

# 放射線分布の3次元イメージング 技術

佐藤 優樹 鳥居 建男

Sato Yuki

Torii Tatsuo

#### 1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力 ホールディングス(株)福島第一原子力発電所(以下, 「東京電力 HD」、「福島第一原発」という)の事故 から7年の歳月が流れ、環境中に飛散した放射性物 質による空間線量率の低減化も進み、避難解除され た地域も拡大した。それを端的に示すものが、現在、 原子力規制庁が行っている航空機モニタリングの空 間線量率分布のマップであろう」。事故後、汚染の 広がりを示すマップは、この航空機モニタリングだ けでなく、自動車に搭載して空間線量率分布を表示 する KURAMA システム等,放射線分布を可視化す る様々な手法が用いられるようになった20。比較的 狭い範囲でも、放射性物質の可視化への要求が高ま り、ガンマカメラと呼ばれる放射線のイメージング 装置の開発が進められ、市販されるようにもなって いる。γ線を放出する放射性物質の可視化装置が実 現すれば、サーベイメータ等による"点"の測定と 異なり、放射性物質の存在を見落とすことなく、"面" 的にその広がりを認識できる。放射性物質の分布を 測定することができるガンマカメラには遮蔽体に小 さな穴を開けそこを通る放射線を後ろに設置した格 子状に配置した多数の放射線検出器でその位置を測 定することにより放射線源を捉えるピンホールカメ ラと、γ線が物質と衝突することにより引き起こす コンプトン散乱を利用して解析的に放射線源の存在 位置を求めるコンプトンカメラと呼ばれる方式に大 別され、用途に応じて様々なフィールドで使われて いる。

人が近づくことができ、またそれほど複雑ではない環境中ならば、こうしたガンマカメラによる面的

な放射性物質の分布測定は、汚染の全体像を把握す ることが容易にできる。しかし、様々な機器や配管 が林立し、しかも線量率が高く、汚染源が各所にあ り人が容易に近づけない福島第一原発の建屋内の作 業環境で測定するためには、面的な汚染分布測定で は、汚染場所の距離や広がりを認識することは困難 である。また、高線量率のエリアでは、陸上ロボッ トやドローンといった遠隔操作機器にガンマカメラ を搭載することも必要となる。そのためにガンマカ メラは小型で軽量であることが重要となる。そこで 日本原子力研究開発機構(以下,「原子力機構」と いう) の廃炉国際共同研究センターでは、放射線イ メージングセンサーとして大きな遮蔽体の要らない 小型コンプトンカメラを用い、放射性物質の立体的 な分布を示そうと、福島第一原発の作業環境におい て放射線物質の3次元可視化技術の研究開発に取り 組んでいる。本稿では、その技術と取組みについて 紹介する。

## 2. 放射性物質の3次元可視化

前述のガンマカメラとして、放射性物質の分布の評価が比較的容易なピンホールカメラは、ピンホールとなる小さな穴以外は重量物の遮蔽体に囲まれているため、その重量は数 10 kg と重い。このため現場へ容易に持ち込むことが難しく、定点観測には適しても、様々な場所で測定することは難しい。加えて、作業員が立ち入ることができないような高線量率環境の現場においても、重量が重いために遠隔機器に搭載して現場に導入することは困難である。

小型・軽量なコンプトンカメラ (y線イメージャーの1種) の開発は、これまでに早稲田大学の片岡らと



光学カメラ

図1 コンプトンカメラの外観図

大きさを比較するためにボールペンを配置した

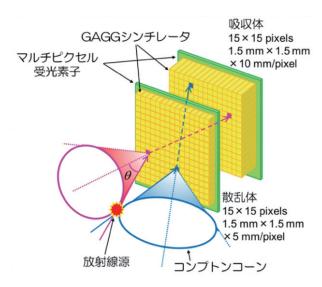
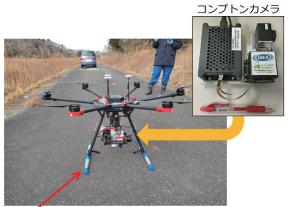


図2 コンプトンカメラの動作原理

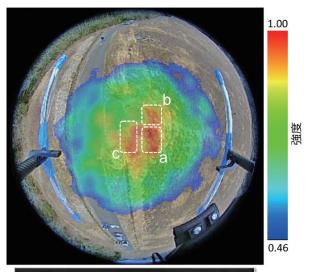
センサー前方に仮想コーンを描画し、コーンの交点に放射性物質を見出す

浜松ホトニクス(株)によって研究開発されている。この技術をベースに、原子力機構では、現場に持ちこみ易く、ドローンにも搭載可能な約680gまで小型軽量化したコンプトンカメラを開発し、福島県内の帰還困難区域や福島第一原発の建屋内外での汚染分布を測定できる本装置の開発を進めている5.6。

