

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K15484

研究課題名(和文)形状変化型放射線検出器を用いた放射性物質の3次元可視化手法の確立

研究課題名(英文)Development of 3-D visualization method of radioactive substances using shape-changing radiation detector

研究代表者

佐藤 優樹 (SATO, YUKI)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター・副主任研究員

研究者番号：20632409

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：廃炉作業において、狭隘空間を通り抜けた先に存在する放射性物質の分布を把握することを目的とし、検出器形状を変更可能なコンプトンカメラを製作するとともに、¹³⁷Cs照射場において放射線源を可視化できることを確認した。併せて、市販品を基盤としたコンプトンカメラで取得した線源イメージを、複数枚の写真から復元した作業環境の3次元モデルに投影することにより、線源位置を3次元的に可視化できることを確認した。

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(1F)の廃止措置に向けて、1F建屋内に飛散した放射性物質の分布を可視化するための技術開発は、作業員の被ばく線量の低減や除染計画の立案のために重要である。形状可変コンプトンカメラによる放射線測定と、複数枚の写真から作業環境を3次元的に復元する技術を組み合わせることにより、廃炉現場において狭隘空間を通り抜けた先にある放射能汚染を3次元的にイメージングできる可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the distribution of radioactive contamination in the narrow space inside the decommissioning environment, we fabricated a Compton camera which can change the shape of the detector and confirmed that the source location can be imaged in the ¹³⁷Cs irradiation facility. In addition, the source location was identified in three dimensions by projecting the source image acquired by a Compton camera fabricated based on a commercial product onto a three-dimensional model of the work environment reconstructed from multiple photographs.

研究分野：放射線計測、放射性物質可視化

キーワード：形状可変ガンマ線イメージャ コンプトンカメラ Structure from Motion

1. 研究開始当初の背景

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所（1F）のような廃炉作業の現場では、作業員の被ばく線量の低減、および作業計画の立案のために、作業環境に沈着した放射性物質の分布を可視化するための技術開発が求められている。さらには作業が進行するにあたり、現行装置では不可能な狭隘部における放射線イメージングや、狭隘部を通り抜けた先に存在する空間を放射線イメージング可能な技術の開発も必要になると予想される。

本研究では、多くの機器や配管、瓦礫といった様々な物体が存在する廃炉作業の現場において、放射性物質分布のモニタリング範囲を拡張するために、自己形状を変化させることが可能な形状可変コンプトンカメラの製作に着手した。加えて、放射性物質の位置を3次的に可視化するために、コンプトンカメラで取得した放射性物質のイメージを、複数枚の現場の写真を組み合わせて復元した作業現場の3次元モデルに投影する手法の開発にも着手した。

2. 研究の目的

1F サイト内のような廃炉作業の現場において、これまでに作業員が進入できなかった狭隘部および狭隘部を通り抜けた先に存在する空間を3次的に把握し、併せてホットスポット（周囲に比べて局所的に線量率が高い領域）の位置を3次的に特定することは、効果的な除染においては廃炉作業を進展させるために重要である。そこで本研究では後述する2点を目的として研究開発を実施した。すなわち、

- (1) 自己形状を変化させることができるコンプトンカメラ（以下、形状可変コンプトンカメラ）の製作、および放射性物質可視化能力を有することの確認
- (2) 複数の写真から復元した作業環境の3次元モデルに放射性物質のイメージを投影することによる、放射性物質の3次元的な位置特定手法の確立

である。

既に1F サイト内では放射性物質を可視化する装置であるガンマ線イメージャを用いた実証試験が実施されていた。しかし従来の装置は重量が重たい（数十 kg）もしくはサイズが大きい（1辺数十 cm 程度）仕様となっており、可搬性に優れていなかった。さらに、これら従来のガンマ線イメージャはその自己形状を変化させることを想定しておらず、固定されたジオメトリを用いてガンマ線の飛来方向の推定ならびに放射性物質の可視化を行っていた。このような仕様のために、作業員が侵入できない狭隘部への装置の導入ならびに放射性物質分布の測定は実施されていなかった。

