

連載講座



放射線を面で捉える

(1) 空からの測定

鳥居建男

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究基盤創生センター
100-8577 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 20 階
torii.tatsuo@jaea.go.jp

東京電力福島第一原子力発電所の事故により、放射性物質が広範囲にわたって環境中に拡散した。7割が森林と言われる福島県では、放射性物質の汚染範囲を迅速に把握するためには空からのモニタリングが有効である。本稿では有人ヘリコプターを用いた航空機モニタリングをはじめ、現在開発中の無人機を用いた空からのモニタリング技術及び測定手法について概説する。

Key Words : Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, aerial monitoring, UAV (unmanned aerial vehicle), Compton camera, radiation map

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（以下、「東電福島第一原発」という。）の事故後、新聞やテレビにより、放射性物質の分布状況を示す空間線量率のマップを見た人は多いと思う。そして、あらためて放射線に関心を持った人も多いのではないだろうか。

事故前でも、原子力発電所周辺をはじめ、我が国では広く空間線量率は測られてきた。また、原子力発電所周辺のモニタリングポストやモニタリングステーションでは空間線量率がリアルタイムで掲示されていることも多いだろうし、インターネットでも表示されている。しかし、それらは“点”のデータであり、全体の分布を示すものではなかった。このため、必ずしも身の回りの放射線という認識は少なく、ある程度知っている人でも漠然と空間線量率は“西高東低”と思う程度であったかもしれない。

それが、この事故により、多くの人々が放射線に関心を持ち、報道やインターネットで示される放射線データに関心を持った。そして、航空

機モニタリングにより“面”で捉えた放射線の分布、すなわち空間線量率や放射性セシウムの沈着量を示す放射線マップが明らかにされると、テレビや新聞等で繰り返し報じられたため、専門家から一般市民までもが身の回りの放射線の全体像として認識したのではないかと思う。

航空機モニタリングは、上空から測定した面的なデータである。測定精度はモニタリングポストやサーベイメータなどによる地上測定データにはかなわないが、全体的な傾向が視覚的に捉えられる。自分の家の周りとは勿論のこと、容易には測定できない裏山や田畑まで空間線量率を指し示してくれる。東電福島第一原発の事故は、放射性物質が広範囲にわたって拡散したため、航空機モニタリングにより明らかにされた放射線マップによってその放射性物質拡散の全体像を把握した人も少なくないであろう。

本稿では、航空機モニタリング技術を中心に、より詳細な測定法、新たに開発されつつある空からのモニタリング技術について述べる。

2. 航空機モニタリング技術

航空機モニタリングは、緊急時の環境モニタリング技術として原子力施設の事故時に活用できるように我が国でも準備されてきたが、東電福島第一原発事故のような大規模な測定は初めての経験であった。事故直後、米国エネルギー省（DOE）が航空機モニタリングを開始（2011年3月17日～同年4月5日）し、その後、文部科学省とDOEは共同で航空機モニタリング（同年4月6日～4月29日）を行った。その後、DOEの手法をもとに我が国だけで航空機モニタリングを実施し、また、測定や解析手法を改良、整備しながら、日本全国の航空機モニタリングを行ってきた^{1)~4)}。

日本全国の航空機モニタリングでは、大型のNaI(Tl)シンチレーション検出器（40 cm×10 cm×5 cm, 6本, 図1参照）をヘリコプターに搭載し、GPSと連動させながら1秒ごとに位置、高度、放射線の計数率、エネルギースペクトル（50 keV～3 MeV）の測定を飛行しながら行っている。そして、予め比較的平坦で直線的な飛行ができる場所をテストラインとして選定し、その上空を高度150 mから1000 m程度までを高度150 m程度ごとに高さを変えながら飛行することにより、地上から放射線の減弱割合（空気減弱係数）を現場で求め、さらにテストライン直下でサーベイメータを用いて線量率（ $\mu\text{Sv/h}$ ）を測定し、航空機モニタリングで測定される検出器の全計数率（cps）との比から線量率換算係数（ $(\mu\text{Sv/h})/\text{cps}$ ）を求めている。また、海上等で基準高度とする300 m付近を飛行する（水上ライン）ことによって、宇宙線等のバックグラウンド成分を求め、その影響を予め差し引いておく。そして、ヘリコプターのGPS高度データと国土地理院の数値地図データから求めた直下の標高データ（DEM）差から求めた対地高度と前述の空気減弱係数と線量率換算係数を用いて、地上高1 mでの空間線量率を算出している。

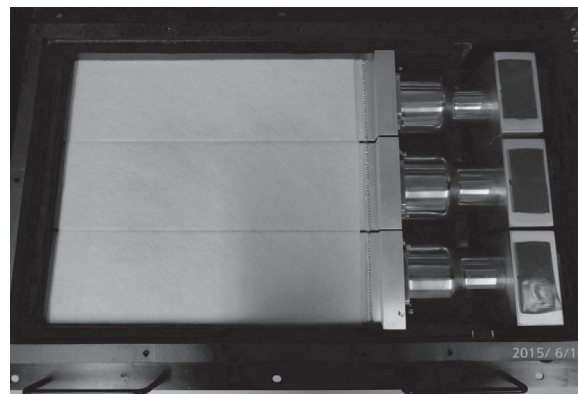


図1 航空機モニタリングで用いられる大型NaI検出器。通常、写真の3個入りの検出器ユニットを2台用いる。

ヘリコプターは測定エリアを楕形に折り返して飛行することにより、直下の放射線の変動を面的に測定している。飛行間隔（測線間隔）は東電福島第一原発に近い場所は600 m間隔（事故直後は1.8 km）であり、原子力発電所から離れるに従って3～5 kmと粗くしている。これは地上の放射性セシウムの拡散範囲と測定時間を勘案したためであり、局所的な変動の可能性がある東電福島第一原発周辺は細かく飛行し、遠く離れた地域は粗く飛行し測定している。

1秒ごとに測定したデータから前述の方法で地上データに変換される。測定点間の値は、デジタル化された地理情報システム（GIS）ソフトを用いて逆距離加重法（IDW）等の内挿法を適用することによって面的にマッピングされる。図2は、これまで8回にわたって行われた東電福島第一原発から80 km圏内の測定データをマップ化したものである。図2から明らかのように、空間線量率の高いエリアが小さくなっており、減衰していることがわかる。また、これらのマップを比較することによって、どの程度変動しているかが容易に視覚化される⁵⁾。

一方、地表面に沈着したセシウムの密度は、空間線量率と可搬型Ge測定器で求めた換算係数から算出している。これは、地上で測定された¹³⁴Cs、¹³⁷Csの沈着密度比がほとんど同じであることから、その密度比を用いてそれぞれの

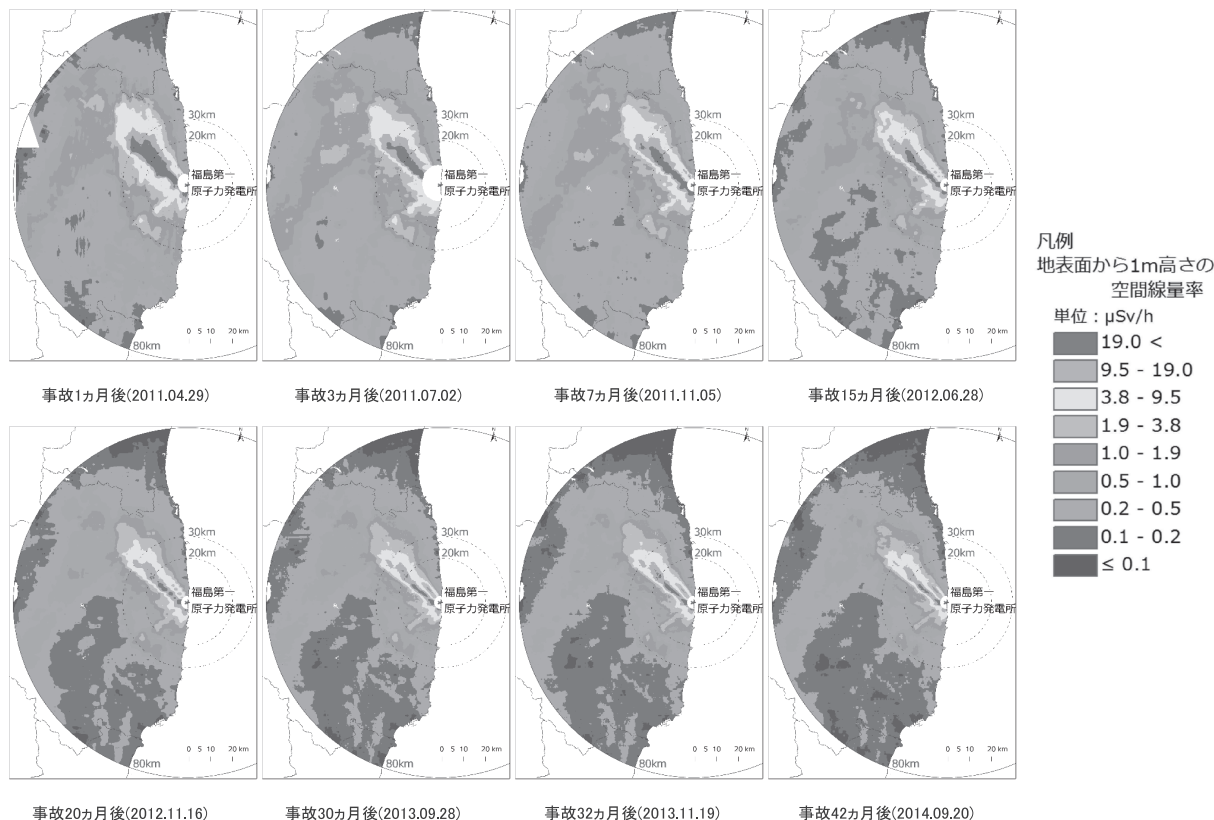


図2 航空機モニタリングによる 80 km 圏内における空間線量率の分布マップの推移（原子力規制委員会ホームページ⁵⁾をもとに作成）

沈着量を換算している（最近，地上測定や無人ヘリコプター測定の詳細解析の結果，¹³⁴Cs と¹³⁷Cs の沈着量の比が場所によりわずかに異なることが報告されている^{6),7)}）。

事故直後には¹³¹Iも検出されていた。¹³¹Iの沈着量は，航空機モニタリングで得られたスペクトルから算出する手法が用いられた。高度 200 ~ 300 m 付近においても¹³¹Iのピーク（365 keV）が検出されたことから，このピーク成分を抽出し，さらにこのエネルギー領域の空気減弱係数をモンテカルロ計算で求めて地表面での¹³¹Iの沈着量を算出している。同様の手法で¹³⁴Cs（ピークエネルギー：796 keV，804 keV）の沈着量についても計算し，地上での土壌サンプリングや in-situ 測定データ，上述の航空機モニタリングによる放射性セシウム沈着密度の算出結果と比較して，この計算手法の妥当性を確認している^{8),9)}。

3. 無人航空機を用いた技術

航空機モニタリングは，パイロットの他に測定員も航空機に搭乗して測定している。航空機は航空法の規制を受けるため，通常低高度（300 m 以下）の飛行はできない。また，東電福島第一原発のように発電所周辺は飛行できない。現在でも東電福島第一原発から半径 3 km 以内の飛行は禁止（2013 年 2 月 6 日以降，高度 1 500 m 以上の飛行制限を緩和）されている。地表面に沈着した放射性物質をより詳細に，また放射性物質の放出源である東電福島第一原発から 3 km 以内の地域についてもその面的な分布を測定するために，航空法の規制を受けず，より簡便に，低コストで測定する手法として無人航空機を用いた測定手法がある。

