

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：38005

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26706024

研究課題名(和文)半導体コンプトンカメラによる放射性同位体の「3D」可視化技術の確立と展開

研究課題名(英文)Development of semiconductor Compton cameras for the study of 3D radioisotope imaging

研究代表者

武田 伸一郎(Takeda, Shinichiro)

沖縄科学技術大学院大学・最先端医療機器開発ユニット・リサーチスペシャリスト

研究者番号：80553718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、研究期間の途中で申請者の所属が変わるという、開発環境の大きな変化があったが、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(ISAS/JAXA)の研究協力者と、沖縄科学技術大学院大学(OIST)の所属長の理解を得て、研究開発を継続することが出来た。最終的に2台のコンプトンカメラユニットを完成させ、OISTの放射線管理区域にインストールした。本研究は、OIST、ISAS/JAXA、東京大学工学部、3者の共同研究へと発展している。

研究成果の概要(英文)：In the midterm of this research, my affiliation has changed. However, thanks to the warm understanding by the collaborators of ISAS/JAXA and the supervisor of OIST, I have continued this research after moving to OIST. Finally, I completed the prototype of Compton cameras and installed it into the radiation controlled area in OIST for 3-D imaging study with unsealed liquid radioisotopes. Hands-on imaging experiment is now ready. This research has generated new collaborative research among ISAS/JAXA, The University of Tokyo and OIST.

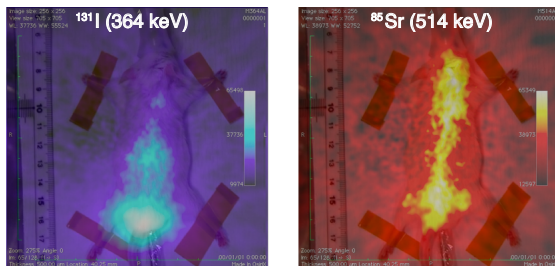
研究分野：放射線計測

キーワード：放射線 半導体検出器 ガンマ線

1. 研究開始当初の背景

申請者は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所に所属し、次世代の高感度宇宙ガンマ線観測を開拓するために、Si と CdTe 半導体検出器で構成する Si/CdTe コンプトンカメラの開発を進めてきた。高性能半導体素子・低ノイズアナログASIC 等の、独自のテクノロジーの開発に成功し、世界に先駆けて高角度分解能コンプトンカメラを実現した。

一方、宇宙物理学実験に端を発する最先端コンプトンカメラ技術の、地上応用を目指した実証実験を牽引してきた。分子イメージングや核医学に代表される医療イメージング分野や、原発事故で飛散した放射性セシウムの可視化などの放射線モニタリング分野を対象とする。マウスと放射性薬剤を用いた分子イメージング実験(図1)、福島でのセシウム可視化実地試験を進めてきた。これらの先行実験の結果は、Si/CdTe コンプトンカメラが、ガンマ線可視化シーズとして、地上の計測が求める次世代技術としても極めて有望であることを示すものであった。



(図1) Si/CdTe コンプトンカメラによるマルチプローブイメージングの実証。
131-I メチルノルコレステロールと 85-SrCl₂ の2種類の放射性薬剤を同時にマウスへと投与し撮像を行った。131-I メチルノルコレステロールの腹部およびその代謝物 131-I の甲状腺への集積と、85-Sr の骨組織への集積が確認出来る。

2. 研究の目的

放射性同位体(RI)からのガンマ線を検出し、3次元位置を再構成する技術は、核医学や放射性物質のモニタリングなど、研究分野を超えて応用できる基本的な技術である。これまで、コリメーターを用いる手法が採られてきたが、コリメーターがガンマ線に対して透明になる 200 keV 以上の帯域で感度を失い、高エネルギーガンマ線放出核種の位置決定は、依然として困難なままである。本研究は、申請者らが次期 X 線天文衛星用に開発を進めてきた宇宙ガンマ線検出器技術を基礎として、Si/CdTe コンプトンカメラによる放射性同位体「3D」可視化技術の確立と、実用の現場への展開を目的とする。

3. 研究の方法

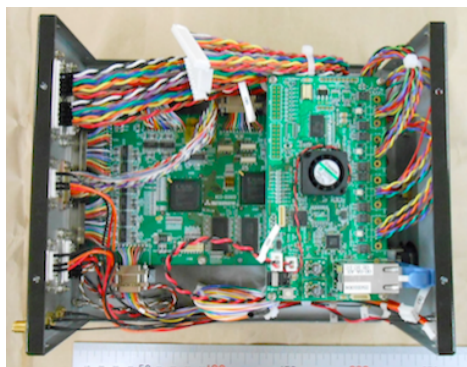
本研究では、医療イメージング分野への展開を目指して、コンプトンカメラを用いた「3D」可視化実証システムを製作する。核医学用に対向配置型回転撮像式のコンプトンカメラを製作し、これらを用いて、残されたままの重要課題である「3D」可視化アルゴリズムを一気に確立し、現場への展開を図る挑戦的な計画である。放射性同位体の分布を要求される精度で「3D」再構成するには、複数台の装置を用いた多角度からのデータを解析することが不可欠であるが、通常、そのような規模の実証システムを製作するには多くの開発費と開発期間を必要とする。本研究では、これまでに ASTRO-H 衛星や福島用コンプトンカメラ開発の枠組みで蓄積してきた設計資源を最大限に利用し、大幅な開発期間の短縮とコスト削減を実現し、申請期間内に実証機を作り上げ、飛躍的に研究を進展させる。

