

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Study of ultra-compact Compton camera
based on 3-D position sensitive scintillator for
environmental and medical gamma-ray imaging

環境及び医療応用を目指した
3次元シンチレータ式小型コンプトンカメラの研究

申 請 者

| | |
|-----|-----------|
| Aya | KISHIMOTO |
| 岸本 | 彩 |

物理学及応用物理学専攻 放射線応用物理学研究

2017年2月

放射線イメージングは理学、医療、産業、防衛の根幹をなす基盤技術の一つである。とくに高エネルギー光子と物質の相互作用（光電効果）を用いた X 線イメージングは 1895 年のレントゲン写真に端をなし、今や健康管理・社会生活にも深く根ざしている。120 年を経た現在、コンピュータトモグラフィ(CT)や画像処理技術の進展も目覚しいが、ここで得られる画像は基本的に白黒 2 次元静止画であり、エネルギー情報を持たない。より高エネルギーのガンマ線に目を向けると、ガンの早期発見に有効なイメージング技術として陽電子断層撮影(PET)が広く普及している。PET は癌細胞がブドウ糖を過剰に摂取する性質を利用した優れた分子イメージング法であるが、511 キロ電子ボルトの対消滅ガンマ線を使用するため、使用できる薬剤は β^+ 崩壊核種に限られる。よりエネルギーの高い、1 メガ電子ボルト(MeV)程度で汎用の放射線イメージング技術は未だ確立しておらず、これは光子の相互作用が光電効果からコンプトン散乱に移行し、その厳密な運動学を解く困難さに起因している。しかしながら、宇宙物理において MeV ガンマ線は恒星内部の元素合成を探るうえで最も重要な核ガンマ線の放出が期待され、また原始ブラックホールからの Hawking 輻射や未知の暗黒物質探査など、将来の物理フロンティアになる可能性が高い。先進医療においては、MeV ガンマ線を放出する多様な新しいトレーサーを用いることで、単一エネルギーの PET を超えた新しい分子イメージングの開拓が期待される。環境計測においても、原子炉内で生成される様々な核種・デブリのモニタリングや福島原発事故における除染作業の効率化にいたるまで、メガ電子ボルトに特化した新しい放射線イメージング技術の開拓が強く切望されている。

これら現状を鑑み、本論文は MeV 領域での実用化を目指した高性能ガンマ線可視化技術（コンプトンカメラ）を独自に開発し、環境および医療応用まで踏み込んだ野心的な研究である。さらに、画像再構成法の新規開拓にも果敢に取り組み、従来のコンプトンカメラが苦手としてきた定量性の解消と、3 次元空間への拡張に成功した。これにより、様々なエネルギーのガンマ線を同時かつ多角に捉えることができ、MeV ガンマ線領域において「3 次元かつ多色イメージング」が可能なことを世界で初めて実証した。

第一章ではコンプトンカメラの開発史について、宇宙物理での実例を元に解説している。コンプトンカメラの概念自体は 1970 年代まで遡り、宇宙分野と医療分野でほぼ同時に提案がなされた。実験的な検証は 1991 年に米国 CGRO 衛星に搭載された COMPTEL 検出器が最初であり、MeV ガンマ線天文学の開拓に多くの足跡を残した。本章ではこれら歴史的経緯と今後の展望について簡潔に述べられている。

第二章は放射線イメージング全般についての導入部である。2.1 章では 2011 年の福島第一原発事故を例にとり、これを契機に開発された二つの異なるガンマ線可視化技術、つまりピンホールカメラとコンプトンカメラの基本

原理について解説し、それぞれの長所・短所を論じている。また、先行研究として Si/CdTe を用いた半導体コンプトンカメラの構成や性能についても詳しく論じている。2.2 章では既存の医療イメージング技術として SPECT(単一光子断層撮影)、PET について紹介している。さらに、コンプトンカメラの医療応用の前例として、ゲルマニウム半導体検出器を用いた GREI およびガスピクセル検出器を用いた μ PIC について紹介している。これら先行研究の到達点を整理することで、本研究で克服すべき問題を客観的に議論している。

第三章では、光子と物質の相互作用及びコンプトン散乱の運動学について解説し、コンプトンカメラの性能を決める要因となる解像度と検出感度について、理論計算と Geant4 シミュレーションを元に議論している。解像度を決める要素として (1) 検出位置の不定性 (2) エネルギー分解能 (3) 電子の軌道運動量による不定性 (ドップラーブロードニング) の寄与を定量的に見積もり、四章以降で述べる検出器の最適化への基礎情報を提供している。3.3 章ではガンマ線の反応順序やヒットパターン決定の難しさ等、コンプトンカメラ特有の問題を整理し、3.4 章では最も良く用いられる画像再構成法として Single Back Projection (SBP) と Maximum Likelihood Expectation Maximization(MLEM)法について、そのアルゴリズムを解説している。

