

# 統合型放射線イメージングシステム iRIS を用いた放射能汚染の3次元可視化

佐藤 優樹

Sato Yuki

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災に端を発する東京電力ホールディングス株式会社（東京電力HD）福島第一原子力発電所（1F）の事故から、11年の歳月が経過したが、1Fの原子炉建屋内部をはじめとする損傷した建屋内には作業者の立入りや長時間作業が困難な高線量率エリアが残されているほか、帰還困難区域には周囲に比べて局所的に線量率が高いホットスポットが残されたままのエリアが存在する。これらの作業現場において作業者の被ばく低減や詳細な作業計画の立案を実施するためには、放射性物質の分布やホットスポットの位置を正確に把握することが重要となる。

1Fの事故後、このような要求に応じるために放射性物質の分布を2次元的に、すなわち“面的”に捉えることが可能なγ線イメージャの開発が複数の機関で進められた。γ線イメージャにはいくつかの種類が存在し、ピンホールカメラ方式、コンプトンカメラ方式、符号化開口方式が挙げられる。筆者らのコンプトンカメラを用いた実証例を含めて、既にいくつかのγ線イメージャについては1Fサイト内や福島県の屋外環境において、ホットスポット位置の2次元的可視化に成功している<sup>1-5)</sup>。

しかしながら1Fや帰還困難区域の屋外環境では、放射性物質が機器や配管、設備、瓦礫といった様々な物体に付着し、もしくは複雑な地形のもとに沈着していることから、放射性物質は2次元ではなく3次元的に分布している。一方で、従来のγ線イメージャを用いた定点観測で得られる放射性物質の分布

は2次元的なものであり、放射性物質の位置や広がりを3次元的に把握することは困難であった。更に、測定対象箇所が何らかの物体により遮蔽されている場合、一か所からの測定ではホットスポットを可視化できずに見落としてしまう可能性があった。このため、複数の視点から作業エリア全域を測定し、放射性物質の分布及びその中に存在するホットスポットの位置を3次元的に特定することが重要となる。

このような背景を踏まえて筆者らのグループでは、γ線イメージャを用いて多視点から取得した放射性物質のイメージデータに、環境認識デバイスで取得した作業環境の3次元モデルデータを統合することにより、放射性物質分布やホットスポット位置を3次元的に可視化する手法を開発した。この手法は、次節に記載した統合型放射線イメージングシステム（iRIS:integrated Radiation Imaging System）のコンセプトのもとに開発を実施したものである。

本稿では、放射性物質の分布を3次元的に可視化する手法について、その原理を説明すると共に、1Fサイト内並びに帰還困難区域における実証例を紹介する。

## 2. iRISを用いた放射性物質の3次元可視化

iRISは、γ線イメージャをはじめとした放射線測定器、環境認識デバイス、ロボット、クロスリアリティ（xR）等、複数のセンサ・機器・可視化技術を統合することにより、遠隔にて放射性物質の分布を3元的に測定し、把握する概念である<sup>6)</sup>。