その代表例が，農薬散布でも使われている産業用無人ヘリコプターをベースにし，コンピューターと通信機器を搭載して自律飛行により予

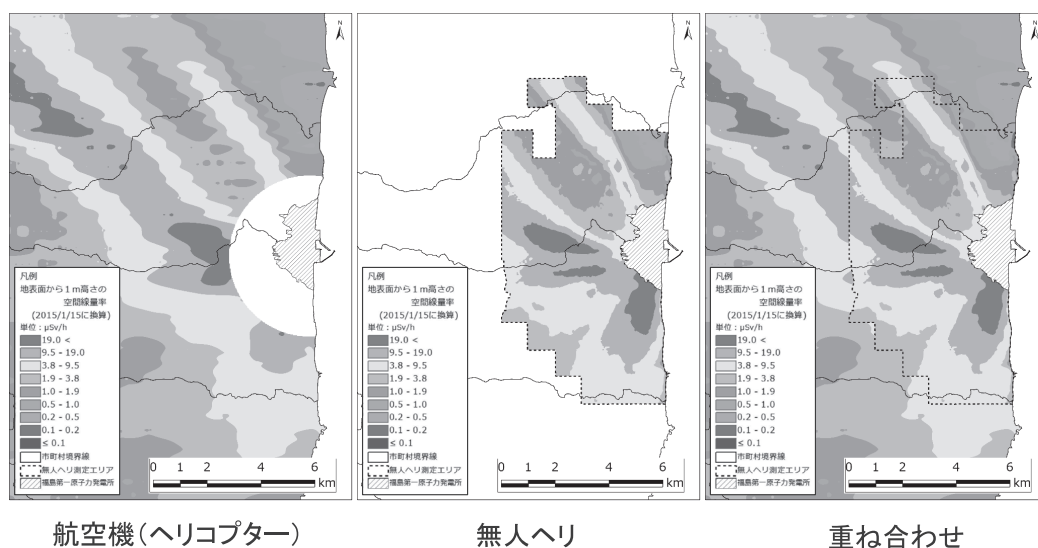


図3 東電福島第一原発周辺における航空機と無人ヘリのモニタリング結果の比較（2015年1月15日の値に規格化）

めプログラムされた飛行ルートに沿って飛行できる自律飛行型無人ヘリコプター（以下、「無人ヘリ」という。）による測定である。この手法は、1999年9月に発生したJCO臨界事故後、旧核燃料サイクル開発機構（現、日本原子力研究開発機構）等によって研究開発が行われていたが、その後休止していた¹⁰⁾。東電福島第一原発事故の発生により、急遽、その当時の測定機材を取り出し、2011年夏頃から測定に使われた。その後、航空機モニタリングの手法を取り入れた解析手法を整備するとともに、測定装置もNaI検出器やプラスチックシンチレータからエネルギー分解能が高いランタンブロマイド(LaBr₃)検出器に変えて、東電福島第一原発から約5km圏内の測定や河川の流域に沿った測定など、航空機では困難な領域、より細かい測定が必要な領域での測定に供せられている^{11),12)}。図3に東電福島第一原発から3km圏外の航空機モニタリングの結果と5km圏内の無人ヘリ測定結果の比較とそれらを重ね合わせたマップを示す。このマップから、無人ヘリでの詳細な測定結果が見て取れる。このとき、無人ヘリは対地高度約80mを、また、測線間隔を80mとして飛行している。

図4に示すように、無人ヘリの飛行範囲は数kmの範囲に限定される。これは飛行可能な時間と使用電波の到達距離、及び肉眼で位置が確認できる範囲で飛行するためであるが、より遠くまで飛行でき、より広い範囲のモニタリングを可能とするために、航空機モニタリング（ヘリコプター）との中間的な存在として無人飛行機によるモニタリングの研究が行われている。この無人飛行機は、数十km程度の長距離の飛行が可能であること、ヘリコプターや飛行機に比べて簡便で、予めプログラムしたルートを自律飛行するもので、現在、日本原子力研究開発機構と宇宙航空研究開発機構(JAXA)が共同開発しているUARMS(Unmanned Airplane for Radiation Monitoring System)という固定翼のモニタリングシステムである。長距離を長時間、プログラム飛行するという特長を活かすことによって、緊急時の対応にも適用できる可能性がある¹³⁾。原子力発電所周辺にはモニタリングポストが設置されているが、無人飛行機による測定はそれらを補完するものとして、また海上で放射線測定することは困難であるが、海上を含めてモニタリング設備がない場所など、広い範囲を迅速に測定する手法として期待され

飛行範囲	広域 (> 100 km)	準広域 (> 数10 km)	中域 (> 数 km)	狭域 (~100 m)
機 種	ヘリコプター	無人飛行機	無人ヘリ	マルチコプター
高 度	~ 300m	~ 150m	50~100m	<10m

航空機モニタリング

無人飛行機モニタリング

無人ヘリモニタリング

ドローンモニタリング

図4 空からのモニタリング手法と測定器

る。

また、最近、ドローンやマルチコプターと呼ばれる複数の回転翼を持つ小型の無人ヘリも開発されている。これは、自動制御技術が発達したため、比較的簡便に飛ばすことが可能となっている。小型軽量、比較的安価で操縦が簡便であることから、これを用いた放射線測定も試みられている。ただし、搭載可能な重量は数 100 g から 2, 3 kg 程度と軽量であることから、放射線測定器も簡便な線量計に限定されているのが実情である。実際に、もともと低高度で狭い範囲の飛行に限定されることから、ある程度空間線量率が高いところでは有効であると思われる。一方、面的な測定となると、対地高度の評価が必要となるため、地形が複雑な場所、周りに建物などの構造物がある場合、放射線測定器がその影響を受けるため、低高度であるだけに精度良い評価が困難である。今後、自動飛行制御技術の発達により、GPS による位置認識ができない建物内での飛行測定も可能となることから、東電福島第一原発の建物内での測定など、人が容易に近づけない場所の測定も可能になると考えられる。しかし、その場合には放射線源の位置評価など新しい測定法、解析法の開発

が必要になってくると思われる。

4. 新しい測定法

前述の空からのモニタリングは、広い範囲を測定することを特徴としているが、使用している放射線測定器は指向性がないため、地表面に沈着した放射性物質を測定するとき、その位置分解能は低い。図5に示すように、ヘリコプターの場合は、高度 300 m 程度で測定し、実効的には下向き 45° の円錐底面での測定となるために、直径約 600 m の円内から放出される放射線の平均的な値を測定していることになる。無人ヘリにしても、高度 50 m での飛行では直径 100 m 以上（低高度になると測定している角度範囲が広がる）になる。測定範囲が広がると、局所的な放射性物質の分布状況が捉えにくくなるが、高分解能の新しい測定法も試みられている。

散乱 γ 線検出型の測定器を無人ヘリに搭載した試験が行われている¹⁴⁾。これはコンプトン散乱原理を用いて2層の検出器により飛行測定する手法である。コンプトンカメラは、散乱体と吸収体の2層の検出器をそれぞれアレイ状に配置し、散乱体に入射した γ 線が散乱され、

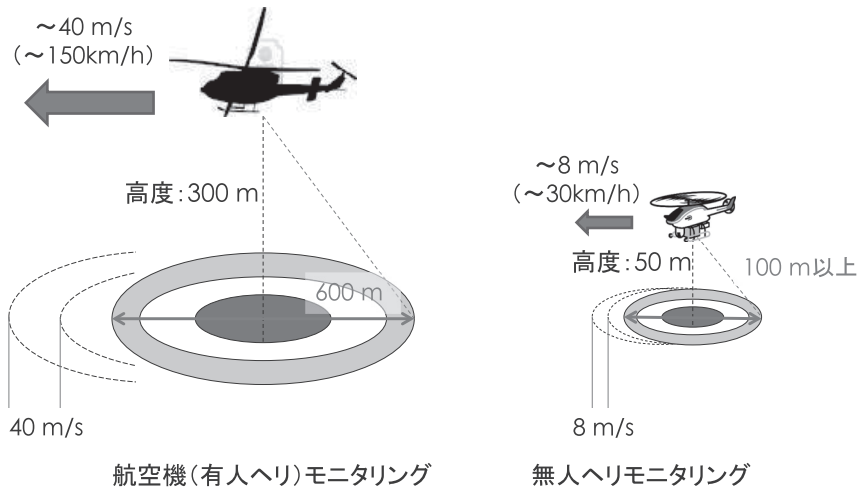


図5 ヘリコプターと無人ヘリの測定範囲

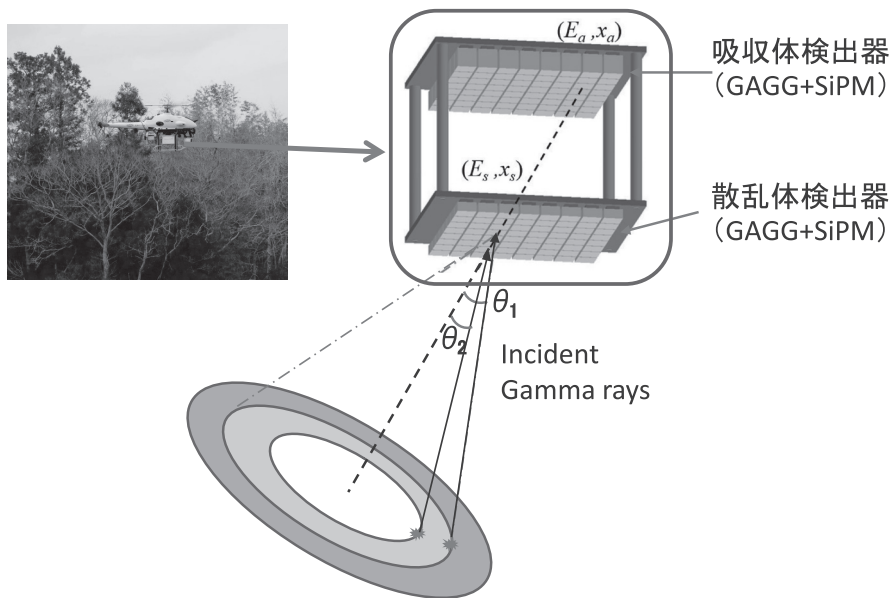


図6 散乱 γ 線検出型無人ヘリモニタリング

吸収体に入射したものを測定し、その角度とエネルギーからどの位置から放出されたものかを特定する手法であるが、地上の各位置の放射能分布を精度良く測定するためには、ある程度時間を要する。また、遠方においては、測定地点からの距離の2乗に反比例して検出効率が小さくなることと、測定地点へ向かう γ 線と地面のなす角度が浅くなるために位置分解能が劣化する。これでは移動しながら広い範囲を測定する無人ヘリの特長を減殺するものとなる。そこで、それらの特長を活かすため、散乱体と吸収

体に入射した γ 線を測りながら移動する無人ヘリのデータを解析することにより、特定核種（例えば、放射性セシウム）の放射線が検出器に入射する角度を限定しつつ測定することが可能となる。図6は1 cm角のGAGGシンチレータとSiPM素子を64個（8×8個）のアレイ状に組み上げた散乱体と吸収体の2層の検出器の概念図である。図7には、これを用いて福島県浪江町の河川沿いで試験測定したマップを示す^{15),16)}。まだ狭い範囲での飛行であるが、位置分解能の良いマップが得られることから、高分

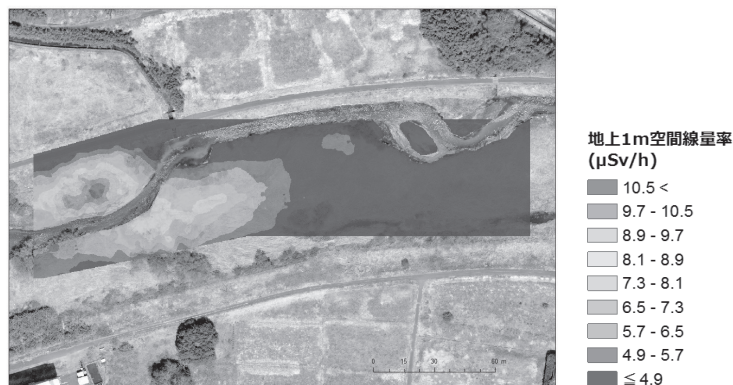


図7 散乱 γ 線検出型無人ヘリで測定した空間線量率分布(2015年2月24～25日)。このガンマカメラを用いることにより、局所的にやや空間線量率が高い場所も判読できる。

解能の特定核種の分布が必要な場合には有効であると考えられる。従来型の測定法より局所的な分布が知りたい場合に備えて、更なる開発・実用化が期待される。

5. まとめ

東電福島第一原発事故直後、広い範囲に拡散した放射性セシウムの面的な分布を知るために航空機モニタリングが開始された。事故発生から4年以上が経過し、放射性物質が環境中でどのように変化(減衰)するかについて、面的な変化に着目してモニタリングが行われている。また、航空機が飛行できないエリアでの測定や局所的な変動を調査するために無人ヘリが導入され、様々な場所で測定が行われている。これらのデータは、放射性セシウムが今後どのように推移するか予測に重要なデータを提供するものであり、より精度の高いデータが要求されている。このため、よりきめ細かな測定、高位置分解能の測定手法に加えて、地理情報システム(GIS)技術や放射線画像の再構成技術を用いた放射線分布の面的な評価技術の更なる開発・研究が必要であろう。

また、二度とあってはならない事故ではあるが、万が一一大気中に多量の放射性物質が放出されるような事故が発生した場合には、住民保護のために迅速に放射性物質の面的な測定をする

無人機システム UARMS などの測定法が有効であると考えられ、今後、迅速に放射線分布を面的に測定するシステムの開発とともに、こうしたモニタリング体制の整備が重要となろう。

