見ることは上述のX線 μ CTで可能であるが、体内でのRI動態をリアルタイムでイメージングする技術は未だに確立されてはいなかった。

上記の現状を鑑み、まず本研究では、昆虫体内のRIの動態を自作の安価携帯ガンマカメラで可視的にイメージングをするシステムの開発と応用を目指した。この性能を実験室内での昆虫への投与で評価→向上させた後、野外の微小生物(昆虫含む)体内中でのRI動態解析へ応用しようという目標を掲げていた。また、ガンマカメラの仕様範囲をコリメータの種類を変えることによって向上させれば、汎用機器としての開発が見込まれ、さらに将来的に、教育教材、放射性医薬品を投与する際の血管外漏出の確認、原発事故における避難者のスクリーニング等に应用可能になる可能性も考えた。

2. 研究の目的

微小な昆虫体内での放射性同位元素(RI)の動態をリアルタイムでイメージング、同時に計測する技術(システム)の開発を目指した。まず核分裂生成核種が体内に摂取されることを想定し、カイコへのRI経口投与により体内に入ったこれらのRIから発せられる放射線を確実に検出できるガンマカメラを、できるだけ製作コストを抑えて作成することを目指した。

低エネルギー線核種に対してはX線用コリメータ+シンチレータ+高感度デジカメを用いて、高エネルギー線核種と線核種に対してはチェレンコフイメージングシステムを用いて作成することにした。また、まずはモデル昆虫であるカイコへRIの人工投与を行い、作成したカメラの画像イメージング技術を向上させるための条件を絞っていくこととした。次にカイコ以外の昆虫へのRIの人工投与実験と画像イメージングを行い、RI蓄積組織(部位)に相違はないか、また蓄積部位の放射能濃度の相関関係を明らかにすることを目標に掲げた。最終的には福島県周辺へ製作した携帯ガンマカメラを持って行って、現在生息する野生の主に昆虫に対してイメージングと測定を行い、現状での核種別RIの組織蓄積状況をイメージングできくかの確認を大きな目標にした。

3. 研究の方法

カメラ開発(方法)の経緯を順番に示す。

- 1) 高感度イメージングを目的に、研究開始直後には複数の放射性物質試料を用い画像検出器として市販のデジタルカメラ PENTAX KP(最高で ISO 819200 の高感度撮影が可能)を最高感度に設定し、P-32、S-35、I-125 のチェレンコフイメージングを試みた。
- 2) F-18 を用い、CsI シンチレータに近づけ同デジカメでイメージングを試みた。
- 3) 低エネルギーガンマ線 I-125 のイメージングについて X 線の散乱線を利用して照射実験をする場を構築した。

- 4) デジタルカメラにイメージングインテンシファイア(I.I.) C9016(浜松ホトニクス, 静岡)を装着した場合および高感度の科学計測用 C-MOS カメラ C11440-36U(浜松ホトニクス, 静岡)に変更した場合の感度評価を実施した。
- 5) 上述のデジタルカメラにイメージングインテンシファイア(I.I.)の性能判定結果に基づき、デジタルカメラガンマ線イメージングシステムの基礎検討結果を論文として発表した。
- 6) 上述の検討とは別の観点であり本来の目的である低放射能の試料を高画質で撮像するためには、検出器と試料(被写体)を近接する必要があり、コリメータについての検討を実施した。

生物被写体(カイコ5齢幼虫)を用いた実験に関してその手法を記載する。

福島環境に近いより低濃度放射性同位体試料をモデル生物(昆虫)体内に取り込ませた場合のイメージングの可否について検討した。カイコ幼虫{(株)愛媛蚕種からの購入系統}5齢3日にCs-137を10kBqから数段階に摂取量に変えた液体を練り込んだ人工飼料を摂食させた後、生きた状態のカイコ幼虫体内のCs-137の分布を、東京大学大学院工学研究科で開発しているコンプトンカメラ、ガンマカメラで計測した(MPPCアレイ+ピンホールコリメータによるガンマ線イメージング)。

4. 研究成果

カメラ開発について実施した実験結果(成果)について順番に概説する。

1) 市販のデジタルカメラ PENTAX KP(最高でISO 819200の高感度撮影が可能)を最高感度に設定した場合のP-32、S-35、I-125のチェレンコフイメージング

高エネルギーβ線であるP-32のみチェレンコフ光の確認ができた。

2) F-18を用い、CsIシンチレータに近づけ同デジカメでのイメージングを試みた。シンチレーション光の検出ができた。

3) デジタルカメラ PENTAX KP(リコーイメージング)と3cm厚のCsI(Tl)シンチレータを組み合わせ、遮光した状態でリアルタイムに画像を取得するシグを作成した。本検出器を用いてX線をシンチレータに照射することで、照射部位のリアルタイムイメージングできることを確認できた。しかしCs-137 3.7MBq密封線源による照射実験では、シンチレーション光を確認することが出来なかった。原因としてはデジタルカメラの感度不足が考えられた。

4) デジタルカメラにイメージングインテンシファイア(I.I.) C9016を装着した場合と高感度の科学計測用 C-MOS カメラ C11440-36Uに変更した場合の感度評価