はじめに、1Fサイト内における実証試験の結果を

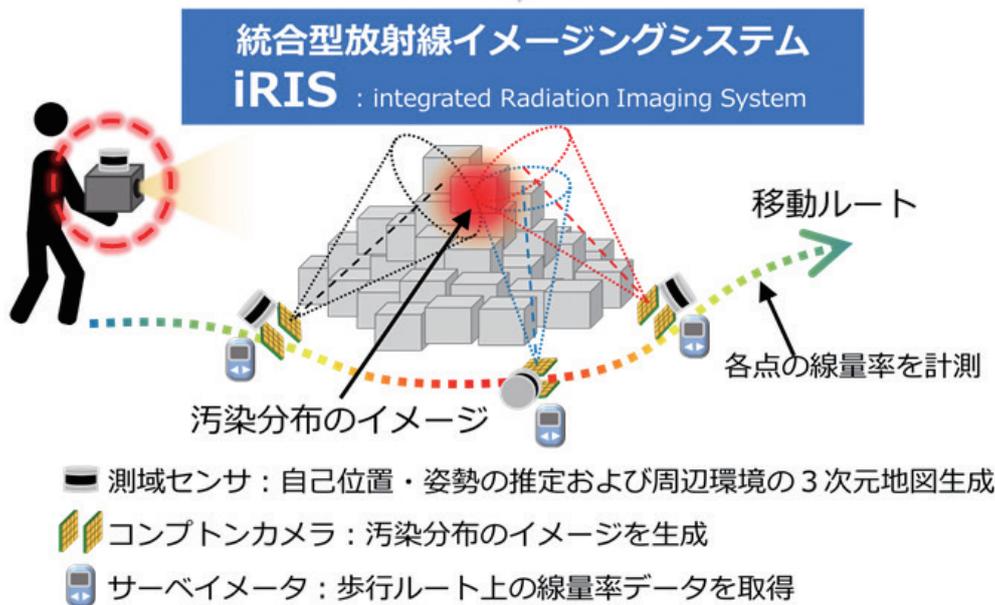


図1 統合型放射線イメージングシステム iRIS の概略図

コンプトンカメラとサーベイメータ及び3次元測域センサを組み合わせた。オペレータが携帯もしくはロボットに搭載したシステムを用いて作業現場をスキャンし、高濃度汚染箇所や移動ルート上の線量率を可視化した3次元マップを描画する（令和3年度 福島研究開発部門 成果報告会資料より転載<sup>7)</sup>）

紹介する。図1は実証試験のために構築したセットアップ及び測定原理を示した模式図である<sup>7)</sup>。このセットアップでは、コンプトンカメラに3次元測域センサを基盤としたSLAM（Simultaneous Localization and Mapping：自己位置推定と環境マップ作成を同時実行）デバイス（米国KAARTA社、Stencil2）及びその場の空間線量率を測定するサーベイメータ（㈱千代田テクノル、PRD-ERJ）を組み合わせた。これを携帯した作業者もしくは搭載したロボットが、作業現場を移動しつつ全域をスキャンすることにより、放射性物質分布を可視化した作業現場全域の3次元マップを描画するものである<sup>8)</sup>。

実証試験に使用したコンプトンカメラは、1.5 mm角の15 × 15 pxのCe : GAGG シンチレータをマルチピクセル光子計測デバイス（浜松ホトニクス㈱、MPPC）に組み合わせたものを2層構造（散乱体と

吸収体）としたγ線センサを採用しており、放射能汚染の主要な要因核種となっている<sup>137</sup>Csからのγ線が散乱体と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γ線の飛来方向を推定する<sup>9)</sup>。なお、使用したコンプトンカメラは、1F事故後に浜松ホトニクス㈱と早稲田大学が共同開発し、製品化が成されたものをベースとして小型・軽量化したものである<sup>10,11)</sup>。

実証試験は東京電力HDの協力のもと、令和2年11月に1Fサイト内1/2号機排気筒付近で実施した。当該排気筒の下部領域は線量率が高く、作業者の侵入や長時間の滞在が難しいエリアである。図2は、1F1/2号機の排気筒付近で実施した実証試験の結果であり、上段は現場の写真、中段と下段は排気筒下部のホットスポットの位置（汚染した配管を赤色で表示）を3次的に特定して可視化した作