また、ガンマ線イメージャそのものが取得できる放射性物質のイメージは2次元の結果であり、放射性物質の位置やその広がりやを3次的にとらえることは困難であった。そこで本研究では、複数の写真から Structure from Motion (SfM) により作業環境の3次元モデルを復元し、ここに放射性物質のイメージを投影することにより、放射性物質の位置を3次的に可視化することを試みた。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 形状可変コンプトンカメラの製作と性能評価、(2) 放射性物質の3次元的な位置特定手法の確立、の2つのテーマを主として実施した。各々のテーマについてその実施方法を示す。なお、(1)については富山高等専門学校と共同で実施した。

(1) 形状可変コンプトンカメラの製作と性能評価

図1は、廃炉作業環境における放射性物質の可視化手法について、従来のガンマ線イメージャと本研究で製作した形状可変コンプトンカメラによる測定方法の違いを示したものである。ここで、従来のガンマ線イメージャにはピンホール型カメラ、コンプトンカメラ、符号化開口型カ

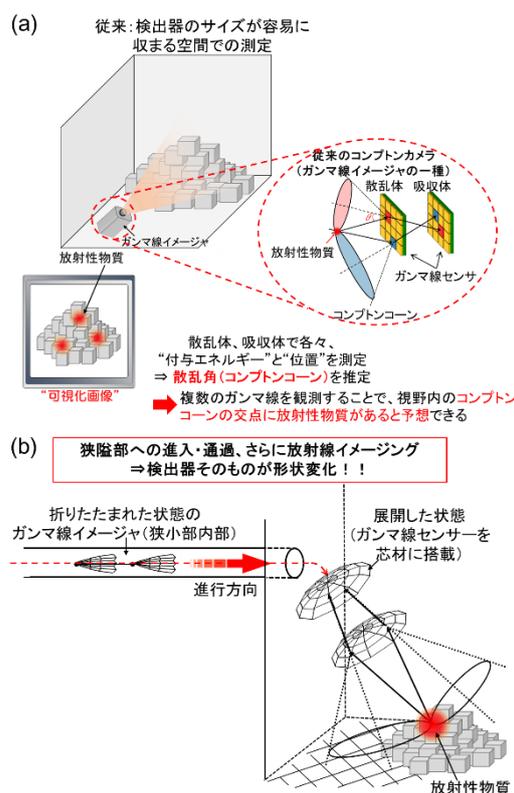


図1. (a)従来のガンマ線イメージャと(b)形状可変コンプトンカメラの利用方法の概念図。

メラが存在するが、図中では本研究で採用したコンプトンカメラ方式について、その動作原理を説明した。従来のガンマ線イメージャでは、各々の装置サイズを踏まえて容易に運び込むことができるエリアを測定対象としていることに対し、形状可変コンプトンカメラは、狭隘部を通り抜けた先にあるエリアを測定対象エリアに設定している。

本研究では、形状を変化させることが可能なガンマ線イメージャを製作するにあたり、原理的に遮蔽が不要であり、小型化に有利なコンプトンカメラを採用した(図1(a)参照)。装置の構造は、図1(b)に示すように折り畳みと展開によって検出器を形状変化させるものとした。具体的には、「折り畳み傘の骨」のような芯材を製作し、芯材に複数のガンマ線センサ(Ce:GAGG シンチレータとSi 半導体受光素子の組み合わせ)を搭載することによって、展開時にコンプトンカメラを構成する装置を製作した。つまり、狭隘部を通り抜ける際は傘を閉じて、通り抜けた先において傘を開き、イメージングを実施するというものである。

(2) 放射性物質の3次元的位置特定手法の確立

空間の3次元モデルを構築するために、本研究ではSfMを利用した。これは、デジタルカメラやビデオカメラのような光学カメラで連続的に撮影した複数の写真をつなぎ合わせることで、対象の3次元モデルを作成するものである。さらにSfMでは、写真が撮影された位置、すなわちカメラ位置および姿勢を推定することができる。この原理を用いて、コンプトンカメラに光学カメラを組み合わせて、コンプトンカメラの自己位置と姿勢を推定し、図2に示すように複数の視点からの測定データをもとに、放射性物質の位置を3次元的に特定することが可能となる。具体的には、コンプトンコートを3次元モデル上に投影し、コーンの交点に放射性物質を見出すというものである。なお、ここで記述した放射性物質の3次元的位置特定的手法については、市販のコンプトンカメラを基盤とした装置と光学カメラを組み合わせて、その成立性評価を実施した。