文 献

- 1) 鳥居建男他, 航空機モニタリングによる空間線量率と放射性セシウムの沈着量の評価, 日本原子力学会誌, **54**(3), 160-165(2012)
- 2) 鳥居建男他, 広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査, *JAEA-Technology*, 2012-036(2012)
- 3) 眞田幸尚他, 平成25年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), *JAEA-Research*, 2014-014(2015)
- 4) Nishizawa, Y. et al., Analytical Method for Distribution of Natural Radionuclides after the FDNPP Accident by Aerial Monitoring, *KEK Proceedings*, 2014-6, 62-71(2014)
- 5) 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>
- 6) Mikami, S. et al., Spatial distributions of radionuclides deposited onto ground soil around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant and their temporal change until December 2012, *J. Environ. Radioact.*, **139**, 320-349(2015)
- 7) Nishizawa, Y. et al., Distribution of the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ratio around the Fukushima Dai-ichi nuclear

- power plant using an unmanned helicopter radiation monitoring system, *J. Nucl. Sci. & Technol.* (in press)
- 8) Torii, T. et al., Enhanced analysis methods to derive the spatial distribution of ^{131}I deposition on the ground by airborne surveys at an early stage after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Health Phys.*, **105**(2), 192-200(2013)
 - 9) 鳥居建男, 事故後初期の航空機モニタリングから得られたヨウ素 131 沈着量の分布, 日本原子力学会誌, **55**(12), 702-706(2013)
 - 10) Okuyama, S. et al., A remote monitoring system using an autonomous unmanned helicopter for nuclear emergencies, *J. Nucl. Tech., Suppl.* **5**, 414-416(2008)
 - 11) 眞田幸尚他, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, *JAEA-Research*, 2013-049(2014)
 - 12) Sanada, Y. et al., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Exploration Geophysics*, **45**, 3-7(2014)
 - 13) UARMS 開発チーム, 無人飛行機による放射線モニタリング技術, *Isotope News*, **727**, 30-34(2014)
 - 14) Jiang, Jianyong, Development of wide area and high resolution gamma-ray imager on Compton scattering principle (博士論文, 東京大学, 2015年6月)
 - 15) Shimazoe, K. et al., Prototype of a Scintillator-SiPM based Compton camera for unmanned helicopter, 2015 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (San Diego, USA),
<http://www.nss-mic.org/2015/public/welcome.asp>
 - 16) 志風義明他, 無人ヘリ搭載散乱エネルギー認識型ガンマカメラの開発 II (2) 福島第一原発の周辺におけるフィールド試験, 日本原子力学会 2015 年秋の大会

Abstract

2-D Capturing of Radiations

(1) Measurement from the Sky

Tatsuo TORII: Center of Research Infrastructural Development, Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency, 2-2-2 Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8577, Japan

Radioactive materials were diffused in the environment by the accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, TEPCO. Radiation monitoring from the sky is effective to find the contaminated areas quickly in Fukushima Prefecture, where 70% is occupied by the forests. In this report, it is given an outline about a monitoring technology from the sky using unmanned aerial vehicles and a new measuring technique under development as well as the aerial monitoring using the manned helicopter.

連載講座

放射線を面で捉える

(2) 水中の測定

小田野直光[†]

海上技術安全研究所

181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1

[†]odano@nmri.go.jp

水中における放射線測定においては、計測機器を耐圧・水密容器に収納することが必要であるが、水底における放射性物質の分布を面的に捉えるためには、機器の開発以上に、放射線検出器の曳航方法等の水中機器の運用技術も重要である。本稿では、1960年代から実施されてきている水中での放射性物質の分布を把握するための技術について概観するとともに、東京電力福島第一原子力発電所事故により海域及び水域に放出された放射性物質の分布を面的に把握するための技術について解説する。

Key Words: towed γ -ray spectrometer, *in-situ* underwater survey, geological mapping, marine mineral exploration, anthropogenic radionuclide survey

1. はじめに

水中の放射線測定は水あるいは泥を採取し、実験室（船上を含む）において放射線検出器による測定及び分析による方法が一般的である。しかしながら、このような方法で水中における放射性物質の面的な分布を把握することには限界がある。2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所（以下、「東電福島第一原発」という。）事故により海洋に放出された放射性物質をモニタリングするため、東電福島第一原発から約20km圏内においては、42の採水箇所、45の採泥箇所が設定されているものの、福島県沖の放射性物質の分布状況を面的に把握できていないかという点と必ずしもそうではないのが現状である。水中の放射性物質の面的な測定に関しては、従来からさまざまな取り組みがなされ、海底あるいは湖底といった水底における放射線のその場 (*in-situ*) 観測技術として発展しており、本稿では、特に、水底の放射線の面的な把握という観点か

ら解説する。

水中の放射性物質の分布を面的に把握するためには、さまざまな工夫が必要である。最も重要な点は、水は γ 線に対しても放射線遮蔽材として機能するため、効率よく水底の放射線を検出するには、検出器を水底に接触させて測定する必要があることである。また、面的に把握するためには、検出器を水底に接触させたまま、一定の速度で移動させる必要がある。¹³⁷Csの662keV γ 線の水中における平均自由行程は11.7cmであり（水に対する γ 線の全減衰係数¹⁾より計算）、空気に対する平均自由行程の約1/1000であり、検出器と水底の距離が数cm変化することによる放射線検出器の応答への影響は無視できない。また、一定の速度で検出器を移動させるということは、位置分解能に限界があることを意味する。例えば、船舶により放射線検出器を曳航する場合、船舶の性能にもよるが最低速力は2ノット（3.6km/h, 1m/s）程度となり、仮に1秒ごとにデータを取得したとしても、検出器を1m移動させた際の積算値

としてのデータとなるため、空間分解能は最小でも1mでしかない。さらに、1mの空間分解能が達成できるのは放射線の強度が十分強い場合のみであって、検出器の検出効率にもよるが、達成できる空間分解能は10~100m程度になってしまう場合が多いことに留意する必要がある。一方で、空間分解能に限界があるとしても、例えば数kmの広域における放射線の分布を把握するという観点からは、放射線の空間的な分布に関する情報としては十分な情報を与えることになる。

試料を実験室に持ち帰っての測定と比較した*in-situ*測定の特長は、自然放射線及び人工放射線の分布を広範囲にわたって評価することができ、経年変化の比較も容易となることからモニタリングに適しているとともに、分布の特徴が容易に把握できることから定点サンプリングによる詳細分析箇所の最適化にも役立つことができることである。このように水中の*in-situ*測定は陸上での測定に比べると技術的な課題はあるものの、有効な手段と認識されており、1950年代後半から諸外国で水底における*in-situ*放射線測定の実践がなされてきた。本稿では、水底における*in-situ*放射線測定の実践の諸外国の実践事例を概観するとともに、東電福島第一原発事故後に我が国で実施された海域及び水域における*in-situ*放射線測定例を紹介する。

2. 諸外国における水中*in-situ*放射線測定技術

諸外国における水中*in-situ*放射線測定技術については、英国地質調査所のD.G.Jonesが海洋における γ 線計測技術の開発と応用に関してレビューしており²⁾、本稿ではそのレビュー内容を整理して紹介する。水中の*in-situ*放射線測定の実用化は、諸外国においてはかなり早期に実施されており、1958年~1960年にかけて旧ソビエト連邦科学アカデミー原子核地質学研究所がアゼルバイジャンにおける石油探査のためにNaIシンチレータを用いた曳航型及び静置型の水中 γ 線測定器による測定を実施したのが

最初である³⁾。その後、1961年及び1962年には、米国五大湖のうちスペリオール湖及びミシガン州のパート湖において、湖底のリン鉱石の分布の把握や低レベル放射性廃棄物の移行経路の把握等を将来的な目標として、GMカウンタ及びNaIシンチレータを用いたプロトタイプ機により、100 keV以上の γ 線を計測するとともに、⁶⁰Co線源を用いた底質の密度測定が実施された⁴⁾。この研究は、米国地質調査所の事業の一環として実施されている。

また、英国地質調査所及びオランダKVI（フローニンゲン大学原子核物理学加速器研究所）は、MEDUSA（Multi-Element Detector System for Underwater Sediment Activity）という曳航型スペクトロメータシステムを開発し、運用しており、このシステムでは、初めてNaIよりも効率がよいBGOシンチレータが使用された⁵⁾。MEDUSAと同様のシステムがIAEA海洋環境研究所にも導入されている。

その他、欧米では、1960年代から1990年代まで、海底堆積物の移動や堆積状況の調査、リン鉱石及びマンガン団塊等の海底鉱物資源探査等を目的として、曳航型放射線スペクトロメータが開発され、運用されてきた実績がある⁶⁻¹²⁾。

我が国においては、曳航型の検出器とは異なるが、遠隔操作無人探査機のドルフィン-3Kに小型電気冷却式Ge検出器を搭載し相模湾における放射線調査が実施され¹³⁾、無人潜水船しんかい2000及びしんかい6000にNaIシンチレータを搭載し、海底活断層調査のための放射線分布の測定が実施されている¹⁴⁾。

曳航型スペクトロメータの利用例として、ここまでは主として地質学への応用を紹介したが、以下、放射性物質による環境汚染の調査例を紹介する。1980年代には、英国地質調査所がセラフィールド核燃料再処理施設近傍海域の放射性物質濃度の分布調査を実施し、南北約30km、沖合約10km程度の海域における¹³⁷Cs、¹⁰⁶Ru、⁹⁵Zr/⁹⁵Nbの分布を明らかにした¹⁵⁾。また、英国及び米国地質調査所等は、1998年にサンフ

ランシスコ近傍のファロン諸島の放射性廃棄物海洋投棄サイトの放射性物質分布調査を実施し、総延長約170kmにわたって曳航調査を実施し放射性セシウム等の放射性物質のマッピングを実施している¹⁶⁾。また、IAEA海洋環境研究所においても、ムルロア環礁及びファンガタウファ環礁の核実験サイトの放射性物質による汚染状況の調査を実施しており、曳航型のNaIシンチレーション式 γ 線スペクトロメータが使用された¹⁷⁾。また、ボストン大学では、ジョンストン環礁のPu汚染調査のため、²⁴¹Amからの60 keV γ 線を測定するために大面積のNaIシンチレータを使用して測定している¹⁸⁾。

3. 東電福島第一原発事故後の我が国における取組み

3.1 曳航型スペクトロメータによる測定

東電福島第一原発事故により海洋に放出された放射性物質の水中における分布を把握する努力は、事故直後から実施されており、船舶によって採泥、採水した試料を陸上に輸送した後、高純度Ge半導体検出器によって測定されている。しかし、海底土中の放射性物質の分布を把握する目的で実施された測定は、事故後3か月程度で、金華山東方沖～仙台湾～福島県沖～小名浜沖までの直線距離で約180kmの範囲に9の採

泥地点しか設定されておらず、面的な把握には不十分であった。そのため、東京大学生産技術研究所では、米国、英国等で実績のある曳航型のNaI検出器を用いたスペクトロメータ (RESQ (Radiometric Environment Survey and Quantification) ホース) を製作し¹⁹⁾、海上技術安全研究所とともに、実海域での運用を開始した^{20,21)}。

RESQホースの放射線検出器には、直径3インチ、長さ3インチのNaIシンチレータを用いており、1024チャンネル (γ 線エネルギー範囲：0.1～1.8 MeV) のスペクトルデータを1秒ごとにデータロガーに記録するスペクトロメータである。スペクトロメータは、ゴムの衝撃吸収材とともに耐圧深度500mで設計されたアルミニウム製の耐圧・耐水容器に収納され、さらに海底と接触した際の衝撃を緩和するためにゴムホースに収納されている。また、検出器部分を海底に設置させることを目的に、ホースには鉛製の錘を取り付け、水中重量115kgのシステムとなっている (図1)。

測定の方法としては、RESQホースを船舶の船尾方向から深度の約3倍程度の長さのワイヤーにより海底に降ろし、船舶を約2ノット (3.6km/h, 1m/s) で航行させ、1秒ごとにデータを取得する。検出器位置は、船舶のGPSデータ、深度、繰り出しているワイヤー長から

