別刷り

放射性物質対策技術 除去、モニタリング、装置・システム開発

第２編　モニタリング技術

第３章　可視化技術

第１節　短時間に画像撮影ができる感度と分解能に優れたセシウムカメラ

株式会社豊田放射線研究所　　豊田　亘博

「放射性物質対策技術 除去、モニタリング、装置・システム開発」(2015年2月9日　株式会社エヌ・ティー・エス 刊)

New Technology New Science

第1節　短時間に画像撮影ができる感度と分解能に優れたセシウムカメラ

株式会社豊田放射線研究所　豊田　亘博

1　はじめに

2011年3月11日に起きた東日本大震災と，それに続く津波によって引き起こされた東京電力㈱福島第一原子力発電所の事故で，大量の放射性物質が放出された。福島県を中心として広範囲に飛散した汚染源は，事故後3年半を経過した現在では半減期の長いセシウム137（^{137}Cs）とセシウム134（^{134}Cs）による。それらの放射性セシウムの崩壊によって放出されるガンマ線は人の目には見えないので，その集積した場所，すなわちホットスポットを見つけるにはこれまでサーベイメータによる空間線量率を測定する方法が採用されている[1)]。

2　ガンマ線が目に見えることの意味

放射線は目に見えないので人々に不安を与えているが，放射性セシウムの存在が可視化されその正体がわかれば初めて安心できると言ってよい。放射性セシウムの分布図である「セシウムグラフ」が得られれば，科学的な除染によってそれに対処することも可能となる。例えて言えば，体温計を身体のあちこちに当てて体温を測定するよりも，赤外線によるサーモグラフで身体の熱の分布を画像化することになぞらえられよう。

特に住宅地の除染現場においては，これまでの一様な面的除染から今後は重点的なスポット除染へ移行する段階にあり，放射性セシウムが集まっているホットスポットを特定することは大きな意味をもつ。ここでいうホットスポットとは，1mの高さにおける空間放射線量率が周囲よりも1μSv/h高い地点と定義されている。

3　ガンマ線を可視化する技術

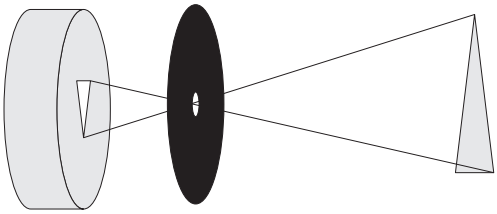
これまでX線やガンマ線を可視化する技術は，天文学の発展とともに歩んできた。可視光線による星の観測だけでなく，天空から飛来する電波，X線，ガンマ線の微弱な信号を捕らえる工夫がなされてきた[2)]。そのうちのひとつに，今回取り上げる符号化開口マスクの技術がある[3)-5)]。「ガンマカメラ」の名称は元来，病院でアイソトープ検査に使われる診断用機器につけられ，核医学の分野では1970年代からなじみの深いものである。

さらに原子炉の中などでは非常に強い放射線を画像化するために，針孔写真機の原理で入射するガンマ線の量を絞り，ガンマ線検出器の上に投影して鮮明な映像を得るピンホール型のガンマカメラが使われている（**図1**）。

それに比べて今回のテーマである除染の現場においては，ホットスポットの周囲の地面や木立などに弱い放射性セシウムが存在し，そこから出てくる背景（バックグラウンド）の放射線が存在する。ホットスポットから出てくるガンマ線を映像化するには，その信号（シグナル）

と背景の雑音（ノイズ）のと比率（S/N 比）が 2～5 程度と比較的小さいところに技術的な難しさがあった。

ピンホール型のガンマカメラでは図 1 に示すように検出器に倒立して投影されるガンマ線の像が得られるが，像がぼやけるのを防ぐには，ピンホールを小さく絞る必要がある。その結果，入射するガンマ線が少なくて明るい映像が得られないか，または撮像時間が長くかかるという難点がある。地上の放射性セシウムからくる放射線が背景のノイズとなって偽像（artefact）を生じるので，それを防ぐ目的で鉛の遮へいを増やすと装置が重くなるというジレンマも課題であった[6]。



ピンホールのサイズを絞れば投影される像は鮮明になるが，入射するガンマ線が少ないので暗い画像となり，撮像時間も長くなる。逆にピンホールのサイズを広げれば，像の輪郭がぼやける。ピンホール型ガンマカメラでは，背景の放射線による偽像が生じやすい。