図1に、開発したコンプトンカメラの外観を示す。本装置は放射性物質から放出される $\gamma$ 線を測定するための $\gamma$ 線センサーと、センサー出力信号を処理するための信号処理基板、及び光学画像を取得するための光学カメラから構成されている。 $\gamma$ 線センサーは 1.5 mm 角の 15 × 15 px の GAGG シンチレータ



ドローン (DJI: Matrice 600)



a:  $55 \mu \text{Sv/h}$  b:  $30 \mu \text{Sv/h}$  c:  $35 \mu \text{Sv/h}$ 

図3 上:コンプトンカメラをドローンに搭載した遠隔放射線イメージングシステムの外観図。下:高度9mの上空からコンプトンカメラを用いてホットスポットを可視化した結果。周囲に比べて汚染強度が高い部分を赤く表示する仕様となっている

が2層になっており、主要な汚染源である  $^{137}$ Cs からの $\gamma$ 線が1層目(散乱体)と2層目(吸収体)の各々で相互作用した位置と、付与したエネルギーから、 $\gamma$ 線の飛来方向を特定する(図 2)。

これまでに、前述のコンプトンカメラをドローンに搭載した遠隔放射線イメージングシステムを試作し、帰還困難区域の屋外環境において、上空から遠隔にて、周囲に比べて汚染強度が高いホットスポットを可視化することに成功している(図 3)<sup>5)</sup>。

一方で、放射性物質の位置、形状を詳細に特定するため、福島第一原発建屋構造物内部の3次元モデルを取得・構築する技術の開発にも着手した。建屋

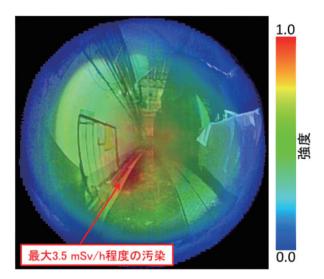


図4 3号機タービン建屋内通路における放射性物質の可視 化結果

床面に這わされたホース付近の床面・壁面に局所的な汚染を映し出すことに成功

構造物の3次元的な寸法を含んだ構造物モデルに、コンプトンカメラで取得される汚染分布の情報を重ね合わせることにより、実空間における汚染分布の拡がりをより詳細に議論することができるようになる。そこで、本稿ではレーザー光を利用した測域センサー(LiDAR)で取得した建屋構造物の3次元モデルに、汚染分布を統合した結果を紹介する。

### 3. 福島第一原発建屋内における放射性物質分布可視化試験

原子力機構は東京電力 HD の協力を得て、福島第一原発 3 号機タービン建屋内通路において、コンプトンカメラを用いた放射性物質の可視化試験と、測域センサーを用いた建屋内の 3 次元モデル構築のためのデータ取得試験を実施した。その結果、空間線量率が 0.4~0.5 mSv/h といった従来のコンプトンカメラでは測定が困難な比較的空間線量率が高い場所で、表面線量率が最大 3.5 mSv/h 程度のホットスポットの撮影に成功した。図 4 は、光学カメラで取得した測定現場の写真に、得られた汚染分布のイメージを重ねて放射性物質(主として 137 Cs)を可視化したものであり、測定の所要時間は数十秒程度である。

また、放射性物質の分布を3次元的に表示するために、コンプトンカメラを用いて複数箇所から測定環境を測定し、それらの測定結果を組み合わせることで、汚染分布を3次元的に表示したものを**図5**に

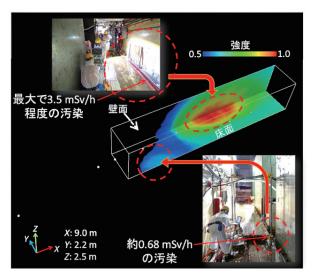


図5 放射性物質の3次元可視化結果

図中のサイズ表記は3次元再構成空間のサイズを示す

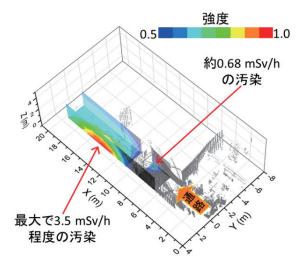


図 6 測定現場の3次元モデルに放射性物質の可視化データを重ね合わせて作成した放射性物質分布マップ

示す。これは測定環境の壁面及び床面の汚染分布を 表示した結果であり、周囲に比べて汚染強度が高い 2か所のホットスポットが映し出されている。

これらの放射線測定試験に加えて、測域センサーを用いた測定現場の3次元モデル構築用データの取得試験を実施している。図6に、構築した測定現場の3次元モデルにコンプトンカメラで取得した3次元汚染分布を重ねて描画したものを示す。通路上の2か所に、ホットスポットの存在を3次元的に視認することができる。