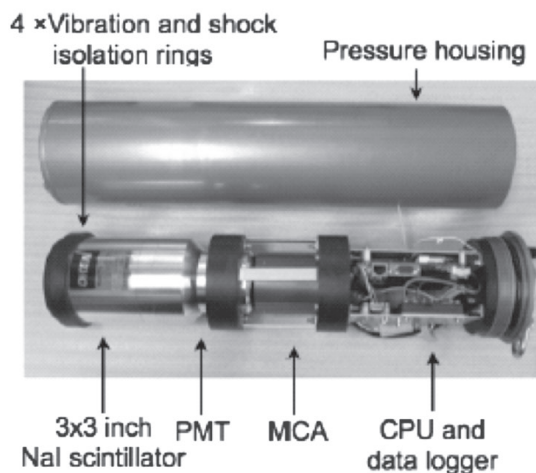


図1 曳航型スペクトロメータの外観図

推定する。また、このシステムで得られるデータは、 γ 線の光電ピーク計数率 (cps) であるが、過去に測定されたデータとの比較を行うため、濃度 (Bq/kg) に変換する必要がある。濃度への変換には、海底における放射性物質の鉛直分布を仮定して、NaIシンチレータの応答関数をモンテカルロ法により評価し、cpsからBq/kgへの変換係数を求め、データ解析に使用している。スペクトロメータのデータは1秒ごとに記録されるが、1秒だけのデータでは統計誤差が不十分なケースがほとんどであるため、光電ピーク計数率の誤差が5%以下になるまでデータを積算することによりデータの不確かさを下げる工夫をしている。これは、検出される放射性物質濃度により空間分解能が異なることを意味しており、直径3インチ、長さ3インチのNaIシンチレータを用いた場合は、海底土の放射能濃度と空間分解能の関係は、濃度が約100Bq/kg-wetの場合は空間分解能が約80m、約1000Bq/kg-wetの場合約8mである。

なお、原子力規制庁等が発表している海底土の放射能濃度の単位は、Bq/kg-dry (単位乾

燥土重量当たりの放射能強度) となっているが、*in-situ*測定の結果を議論する際には、含水率等の海底の性状の情報が含まれる形のBq/kg-wet (単位湿潤土重量当たりの放射能強度) で表記したほうが適切であると考えられるため、以下、本稿では、特に記載がない限り海底土放射能濃度は、Bq/kg-wetで表記する。

このシステムの実海域での運用は、2012年8月に初めて実施され、北茨城及び四倉沖に東西の測線を設定し、海底土中の放射性物質の分布が沿岸域から沖合にかけて減少する傾向が連続的に捉えられた²⁰⁾。その後、2013年7月までは、水産庁事業等の一環として、福島県沖、阿武隈川河口沖、仙台湾等で総延長421kmにわたる測定を実施した^{21, 22)}。それ以降は、原子力規制庁の事業として、福島県沖、阿武隈川河口沖における放射性物質の分布状況の調査を実施し、2013年度には総延長958km、2014年度には総延長1256kmにわたって曳航調査を実施した^{23, 24)}。それらの調査においては、面的な放射性物質の分布状況を把握するために十分な測線間隔を設定した。

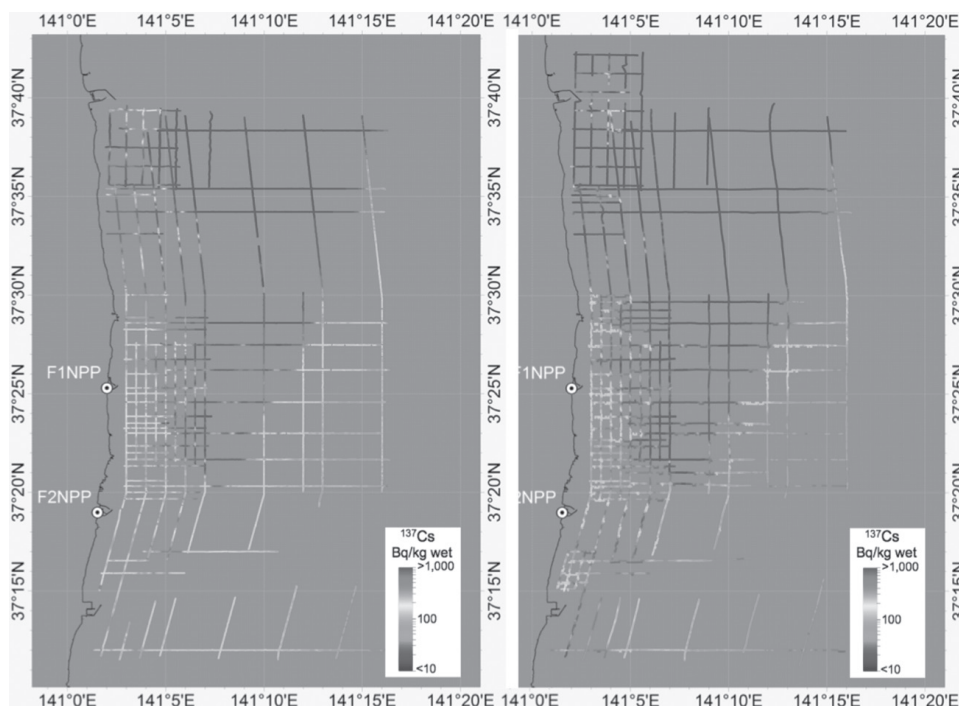


図2 福島県沖の放射性物質分布状況及びその経時変化 (左図：2013年度，右図：2014年度)²⁴⁾

図2は、2013年12月～2014年1月と2014年11月～2015年1月までに実施した曳航調査の結果を示したものである²⁴⁾。東電福島第一原発近傍及びその南側で放射性物質濃度が高い海域があり、沖合においても放射性物質濃度が高い海域があることがわかる。また、局所的に放射性物質濃度が高い箇所もあり、これらの放射性物質の分布状況は、海底地形及び底質と密接な関連があることがわかった。例えば、海底の崖などの窪み地では、放射性物質濃度が高い傾向にある。また、沖合の放射性物質濃度が高い海域の海底堆積物は、福島県水産試験場の調査によれば、シルトと呼ばれる粒径が4～63 μm の泥成分が多く占めており²⁵⁾、それらの分布と放射能濃度が高い海域はほぼ一致している。

これらの曳航調査によって得られるデータは、表層から3cmの放射性物質の濃度として整理し、主要な箇所では採泥を実施して、鉛直方向の放射性物質の濃度分布とも比較した。曳航調査と採泥による放射性物質濃度の測定結果は、誤差の範囲で一致することを確認している。

放射線検出器による測定結果から得られる光電ピーク計数率から曳航測線上での放射性物質濃度を導出するための解析フローを図3に示す。曳航測定においては、底質の状況によって、放射線検出器が海底に沈み込む状況が変化し、検出器の放射線に対する応答が変化しているため、沈み込み量をモニタリングし、応答を補正する必要がある。そのため、曳航式スペク

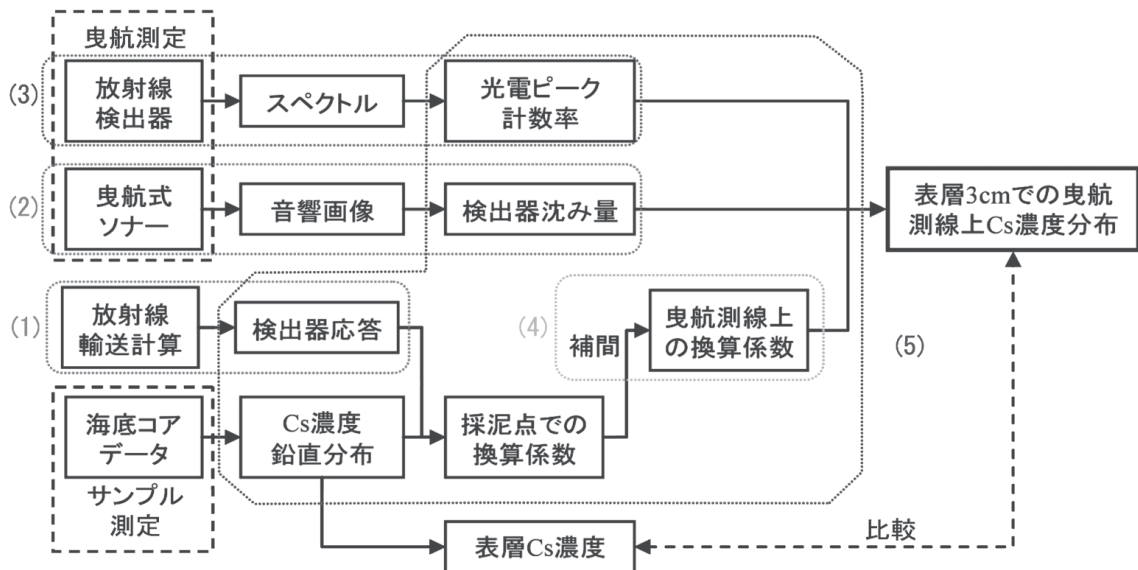


図3 解析フロー図²⁴⁾

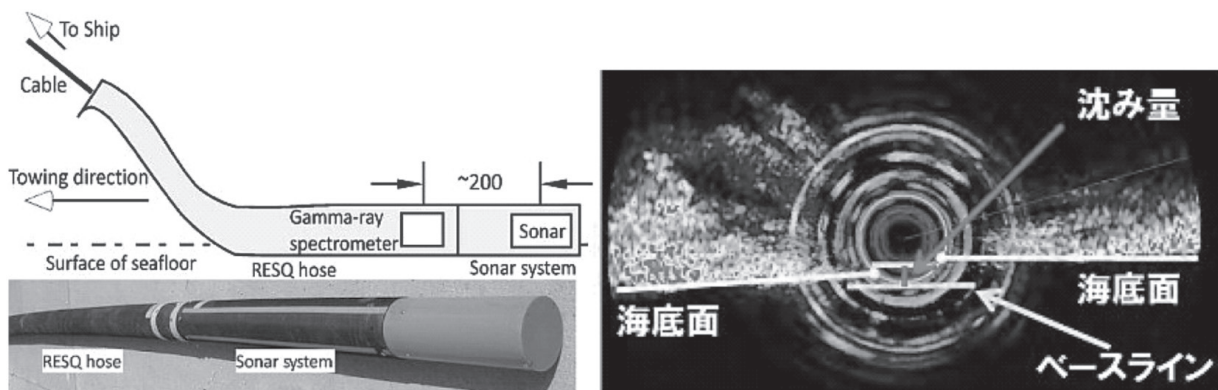


図4 沈み込み量測定ソナーの概念図（左図）及び音響画像解析例（右図）²⁴⁾

トロメータの先端部分に、図4に示すようなソナーを装着し、得られる音響画像を解析することにより沈み込み量を評価し、沈み込みによる検出器の応答の変化を補正している²⁶⁾。また、光電ピーク計数から濃度への換算は、モンテカルロ法による放射線輸送計算により検出器の応答を求めることでcpsからBq/kg-wetへの換算係数を導出することが可能になるが、そこで仮定する放射性物質濃度の鉛直分布は、海底の底質の状況により大きく変化することから、各測線上の点に対する放射性物質濃度の鉛直分布を推定する必要がある。このため、複数の採泥点において求めた換算係数からクリギング法による補間（地球統計学の分野で広く利用されている空間的補間方法）によって曳航測線上での換算係数を求め、曳航型検出器の沈み込み量の応答関数へ補正を行い、表層3cmでの曳航測線上の放射性セシウム濃度の分布を求めている。このため、得られる放射性セシウム濃度には、さまざまな不確かさが存在し、鉛直分布、検出器の沈み込み量、補間に起因する不確かさが主要な誤差の成分であるが、曳航型スペクト

ロメータによる放射性セシウム濃度の測定誤差は、20～30%程度である。

3.2 プラスチックシンチレーションファイバーによる測定

日本原子力研究開発機構では、ため池の水底における放射性物質の分布状況を把握するために、プラスチックシンチレーションファイバー（PSF）を用いた水底測定システム（p-Scanner）を開発した²⁷⁾。p-Scannerは、最長20mのシステムがあり、PSFの両端に設置されている光電子増倍管に入射放射線によって生じるシンチレーション光が到達する時間差から放射線の位置を特定するシステムである。位置分解能は、PSFの長さが10mのシステムで40cm程度である。p-Scannerの概念図を図5に示す。また、計数率から放射性物質濃度への換算のため、LaBr₃（Ce）検出器を5m間隔で水底に降ろし、放射性物質濃度データの校正に利用しており、計数率から濃度への換算係数は、モンテカルロ法によるLaBr₃（Ce）検出器の応答関数を評価することによって実施している。また、測線間

