

早稲田大学大学院 先進理工学研究科

博士論文概要

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

2016年12月

近年、宇宙から医療まで多岐にわたる分野において放射線可視化技術の需要が高まりつつある。ガンマ線イメージング装置の一種であるコンプトンカメラは、数百 keV から数 MeV に渡る幅広いエネルギー領域での撮像が可能であることを特徴とし、その様々な有用性が着目されている。これまでのガンマ線イメージングはレントゲン写真に代表されるように 2 次元かつエネルギー情報を持たないモノクロ画像が一般的であった。本研究はコンプトンカメラを用いることでこの従来イメージングを革新し、「3 次元かつマルチカラーイメージング」の世界を新たに切り拓くことを最大の目的とする。本論文では、環境計測及び医療応用に向けた新規コンプトンカメラの考案と開発、また実用化検討を実施した。本概要では各々のコンプトンカメラ開発と主要な結果について概説する。

本論文の前半部では環境用コンプトンカメラの開発について述べる。2011 年の福島第一原子力発電所事故により、 ^{137}Cs を主とする膨大な量の放射性物質が放出された。事故から 5 年経過した今なお福島等における環境中の残留放射線の影響は深刻である。効率的な除染作業推進のためにこれまでいくつかのガンマ線可視化装置が開発されてきたが、いずれも数時間もの計測時間を要する、または装置重量が数十 kg に及ぶ等の問題があり、迅速かつ柔軟な環境中での放射線分布取得のためには感度や携帯性の向上が大きな課題であった。そこで本研究では、ほぼリアルタイムでの計測を実現する高感度かつ携帯型コンプトンカメラの開発を目指した。検出器には ^{137}Cs からの 662keV の高エネルギーガンマ線にも高い感度を有する $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG) シンチレータと半導体光検出器 multi-pixel photon counter (MPPC) を使用する。一般的に、シンチレータを使用したコンプトンカメラは製作が簡単で低コストかつ軽量化が図れるが、半導体検出器カメラ等と比較して解像度が悪い。その一つの原因が、ガンマ線の反応位置不定性にある。本研究ではシンチレータ内でのガンマ線 3 次元位置同定技術 (Depth of Interaction: DOI) を新たに考案し、これにより感度と分解能の両立を初めて実現することが可能となった。開発したコンプトンカメラは大きさ $16 \times 15 \times 15 \text{cm}^3$ 、重さ 2.5 kg とコンパクトかつ軽量であり、森林をはじめとする様々な環境下でも携帯測定を可能とした。開発したコンプトンカメラの基礎性能を評価し、角度分解能においては DOI 技術を用いない従来カメラからの大幅な性能向上を達成し、また感度面においても既存のあらゆるガンマ線可視化装置を上回る高感度を実現した。加えて、本研究では開発したコンプトンカメラを用いて福島県浪江町の帰宅困難区域内における実地調査を複数回にわたり実施している。これらの調査を通して、高いバックグラウンドに囲まれた実際のフィールド環境中においても、約 $10 \mu\text{Sv/h}$ 程の ^{137}Cs ホットスポットを数十秒~数分とほぼリアルタイムでイメージング可能であることを示した。たとえば、森林道の脇に堆積した落葉がホッ

トスポットとなっている様子や樹幹への集積を可視化することで、森林内部における放射性核種の動態調査にも重要な示唆が得られることを示した。本研究で得られた成果は福島での環境計測に限らず、各種産業やテロ対策等防衛面において大きな役割を果たすことが期待される。今後は、その軽量性を活かしドローン搭載による上空からの広域撮像への展開等、効率的な除染作業の推進に向けて更に幅広い応用を行っていく。