業現場の3次元マップである<sup>12)</sup>。

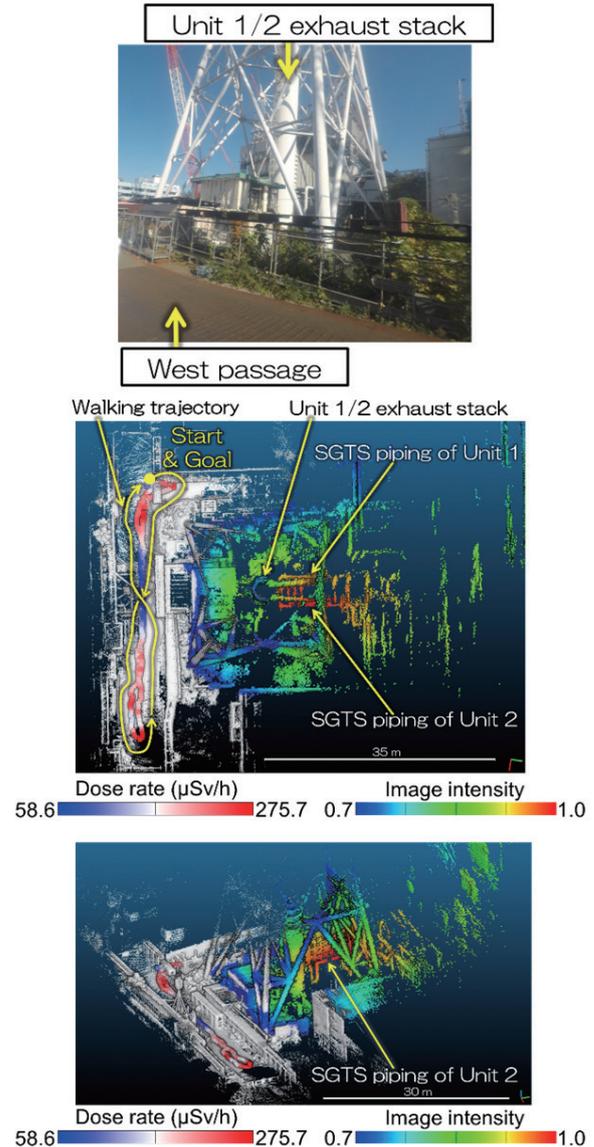
この3次元マップを描画するためのデータを取得するにあたり、**図1**に示すようにiRISを携帯した筆者が排気筒付近の通路を歩行しながら現場をスキャンした。測定を実施するにあたり、筆者は高線量率エリアである排気筒下部には進入することなく、排気筒下部と比較して線量率の低い離れた通路を歩きながら、5分未満の短い測定でホットスポット可視化のためのデータを取得した<sup>6,8)</sup>。

ここで、**図1**に示すように3次元測域センサを基盤としたSLAMにより、歩行移動中の各時刻におけるコンプトンカメラの自己位置及び姿勢の情報を逐一記録し、これをコンプトンカメラがγ線を検出した時刻と同期させた。これにより、移動中にコンプトンカメラがγ線を検出した各位置において、γ線の飛来方向を推定できるようになった。更に、同じくSLAMにより取得した作業環境の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り、ホットスポットの位置や形状を3次元的に可視化したマップを描画することに成功した。併せて、サーベイメータで取得した空間線量率データに付加された時刻情報を用いることにより、コンプトンカメラの移動経路上の空間線量率を3次元マップ上に表示している<sup>8)</sup>。

従来のコンプトンカメラを用いた定点観測（2次元分布の測定）では、ホットスポット位置を正確に特定するためには複数点から対象エリアを測定せねばならず、コンプトンカメラの設置や移動、測定を繰り返す必要があった。一方で、本手法では短時間において移動しながら、かつ複数の視点から測定を実施することにより、ホットスポット位置を排気筒下部の特定の配管に見出すことに成功した。

なお、本試験で利用した放射性物質の可視化手法に関連して、コンプトンカメラ、SLAM機器及びサーベイメータといった複数のセンサ情報を入力データとし、数回のボタン操作で3次元的な放射性物質分布マップの描画を可能とする専用ソフトウェア[COMRIS (コムリス) : COMpton camera for Radiation Imaging System]の開発・整備を実施すると共に、本ソフトウェアは(株)ヴィジブルインフォメーションセンターから販売されている<sup>13)</sup>。