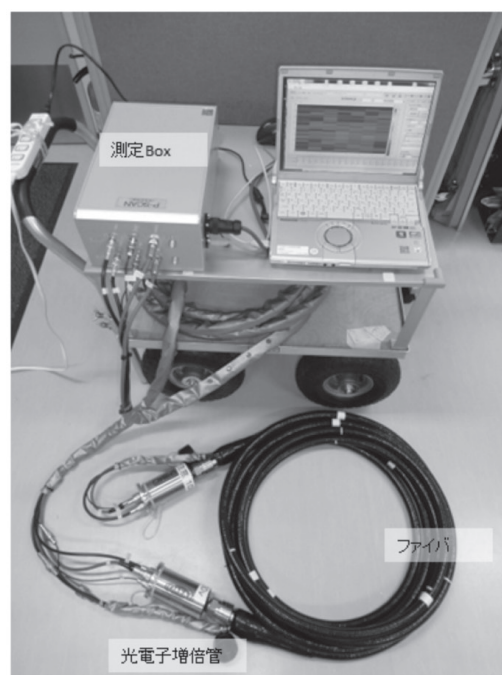
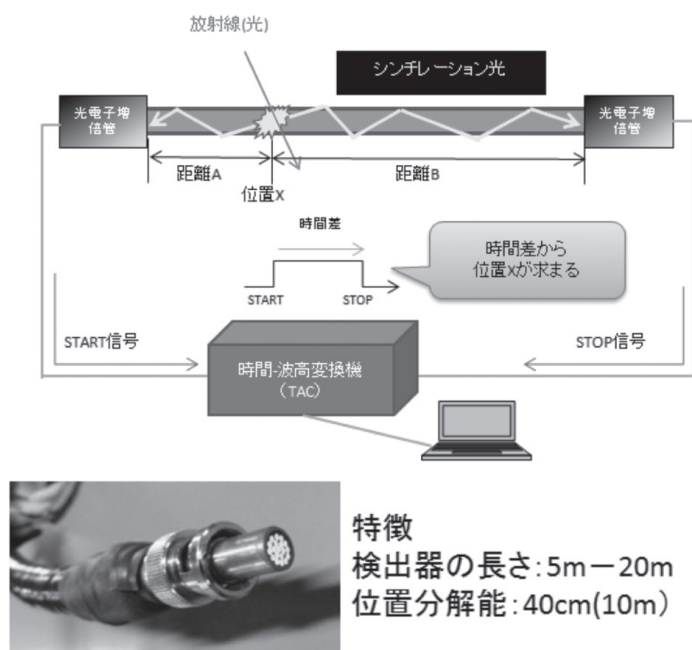


図5 プラスチックシンチレーションファイバー（PSF）を用いた水底測定システム（p-Scanner）の概念図²⁷⁾

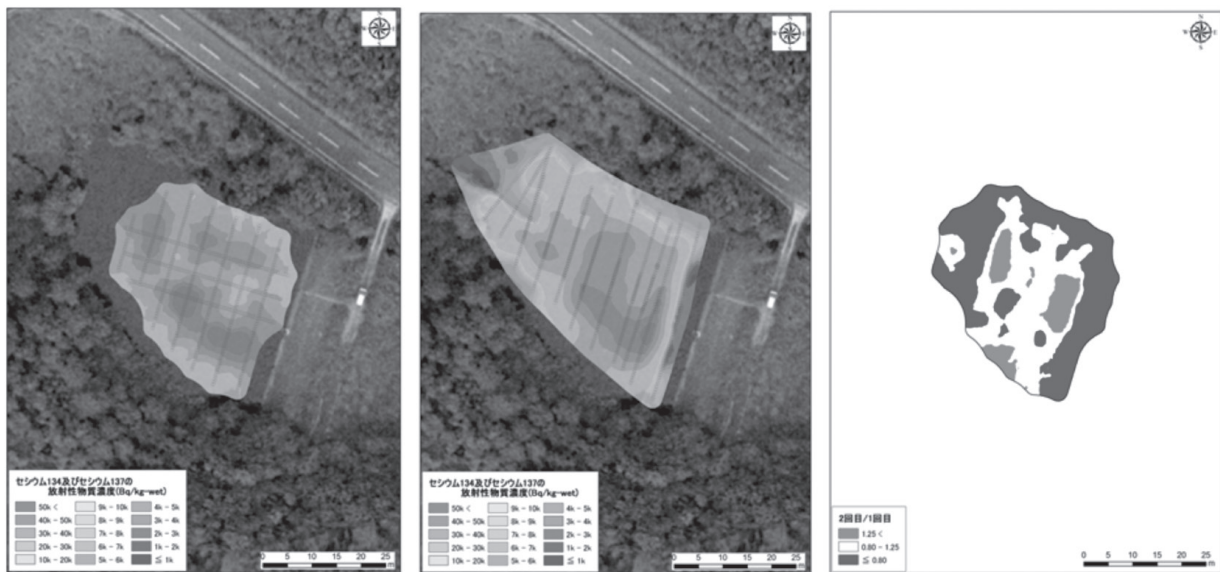


図6 水底の放射性セシウム濃度マップ
(左：浚渫後，中：浚渫後約5か月後，右：浚渫前後の比画像)²⁷⁾。

隔は5mでも空間的補間により面的な放射性物質濃度分布が得られることが示されており、水底の放射性物質濃度分布の面的な把握に有効な手法である。図6に例として、ため池の水底の放射性セシウムの濃度の分布を浚渫後及び浚渫後約5か月の測定結果を示すとともに、浚渫前後の比較図を示す²⁷⁾。

4. まとめ

水底の放射性物質の分布を面的に把握する技術は、1950年代後半から存在し、その後改良が加えられてきた。当初の目的は、海底の資源探査や堆積物輸送現象の研究であり、海洋地質学の分野で発展した技術であり、米国、英国の地質調査所、米国ジョージア大学等が技術の発展を担ってきた。これらの技術は、人工放射線による海洋汚染が問題になると、海域における人工放射性物質の分布の把握に活用されてきた。また、東電福島第一原発事故後は、海洋、湖沼、ダム等、さまざまな水域で放射性物質分布の測定が実施されてきている。水底の放射性物質の相対的な強度分布を得ることは比較的容易であるが、陸上とは異なり、*in-situ*測定している場所の情報を直接的に確認することが

できないために、絶対値としての測定データにはさまざまな不確実さが伴うことに注意を払う必要がある。本稿が、水中の放射線を面で捉える技術の理解の一助になれば幸いである。

文 献

- 1) 日本アイソトープ協会，アイソトープ手帳11版（2010）
- 2) Jones, D. G., Development and application of marine gamma-ray measurements: a review, *J. Environ. Radioact.*, **53**, 313–333 (2001)
- 3) Ermakov, V.I., Peisikov, Y. and Shatson, A.N., Investigation of the radioactivity of the seafloor, *Yadernaya Geofizika*, 137–153 (1961)
- 4) Bunker, C. M., Radioactivity and density-measurement devices for oceanographic studies, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, **501-D**, 65–69 (1964)
- 5) de Meijer, R. J., Heavy minerals: from 'Edelstein' to Einstein, *J. Geochem. Explor.*, **62**, 81–103 (1998)
- 6) Bastin, A., Natural radioactive tracers and their use in Belgium: lithological maps of the bottom of the North Sea off the Belgian coast and of the Scheldt estuary constructed on the basis of natural radioactivity measurements, in *Tracer techniques in sediment transport*, pp. 179–200, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1973)
- 7) Summerhayes, C. P., Hazelhoff-Roelfzema, B. H., Tooms, J. S. and Smith, D. B., Phosphorite prospect-

- ing using a submersible scintillation counter, *Econ. Geol.*, **65**, 718–723 (1970)
- 8) Miller, J. M., Roberts, P. D., Symons, G. D., Merrill, N. H. and Wormald, M. R., A towed gamma-ray spectrometer for continental shelf surveys, in Int. Symp. on Nuclear techniques in exploration, extraction and processing of mineral resources, pp. 465–498, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1977)
 - 9) Noakes, J. E. and Harding, J. L., New techniques in seafloor mineral exploration, *Mar. Technol. Soc. J.*, **5**, 41–44 (1971)
 - 10) Senftle, F. E., Tanner, A. B., Philbin, P. W., Noakes, J. E., Spaulding J. P. and Harding J. L., *In-situ* capture gamma-ray analyses for sea-bed exploration, in Nuclear techniques in geochemistry and geophysics, pp. 75–91, International Atomic Energy Agency, Vienna, (1976)
 - 11) Michaelis, W., Nuclear techniques in marine metal exploration, in Int. Conf. on Nuclear Cross Sections for Technology, Knoxville, TN, USA, (1979)
 - 12) Noakes, J. E. and Harding, J. L., Overview of nuclear techniques for marine mineral survey and environmental assessment, in R. A. Geyer, CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea, Hard Minerals, Boca Raton, FL, CRC Press, (1992)
 - 13) 山本忠利, 清水 徳, 小澤皓雄, 美留町厚, 千崎年彦, 片桐政樹, 深海放射能測定用Gey線検出器システムの開発, JAERI-Research, 99, 032 (1999)
 - 14) 服部陸男, 岡野眞治, 海底 γ 線測定—成果とモデル化—, JAMSTEC 深海研究, **20**, 37–52 (2002)
 - 15) Jones, D. G., Roberts, P. D. and Miller, J. M., The distribution of gamma-emitting radionuclides in surface subtidal sediments near the Sellafield Plant, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **27**, 143–161 (1988)
 - 16) Jones, D. G., Roberts, P. D., Limburg, J., Karl, H., Chin, J. L., Shanks, W. C., Hall, R. and Howard, D., Measurement of seafloor radioactivity at the Farallon Islands radioactive waste dump site, California, Open-File Report 01-62, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, (2001)
 - 17) Osvath, I., Povinec, P., Huynh-Ngoc, L. and Comanducci, J. F., HuynhNgoc, L., Comanducci, J. F., Underwater gamma surveys of Mururoa and Fangataufa lagoons, *Sci. Total Environ.*, **238**, 277–286 (1999)
 - 18) Johnson, O., Osborne, D., Wildgoose, C., Worstell, W. and Lobel P., Development and testing of a large-area underwater survey device, *IEEE T. Nuc. Sci.*, **44**, 792–798 (1997)
 - 19) ソーントン・ブレア, 矢野裕亮, 浦 環, 曳航式海底ガンマ線計測装置の開発, 海洋調査技術, **25**, 1–6 (2013)
 - 20) Thornton, B., Ohnishi S., Ura, T., Odano, N. and Fujita, T., Continuous measurement of radionuclide distribution off Fukushima using a towed seabed gamma ray spectrometer, *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, **79**, 10–19 (2013)
 - 21) 水産庁, 平成24年度科学技術戦略推進費「重要政策課題への機動的対応」に係るプロジェクト「高濃度に放射性セシウムで汚染された魚類の汚染源・汚染経路の解明ための緊急調査研究」報告書, (2013)
 - 22) Thornton, B., Ohnishi, S., Ura, T., Odano, N., Sasaki, S., Fujita, T., Watanabe, T., Nakata, K., Ono, T. and Ambe, D., Distribution of local ^{137}Cs anomalies on the seafloor near the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, *Mar. Pollut. Bull.*, **74**, 344–350 (2013)
 - 23) 海上技術安全研究所, 東京大学, 金沢大学, 原子力規制庁事業平成25年度放射性物質測定委託調査費(海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究) 事業成果報告書, (2014)
 - 24) 海上技術安全研究所, 原子力規制庁事業平成26年度放射性物質測定委託調査費(海域における放射性物質の分布状況の把握等に関する調査研究) 事業成果報告書, (2015)
 - 25) 青柳和義, 五十嵐敏, 福島県沿岸域の粒度組成について, 福島水試研報, **8**, 69–81 (1999)
 - 26) Hirao, Y., Ohnishi, S., Thornton, B., Yano, Y., Odano, N. and Ura, T., Development of a sonar system to estimate the seafloor subsurface burial depth of a towed gamma-ray spectrometer, *Mar. Technol. Soc. J.*, **48**, 155–166 (2014)
 - 27) 眞田幸尚, 高村善英, 卜部 嘉, 土田清文, 西澤幸康, 山田 勉, 佐藤義治, 平山弘克, 西原克哉, 伊村光生, 石田陸司, 石橋 聖, 佐瀬隆聡, 鈴木元和, 森 英治, 米澤重晃, 鳥居建男, 水底のin-situ放射線分布測定手法の開発, JAEA-Research 2014-005 (2014)

Abstract

2-D Capturing of radiations

(2) Underwater Measurements

Naoteru ODANO[†]: National Maritime Research Institute,
6-38-1 Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo 181-0004, Japan

For underwater in-situ measurement of radiations, radiation measurement instruments are required to be designed as water and pressure resistant. In addition to the development of underwater radiation measurement system taking into account the operating environment, operation

techniques of underwater equipment such as towed γ -ray spectrometer are essential to get two dimensional mapping of radiation distribution in sediment of bottom of sea or water. In this paper, in-situ radiation measurement techniques, used from the 1960s to the present for geophysics studies, marine sediment transport studies, marine mineral exploration, and anthropogenic radionuclide survey, are reviewed. Recent techniques for mapping of distribution of radionuclides in seafloor or water bottom deployed to measurement of radionuclides released from the accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo Electric Power Company, are also described.