第四章では本論文における最初の重要テーマとして、福島県下の除染を効率化するための環境用コンプトンカメラの開発について述べている。装置を 2 キログラム級まで小型軽量化する上での創意工夫、ガンマ線を吸収するシンチレータや光センサー、データ処理系の詳細のほか、申請者本人が考案・開発した重要技術である 3 次元シンチレータについて、その原理と実証実験を述べている。本技術の開発により、シンチレータ内部におけるガンマ線の散乱・吸収位置を 3 次元的に約 1mm の精度で求めることができ、検出感度を保ったまま装置の解像度を大幅に向上することが可能となった。この技術的進展により、既存のコンプトンカメラの感度を約 2 倍、解像度は 662 キロ電子ボルトで 14° から 8° (FWHM)まで向上することに成功した。本章の後半では、様々なエネルギーのガンマ線源を用いた実験室実験のほか、福島県浪江町におけるフィールド試験の結果について紹介している。今後は軽量小型を生かした、森林調査等に威力を発揮することが示唆されている。

第五章では、次章における医療用コンプトンカメラの開発に先立ち、新規画像再構成法(3次元 MLEM 法)の開発について述べている。通常、コンプトンカメラの画像は特定の平面に投影するか、もしくは球面座標を用いた 2 次元描画が行われる。しかしながら、コンプトン運動学の原義にもどれば確率分布はコンプトン・コーンと呼ばれる立体円錐面上にあり、原理的には 3 次元画像のまま扱うことが可能である。本章では小動物イメージングを意識した $80 \times 80 \times 80 \text{mm}^3$ の空間領域を定義し、被写体を複数の角度から観測することで 3 次元画像再構成を試みている。さらに、観測するポイントの数と再構成画像の精度や定量性への影響についても、詳しく議論されている。

第六章は、本論文の集大成となる医療用コンプトンカメラの開発について述べられている。分子イメージングへの応用を意図した場合、四章で述べた環境用コンプトンカメラの解像度（約 8° ）は充分でなく、また装置の構成上マルチアングルでの撮影が実現しにくい。本章では医療用として重量 580 グラムの超小型カメラを新たに試作し、解像度を 4.2° (FWHM, 662keV)まで劇的に改善した。これは、Si/CdTe や Ge など半導体を用いたコンプトンカメラとほぼ同程度であり、 $80 \times 80 \times 80 \text{mm}^3$ の空間領域で解像度 3mm(FWHM)を実現した。本章では実機をもちいたシリンジファントムの撮影、線状線源や平面線源の撮影を行い、定量性についても約 20%の精度で保たれることを実証している。最後に、ヨウ素 (^{131}I :365keV), ストロニウム (^{85}Sr :514keV), 亜鉛 (^{65}Zn :1116keV)を同時に投与した生体マウスの 3色同時撮影について報告している。12アングルからの多角撮影により、ヨウ素は甲状腺、ストロニウムは背骨、亜鉛は肝臓に異なる集積を示すことが3次元画像として示されている。測定時間は1アングルあたり僅かに10分であり、本研究で開発したコンプトンカメラの感度が極めて高いことを明確に裏付けている。

第七章は、本論文で得られた成果と知見、結論を簡潔にまとめている。

以上をまとめると、本研究は MeV 領域に特化した新規ガンマ線可視化技術であるコンプトンカメラの開発に着手し、独自に考案・開発した3次元シンチレータを採用することで、これまでになく高感度かつ小型のカメラの製作に成功した。最初の応用として、福島県浪江における森林部フィールド試験を通じて同カメラの性能と有用性を示した。後半の医療応用に関しては、多角撮影によるメリットを生かした新規3次元画像再構成法の開発に着手し、各種ファントムや生体マウスを用いた臨床実験により、高解像度かつ3次元のガンマ線画像が実際に得られることを示した。3次元の多色分子イメージングは世界初となる成果であり、博士（工学）を付与する成果と判断する。

2017年2月

審査員（主査） 早稲田大学教授 博士（理学） 東京大学 片岡 淳

（副査） 早稲田大学教授 博士（理学） 早稲田大学 寄田 浩平

（副査） 東京女子医科大学教授 博士（医学） 東京大学
博士（理学） 立教大学 西尾 禎治

（副査） 東海大学医学部講師 博士（理学） 東京大学 株木 重人