4. 研究成果

上述した「3. 研究の方法」に記載した2つのテーマについて、研究成果を記述する。

(1) 形状可変コンプトンカメラの製作と性能評価

製作した形状可変コンプトンカメラの写真を図3に示す。上述したように開閉可能な「傘」を2つ用意してそれぞれを散乱体、吸収体とし、32個ずつガンマ線センサを配置した。ガンマ線センサには、4mm×4mm×4mmのCe:GAGGシンチレータとSi半導体受光素子を組み合わせたものを採用した。

動作試験では、1Fにおいて主な汚染要因核種となっている ^{137}Cs の可視化を試みた。 ^{137}Cs ガンマ線照射場において線源の可視化試験を実施するにあたり、事前に放射線輸送計算コードEGS5で測定体系を模擬し、散乱体-吸収体間の距離を変化させたときのガンマ線検出効率やイメージングの分解能を調査することによって、散乱体-吸収体間の距離を決定した。

図4に ^{137}Cs 照射場における試験結果を示す。それぞれ(a)視野中央ならびに(b)視野左側45度

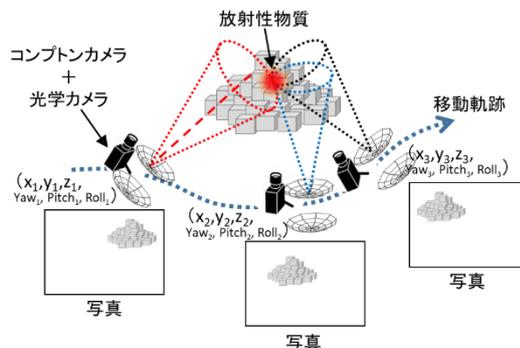


図2. 光学カメラの撮影写真を用いてコンプトンカメラの自己位置及び姿勢を推定する。推定した複数の自己位置及び姿勢において、ガンマ線の飛来方向を測定し、放射性物質を3次元的に可視化する。

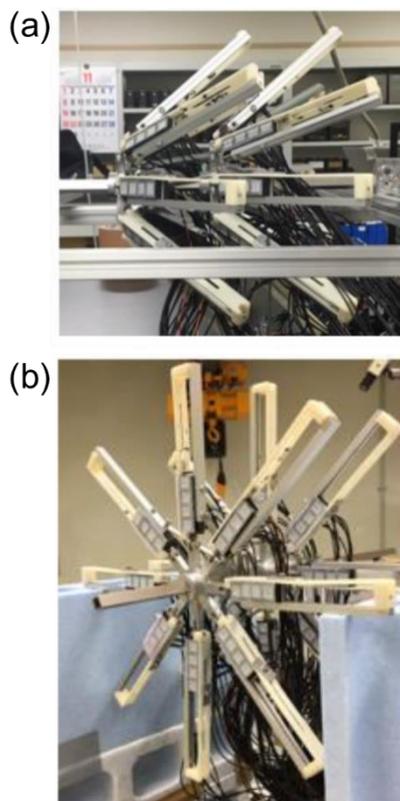


図3. 形状可変コンプトンカメラの写真。(a)および(b)は、傘の開き角度が45度の様子と、全開の様子である。

方向に ^{137}Cs 線源が存在するケースについて、画像再構成を行った結果である。両ケースともに $10 \mu\text{Sv/h}$ の照射環境において、20 分間データを取得したものであり、異なる角度に存在する ^{137}Cs 線源について、線源存在位置に高強度のイメージが結像していることが見て取れる。

これらの結果より、製作した形状可変コンプトンカメラが ^{137}Cs 線源を可視化する能力を有していることを確認できた。一方で、 $10 \mu\text{Sv/h}$ 以上の照射条件ではデータ収集に使用するソフトウェアが停止する事象が発生したため、今後、高線量率でイメージングを行うためにはデータ収集ソフトウェアの改造が必要であることが課題として残った。

この他、ガンマ線センサに $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の Ce:GAGG シンチレータを採用した形状可変コンプトンカメラを用いて、福島県浜通り地域の屋外環境中にて、1F 事故由来の放射性物質の可視化試験を実施した。その結果、周辺が $0.3 \mu\text{Sv/h}$ 未満の環境において、最大で $2.5 \mu\text{Sv/h}$ の汚染（ホットスポット）を可視化することに成功しており、日本原子力学会「2019 年の秋の年会」にて報告した（山岸ら）。