連載講座

放射線を面で捉える

(3) 地上の測定

武田伸一郎^{†, #}, 原山 淳, 佐藤悟朗, 渡辺 伸, 高橋忠幸

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1

[#]沖縄科学技術大学院大学最先端医療機器開発ユニット (2015年7月より所属変更)

904-0495 沖縄県国頭郡恩納村字谷茶1919-1

[†]shinichiro.takeda@oist.jp

東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故をきっかけとして、敷地や建物へと飛散した放射性物質に対する可視化の要求が一気に高まった。この数年の間に飛躍的に進展した放射性物質の可視化技術について、筆者らのグループが実用化を進めてきたSi/CdTe半導体コンプトンカメラを含む、複数の事例を取り上げて解説する。

Key Words: Radioactive substances, γ -ray, compton camera, Gamma camera, plastic scintillation fiber

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所（以下、「東電福島第一原発」という。）の事故から4年の時間が流れた。2015年6月には、原子力災害現地対策本部より、2015年8月中旬から福島県楢葉町の避難指示解除を実施するとの発表があった。このニュースは、東京電力から相談を受けたことをきっかけとして、事故直後の夏（2011年8月）から、たびたび東電福島第一原発から20km圏内に立ち入って放射性物質の可視化実証試験に取り組んできた、筆者ら宇宙科学研究所のグループにも、特別な感情を抱かせる。今も現地では、失われた土地と生活を取り戻すための、除染に対する最大限の取り組みが進行しているはずである。

この事故によって、放射性物質の可視化への要求が一気に高まることになった。可視光に対するデジタルカメラのように、 γ 線を放出する放射性物質に対しても可視化装置が実現すれば、サーベイメータを携えて人力で敷地を探索

する従来の方法に比べて、格段に容易に、かつ見落とすことなく、ホットスポットの探索が可能になると考えられるからである。しかしながら、今回のように広い範囲にわたって放射性物質が土地や建物を汚染するという状況が、我が国において発生する事態になろうとは、事故以前には想定できず、また、そのような可視化技術に対する需要も国内ではそれほどなかったこともあって、事故当時、有用な可視化装置は存在していない状況であった。

これらを背景として、この3~4年間で飛躍的に進歩した技術が放射性物質の可視化の技術である。今回の有事に際して、日本原子力研究開発機構（JAEA）に代表される原子力分野の研究機関及び大学研究室だけでなく、筆者らのような宇宙天体観測を主戦場としているような研究グループや、医療用のイメージング装置を開発してきた民間企業グループも、自発的かつ積極的に、各人の使命感を持って、各グループのアイデアに基づく可視化装置の実用化に取り組んできた。本稿では、まず、最新の可視化技術について解説を試みる。それから、

ISOTOPE NEWS 2012年10月号で報告した、宇宙 γ 線計測技術を応用した「超広角コンプトンカメラ^{1,2)}」の、その後の展開について述べる。

2. いかにして放射性物質を可視化するか

放射性同位体が崩壊して安定な原子核に遷移する際に放出される γ 線を計測して、放射性物質の分布を画像化する技術は、特に核医学の分野において飛躍的な発展を遂げてきた。放射性同位体で標識した化合物の体内における動態や集積を画像化することにより、非侵襲的な臓器疾患の診断やがんの早期発見に資することができる。また、放射性物質の可視化技術は、宇宙高エネルギー天体観測に代表される学術分野や、原子力関連施設での放射性物質管理といったセキュリティ分野など、広く分野を超えて応用できる基盤技術である。

しかしながら、今回の東電福島第一原発事故により生じた状況は、放射性物質が敷地・建物に広範囲に分布しており、かつ、放射性セシウム (^{137}Cs) から放出される γ 線のエネルギー (662 keV) が高いという、可視化を困難にする二つの要素が同時に成立する前例のない特殊な状況であったため、医療イメージング等で確立してきた放射線計測技術をそのまま現地に適用することは難しかった。

このような状況における放射性物質の分布の可視化方法は、大別して、

- (a) 空間の各点での γ 線の計数から放射性物質分布を推定する方法
- (b) γ 線の到来方向を計測し放射性物質分布を直接求めるガンマカメラを用いた方法

が挙げられる。

まず、(a)の方法は、放射性物質が作り出す放射線の場を計測して、その情報から逆に放射性物質分布を推定することを目指す方法である。サーベイメータ等を用いた計数測定での究極的な目標であるといえる。推定の精度は測定点の数と間隔、センサーの大きさ、センサーから放射性物質までの距離等に依存する。た

だし、2次元の面上に放射性物質が分布していると仮定できる状況であっても、ほぼ無限に広がっている放射性物質に対して測定点は有限であることもあり、この逆問題を解くのは難しい。実践的には、サーベイメータの計数と、実地の環境で別途得られた放射性セシウム沈着量 [Bq/cm^2] との間の経験的な相関をもとに、放射性物質分布の推定が行われている。

一方、(b)の方法は、放射性セシウムから放出されて装置に入射する γ 線の到来方向を決定し、入射方向の分布をマッピングすることで、装置から見た放射性物質の方向分布をカメラのように表示する「直接的な」可視化方法である。可視光のデジタルカメラの画像と、ガンマカメラによる放射性物質の分布をオーバーラップさせることで、直感的な汚染状況の把握が可能になる。サーベイメータを携えて人力で敷地を探索する従来の方法に比べて、格段に容易に、かつ見落とすことなく、ホットスポットの探索が可能になる。

また、除染作業の効果を評価するために、ガンマカメラを用いて除染前後で撮像比較を行うことも極めて有効である。例えば、ある庭サイズの区画 (10×10m四方程度) を除染し、放射性物質が完全になくなったとする。一般には、サーベイメータを用いて除染前後の空間線量値を測定するが、数値は自然放射能のレベルはおろか、元の半分程度にまでしか下がっていない場合もありうる。なぜならば、 ^{137}Cs から放出される662 keVの γ 線の大気中での減衰長は約100mと長く、サーベイメータの測定値は、除染済みの10×10m区画の外側に広がる半径

*放射性セシウムからの γ 線もしくは β 線を計測できるサーベイメータに、周辺からの γ 線・ β 線を遮蔽できる十分な厚みを持ったコリメータを装着して、測定器直下以外からの放射線の混入を極力軽減した上で、敷地内を隈なく走査し、表面汚染を測定することは可能である。しかし、依然として手間がかかることには変わりなく、またコリメータを含む装置自身の汚染にも十分なケアが必要である。

100m程度の領域内に存在する放射性物質の影響を多分に受けるからである。これは、サーベイメータが γ 線の到来方向を特定できないために生じる問題であり、除染の効果をより端的に示すという観点では改善の余地がある*。 γ 線の到来方向を決定する能力を持つガンマカメラを用いることにより、よく除染された区画であれば、 γ 線の信号が欠損した空白領域として認識されるであろう。これがまさに、ガンマカメラによる撮像の強力なメリットの一つなのである。

3. 放射性物質の可視化技術の進展

本講座「放射線を面で捉える (1)空からの測定」では、航空機による上空からのモニタリングについて解説されている。航空機モニタリングは、地上の広い範囲にわたって汚染レベルを素早く測れるメリットがあり、広域汚染の全体像を俯瞰する上で有用である。一方で、位置分解能には制限があり、例えば高度300mでの飛行の場合には数100m四方程度になる。航空機モニタリングによる汚染状況の可視化は2.(a)に分類されるが、すでに指摘したように、放射性セシウム沈着量の推定精度がセンサーから放射性物質までの距離に依存し、典型的には飛行高度程度になるためである。

地上での測定は、汚染場所の特定や除染対策を行う上で手法の選定のための詳細分布測定を目的とする。また、除染作業の効果を数値化して評価する上でも、地上における可視化技術

は不可欠である。以下に、東電福島第一原発事故を背景として実用化に至った可視化技術について解説する。

3.1 プラスチックシンチレーションファイバー (Plastic Scintillation Fiber, PSF) を用いた大面積汚染分布測定

2.(a)に示したサーベイメータを用いる方法を、格段に高効率化・高信頼化(見落としが少ない)したのが、プラスチックシンチレーションファイバー (PSF) による測定法である^{3,4)}。サーベイメータ等を用いた除染効果の確認は、除染前後での代表点を測定することで行われているが、これは多大な時間と労力を要する。PSFを用いた測定は、短時間で広いエリアの放射線を測定するために福島県内の汚染地域で適用されている。

測定では、放射線と反応することで発光するPSFの両端に光電子増倍管 (PMT) を接続したものを使用する。ファイバーの両端に到達するシンチレーション光の時間差情報を、ファイバー内で放射線が反応した位置情報へと変換する。状況に応じて、5~20m程度の長さのPSFを地面に対して並行移動して、連続的な2次元スキャンを行う(図1)。得られた計数率は、事前のキャリブレーションで得た計数率と放射性セシウム沈着量 [Bq/cm²] の相関を用いて、放射性セシウム沈着量へと換算した後に、2次元平面上にマッピングして表示する。鳥居建男らの報告³⁾では、除染現場への適応実験

プラスチックシンチレーションファイバー (PSF)



図1 プラスチックシンチレーションファイバーを用いた測定風景。(提供：日本原子力研究開発機構 鳥居建男氏)

において、PSFを用いた除染前後での汚染分布の比較により、除染前後で汚染レベルが異なることが示され、除染効果の確認や未除染エリアのチェックなど実用上有益であることが示された。

3・2 CdTe半導体を用いたガンマカメラの実用化

東電福島第一原発事故後、いち早く市場へと投入された国産のガンマカメラが、テルル化カドミウム (CdTe) 半導体⁵⁾を用いたガンマカメラである^{6,7)}。CdTeは原子番号が大きく (Cd: 48, Te: 52)、密度が高い (5.85 g/cm³) ために、光子阻止能力が高い。γ線検出器を形作る上で有力な半導体であり、(株)アクロラド (沖縄県うるま市) によって供給されている。半導体素子特有の優れたエネルギー分解能を有し、ピクセル化のための電極微細加工が可能で、ゲルマニウム検出器のような液体窒素温度での動作を要求せず、常温でも動作させることができる特徴を持つ。

高橋勲らのグループ⁷⁾では、独自に開発し



図2 CdTe半導体を用いたピンホール型ガンマカメラの写真。(提供：日立製作所 高橋勲氏)

た16×16ピクセルのCdTe検出器モジュールとタングステン製のピンホールコリメータを組み合わせたガンマカメラを実用化した (図2)。小さな孔の開いた遮蔽板 (ピンホール) を検出器モジュール前方に配置し、一つ一つのγ線に対し入射方向と検出器モジュール上の位置とを一对一に対応付けることで撮像を行う。視野外からのγ線を遮蔽するために、検出器モジュールは十分な厚みの遮蔽体により囲まれている。ガンマカメラ自体はγ線の入射方向分布を与えるが、装置に備え付けられたレーザー距離計により、ピクセルで検出されたγ線の数と距離の情報とを組み合わせることで、放射能 [Bq] の面分布を推定することが可能になっている。フィールド試験では、ホットスポットの除染前後での撮像を行い、除染の現場でも有効に活用できることを示した。

3・3 コンプトンカメラの登場と製品化

従来のガンマカメラが必要としてきた「外付けの」コリメータと、視野外からのγ線に対する遮蔽体とを用いることなくイメージングが可能であり、広角撮像能力・広いエネルギー帯域・高検出効率と同時に装置軽量化も達成しうる潜在能力を有し、次世代型ガンマカメラと位置付けられるのがコンプトンカメラである。コンプトンカメラは、装置内部で起こった「コンプトン散乱」のプロセスを記録し、そのエネルギー・位置情報とコンプトン散乱の運動方程式から、γ線の入射方向を求める²⁾。しかしながら、必要な効率や画像分解能で可視化を行い、また比較的簡便な手法で現地での撮像ができるような装置は存在せず、実証は実験室レベルにとどまっていた。

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) の高橋忠幸研究室では、宇宙高エネルギー天体现象の高感度観測を目標として掲げ、高エネルギー分解能テルル化カドミウム (CdTe) 半導体を用いた大面積撮像素子や、シリコン (Si) 半導体を用いた低ノイズ撮像素子

など、宇宙からの微弱な γ 線を検出するための計測技術を蓄積してきた**。これらの技術を基に独自に提案し、開発を進めてきたのが、SiとCdTeの撮像型半導体検出器を多段積層したSi/CdTe半導体コンプトンカメラである。この技術を地上用途に応用したプロトタイプ「超広角コンプトンカメラ」を用いた、世界で初めての東電福島第一原発から20km圏内での現地実証実験¹⁾を皮切りに、国内の複数のグループによりコンプトンカメラの実地への応用研究が進められ、実際に、半導体やシンチレータにより構成されるコンプトンカメラが製品化されるに至っている⁸⁻¹¹⁾。近年の急速な半導体放射線センサーや光検出器の発展は、数十年前には予想もできなかったような、コンパクトなコンプトンカメラの実現を可能にしている。