図 1　針孔写真機の原理に基づくピンホール型ガンマカメラ

これらの問題点を克服する目的で，符号化開口マスクを採用した新しい装置を開発することとなった。

4　セシウムカメラ

4.1　開発の経緯

除染の現場に投入されたピンホール型のガンマカメラでは，前記のような問題点を有していた。そこで 2012 年の 7 月，日本の一顧客の要望でスタートしたセシウムカメラの開発は，英国の Innovative Physics Ltd（IPL 社）の技術者，D. プレンダーガストの設計により秋には基礎実験（Proof of concept）を終えた。その基本的な考え方は，単一の針孔（シングルピンホール）に対して多数の針孔（マルチピンホール）によるコリメータを採用したことにある。

2013 年の夏には試作機ができあがり，福島県の除染の現場に持ち込んで技術的な評価に供した。その結果，次の改良点が指摘された。

① 偽像の解消
② 軽量化
③ 白昼の戸外でも見やすいパソコンスクリーンの選択
④ 装置を支持する三脚の改良

2014 年に入り，これらすべての点が改良され，さらにレーザ距離計によるホットスポットまでの距離を測定して，1 m の高さでの空間線量率への寄与も表示できる機能を備えた製品に仕上がった。

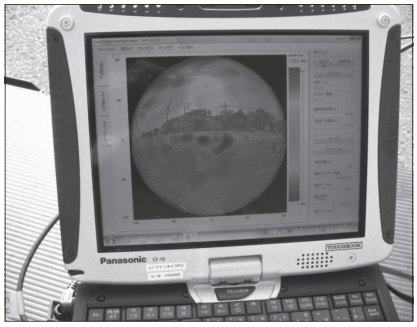
4.2　装置の構成

「セシウムカメラ」の外観写真を**図 2**（a）に，またその原理を**図 3** に示した。符号化開口マスクは光学の分野ではすでに確立された方法[7)8)]であり，本装置で測定するガンマ線用には，六角形の配列（HURA，**図 4**（a））[3)]を改良した正方形の配列（MURA，図 4（b））[5)]が採用された。沃化セシウムの結晶に投影された多数の倒立するガンマ線像は，光電子増倍管を通してコン

(a)「セシウムカメラ」の外観

(b)「セシウムカメラ」による画像：その１

(c) ピンホール型ガンマカメラによる画像：その１



(d) コンプトンカメラによる画像：その１

(b) 自然のホットスポットからセシウムカメラまで10mの距離で10分間撮像。
(c) 自然のホットスポットから10mの距離で10分間撮像。
(d) 自然のホットスポットから5mの距離まで近づけて5分間撮像。

※口絵参照

図２　除染前の背景放射線量が 1.5 μSv/h 地点での撮像例

ピュータに送り込まれる。符号化開口マスクの位置情報をもとに，多数の像を重ね合わせるソフトウェアが，この装置を開発するうえでの鍵であったが，IPL 社ではブリムストン親子がソフトウェアを短時間に完成させ，この課題を克服した。

またセシウムの分布を示すガンマ線の画像（セシウムグラフ）は，通常のビデオ画像に重ね合わせて PC 画面上に表示される。GPS 機能も備えており，測定場所の温度，湿度などの情報とともに記録される。これらの「セシウムカメラ」の仕様をまとめて**表１**に示した。

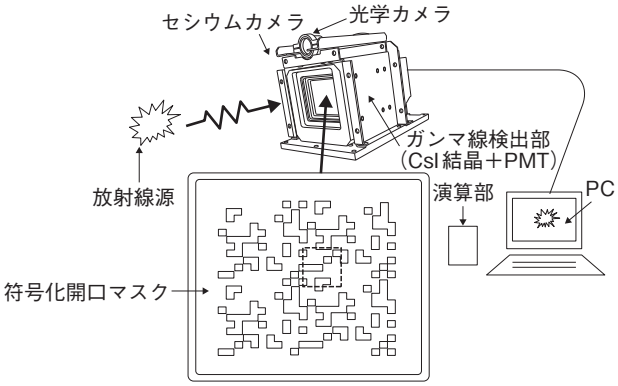
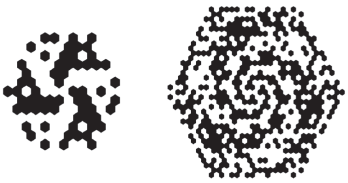
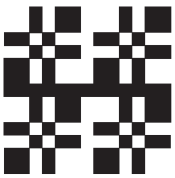