4. 研究成果

(1) 同期式データ処理ロジックの開発

本研究では複数台のコンプトンカメラを同時に動作させて多角度プロジェクション

データを取得する。各検出器モジュールの間で、時刻の同期を取ることができれば、モジュール間にまたがるコンプトン散乱イベントも画像再構成に用いることができ、検出効率の向上が見込まれる。本研究専用の時刻付けロジック FPGA コードを開発し、ひとみ衛星で使用したデータ取得デジタル I/O ボードの FPGA に実装した。22-Na 由来の 511 keV 対消滅線を用いた検証をおこない、実証実験を行う上で、十分な精度で時刻付けが出来ていることを検証した。

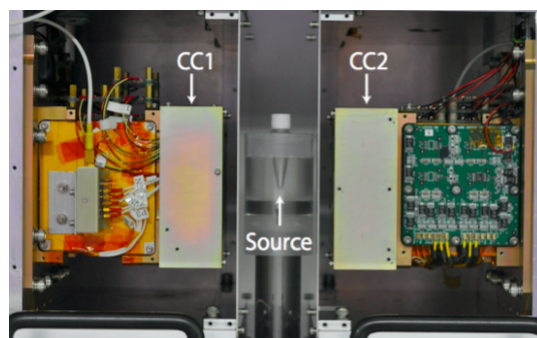


(図 2) 本研究用の時刻付けロジックを実装したデータ処理ボード。複数のコンプトンカメラモジュール間の時刻同期ができ、検出効率を向上させることができた。

(2) 対抗配置型コンプトンカメラの構築

本研究の最大の目的は、「3D」可視化の実証実験に供することができる、対抗配置型のコンプトンカメラ実験プラットフォームを実現することであった。研究期間の途中で、申請者の所属が変わる(宇宙科学研究所 ISAS/JAXA→沖縄科学技術大学院大学(OIST))という、開発環境の大きな変化があったが、ISAS/JAXA の研究協力者(渡辺伸、高橋忠幸)と、沖縄科学技術大学院大学の上長(菅原寛孝)の理解を得て、研究を継続することが出来た。最終的に 2 台のコンプトンカメラユニットを完成させ、沖縄科学技術大学院大学の放射性同位体(RI)管理区域にインストールした(図 3)。

単体のコンプトンカメラモジュールは、Si の両面ストリップ検出器が 2 層、CdTe の両面ストリップ検出器が 3 層積層された、5 積層構造からなる。2 台のモジュールは対抗配置され、中心に被写体を設置する。被写体中心からの距離は、41.35 mm である。被写体は、ロータリーアクチュエータで回転させることができ、多角度データを用いた「3D」可視化アルゴリズムの研究をする上で、十分な質のデータを取得することができる。コンプトンカメラの角度分解能は 245 keV のガンマ線に対して 4.7 degree を実測した。世界的に見ても、このエネルギー帯域で、これほど高い角度分解能を持つコンプトンカメラは存在しない。コンプトンカメラの医療イメージングへの応用展開を目指す実証機として、世界で最も先進的なシステムであると言える。



(図 3) 沖縄科学技術大学院大学の、放射線管理区域にインストールした、「3D」可視化の実証用のコンプトンカメラ実験プラットフォーム。2 台のコンプトンカメラ(CC1,CC2)を対抗配置している。本研究のハイライト写真である。

(3) 非密封線源を用いた実証実験

沖縄科学技術大学院大学(OIST)のRI管理区域の整備を、放射線管理主任と協力して進めた。コンプトンカメラの実験で使用する核種の変更・追加を原子力規制庁に申請し承認された。これにより、OIST 内で、111-In や 131-I などの非密封線源を用いた、実践的な実験ができるようになった。