I.I.を使用することで10倍、科学計測用カメラで100倍近くの高感度上昇を確認した。

5) 論文の内容

具体的には、市販のデジタルカメラとシンチレータアレイをベースにしたリアルタイムイメージング法の提案のための実験として、ガンマ線の代用としてX線を用い、デバイス(PENTAXKPおよびORCA-sparkC11440-36Uデジタルカメラの2種類)の感度と解像度を評価した内容である。ヨウ化セシウムシンチレータアレイにX線を照射して、ライブビュー画像を使用して発光状態を確認、ピクセル値を線量率の関数として評価、さらにイメージングインテンシファイア(I.I.)を使用して光信号を増幅することに応じた発光の状態を解析した。ORCA-sparkは核医学検査に適用するのに適した予測線量率で発光を観測できたが、ガンマ線の広がりを制御するにはコリメータが必要であることが判明した。一方これにより感度が低下するため、シンチレータから放出される光の量を増やし、カメラの感度を向上させることが重要であることが示唆された結果となった。またシステムのガンマ線検出感度を上げるために別のシンチレータGAGGを用意し、基本特性を評価した。

6) コリメータの検討

平行多孔コリメータについて、鉛ブロックを加工したもの、および金属3Dプリンタを用いたものを作成し、2種類の画像検出器を作成した。鉛ブロックの加工は試行錯誤をしながらの作成となり、最終的にはワイヤー放電加工機と型掘り放電加工機の2台を使用して加工することで、60mm×60mm×長さ30mmの鉛に1.5mm辺の四角穴を肉厚0.5mm間隔で676個開けたものが作成できた(九州大学工学部技術部製作技術室 設計・加工班に作成をしていただいた。)

画像検出器(モバイルガンマカメラ)の開発に関しては、表示プログラムを作成した。

モバイルカメラの性能評価としてはエネルギー分解能の評価、コリメータの評価としては、PHITSを用いたコリメータ厚を変化させたときの分解能を評価した。

AGG(Gd₃(Al,Ga)₅O₁₂)シンチレータとMAPMT及び読み出し回路で構成されるガンマ線

イメージングカメラで、平行多孔コリメータを通過したガンマ線を、ピッチ 3.2 mm で 12×12 個並べた GAGG シンチレータで光信号に変換し、さらに 8×8 ピクセルの MAPMT で電気信号に変換し、64 チャンネルの読み出し回路でデジタル化する。データはリアルタイムに PC に転送され、重心演算結果によりガンマ線の当たったシンチレータを特定し画像化した。コリメータには上述の 60 mm×60 mm×長さ 30 mm (九州大学工学部技術部作成) の鉛製のものを用いた。MAPMT は浜松ホトニクス製の H12700A、増幅器形式は電荷増幅器、波形整形増幅器であった。シンチレータ、MAPMT、読み出し回路線源は ^{137}Cs 、 ^{133}Ba 、 ^{60}Co で、エネルギースペクトルから各線源でのエネルギー分解能を求めた。PHITS でガンマカメラの一部を再現、実測と同様の条件で計算を行い、実測と比較、それに基づきコリメータ厚を変化させたときの分解能を評価した。各線源でのエネルギー分解能を解析した結果、計算と実測で近い分布が見られた一方、一部ピクセルで感度異常が見られた。実測、計算の指標値の差からコリメータ厚変化に対する指標値の変化を示せた。

今後は感度不良に対するソフトウェア側での補正の必要性和計算条件、結果の妥当性の検討し、高感度化、高解像度化を目指す方向で進める。

カイコ 5 齢 3 日目幼虫を用いた実験の結果と今後の方向性について。

カイコの消化器官内(前腸、中腸、後腸)の詳細なイメージングまではできないものの、消化器官内全体内のガンマ線の分布を取得(撮像)することが出来た。しかしカイコの自発的な摂食による方法では、放射性同位元素の投与量を正確に評価することが困難であることから、人為的な投与方法でできるだけ正確な量を投与する人工投与に切り替えた。具体的には一定量の RI 入り水溶液を幼虫へ 3 種類(静脈注射、腸管内注射、経口投与)の方法で投与することにした。

現在までのところ、安価、高感度なモバイルガンマカメラは最終的には出来上がっていないため、研究期間内に、野外における昆虫体内の RI の動向を撮像するまでには至らなかったが、上記の研究成果に基づき、今後はモバイルガンマカメラの改良をさらに進め、これを用いてより精度高く微小生物体内での RI の局在と可視化するシステム構築の開発を続ける予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Hiroshi Yoshitani, Toshioh Fujibuchi, Yumiko Nakajima	4. 巻 7 (3) (037001)
2. 論文標題 Basic study of mobile gamma ray imaging using a digital camera andscintillator	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Biomedical Physics and Engineering Express	6. 最初と最後の頁 1-6
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroshi Yoshitani, Toshioh Fujibuchi, Yumiko Nakajima
2. 発表標題 Performance evaluation of gamma-ray real-time imaging system with digital camera
3. 学会等名 5th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA15)（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉谷悠、藤淵俊王
2. 発表標題 デジタルカメラRI投与時を利用したモバイルガンマ線イメージング法の検討
3. 学会等名 第14回九州放射線医療技術学術大会, 2019.11., 熊本
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本昂侑、藤淵俊王
2. 発表標題 X線診療場に最適化したワイヤレス線量測定システムの基本性能評価
3. 学会等名 日本放射線技術学会第46回秋季学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Yamamoto, Toshioh Fujibuchi
2. 発表標題 Estimation for Basic characteristics of wireless multi-sensor active personal dosimeter-tablet syste
3. 学会等名 Kyushu University - Diponegoro University Symposium (招待講演)
4. 発表年 2019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	藤淵 俊王 (Fujibuchi Toshio) (20375843)	九州大学・医学研究院・教授 (17102)	

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
---------	---------