図３「セシウムカメラ」の原理



(a) 六角形の符号化開口マスク[3)]



(b) 正方形の符号化開口マスク[5)]

図４　符号化開口マスクの配列例

5 「セシウムカメラ」の測定例と他の装置との比較

福島県の現地で撮像された「セシウムカメラ」による映像と，ピンホール型の「ガンマカメラ」，および最近開発されたコンプトン散乱を利用した「コンプトンカメラ」[9) 10)]の例をそれぞれ図2(b)，(c)，(d)に示す。「セシウムカメラ」は他の方法に比べ，速く自然のホットスポットの位置を特定した。特定した位置はまだ除染が終わっていない敷地で，背景の空間線量率が1.5 μSv/hを示す場所に，放射性セシウムが寄り集まってできた自然のホットスポットが存在する。そのホットスポットに含まれる放射性セシウムの量は，セシウム137が13 MBq，セシウム134が6 MBqと測定された。

表1 「セシウムカメラ」の仕様一覧

1 ガンマ線の検出部
●検出方式：CsI (Tl) 結晶＋光電子倍増管
●コリメータ：タングステン製符号化開口マスク
●視野角：約60°
●画素数：8 × 8 ピクセルを内挿補完し 70 × 70 ＝ 4,900 点
●検出感度：900 cps/μSv/h
●測定時間：3～6 分（線源の強さと距離による）
●測定範囲：0.04～30 μSv/h
2 ビデオカメラ
●表示解像度：1,240 × 768
●視野角：約60°
3 機械的および電気的仕様
●寸法：275 × 204 × 290 mm
●重量：20 kg 以下
●電源：リチウム電池
●電池駆動時間：20 時間以上（全充電時）
●充電時間：8 時間以下（主電源入力の場合）

次に，すでに除染を終えている背景の放射線量が0.4 μSv/hの駐車場で，2 MBqのセシウム137の密封標準線源を置き撮像した例を**図5**(a)，(b)，(c)に示す。ここでもセシウムカメラは，他の方法に比べて線源の位置を正確に特定した。

セシウムグラフ上には標準線源のほかにも，放射性セシウム源の存在が写し出されたので，近寄って詳しく調べると，**図6**(a)のひび割れの中にホットスポットが見つかった。サーベイメータによる1 mの高さの空間線量率測定では見つけられなかったものなので，これまでの面的な除染作業で取り残され，見逃されていたものであった。

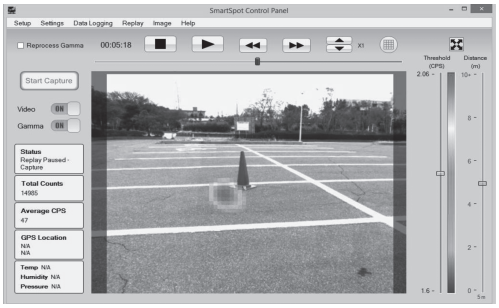
また，別の除染を終えた箇所でも「セシウムカメラ」でホットスポットの存在が示され，その放射線源を調べると，タイルの割れ目に入り込んだ放射性セシウムであることが分かった（図6(b)）。

コンクリートやアスファルト面の表面汚染が取り除けたか否かを判断するには，高橋正二ら[11)]の開発した新しいX線測定器を併用すればさらに有力な方法となろう。

以上の実証試験から，従来のピンホール型ガンマカメラと比較して「セシウムカメラ」は感度，精度，分解能に優れ，偽像の問題も解消して，短時間にセシウムグラフが得られることがわかった。またコンプトン散乱を利用したコンプトンカメラと比較しても，除染の現場においては，ホットスポットの位置と大きさを特定するのに「セシウムカメラ」のほうが優れていることが示された。

6 符号化開口マスク技術の今後の展開

放射性セシウムの分布を把握するのに，従来は点を線で結んで，等高線を描く手法が使われているが，今後は点と線から面へ，さらに面的な把握から立体的な把握が求められる[8)]。



