

奨励金No.1576

放射能汚染の定量的3次元可視化に挑む 統合型放射線イメージングシステムの開発

佐藤 優樹

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究主席

Development of an integrated Radiation Imaging System for quantitative 3-D visualization of radioactive contamination

Yuki Sato

Japan Atomic Energy Agency, Senior Principal Researcher



福島第一原子力発電所の廃止措置において、作業員の被ばくを減らし、効果的な除染を行うためには、放射能汚染の正確な位置特定が重要である。本研究ではコンプトンカメラで取得した放射線源のイメージに逆推定技術を適用し、複数の放射線源の3次元的位置と放射能レベルを特定する手法を提案した。複数の既知の放射線源のイメージを準備し、係数を乗じて足し合わせて未知の放射線源のイメージを再現することで、未知の放射能を推定するものである。

In the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, it is important to accurately locate radioactive substances in order to minimize worker exposure and to perform effective decontamination. This study proposes a method to determine the 3D location and radioactivity levels of multiple radiation sources by applying inverse estimation techniques to radiation source images acquired using a Compton camera. In this method, images of known radiation sources are prepared, combined with appropriate coefficients and added together to reconstruct an image of unknown radiation sources to estimate their radioactivity.

1. 研究内容

1.1 はじめに

福島第一原子力発電所（1F）の廃止措置において、作業員の被ばくを最小限に抑え、適切な除染計画を策定するためには、放射能汚染の位置や拡がりを可視化することが重要である。

従来、コンプトンカメラを含むガンマ線イメージャで得られる放射線源イメージは2次元であり、奥行き情報を含まない。一方で1Fの作業現場において、放射能汚染は様々な機器、構造物、及び瓦礫に3次元的に付着しているため、3次元的に放射能汚染の分布を把握することが望ましい。加えて、放射能汚染の分布を可視化するだけでなく、

その放射能を定量的に評価することにより、その周辺環境の線量率上昇への寄与や、除染や遮蔽効果を定量的に議論できるようになる。

このような背景を踏まえて、本研究はガンマ線イメージャの一種であるコンプトンカメラを用いて、放射能汚染の位置や拡がりを3次元的に可視化するとともに、その放射能を定量的に推定するための手法を提案するものである。

1.2 方法

本研究では、逆推定を用いて3次元空間内に存在する複数の放射線源の位置を特定し、その放射能を定量的に推定する手法を提案した。提案手法

は以下の通りである。

まず対象領域を複数の関心領域（ROI, Region of Interest）に分割し、各ROI毎に放射能が既知の放射線源を配置して、放射線源の3次元イメージを撮影する。具体的には、各ROIに配置した既知の放射線源について、線源を中心として90度ずつ回転させた4方向の視野からコンプトンカメラを用いて測定を行い、既知線源の3次元イメージを取得する。次に、未知の放射能を持つ複数の放射線源が存在する対象領域の3次元イメージを撮影する。これについても、上記と同じように4つの視野からコンプトンカメラを用いて測定を行い、3次元的な放射線源のイメージデータを取得する。その後、既知の放射線源の3次元イメージにおける各ROI毎のイメージ強度について、ROI毎に係数を乗じて足し合わせることによって、未知の放射線源の3次元イメージを再現することを試みる。この過程で使用される式は以下の通りである。

$$I_{m,j} = C_j \cdot i_{m,j}, \quad (1)$$

$$C_j = \frac{Q_j}{q_j}, \quad (2)$$

$$\Delta = \sum_m \left(S_m - \sum_j I_{m,j} \right)^2, \quad (3)$$

ここで、 $I_{m,j}$ は、対象領域内のボクセル m における、放射線源 j のみがあるROIに存在する場合のイメージ強度を示す。放射線源 j は、放射能を推定すべき未知の放射線源として指定する。ここで、未知の放射線源 j の画像強度 $I_{m,j}$ は、式1に示すように同じROIに放射能が既知の放射線源があった場合の画像強度 $i_{m,j}$ に比例する。さらに、比例係数 C_j は、式(2)に示すように、未知の放射線源 (j) と既知の放射線源の放射能値の比として定義される。 Q_j と q_j は、それぞれ未知の放射線源 j と既知の放射線源の放射能である。式3において、 N は対象領域内の未知の放射線源の数であり、ROIの数に等しいとする。ここで、既知線源を配