続いて本論文の後半部では、コンプトンカメラの核医学診断への開発応用について記す。診断領域における分子イメージングとは、生体内に放射性薬剤を投与し、放出されるガンマ線をプローブとして生体内の機能を画像化する技術である。現在臨床で用いられている SPECT や PET はガンやアルツハイマー病等の早期診断に高い効果を発揮しているが、一方でその撮像原理から撮像に使用可能な放射性薬剤のエネルギー範囲は大きく制限される。もし幅広いエネルギー領域でのイメージングが実現すれば、これまで使用できなかった多様な放射性薬剤が利用可能になることに加え、それら複数核種の同時イメージングを行うことにより得られる生体情報量が飛躍的に増加し、癌と炎症との区別や移植臓器の生着率の判定の実現等その医学的な意義は極めて大きい。コンプトンカメラはこの分子イメージングにおいても次世代の撮像装置として注目されてきたが、既存の PET 等の装置と比較して低感度であることや画像再構成の複雑さに起因する定量性の低さから未だ実用化に至っていない。本研究では、前述の環境用コンプトンカメラの開発を基盤に、核医学への応用を目的とした医療用コンプトンカメラの新規開発を行った。医療用途においては環境用途よりも更に高解像度化が求められるため、Geant4 シミュレーションを用いて検出器構成の最適化を行うことで解像度の向上を図った。開発した実機評価の結果、検出器から 4cm の位置に置いた ^{137}Cs 点線源を 3mm(FWHM)以下の空間分解能でイメージングすることが可能となり、これは現行の SPECT と同等の性能である。医療用コンプトンカメラの最大の特徴は環境用カメラを上回るコンパクト性であり、センサーヘッドはサイズ $5\times 6\times 11\text{cm}^3$ 、重さ 580g と信号処理系を分離することで更なる小型化を実現した。また、散乱体・吸収体間の距離を変化させることで、分解能・感度・視野等の検出器性能を測定環境に応じて自由に調整することが可能である。

高精度なイメージングを実現するには、上記のような検出器性能に加えて画像再構成法の確立もまた極めて重要となる。従来、コンプトンイメージングは 2次元平面上で行われることが一般的であったが、本研究ではイメージ領域を 3次元空間に拡張し、被写体の 3次元構造及び任意方向での断層画像を提供する 3次元マルチカラーイメージングの確立を目指した。再構成には maximum-likelihood expectation-maximization(MLEM)法を使用し、イメージ領域内 voxel・検出器間

距離情報やイベント毎の光子の反応確率等を新たにアルゴリズムに組み込んだ。加えて、複数の異なる角度からデータを取得した上でそれら全ての情報を統合してイメージを構成する「マルチアングル手法」を提案し、これにより領域内イメージ性能の3次元的な等方性を大幅に向上させることに成功した。

以上の開発した検出器と再構成アルゴリズムを用いて、様々な放射性トレーサー・ファントムを用いて核医学におけるコンプトンカメラの実証実験を行った。以下にいくつかの代表的な結果を記す。これまでコンプトンイメージングにおいては、広がった線源等の構造体の画像化精度に大きな課題があった。そのためまず第一に、構造体のイメージング性能評価として ^{137}Cs 一様面線源を用いた3次元イメージング及び一様性評価を行った。12アングルから各20分間測定を行ったイメージングの結果、直方体線源構造の3次元描出に成功した。また再構成イメージ上での一様性不定性は10%以下であった。これらの結果は本研究で新たに提案した複数角度からのデータ取得によりイメージ領域内の再構成精度が向上したことによるものであり、既存のコンプトンカメライメージングでは困難であった構造体の定量的な3次元描出の実現を果たした。続いて、3次元マルチカラーイメージングの実現に向けて、シリンジファントムを用いた複数核種同時イメージングを実施した。 ^{18}F (511keV)、 ^{137}Cs (662keV)、 ^{65}Zn (1116keV)の3つのトレーサーを直径4.5mmのシリンジファントムに各々封入し、12アングルからデータ取得を行った。データ収集時間は各アングルにつき5分である。測定の結果、エネルギースペクトル上で各々の核種のピークが明瞭に確認でき、それらのエネルギー帯域毎に再構成を行うことでシリンジファントムの3次元構造を正しくイメージングすることができた。またその際の定量性評価の結果、再構成アルゴリズム内でイベント毎の光子反応確率を考慮したことにより、 $\pm 20\%$ 以下の精度で線源強度比が再現できることを確認した。これらの結果を踏まえて、最終的にマウスを用いた生体内での多核種同時イメージングの実証実験を実施した。生体内において互いに異なる臓器に集積する特徴を持つ ^{131}I (364keV)、 ^{85}Sr (514keV)、 ^{65}Zn (1116keV)の3核種を一匹のマウス(8週齢)に注入し、麻酔下状態で12アングルからデータ測定を行った。測定時間は各アングル10分である。イメージングの結果、各々の核種が甲状腺・骨・肝臓の標的臓器に正しく集積している様子が確認できた。半導体検出器ベースの従来研究では十時間以上を要していたマウス生体撮像から大幅な撮像時間短縮化を実現するとともに、生体内における複数核種の3次元同時イメージングの実用に向けた飛躍的な一歩を示す結果となった。

以上のように、本研究は環境計測・核医学の両分野においてコンプトンカメラの有用性を示した。これらは3次元マルチカラーという次世代放射線イメージングの新たな可能性を切り拓く先駆的な成果である。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 岸本 彩 印