加えて、福島県イノベーション・コースト構想に基づく補助事業である地域復興実用化開発等促進事



**図2** 上段：実証試験を実施した1F1/2号機排気筒付近の写真。中段、下段は空間線量率とホットスポット（赤色）を可視化した3次元マップ

測定者の歩行ルート上の線量率と、コンプトンカメラで可視化したホットスポットをカラー表示した。中段と下段は同じ3次元マップについて、視点を変更して表示したものである  
(Sato, Y., et al., J Nucl Sci Technol.  
DOI:10.1080/00223131.2021.2001391より転載<sup>12)</sup>)

業費補助金事業において、(株)千代田テクノロと共同でコンプトンカメラとドローンを組み合わせた遠隔放射線イメージングシステムを開発した（**図3**参照）<sup>6,14,15)</sup>。

本システムではドローンの優れた機動性に着目し、従来手法のようにコンプトンカメラによる定点観測を実施するのではなく、移動しながらのデータ取得により放射性物質の分布を可視化する手法を実現した。ドローンに搭載した慣性計測ユニット

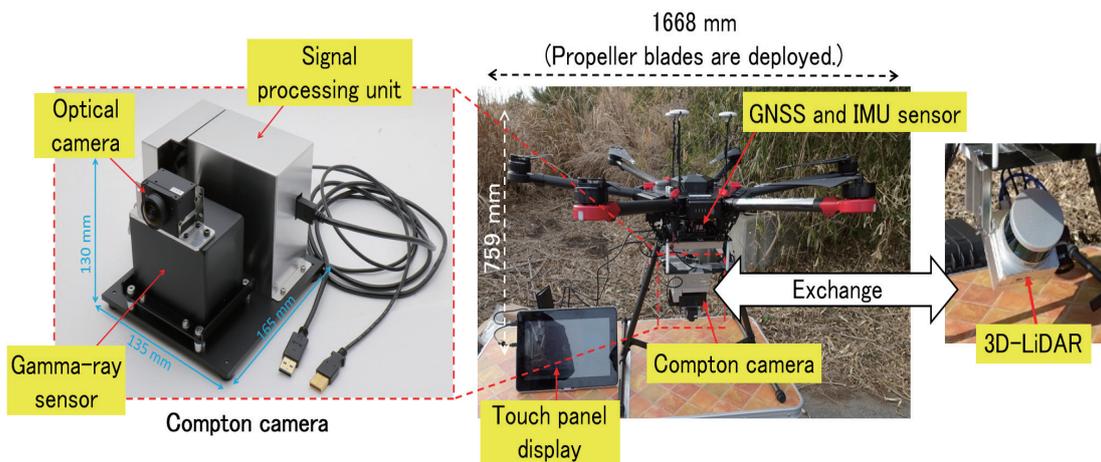


図3 (左)ドローンに搭載されたコンプトンカメラ, (中央)遠隔放射イメージングシステム, (右)3次元測域センサの写真

(Sato, Y., et al., J Nucl Sci Technol., 57,734-744 (2020) より転載<sup>15)</sup>)

(IMU) 及び GNSS センサを利用して, コンプトンカメラが $\gamma$ 線を検出した時刻における自己位置と姿勢の情報を逐一記録できるようにした。これにより,  $\gamma$ 線を検出した飛行中の各位置を基点として, 別途3次元測域センサで取得した測定対象エリアの3次元モデルに放射性物質のイメージを投影することが可能となった<sup>14)</sup>。

図4は, 福島県帰還困難区域において実施した実証試験の結果である。図4(a), (b) はそれぞれ3次元測域センサの出力データをもとに作成した測定対象エリアの3次元モデル並びにコンプトンカメラで取得した放射性物質イメージを投影した放射性物質分布マップである<sup>15)</sup>。比較のために, 図4(c)に同じエリアをサーベイメータで測定した結果を示す。実証試験を実施したエリアの面積は約7,000 m<sup>2</sup>と広く, 草木の手入れもされておらず足元も悪かったため, 従来のサーベイメータを用いたホットスポット探索のためのデータ取得には半日以上を要した。一方で本システムを用いることにより, 上空から30分未満という短時間でホットスポット可視化に必要なデータ取得を完了できた<sup>6,14,16)</sup>。上空から遠隔での測定が可能であることから, 作業者の被ばく低減が達成されるだけでなく, 怪我等の安全に対するリスクを低減することができる。