4. ASTROCAM 7000HSの開発

ISOTOPE NEWS 2012年10月号において報告した車載式プロトタイプ機による実地試験¹⁾では、Si/CdTe半導体コンプトンカメラの広角撮像能力を生かしたホットスポット探索に対する有用性を示すことができた。一方で、実用化に向けては克服すべき複数の課題が浮かび上がることになった。列挙すると、

- ・ 検出効率の向上（詳細は4・1に記載）
- ・ 山林や田畑，家屋裏へのアクセスを可能とする可搬式ハウジングの開発
- ・ 作業者が容易に装置を操作できるGUIソフトウェアの開発
- ・ 除染前後での撮像による可視化有用性の実証（詳細は4・2に記載）
- ・ 遠方のホットスポットを可視化するための撮像手法の開拓（詳細は4・2に記載）
- ・ 装置内部での複数散乱イベントに対するコンプトン再構成アルゴリズムの開発¹²⁾
- ・ バックグラウンド中でのホットスポット

**名古屋大学の田島宏康教授，大阪大学の能町正治教授との共同開発の成果も含む。



図3 ASTROCAM 7000HSの写真

検出感度の定量化（詳細は4・3に記載）

などである。その後、プロトタイプ機に対して実に100倍近い検出効率を実現するための検出器技術を確立し、この技術を土台とした高感度改良型Si/CdTeコンプトンカメラを実現し、2013年3月に三菱重工業からリリースしたのが、世界で初めてのコンプトンカメラ商用機「ASTROCAM 7000HS」である（図3）。可搬型ハウジング外観には、軽量化に配慮したエンジニアリングプラスチックを用いており、かつ耐環境を向上させるための塗装を施している。内部には、高感度改良型Si/CdTeコンプトンカメラ、冷却機構及び断熱材、高圧回路、可視光カメラがコンパクトに収納されている。だれもが容易に装置を操作させることができるように、パソコン上で動作するユーザーインターフェイス用GUIソフトウェアを新たに開発した。解析ソフトウェアには、高感度改良型Si/CdTeコンプトンカメラに適応した装置内部での複数散

乱イベントを取り扱うアルゴリズム¹²⁾を、新たに実装している。詳細な装置仕様に関しては、文献13)に記載されている。筆者らは、このASTROCAMを現地に持ち込み、前記の課題に取り組むべく実証実験を進めてきた(4・2, 4・3)。

4・1 ASTROCAM 7000HSのデザイン

実用機を設計する上で重要視したのは、プロトタイプ機を用いた実地試験で得られた結果をもとに、装置をより有効に使うことができる適切な検出効率を実現することであった。2層のSiストリップ検出器と3層のCdTeストリップ検出器を積層した5層からなるカメラモジュールを計2モジュール並べたプロトタイプ機により得られた検出効率の実測値は0.035 cps/MBq @ 1m (¹³⁷Cs, 662 keV)である。これは、1m先に1MBqの¹³⁷Csの点線源を置いた場合に662 keVの γ 線のフルエネルギーピークのカウントレートが0.035 cpsとなる検出効率を持つことを意味する。実地試験では、3~5 μ Sv/hの空間線量下において、ホットスポットの可視化に典型的に60分程度の時間を要した。同様の条件下で撮像時間を10分程度にまで短縮することをASTROCAMの設計目標とした。この場合、検出効率をプロトタイプ機に比べて約5倍向上させる必要がある。

ASTROCAMでは検出効率を向上させるため

に、半導体素子のサイズをプロトタイプ機で用いた3.2cm角から5cm角へと拡大し、かつ、より多くの検出器モジュールを積層可能な設計とした。このタイプの検出器モジュールは、2015年度打ち上げ予定のASTRO-H衛星に搭載する軟 γ 線検出器(SGD)でも用いられており、各SiとCdTe検出器のデザインとモジュール化に関しては、文献14)に詳しい。ASTROCAMの標準モデルでは、Siピクセル検出器を8層、CdTeピクセル検出器を4層積層する構成とし、プロトタイプ機の約5倍となる0.16 cps/MBqの検出効率(実測値)を達成できる設計とした。

撮像時間をさらに短縮するために、もしくはより低線量下における測定への要求を想定し、より多くの検出器を積層して検出効率をさらに向上させることができるようになっている。最大で32層のSi検出器と8層のCdTe検出器を多段積層し、Si検出器の水平4方向もCdTeで取り囲んだ構成が可能である。この拡張モデルの場合には、検出効率は標準モデルの約16倍の2.8 cps/MBqにまで到達し、これはプロトタイプ機の約80倍に相当する。そのほか、ASTROCAMの基礎的な性能については表1にまとめた。コンプトンカメラ特有の広い視野(180 \times 180 $^\circ$ (半球))と、半導体検出器による優れたエネルギー分解能が特徴的である。

表1 ASTROCAM 7000HSの主要諸元

項目	諸元
形状	445L x 340W x 235H (mm)
重量	8-13 kg 程度 (装置仕様による)
視野	180 x 180 $^\circ$ (2 π ステラジアン)
エネルギー分解能	約 2 % (FWHM) @ 662 keV
角度分解能	約 5 $^\circ$ (FWHM) @ 662 keV
検出効率	0.16 cps/MBq @ 1m, ¹³⁷ Cs (標準タイプ) 2.8 cps/MBq @ 1m, ¹³⁷ Cs (拡張タイプ)

2013年6月撮像 (除染前)



2014年1月撮像 (除染後)



図4 ASTROCAMによる東電福島第一原発から20km圏内での実地試験。除染前（左：2013年6月取得）と除染後（右：2014年1月取得）の比較。除染作業によって、ホットスポットが除去されていることが画像上で明らかに分かる。ASTROCAMが、ホットスポットの検出だけでなく、除染作業の評価にも有用であることを示している

4.2 福島での実証実験

ASTROCAMの標準モデルを用いた現地実証実験は東電福島第一原発から20km圏内において行われた。ここでは、 γ 線イメージングの力を端的に示す二つの実験結果について説明する。

ここに示すASTROCAMの γ 線画像では、ホットスポットに対する有意度の判定がなされており、画像上の統計的なゆらぎに対して、ある一定以上の有意度を持つ領域のみを表示することになっている。統計的なゆらぎの定量化のために、コンプトンコーンを重ね合わせることで生じる画像のオフセット成分を推定するアルゴリズムを開発した。元画像からそのオフセット成分の引き算を行った上で、線源が存在しないと想定できる参照領域（基本的には空の領域）のピクセル値の分布を作成し、その分布の広がりから統計的なゆらぎを推定する。

γ 線のイメージング装置にまず期待されることは、除染作業の効果の可視化である。除染前後で撮像し除染効果を視覚的に示すという優れた特徴に加え、2.(b)で述べたように、 γ 線の方向を決定できる能力により除染した領域の外側

から混入する γ 線を区別できるため***、サーベイメータを用いた計測では除染の効果をはっきりと示すことが難しかった状況での有効利用も期待される。ASTROCAMによる除染前後の撮像比較の例を図4に示す。この区画の空間線量は概ね $0.5\sim 1.0\mu\text{Sv/h}$ であり、表示した二つの画像はいずれも30分積分の画像である。図4(左)は2013年の6月に撮像した除染作業前の画像であり、図4(右)は2014年1月に撮像した除染作業後の画像である。カメラはほぼ同じ位置に配置し、同じ方向を撮像した。除染前の画像では、民家の庭がホットスポットとして検出されている（画像中四角で囲った領域）のに対して、除染後の画像ではホットスポットは未検出である。この結果は、ASTROCAMが広い視野を活用したホットスポットの検出だけでなく、除染作業の検証にも有効であることを示してい

*** 現状のコンプトンカメラは、 γ 線の到来方向を円環上には制限できないため、一つ一つの γ 線の入射方向を完全に特定することはできず、可視化には統計的な処理を必要とする。コンプトン散乱での反跳電子の方向を検出できると、一つの γ 線の到来方向を単一の方向に決定できるようになる。



図5 ASTROCAMによる東電福島第一原発から20km圏内での実地試験。放射性物質が広く分布している状況で、遠方（20m以上）に存在するホットスポットも可視化し、敷地内の全体的な汚染状況を把握するために、高所作業車にASTROCAM 7000HSを搭載し、6mの高度から撮像した

る。

もう一つ、 γ 線のイメージング装置に強く求められているのは、敷地や建物に広く飛散している放射性物質の分布を可視化する能力である。サーベイメータを用いた人力でのスキャンでは、大きな労力をつぎ込まなくてはならない広大な敷地や、アクセスが難しい建物の壁や屋根などに対しても可視化が実行できれば、周辺の汚染状況をより正確に把握することができる。現場での効率のよい除染計画の立案等に貢献できる可能性もある。コンプトンカメラは広い視野（ $180 \times 180^\circ$ （半球））を持つため、これを実行する上で優位に立つが、実地はそれほど単純ではない。具体的には、カメラの近くに強度の強いホットスポットが存在する状況が挙げられる。この場合には、近場のホットスポットからの γ 線の信号が、遠方の放射性物質からの信号に対して無視できないバックグラウンドになり、カメラで遠方まで見通すことが困難となる。このような状況でも、コンプトンカメラの広角の視野を最大限に生かした広範囲の可視化ができるように、筆者らが現地で取り入れた

のが、ASTROCAMを高所作業車に搭載して高度を上げ、高所から敷地を見下ろす鳥瞰的な撮像方式である。この方式により、近場のホットスポットからの影響が軽減され、広い範囲にわたっての放射性物質の探索が可能になる。一例を図5に示した。カメラは地上6mの高さに保たれ、このときカメラ位置での空間線量は約 $1.3 \mu\text{Sv/h}$ であった。示した画像は30分積分である。カメラから20~30m離れた敷地内の駐車場の側溝に沿って放射性物質の集積が認識できる一方で、カメラからみて左手方向のプレハブの壁や屋根からは未検出である。この方式による可視化が、敷地内の汚染状況を広範囲にわたって把握する上で有効であることを実証した。

4.3 バックグラウンド中でのホットスポット検出感度

ホットスポットの検出とは、薄く広がった放射性物質が作るバックグラウンド（BG）環境（あるいは空間線量）の中で、周囲より放射性物質の集積が高い領域を、ある有意度で検出

したと主張することである。同じ強度のホットスポットであっても、BGが高い環境ではより検出が難しくなるし、測定時間が短くてもやはり難しくなる。BG中でのホットスポットの検出能力（以下、「感度」という****）を知るとは、あるBG中である強度のホットスポットをある有意度で検出するための測定時間の見積もり、また、ホットスポットの検出限界を知る上で重要である。

本節では、感度を求めるための計算方法とその検証実験について述べる。この研究は、英文学術誌 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A¹⁵⁾ に発表したものである。ここでは、論文の内容を簡潔にまとめる工夫とともに、説明の一部は理解が容易になるように新たに書き加えた。注意しておきたいのは、現場の状況はあまりにも多様であるため、感度計算では一様のBG中における点線源に対する感度という、最も単純化された状況を選ばざるをえなかった点である。現実には、放射性物質は均一に拡がっているわけではないので、BG γ 線の装置への入射方向分布は複雑であり、また、ホットスポットのサイズや形状も多種多様である。

γ 線の計測は確率過程であるのでソース及びBGの測定値はゆらぎを持つ。BG中でのソースの感度は、ある有意度で検出可能なソースからの最小の信号の量 (S_{RoI}) であり、以下に定義できる。

$$S_{\text{RoI}} > z\sqrt{(\Delta B_{\text{RoI}})^2 + (\Delta S_{\text{RoI}})^2}$$

ここで、 z は有意度であり、 ΔB_{RoI} と ΔS_{RoI} はそれぞれBGのゆらぎとソースのゆらぎを意味する。下付き添え字のRoI (Region of Interest) はソース及びBGの量のゆらぎを評価する参照領域を意味している。例えば、エネルギースペクトル測定におけるピーク検出の場合には、

**** 医療イメージングの分野では、検出効率のことをSensitivity (感度) ということも多いが、ここでは宇宙 γ 線観測の慣例に従わせていただく。

検出器のエネルギー分解能を考慮した上での、ソースからの信号が分布する1次元のエネルギー領域である。今回の場合には、バックプロジェクション画像においてソースからの信号が分布する2次元の領域を指定する。ここでは、点線源に対する感度を評価するため、点線源からの信号がほぼ収まる天球上の半径 10° の領域をRoIに指定した。