(2016年11月9日現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
学術雑誌 (査読あり)	<p>【主著】</p> <p>○[1] <u>A. Kishimoto</u>, J. Kataoka, A. Koide, K. Sueoka, Y. Iwamoto, T. Taya, S. Ohsuka, “Development of a compact scintillator-based high-resolution Compton camera for molecular imaging,” <i>NIM-A</i>, in press, 2016.</p> <p>○[2] <u>A. Kishimoto</u>, J. Kataoka, T. Nishiyama, T. Taya, S. Kabuki, “Demonstration of three-dimensional imaging based on handheld Compton camera,” <i>JINST</i>, 10, P11001, 2015.</p> <p>○[3] <u>A. Kishimoto</u>, J. Kataoka, T. Nishiyama, T. Fujita, K. Takeuchi, H. Okochi, H. Ogata, H. Kuroshima, S. Ohsuka, S. Nakamura, M. Hirayanagi, S. Adachi, T. Uchiyama, H. Suzuki, “Performance and field tests of a handheld Compton camera using 3-D position-sensitive scintillators coupled to multi-pixel photon counter arrays,” <i>JINST</i>, 9, P11025, 2014.</p> <p>○[4] <u>A. Kishimoto</u>, J. Kataoka, T. Kato, T. Miura, T. Nakamori, K. Kamada, S. Nakamura, K. Sato, Y. Ishikawa, K. Yamamura, N. Kawabata, S. Yamamoto, “Development of Dual-Sided Readout DOI-PET Module Using Large-Area Monolithic MPPC-Arrays”, <i>IEEE-TNS</i>, vol.60, pp.38-43, 2013.</p> <p>【共著】</p> <p>[5] T. Taya, J. Kataoka, <u>A. Kishimoto</u>, Y. Iwamoto, A. Koide, T. Nishio, S. Kabuki, T. Inaniwa, “First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy,” <i>NIM-A</i>, in press, 2016.</p> <p>[6] Y. Iwamoto, J. Kataoka, <u>A. Kishimoto</u>, T. Nishiyama, T. Taya, H. Okochi, H. Ogata, S. Yamamoto, “Novel methods for estimating 3D distributions of radioactive isotopes in materials,” <i>NIM-A</i>, in press, 2016.</p> <p>[7] M. Takabe, <u>A. Kishimoto</u>, J. Kataoka, S. Sakuragi, Y. Yamazaki, “Performance evaluation of newly developed SrI₂(Eu) scintillator,” <i>NIM-A</i>, in press, 2016.</p> <p>[8] J. Kataoka, <u>A. Kishimoto</u>, T. Fujita, T. Nishiyama, Y. Kurei, T. Tsujikawa, T. Oshima, T. Taya, Y. Iwamoto, H. Ogata, H. Okochi, S. Ohsuka, H. Ikeda, S. Yamamoto, “Recent progress of MPPC-based scintillation detectors in high precision X-ray and gamma-ray imaging,” <i>NIM-A</i>, vol.784, pp.248-254, 2015.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (国際会議)	[9] K. Takeuchi, J. Kataoka, T. Nishiyama, T. Fujita, <u>A. Kishimoto</u> , S. Ohsuka, S. Nakamura, S. Adachi, M. Hirayanagi, T. Uchiyama, Y. Ishikawa, T. Kato, "Stereo Compton cameras for the 3-D localization of radioisotopes," <i>NIM-A</i> , vol.765, pp.187-191, 2014.
	[10] T. Nishiyama, J. Kataoka, <u>A. Kishimoto</u> , T. Fujita, Y. Iwamoto, T. Taya, S. Ohsuka, S. Nakamura, M. Hirayanagi, N. Sakurai, "A novel Compton camera design featuring a rear-panel shield for substantial noise reduction in gamma-ray images," <i>JINST</i> , 9, C12031, 2014.
	[11] T. Fujita, J. Kataoka, <u>A. Kishimoto</u> , Y. Kurei, T. Nishiyama, T. Oshima, T. Taya, "Development of prototype PET scanner using dual-sided readout DOI-PET modules," <i>JINST</i> , 9, P12015, 2014.
	[12] J. Kataoka, <u>A. Kishimoto</u> , T. Nishiyama, T. Fujita, K. Takeuchi, K. Kato, T. Nakamori, S. Ohsuka, S. Nakamura, M. Hirayanagi, S. Adachi, T. Uchiyama, K. Yamamoto, "Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays," <i>NIM-A</i> , vol.732, pp.403-407, 2013.
	【筆頭のみ】
	[1] <u>A. Kishimoto</u> , J. Kataoka, L. Tagawa, S. Mochizuki, T. Taya, Y. Iwamoto, S. Ohsuka, K. Matsunaga, H. Ikeda, E. Shimosegawa, J. Hatazawa, N. Kawachi, Y. Nagao, M. Yamaguchi, K. Kurita, "Demonstration of Multi-Color 3D imaging of Gamma Rays Based on Ultra-Compact Compton Camera," IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Strasburg, 2016.
	[2] <u>A. Kishimoto</u> , J. Kataoka, K. Sueoka, A. Koide, T. Taya, S. Ohsuka, "Development of a compact scintillator-based high-resolution Compton camera for molecular imaging," Vienna Conference on Instrumentation 2016, Austria, 2016.
	[3] <u>A. Kishimoto</u> , J. Kataoka, T. Nishiyama, T. Taya, S. Kabuki, "Study of Three-Dimensional Imaging with Scintillator-Based Handheld Compton Camera for Molecular Imaging," 17 th International Workshop on Radiation Imaging Detectors, Germany, 2015.
	[4] <u>A. Kishimoto</u> , J. Kataoka, T. Nishiyama, T. Fujita, K. Takeuchi, H. Okochi, H. Ogata, H. Kuroshima, S. Ohsuka, S. Nakamura, M. Hirayanagi, S. Adachi, T. Uchiyama, H. Suzuki, "Performanve and field tests of handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators coupled with MPPC-arrays," SORMA XV, Michigan University, USA, 2014.
	[5] <u>A. Kishimoto</u> , J. Kataoka, T. Kato, T. Miura, T. Nakamori, K. Kamada, S. Nakamura, K. Sato, Y. Ishikawa, K. Yamamura, S. Yamamoto, "Development of a MPPC-based DOI-PET module with submillimeter 3-D resolution", IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, California, USA, 2012.