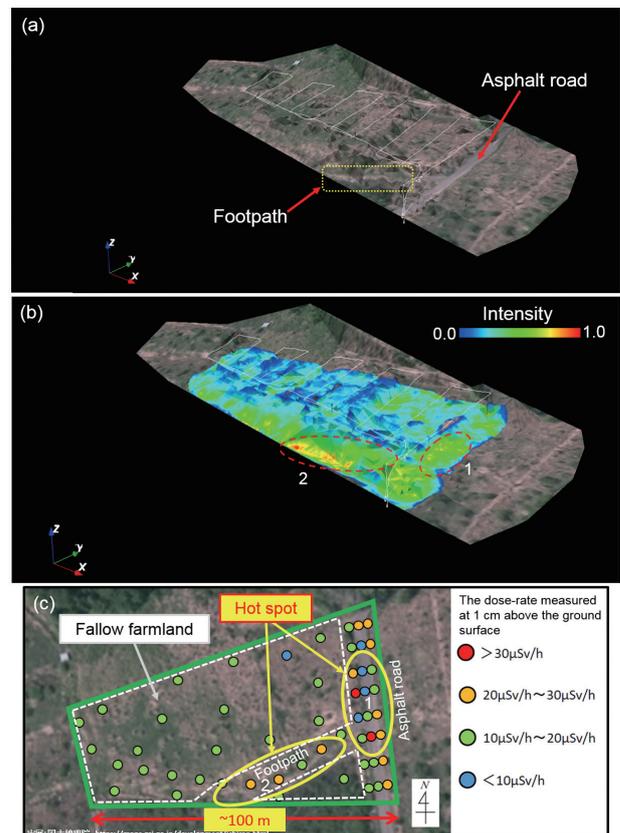


図4 (a) 3D-LiDARで取得した3次元モデルに航空写真を貼り付けて作成した3次元地形モデル。白線はコンプトンカメラの測定時のドローンの軌跡を示す。(b) コンプトンカメラで測定した放射性物質の再構成画像を3次元地形モデル上に描画したものであり, 黄色から赤色が周囲に比べて高濃度に放射性物質が蓄積していることを示す。(c) サーベイメータで同地域の線量率分布を測定した結果

すべての図の航空写真は, 国土地理院公開のものを元に作成した (<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>)。 (Sato, Y., et al., J Nucl Sci Technol., 57,734-744 (2020) より転載<sup>15)</sup>)

### 3. まとめと今後について

本稿では, 複数の異種センサ, データ可視化技術,

ロボットを統合した統合型放射線イメージングシステムである iRIS の概念、及び 1F サイト内と帰還困難区域におけるホットスポット可視化の実証例を紹介した。これらの結果は作業現場全域を移動しながら連続測定し、3次元測域センサで取得した作業現場の3次元モデルに放射性物質イメージを描画することにより、ホットスポットを可視化した3次元マップを作成したものである。

本手法は、様々な放射線作業環境を仮想空間に再現するものであり、仮想現実(VR) 技術を利用することにより作業の事前トレーニングに利用できる<sup>12,17)</sup>。また本手法の開発の一環として、コンプトンカメラやサーベイメータの測定値を利用して、可視化した放射性物質の線源強度を定量的に評価する手法の開発を別途進めている。この線源強度の情報を利用することにより、仮想空間内において作業環境の空間線量率を計算し、更に遮蔽や除染の効果をシミュレーションできるようになるだろう。これは、いわば作業環境のデジタルツインを構築し、仮想空間内において作業計画の立案を支援するものとなる。