コンプトンカメラの場合には、一つの γ 線の到来方向は天球上の円環に制限され、バックプロジェクション時には、光子数を保存するため、円環（コンプトンコーン）に沿った線積分が1となるように規格化する。したがって、ひとつのイベントによるRoI領域への測定量の寄与は必ず1より小さくなる性質があり、RoI領域の統計的なゆらぎが単純なポアソン分布に従うとはいえない。加えて、コンプトンコーン上の確率密度分布は、入射エネルギー、検出器のコンフィグレーション、イベントリコンストラクション方法に依存するため、ゆらぎを解析的な手法で定量化することは非常に困難である。

筆者らのグループでは、検出器の応答を取り込んだGeant4ベースのモンテカルロシミュレーター¹⁶⁾を用いて、ゆらぎの定量化に取り組んだ（詳細は文献15)を参照）。例えば、平均検出光子数 $\bar{N}_B=200$ のBGにより形成されるRoI領域のゆらぎ (ΔB_{RoI}) の定量化では、まず、モンテカルロシミュレーションにより662 keVの γ 線を装置に等方的に入射させ、 N_B 個の γ 線 (N_B は $\bar{N}_B=200$ のポアソン分布に従う) からなるバックプロジェクション画像を生成する。この作業を繰り返して独立なバックプロジェクション画像を計4000サンプル用意した上で、各画像サンプルのRoI領域からBG量を抜き出してヒストグラム（サンプル数4000）を作成し、平均検出光子数 $\bar{N}_B=200$ の下でのRoI領域の統計的なゆらぎ (ΔB_{RoI}) を求める。最終的には、平均検出光子数 \bar{N}_B を変数として ΔB_{RoI} との関係をモデル化し、あるバックグラウンド光子数が与えられた時に、画像上での

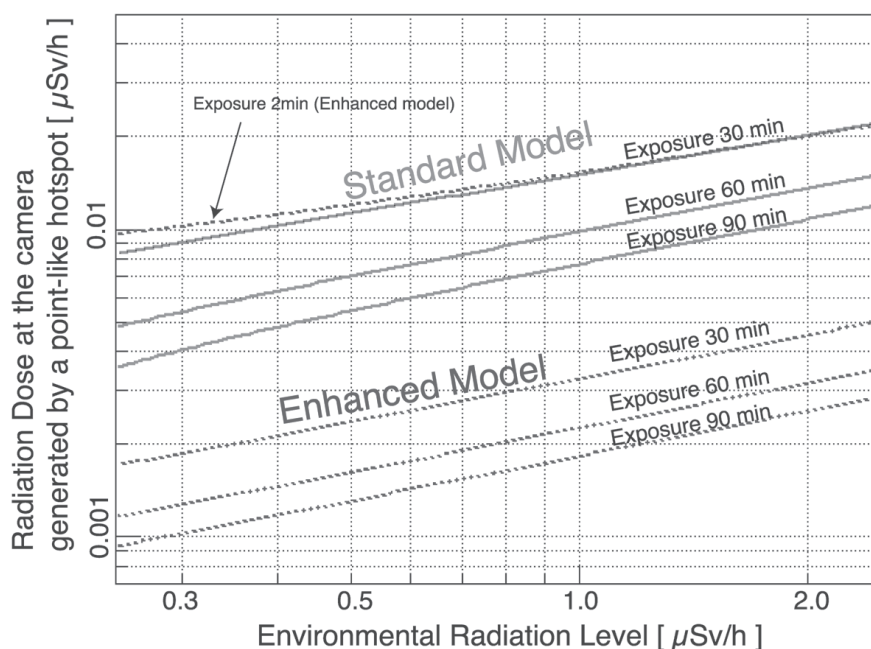


図6 モンテカルロシミュレーションをもとに計算した、一様バックグラウンド中での ^{137}Cs 点線源に対する、誤検出0.1%レベルの検出感度。赤線はASTROCAM標準モデルの感度、青破線は拡張モデルの感度。それぞれ、測定時間30分、60分、90分での検出感度。拡張モデルは測定時間2分の感度も示す。文献15)より転載

ΔB_{ROI} が推定できるようにしている。ソースのゆらぎに対しても、モンテカルロシミュレーションで γ 線を装置鉛直の単一方向から入射させる以外は、同様の手続きによって ΔS_{ROI} を定量化する。

モンテカルロシミュレーションによって得られた、等方向BG条件下における ^{137}Cs 点線源に対する感度を図6に示す。有意度は $z=3$ であり、これは誤検出の確率が約0.1%であることを示す。標準モデルと拡張モデルそれぞれで、測定時間30分、60分、90分での検出感度を示した（拡張モデルは測定時間2分での感度も示した）。横軸はバックグラウンド光子数を空間線量へと換算したものであり、現地でのASTROCAMの実測カウントレートと、装置位置でのサーベイメータの出力値の相関を用いた。縦軸は、点線源がカメラ位置にもたらすドーズであり、これはソース光子数を、ASTROCAMの検出効率 [cps/MBq @ 1m] と ^{137}Cs のDose-rate Constant (1.0×10^{-13} [Sv·m²·Bq⁻¹·h⁻¹])を用いて換算した。感度グラフは、例えば、0.3 $\mu\text{Sv/h}$ 程度の空間線量下で、標準モデルのカ

メラに0.006 $\mu\text{Sv/h}$ のドーズをもたらす点線源は、60分程度の測定により誤検出0.1%レベルの検出が可能であることを意味している。拡張モデルであれば、1/16の測定時間で同様の検出レベルに到達する。同じ測定時間と空間線量を仮定すると、拡張モデルは標準モデルに比べて4~5倍弱いソースを検出可能である。

筆者らは、東電福島第一原発から20km圏内の実地において、このモンテカルロシミュレーションによって与えられた感度グラフを検証するための実験を行った。具体的には、0.32 $\mu\text{Sv/h}$ の空間線量下で、周囲に極端に強いホットスポットが存在しないことを確認した上で、2.7MBqの較正用 ^{137}Cs 点線源を装置から5.2mの距離に配置し、装置に対して0.01 $\mu\text{Sv/h}$ のドーズをもたらすホットスポットを模擬的に作り出し、点線源を検出する測定を行った。その結果、感度グラフから予測される30分程度の観測時間で、点線源が検出できることを確認した。一様BGの中の点線源という、極めて単純化された条件での感度計算ではあるが、少なくとも実用的な装置の設計段階では必要である

し、現地での測定においても撮像計画を立案するために参考になる情報を与える。

5. おわりに

本稿では、東電福島第一原発事故をきっかけに、この数年の間に飛躍的に進歩した放射性物質の可視化技術について、Si/CdTeコンプトンカメラを含む幾つかのトピックを取り上げて解説した。放射性物質の可視化方法という観点からはやや外れるため陽に取り上げることはなかったが、臭化タリウム (TlBr) 半導体¹⁷⁾ や GAGG シンチレータ¹⁸⁾ に代表される、新しい材料を γ 線検出器へと応用する研究も進んでいる。筆者らの研究室では、コンプトン散乱での反跳電子の飛程を捉えるために電子トラッキング型シリコンデバイスの開発を進めており、これを実用化できれば、 γ 線の到来方向を円環ではなく単一の方向に限定できるため、コンプトンカメラによるイメージングを飛躍的に高感度化できる。最後となったが、Si/CdTeコンプトンカメラのASTROCAM 7000HSへの応用には、科学技術振興機構 (JST) の先端計測分析技術・機器開発プログラム「革新的超広角高感度ガンマ線可視化装置の開発」(チームリーダー：高橋忠幸，サブリーダー：黒田能克)のご支援をいただいた。また、Si/CdTeコンプトンカメラの実地試験においては、日本原子力研究開発機構や東京電力の方々から助力をいただいた。ここに厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 武田伸一郎, 渡辺 伸, 高橋忠幸, 超広角コンプトンカメラによる福島での実証実験, *Isotope News*, **702** (2012)
- 2) 高橋忠幸, 武田伸一郎, 最近の展望: コンプトンカメラによるガンマ線イメージング, 日本応用物理学会誌, **83**, 820–825 (2014)
- 3) 鳥居建男, 眞田幸尚, 面で捉える汚染分布の測定技術～ファイバー検出器による放射性セシウムの測定～, *Isotope News*, **714** (2013)
- 4) 蒲生秀穂, USB駆動型PSF空間線量当量率測定システムの実用化と測定実績, *Isotope News*, **716** (2013)
- 5) Takahashi, T. and Watanabe, S., Recent progress in CdTe and CdZnTe detectors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **48**, 950–959 (2001)
- 6) 東芝プレスリリース, 放射線を可視化するポータブルガンマカメラ装置の販売および撮影サービスの開始について, http://www.toshiba.co.jp/about/press/2012_04/pr_j1601.htm
- 7) 高橋 勲, 茂呂英治, 長島賢一, 上野雄一郎 他, CdTeを用いた放射能分布測定技術, *Isotope News*, **714** (2013)
- 8) 三菱重工業, ISAS/JAXA, 名古屋大学, JST共同プレスリリース, 放射性物質を可視化する, 放射性物質見える化カメラ」を開発～世界最先端の超広角コンプトンカメラをベースに～, <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20121115/index.html>
- 9) 浜松フォトニクス, 早稲田大学, JST共同プレスリリース, ガンマ線撮像用コンプトンカメラの高性能化に成功～除染のさらなる効率化, 環境調査, 医療, 理学応用へ期待～, <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140723-2/index.html>
- 10) 富士電機, コンプトンカメラ ガンマ・アイ, <http://www.fujielectric.co.jp/products/radiation/servy/gamma.html>
- 11) JAEA, 古河機械金属, 東京大学, 東北大学, JST共同プレスリリース, 上空から放射性セシウムを可視化する散乱エネルギー認識型ガンマカメラの開発に成功～無人ヘリに搭載して上空から放射性セシウムの分布を可視化～, <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20140905/index.html>
- 12) Ichinohe, Y. et al., The first demonstration of the concept of narrow-FOV Si/CdTe semiconductor Compton camera, *NIMA*, in press (2015)
- 13) 松浦大介 他, 放射性物質見える化カメラ“ASTROCAM 7000HS”の開発, 三菱重工技報, **51** (2014), <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/511/511080.pdf>
- 14) Watanabe, S., Tajima, H., Fukazawa, Y., Ichinohe, Y., Takeda, S., Enoto, T., Fukuyama, T., Furui, S., Genba, K., Hagino, K., Harayama, A., Kuroda, Y., Matsuura, D., Nakamura, R., Nakazawa, K., Noda, H., Odaka, H., Ohta, M., Onishi, M., Saito, S., Sato, G., Sato, T., Takahashi, T., Tanaka, T., Togo, A. and Tomizuka, S., The Si/CdTe semiconductor Compton camera of the ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector, *NIMA*, **765**, 192–201 (2014)
- 15) Takeda, S., Harayama, A., Ichinohe, Y., Odaka, H., Watanabe, S., Takahashi, T., Tajima, H., Genba, K., Matsuura, D., Ikebuchi, H., Kuroda, Y. and Tomo-

naka, T., A portable Si/CdTe Compton camera and its applications to the visualization of radioactive substances, *NIMA*, **787**, 207–211 (2015)

- 16) Odaka, H., Sugimoto, S., Ishikawa, S., Katsuta, J., Koseki, Y., Fukuyama, T., Saito, S., Sato, R., Sato, G., Watanabe, S., Kokubun, M., Takahashi, T., Takeda, S., Fukazawa, Y., Tanaka, T. and Tajima, H., Development of an integrated response generator for Si/CdTe semiconductor Compton cameras, *NIMA*, **624**, 303–309 (2010)
- 17) 人見啓太郎, 石井慶造, 臭化タリウム半導体検出器, *Isotope News*, **715** (2013)
- 18) 古川機械金属, 放射線測定器ガンマスポッター, <http://www.furukawakk.co.jp/business/others/gammapotter.html>

Abstract

2-D Capturing of radiations

(3) Measurement on the Ground

Shin'ichiro TAKEDA^{†, #}, Atsushi HARAYAMA, Goro SATO, Shin WATANABE and Tadayuki TAKAHASHI: Japan Aerospace Exploration Agency, Institute of Space and Astronautical Science, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa Pref. 252-5210, Japan, [#]Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, 1919-1 Tancha, Onna-son, Kunigami-gun, Okinawa Pref. 904-0495, Japan

After the nuclear accident in Fukushima Daiichi Power Plant, the technology to visualize radioactive substances has been highly desired to effectively support the radioactive clean-up. In addition to the Si/CdTe semiconductor Compton camera that was proposed and has been developed by our group, we pick up some topics regarding practical visualization systems realized in recent years.