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (国内学会)	<p>【筆頭のみ】</p> <p>[1] 岸本彩, 片岡淳, 末岡晃紀, 小出絢子, 岩本康弘, 大須賀慎二, 「分子イメージング応用に向けた高解像度型コンプトンカメラの開発」, 応用物理学会, 東京工業大学, 2016.</p> <p>[2] 岸本彩, 片岡淳, 西山徹, 藤田卓也, 多屋隆紀, 株木重人, 西尾禎治, 「携帯型コンプトンカメラによる 3 次元ガンマイメージ再構成」, 応用物理学会, 東海大学, 2015.</p> <p>[3] 岸本彩, 片岡淳, 高部美帆, 櫻木史郎, 山寄康司, 「PMT, APD, MPPC を用いた SrI₂(Eu)シンチレータの限界性能評価」, 応用物理学会, 東海大学, 2015.</p> <p>[4] 岸本彩, 片岡淳, 西山徹, 藤田卓也, 岩本康弘, 多屋隆紀, 大河内博, 緒方裕子, 大須賀慎二, 中村重幸, 足立俊介, 内山徹也, 「3 次元シンチレータを用いた高感度コンプトンカメラの開発(Ⅲ)」, 応用物理学会, 北海道大学, 2014.</p> <p>[5] 岸本彩, 片岡淳, 加藤卓也, 中森健之, 西山徹, 武内健士郎, 藤田卓也, 鎌田圭, 中村重幸, 里健一, 石川嘉隆, 山村和久, 山本誠一, 「大面積・薄型モノリシック MPPC アレイを用いた 3 次元高解像度ガンマ線位置検出手法の開発」, 応用物理学会, 愛媛大学, 2012.</p> <p>[6] 岸本彩, 片岡淳, 三浦大陽, 中森健之, 鎌田圭, 中村重幸, 里健一, 石川嘉隆, 山村和久, 山本誠一, 「大面積モノリシック MPPC アレイを用いた新規 DOI 測定手法の開発」, 応用物理学会, 早稲田大学, 2012.</p> <p>[7] 岸本彩, 錦戸文彦, 稲玉直子, 吉田英治, 盛武敬, 片岡淳, 村山秀雄, 山谷泰賀, 「IVR 用被曝線量分布モニタリングシステムの基礎研究」, 日本医学物理学会, Web 開催, 2011.</p>
受賞歴	<p>[1] 第 59 回応用物理学会講演奨励賞, 2012.</p> <p>[2] 第 26 回先端技術大賞 特別賞, 2012.</p>