(2) 放射性物質の 3 次元的な位置特定手法の確立

SfM とコンプトンカメラによるガンマ線イメージングを組み合わせて、放射性物質の位置を 3 次元的な特定する手法を確立した。代表的な実証例を以下に示す。実証試験では、株式会社千代田テクノ製ガンマキャッチャーを基盤として製作したコンプトンカメラ（Ce:GAGG シンチレータと浜松ホトニクス株式会社製 MPPC を組み合わせたガンマ線センサを採用、Y. Sato, Physics Open, 7, 100070 (2021) 参照）とデジタルカメラ（デジカメ）（SONY 株：DSC-RX100M5A）を組み合わせた。

図 5 は、実験室の 3 次元モデルを SfM によって復元し、ここにコンプトンカメラで取得した ^{137}Cs 線源のイメージを投影したものである。棚に ^{137}Cs 線源が入った段ボール箱が置かれており、ここに高強度のイメージが結像している。

実験では、コンプトンカメラとデジカメを組み合わせたセットアップをオペレータが携帯し、連続的に写真を撮影しながら、かつコンプトンカメラでガンマ線を測定しながら実験室内を移動した。SfM の原理を利用することによって、ガンマ線が検出された時刻におけるコンプトンカメラの自己位置や姿勢の情報を推定することができる。そのため、コンプトンカメラの移動軌跡上の各点において、コンプトンコーンの投影方向が決定され、3 次元モデル上においてコーンが多く重なった点に線源を見出すことができる。本研究では、これらの手法を用いることにより ^{137}Cs 線源の位置を 3 次元的に可視化し、特定できることを確認した。

しかし、3 次元的な可視化を実施する上での課題も明らかとなっている。写真撮影の条件について、移動中にデジカメの急な視野変更が発生するなどして特定の写真が結合できなくなる、すなわち 3 次元モデルの復元に特定の写真が利用できなくなる場合、同時にコンプトンカメラの自己位置推定もできなくなる。1F のような高線量率の環境ではデジカメと組み合わせたコンプトンカメラをロボットに搭載することが望ましいが、移動速度や旋回速度については今後検討する必要がある。

4. 研究成果

原子力発電所の廃炉作業において、狭隘部を通り抜けた先に存在する放射性物質をイメージングすることを目的とし、検出器形状を変更可能なコンプトンカメラを製作した。具体的には、「傘」の骨の形状をした開閉可能な芯材を前段と後段に 2 つ用意し、ここに Ce:GAGG シンチレータと Si 半導体受光素子の組み合わせからなるガンマ線センサを配置することにより、コンプトンカメラを構成した。さらに、このコンプトンカメラについて ^{137}Cs 照射場での試験を実施するとともに、 $10 \mu\text{Sv/h}$ の照射条件で線源位置をイメージングできることを確認した。一方で、線量率が $10 \mu\text{Sv/h}$ までの環境では線源をイメージングできたが、より高線量率でイメージングを行うためにはデータ収集ソフトウェアの改造が必要であることが明らかとなった。

加えて、複数枚の写真から SfM により作業環境の 3 次元モデルを構築し、ここに線源イメージを投影することにより、線源位置を 3 次元的に特定する手法を開発した。市販のコンプトンカメラをベースに改造した小型コンプトンカメラ（ジオメトリは固定）に光学カメラを組み合わせたセットアップにおいて、これらを携帯したオペレータが移動しながら連続的に写真を撮影するとともに、コンプトンカメラを用いて線源から放出されるガンマ線を計測することにより、線源位置を 3 次元的に可視化できることを実証した。