今回, コンプトンカメラを用いた放射性物質の可 視化試験と測域センサーを用いた建屋内の3次元モ デル構築のためのデータ取得試験により, 測定環境 の3次元モデルに汚染分布図を重ね合わせ、建屋情報を含んだ汚染分布図を描画した。この汚染分布図は、実環境の寸法や外観を反映していることから、作業員がホットスポットの在りかをこの分布図を用いて視認することにより、注意喚起に伴う被ばく線量の低減や、除染計画の立案に役立つものと考える。また、これらのデータは3次元で表されていることから、最近利用範囲が拡大している仮想現実(Virtual Reality)空間での表示も可能であり、作業

員のイメージトレーニングに役立つものと考えてい

### 4. 今後の取組みと課題

る。

ここで述べた場の放射線分布をイメージングする コンプトンカメラによる測定は、放射線がどこから 飛んできているかを把握するために一定時間その場 で測定する必要がある。福島第一原発の建屋内の線 量率が高いエリアにおいても数十秒程度の測定時間 を要している。この種の測定器の用途として、作業 現場に固定し定点観測するモニタ型の方法と、移動 しながら広範囲を測定するサーベイメータ型の方法 があるだろう。前者は、作業の進捗に伴い放射線分 布がどのように変化するか、またどこにどのような 除染を行えば良いか、またどのような遮蔽物を設置 すれば線量率が下がるか判断する材料を提供するこ とになろう。一方、より広い範囲を測定するために は、後者の動きながらの測定で放射線源分布の全体 像を把握できることが望ましい。とりわけ福島第一 原発建屋内の高線量率な場所では、小型ロボットや ドローンに搭載して動きながら短時間で測定するこ とにより、作業員が作業できるかどうか速やかに判 断するための情報提供ができるであろう。

この種の研究は、国内外の研究機関でも進められている。米ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL) の Vetter らは、低線量率用の $\gamma$ 線イメージャーを使って福島県内の環境中で3次元イメージング試験を実施している $^{n}$ 。彼らは家屋の内外や竹林周辺で移動しながら逆解析を行うことにより広い

範囲の3次元イメージングに成功している。しかし, 迅速な測定や小型軽量化という面で考えると,実用 化に向けてまだ課題があろう。

今後、こうした研究が重要であると考えている。 原子力機構では、これまでも福島県の帰還困難区 域や福島第一原発の構内でコンプトンカメラをドローンに搭載し、放射線イメージング試験を実施しているが、今後、建屋内においても小型のドローンやロボットにより小型軽量化した本システムを搭載し、遠隔操作でより広い範囲の詳細な3次元汚染分布が把握できるよう研究開発を進め、汚染源の効率的な撤去や効果的な遮蔽により廃炉作業の円滑な推進に貢献することを目指している。

#### 参考文献

- 1) 原子力規制委員会, 航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果, http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html
- 2) 谷垣 実, 第4章 環境放射線の監視と管理, 原子力 安全基盤科学, 第3巻「放射線影響と環境放射線 管理」(高橋千太郎編) 2017, 京都大学学術出版会
- 3) 武田伸一郎 他, 放射線を面で捉える (3) 地上の測定, *RADIOISOTOPES*, **65**, 81-92 (2016)
- Kataoka, J., et al., Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays. Nucl. Instrum. Methods A. 732, 403–407 (2013)
- 5) Sato, Y., *et al.*, Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *J. Nucl. Sci. Technol.* **55**,90–96 (2017)
- 6) Sato, Y., et al., Development of compact Compton camera for 3D image reconstruction of radioactive contamination. Journal of Instrumentation. 12, C11007 (2017)
- Vetter, K., et al., 3-D Radiation Mapping and Data Fusion for Environmental Remediation and Cleanup (18449), WM2018 Symposia, March 18-22, Phoenix, Arizona, USA

((国研)日本原子力研究開発機構 廃炉国際共同研究センター 遠隔技術ディビジョン)