

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760056

研究課題名（和文）宇宙ガンマ線検出器 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラの分子イメージングへの応用

研究課題名（英文）Applications of Si/CdTe semiconductor Compton camera to molecular imaging

研究代表者

武田 伸一郎（SHIN' ICHIRO TAKEDA）

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 研究員

研究者番号：80553718

研究成果の概要（和文）：分子イメージング分野において、人体に投与した複数の放射性薬剤を追跡する、あたらしい診断法の実現が望まれている。本研究では、ASTRO-H 衛星（2014）の検出器技術を応用した、Si/CdTe 半導体コンプトンカメラのプロトタイプ機を用いた基礎実験をおこなった。マウスに投与した 2 種類の放射性薬剤を同時に画像化することに成功し、複数薬剤を同時追跡できる可搬型のイメージングシステム実現にむけて見通しを得た。

研究成果の概要（英文）：In field of molecular imaging, a new imaging method which allows tracking of multiple radiopharmaceuticals injected into a body is desirable. Experimental studies by using a Si/CdTe semiconductor Compton camera originally developed for ASTRO-H satellite mission were conducted. Accumulations of two radiopharmaceuticals injected into a living mouse were successfully imaged, meaning that the Si/CdTe Compton camera is a promising system for innovative molecular imaging.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
22 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
23 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物理学一般

キーワード：放射線、分子イメージング、宇宙ガンマ線観測

1. 研究開始当初の背景

光子と物質との相互作用がコンプトン散乱に支配される 100 keV - MeV のエネルギー帯域において、撮像能力をもつ宇宙ガンマ線検出器として、シンチレーターを用いたコンプトンカメラが提案されたのは、1970 年代初頭

のことである。実は一桁にわたる広い撮像帯域を特徴とする検出器の、医療イメージングにおける有用性が、まもなく指摘されている。1990 年代以降、ガス検出器や半導体検出器技術の進歩を背景として、複数のグループから次世代コンプトンカメラシステムが提案されてきた。しかしながら、提案から 30 年あま

り経った今なお、創薬・臨床用装置の実用化は成し遂げられていない。装置開発の観点からみると、実用的装置に要求される mm レベルの「3D」空間分解能の実証と、10 分程度という現実的な計測時間で高い S/N 比を実現する最適化されたシステムの設計が最大の課題となっている。

申請者は、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証した。コリメーターを必要とせず、コンプトン散乱の運動学から画像再構成を行うこの手法により、60 keV という低いエネルギー帯域から 662 keV にわたって撮像が可能であることを実証した。また、Si と CdTe 検出器は常温付近での動作が可能であり、コンパクトかつ可搬のシステム設計が、Ge や Si(Li) 検出器に比べて容易であることも、実用上有利である。これらは、Si/CdTe コンプトンカメラが、分子イメージングが求める次世代技術としても有望であることを示すものである。

2. 研究の目的

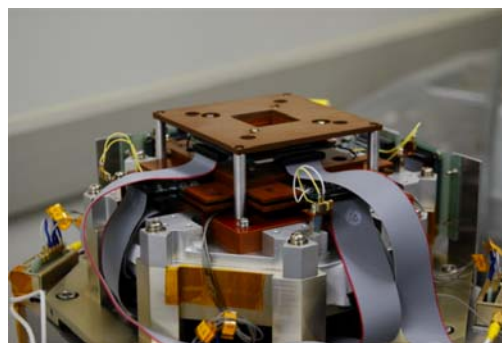
放射線同位体で標識した化学物質の体内動態を探る分子イメージング技術の、PET 装置を中心とした創薬・臨床医療への応用が進められている。しかし、PET 装置の測定では、単一の化学物質の追跡のみが可能である。広い撮像帯域をもち、複数核種の同時追跡を可能とし、新たな視点から創薬や動態解析のための基礎データを提供する、次世代イメージング装置の実現が望まれている。本研究では、次世代高感度宇宙ガンマ線観測装置として、

申請者が開発に貢献してきた Si と CdTe 半導体検出器をもちいた半導体コンプトンカメラを基礎として、分子イメージング研究における革新的なイメージング装置の創出を目的とした、実証実験と検出器設計を進める。