上述の形状可変コンプトンカメラに SfM を組み合わせることにより、狭隘領域を通り抜けた先にある放射能汚染を 3 次元的にイメージングできる可能性が示された。

なお、本研究における形状可変コンプトンカメラの製作は、富山高等専門学校の高田英治教授、山岸恵大氏、宮田健吾氏と共同で実施したものである。

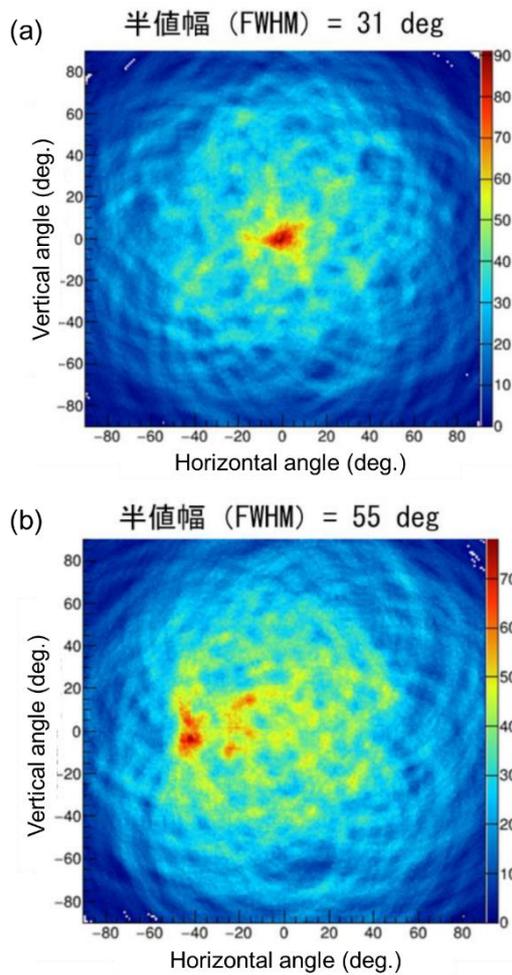


図 4. ^{137}Cs 照射場における試験結果。(a)および(b)は、それぞれ線源が視野中央および左 45 度方向に存在するケースにおける測定結果である。照射の線量率は $10 \mu\text{Sv/h}$ であり、傘は全開としてそれぞれ 20 分間照射した。

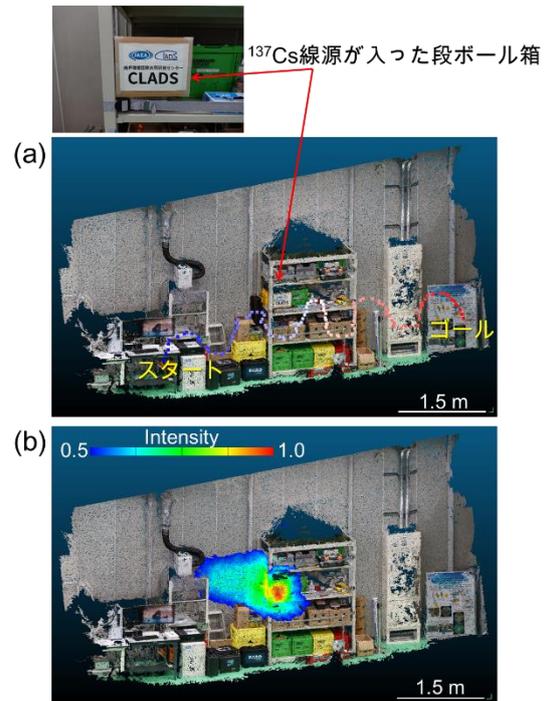


図 5. コンプトンカメラによるガンマ線測定と SfM を組み合わせることにより、 ^{137}Cs 線源の位置を可視化した。(a)および(b)はそれぞれ、SfM により復元した実験室の 3 次元モデルと、ここにコンプトンカメラで取得した線源イメージを投影したものである。図中の“スタート”と記載された位置から“ゴール”と標記された位置まで、オペレータが装置を携帯して移動させつつ、ガンマ線測定と写真の連続撮影を実施した。(Y. Sato, Physics Open, **7**, 100070 (2021) において発表)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Sato Yuki, Minemoto Kojiro, Nemoto Makoto, Torii Tatsuo	4. 巻 976
2. 論文標題 Construction of virtual reality system for radiation working environment reproduced by gamma-ray imagers combined with SLAM technologies	5. 発行年 2020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 164286 ~ 164286
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2020.164286	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 Sato Yuki	4. 巻 7
2. 論文標題 A concept of mirror world for radioactive working environment by interactive fusion of radiation measurement in real space and radiation visualization in virtual space	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Open	6. 最初と最後の頁 100070 ~ 100070
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physo.2021.100070	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1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山岸 恵大、高田 英治、佐藤 優樹、鳥居 建男、浦風 和裕
2. 発表標題 形状可変型 カメラの開発と特性評価
3. 学会等名 日本原子力学会 2019年秋の大会
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
連携研究者	高田 英治 (TAKADA EIJI) (00270885)	富山高等専門学校・電気制御システム工学科・教授 (53203)	

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