対抗配置した 2 つのカメラ (CC1,CC2) の相対位置およびエネルギーのキャリブレーションを行った後に、 ^{111}In (171 keV, 245 keV) の非密封線源を用いた実証実験を進めてきた。図 4 に撮像結果の一例を示す。これは、150 kBq (10 μL) の点線源を 14 mm ピッチで 3 つ並べたファントムを用いた撮像結果である。単純なバックプロジェクション法を用いるだけで、3 つの点線源が分離されていることがわかる。コンプトンカメラが正しく動作し、良質の実験データが得られていることを示している。現在、これらの優れたデータを用いた、3D 再構成アルゴリズムの研究を進めている。本研究提案の最大の開発項目であった 3D 撮像用コンプトンカメラ実証機は、申請者の所属組織の変更など多少の紆余曲折があったものの、最終的には当初の計画を実現することができた。



(図 4) ^{111}In 液体線源を用いて、3 つの点線源ファントム(150 kBq, 10 μL)を作り、コンプトンカメラ実験プラットフォーム(図 3)で取得したデータから再構成した画像。単純なバックプロジェクション法を用いて、3 線源を分解することができた。良質のデータが取得できていることを示す。

(4) コンプトンカメラ研究の広がり

当初、申請者個人の申請課題としてスタートした本研究であったが、今、コンプトンカメラ実証機を用いた共同研究へと発展している。コンプトンカメラの技術は、将来的には、宇宙観測、分子イメージング、核医学、放射性物質モニターなど、広い分野で、応用が期待されるものである。写真(図 5)は、沖縄科学技術大学院大学(OIST)、JAXA 宇宙科学研究所、東京大学工学部の研究者の集合写真である。申請者が in-vivo 分子イメージング用に整備した、OIST 内の RI 管理区域において、これまで計 3 回の撮像実験を共同で進めてきた。取得したデータは 3 者で共有し、キ

ャリブレーションの検証、撮像シーケンスの検証、3D 再構成アルゴリズムの研究開発が目下進行中である。今年度には、マウスを用いた in-vivo イメージングも実施する予定である。得られた知見は、次世代のコンプトンカメラの設計・実現の礎となる。コンプトンカメラ研究は、大きな広がりを見せている。



(図 5) コンプトンカメラ共同研究チーム。沖縄科学技術大学院大学、JAXA 宇宙科学研究所、東京大学工学部の研究者達。筆者は前列右である。沖縄科学技術大学院大学にて。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 片岡淳, 武田伸一郎, 高橋忠幸, “放射性物質を可視化するコンプトンカメラ”, 光学, 45, pp.289-299 (2016), 査読なし
- ② 武田伸一郎, 渡辺伸, “宇宙硬 X 線・ガンマ線測定技術を地上へと応用する”, 放射協ニュース, 58, pp. 2-6, (2016), 査読なし
- ③ M. Katsuragawa, S. Takeda, G. Sato, A. Harayama, P. Kennedy, K. Deasy, S. Watanabe, T. Takahashi, “Compact Hard X-ray Imaging system with large FOV”, Proc. SPIE, 9905, 99055C-1, (2016), 査読なし
DOI: 10.1117/12.2240497
- ④ 武田伸一郎, 原山淳, 佐藤悟朗, 渡辺伸, 高橋忠幸, “放射線を面で捉える(3)地上の測定”, RADIOISOTOPES 誌, 65, pp. 81-92 (2016), 査読あり
DOI: 10.3769/radioisotopes.65.81
- ⑤ Yuto Ichinohe and 17 co-authors including Shin'ichiro Takeda, “The first demonstration of the concept of narrow FOV Si/CdTe semiconductor Compton camera”, Nuclear Inst. and

Methods in Physics Research A, 806,
pp.5-13 (2016), 査読あり

- ⑥ Shin'ichiro Takeda and 11 co-authors,
“A portable Si/CdTe Compton camera
and its applications to the visualization
of radioactive substance”, Nuclear Inst.
and Methods in Physics Research A,
787, pp.207-211 (2015), 査読あり
DOI: 10.1016/j.nima.2014.11.119,

[学会発表] (計 3 件)

- ① Shin'ichiro Takeda, “High-resolution
CdTe detectors with application to
various fields”, SPIE Optical
Engineering + Applications 2016,
2016/08/28-09/01, San Diego USA
- ② Shin'ichiro Takeda, “Development of a
portable Si/CdTe Compton camera for
applications in diverse fields”, SPIE
Astronomical Telescopes +
Instrumentation 2016,
2016/06/26-07/01, Edinburgh, Scotland
- ③ Shin'ichiro Takeda, “A portable
Si/CdTe Compton camera and its
applications to the visualization of
radioactive substance”, 7th
International Conference on New
Development in Photodetection,
2014/06/30-07/04, Tours, France

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田伸一郎 (Takeda Shin'ichiro)
沖縄科学技術大学院大学・先端医療機器開
発ユニット・リサーチスペシャリスト
研究者番号： 80553718

(2) 研究協力者

菅原寛孝 (Sugawara Hirotaka)
高橋忠幸 (Takahashi Tadayuki)
渡辺伸 (Watanabe Shin)
島添健次 (Shimazoe Kenji)
織田忠 (Orita Tadashi)