(a)「セシウムカメラ」による画像：その２

(b) ピンホール型ガンマカメラによる画像：その２

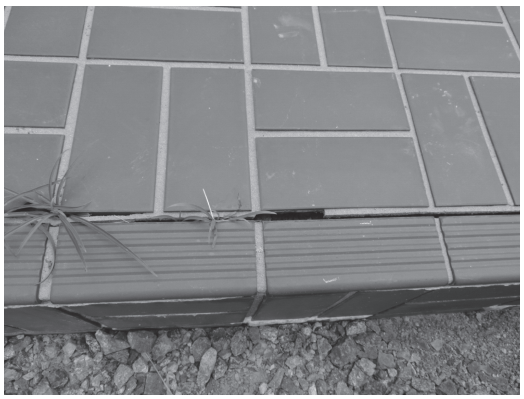
(c) コンプトンカメラによる画像：その２

(a) セシウム137の密封点線源（2MBq）から５mの距離で５分間撮像。
(b) 密封点線源から５mの距離で10分間撮像。
(c) 密封点線源から１mの距離で６分40秒撮像。

※口絵参照

図５　除染後の背景放射線量が 0.4 μSv/h 地点での撮像例

(a) 放射性セシウムがひび割れに入り込んだホットスポット



(b) タイルの割れ目に放射性セシウムが入り込んだホットスポット

図６　除染後に残されたホットスポットの発見例

「セシウムカメラ」の完成で符号化開口マスクの有用性が実証できたので，これを無線操縦によるヘリコプターなどの飛行体に乗せれば，空から放射性セシウムの分布地図を作成することができる。住宅地に隣接する山林においては，これまでの２次元的な表面地図に代わって，３次元的に描出することの必要性も強調されている。飛行体に搭載できる装置の重量には制限

（ペイロード）があるので，さらなる軽量化が求められるが，それは地上に向かう装置の前面を除き，側面と背後を遮へいする鉛を削減することで実現できる。

その結果，農地，牧草地，森林，河川，海岸の詳細な汚染地図も描くことができて，今後の除染対策に役立つ。その応用は，単に日本の中だけでなく，チェルノブイリ原発事故による汚染地図の上で，これまで測定されないまま空白地帯として残っている旧ユーゴスラビア連邦の各国の放射性セシウムの地図を完成させる夢も実現できよう。

さらに，符号化開口マスクとテルル化カドミウム（CdTe），あるいはCZTなどの半導体結晶とを組み合わせた放射線検出器を開発し，得られるガンマ線スペクトルを解析すれば，汚染源となっている核種を同定することができる。

その結果，原子力発電所内のオンサイトで進展する廃炉作業においても，汚染源の箇所を画像化して特定することができ，オフサイトにおいては原発立地自治体の事故対策にも設置される機器となろう。また，アイソトープの輸送中に起きる事故や，放射線あるいは核テロに備える対策としても役立ち，符号化開口マスク技術は広い範囲に応用されることが期待される。

7 おわりに

「セシウムカメラ」によって放射性セシウムで汚染された箇所の見える化を実現すれば，除染作業のさらなる効率化が図れるとともに，今後，汚染廃棄物や土壌の減容化にも役立つことが期待できる。その結果，原発事故で被災した福島の人たちの生活の立て直しと，飛散した事故由来放射性物質の被害から福島県の市町村が一日も早く立ち直り，今後の復旧と復興に寄与できることを願っている。

文　献

1）環境省：放射性物質による局所的汚染箇所への対処ガイドライン改訂版（2013）.
2）柴田一成：太陽の科学―磁場から宇宙の謎を探る―, NHK出版, 174（2010）.
3）E. E. Fenimore：*Applied Optics*, **17**（22）, 3562（1978）.
4）G. K. Skinner：*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, **221**, 33（1984）.
5）S. R. Dottesman and E. E. Fenimore：*Applied Optics*, **28**（20）, 4344（1989）.
6）日立製作所：日立評論, **94**（09）, 678（2012）.
7）日浦慎作, 松山隆司：構造化瞳をもつ多重フォーカス距離画像センサ, 電子情報通信学会論文誌,（11）, 1912−1920（1999）.
8）日浦慎作, 松山隆司：日本特許第2963990号, 距離計測装置及び方法並びに画像復元装置及び方法（1999）.
9）a）浜松ホトニクス：http://www.jst.go.jp/pr/announce/2-130910/
b）日経新聞：2013年9月10日
10）松浦大介, 玄蕃恵, 黒田能克, 池淵博, 塘中哲也：三菱重工技報, **51**（1）, 80（2014）.
11）高橋正二, 平野靖浩, 片山均：特性X線測定による放射性セシウムの表層放射能面密度と浸透深さ測定法, Proceedings of the 15th Workshop on Environmental Radioactivity, 287-293（2014）.