今後も、放射性物質の可視化を通して作業員の被ばく低減や作業計画の立案に貢献できるよう、引き続き研究開発を実施するものである。

## 謝辞

コンプトンカメラ搭載ドローンシステムの共同開発において、(株)千代田テクノルの小澤慎吾氏にご協力いただいた。また、(株)栄製作所の鈴木力社長には、当該システムの部品加工や装置のシステム化の面でご協力いただいた。当該システムの開発は、地域復興実用化開発等促進事業費補助金採択課題「無人飛行体をプラットフォームとする放射線分布の3D可視化技術の開発」によるものである。また、コンプトンカメラの小型・軽量化に際し浜松ホトニクス(株)の中村重幸氏、平柳通人氏、早稲田大学の片岡淳教授並びに岸本彩氏にご協力いただいた。(株)ヴィジブルインフォメーションセンターの根本誠氏、峯本浩二郎氏には、COMRISの開発においてご協力いただいた。東京電力HD(株)の佐藤航氏、大浦正利氏には1Fにおける実証試験においてご協力いただいた。最後に、iRISの共同発案者である福島大学の鳥居建男教授、及び多くの試験にご協力いただいた(国研)日本原子力研究開発機構の寺阪祐太氏に御礼申

し上げる。

## 参考文献

- 1) Takahashi,T.,*et al.*, 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC) ., 4199-4204 (2012)
- 2) Okada,K.,*et al.*, *Prog. Nucl Sci Tech.*,**4**, 14-17 (2014)
- 3) Katagiri,H.,*et al.*,*J Nucl Sci Technol.*, **55**(10),1172-1179 (2018)
- 4) Sato,Y.,*et al.*,*J Nucl Sci Technol.*, **55**(9), 965-970(2018)
- 5) Sato,Y.,*et al.*,*J Nucl Sci Technol.*,**56**(9-10),801-808 (2019)
- 6) 佐藤優樹, 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発-放射能汚染を見える化する新システム“iRIS”-, (国研)日本原子力研究開発機構, 令和3年度福島研究開発部門 成果報告会資料 (2022) 令和4年1月21日 Web 掲載
- 7) 佐藤優樹, 共通基盤技術の現場実装に係る研究開発, (国研)日本原子力研究開発機構 令和3年度 福島研究開発部門 成果報告会資料 (2021) 令和3年12月7日口頭発表
- 8) 佐藤優樹, 統合型放射線イメージングシステムの開発, 検査技術, **5** (2022)
- 9) (国研)日本原子力研究開発機構, 廃炉現場の汚染分布を3次元マップで“見える化”-見えない汚染を仮想空間で把握し, 作業員の被ばくを低減-, プレス発表 (2021)
- 10) Kataoka,J.,*et al.*, *Nucl Instrum Methods A.*,**732**,403-407 (2013)
- 11) 浜松ホトニクス(株)他, 放射性物質の除染作業を効率化するガンマ線撮像用コンプトンカメラを製品化~高感度コンプトンカメラとして, 従来よりも大幅な小型・軽量化と低価格化を実現~, プレス発表 (2013)
- 12) Sato,Y.,*et al.*,*J Nucl Sci Technol.*, In Press., DOI:10.1080/00223131.2021.2001391.
- 13) (株)ヴィジブルインフォメーションセンター, 佐藤優樹, 放射能汚染可視化ソフトウェア COMRIS, [http://vic.co.jp/?page\\_id=15#COMRIS](http://vic.co.jp/?page_id=15#COMRIS)
- 14) 佐藤優樹 他, 未来へ森を 福島報告/放射性物質を空からすばやく可視化, グリーン・パワー, **8**(2019)
- 15) Sato,Y.,*et al.*,*J Nucl Sci Technol.*, **57**(6),734-744 (2020)
- 16) 佐藤優樹 他, 日本原子力学会誌 ATOMO Σ, 福島第一原子力発電所廃炉作業環境における遠隔放射線イメージング技術の開発と実証, 統合型放射線イメージングシステム iRIS の構築, **62**(11), 645-649 (2020)
- 17) Sato,Y.,*et al.*,*Nucl Instrum Methods A.*, **976**, 164286 (2020)

((国研)日本原子力研究開発機構 廃炉環境国際共同研究センター)