置して取得した $i_{m,j}$ に比例係数 C_j を乗じた $I_{m,j}$ 値について、全てのROIに対して合計したイメージ強度と、複数の未知の放射線源を測定して取得したイメージ強度 S_m との差を計算する。この差の二乗和を対象領域内のすべてのボクセルにわたって計算し、 Δ を最小化する各放射線源 j に対する比例係数 C_j を決定する。最終的に C_j が得られたならば、式(2)を用いて未知の放射線源 Q_j の放射能を推定できるというものである。この計算は、Microsoft Excel に実装されている一般化簡約勾配法 (GRG: Generalized Reduced Gradient method) のソルバーを用いて実施しており、多くのユーザーが試行できるものとなっている。なお、既知の放射線源の画像強度 $i_{m,j}$ は事前に取得しておく必要がある。著者は既に、類似の手法をコンプトンカメラで取得した2次元イメージに適用しており、コンプトンカメラの有効視野内の複数の放射線源の放射能を推定した実績を有している [1,2]。本研究で提案した手法は、これを3次元イメージに拡張したものである。

1.3 結果

放射能 q_j が $8.9 \text{ MBq} \pm 20\%$ の ^{137}Cs 放射線源を既知線源として準備し、これを合計27個のROI毎に配置してコンプトンカメラで測定するとともに、あらかじめ3次元イメージを取得した。次に放射能を未知と仮定した3つの ^{137}Cs 放射線源 ($7.6 \text{ MBq} \pm 20\%$ 、 $7.7 \text{ MBq} \pm 20\%$ 、 $1.54 \text{ MBq} \pm 3\%$) について、いずれかのROIに配置して3次元イメージを取得した。

GRGを用いた逆推定により、実際に未知の放射線源を配置したROIにおいては、周囲のROIよりも高い放射能値が推定された。しかし、実際には放射線源が存在しないROIにおいても、推定値は真値であるゼロとはならず、弱い放射能が推定された。これは、コンプトンカメラにおけるガンマ線の検出数のゆらぎや、既知線源と未知線源を測定した実験セットアップにおける線源とコンプト

ンカメラの間の距離のずれが原因と考えられる。しかしながらこの結果では、放射能の推定値に対して適切に閾値を設定することで、複数の放射線源の正しい位置を推定できる可能性を示すことができた。この手法は、従来のコンプトンカメラを用いた画像再構成では難しかった、放射能比が大きい複数の放射線源の同時可視化に適用できることを示している。

さらには未知線源の放射能を定量的に推定した。3つの未知線源のうち、放射能の大きい放射線源（7.6 MBq および 7.7 MBq）については、放射能の推定値が推定誤差の範囲内で真値と一致した。しかし、低い放射能の放射線源（1.54 MBq）については、推定値が真値から逸脱した。今後の研究では、コンプトンカメラのガンマ線検出数の変動が放射能推定の精度に与える影響を調査し、放射線源の数や複数の放射線源における放射能比を変化させて、原理検証を継続する予定である。なお、本稿で記載した内容は「2. 発表（研究成果の発表）」の1に記載した論文として公開したものである。

1.4 参考文献

1. Yuki Sato, Yuta Terasaka, Radioactivity estimation method of multiple radiation sources using Compton camera for radioactive hotspot survey at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Abstract of IYNC2022, International Youth Nuclear Congress, Koriyama, Fukushima Prefecture, Japan, Nov. 27–Dec. 2 (2022).
2. Yuki Sato, Radioactivity estimation of multiple radiation sources using a Compton camera to investigate radioactively contaminated objects, Appl. Radiat. Isot., Volume 203, 111083 (2024).

2. 発表（研究成果の発表）

1. Yuki Sato, Three-dimensional localization and radioactivity quantification of radiation sources

through inverse estimation based on Compton camera measurements, Radiation Protection Dosimetry, Volume 201, Issue 7, Pages 490–500 (2025)