3. 研究の方法

(1) プロトタイプ機を用いた実証実験

大気球実験用に製作した Si/CdTe コンプトンカメラシステムを改修して製作した、医療イメージング用プロトタイプ機を使って(下図)、空間分解能・視野・感度といった、医療イメージングの視点に立った性能パラメーターの評価をおこない、撮像能力を検証する。また、数種類の放射性薬剤を投与したマウスの撮像をおこない、複数の放射性薬剤の同時イメージングを実証する。



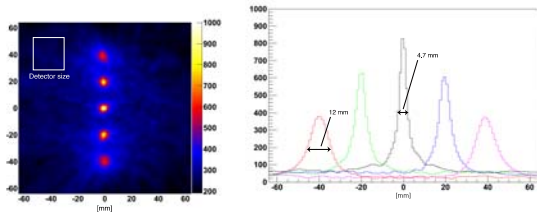
(2) シミュレーションによる検出器設計

コンプトンカメラを小動物撮像・臨床に応用するには、対象の 3 次元的構造・位置を正確に測定できる能力が要求される。これまでに実証してきた 2D 撮像能力の 3D への拡張を可能にする、解析方法の開発や検出器配置の最適化が不可欠である。Geant4 ベースのモンテカルロシミュレーターを発展させ、ピクセルサイズや検出器配置を最適化し、現実的な測定時間で 3D 構造を分解する実用機の設計に取り組む。

4. 研究成果

(1) プロトタイプ機を用いた実証実験

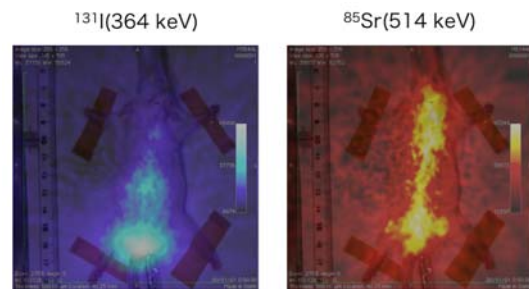
理化学研究所と群馬大学医学部の協力のもと、ファントムを用いた撮像性能の評価と、マウスを用いた複数薬剤の同時イメージングの実証をおこなった。



上図に撮像性能の評価実験の一例を示す。この実験では、検出器表面から 30 mm の平面上に ^{133}Ba (356 keV) の点線源を配置し、20 mm ピッチで移動させた。左側が取得したイメージで、右側がそれぞれの位置での Point Spread Function (PSF) である。左図から、Si/CdTe コンプトンカメラは、検出器サイズよりもはるかに広い視野を持つことがわかる。これはコリメーターを用いない撮像方式であるコンプトンカメラの特徴であり、将来的には小型・可搬のシステムで広い撮像領域をカバーする実用化システム設計が可能となる。空間分解能は視野中心において 4.7 mm (FWHM) を達成し、分子イメージングで必要とされる mm レベルの空間分解能実現に向けて技術的見通しを得た。

性能評価実験ののち、マウスを用いた実証実験に取り組んだ。例として、2 つの放射性薬剤 ^{131}I methylnorcholestenol と $^{85}\text{SrCl}_2$ を同時に投与したマウスの断面画像を下図に示す。 ^{131}I methylnorcholestenol の腹部と解離した ^{131}I の甲状腺への集積、 ^{85}Sr の骨への集積が確認でき、両者の分布は明らかに異なっている。エネルギーウィンドウを個々の核種に対して設定する解析により、2 核種の同時イメージングに成功した。これは、Si/CdTe コンプトンカメラの優れたエネルギー分解能と角度分解能により成し

遂げられた結果であり、国内外の可搬型コンプトンカメラ開発を遥かに先行する成果である。

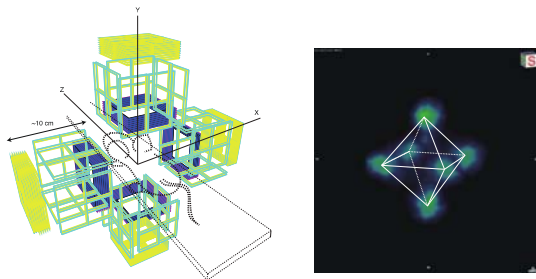


(2) シミュレーションによる検出器設計

上述したように、Si/CdTe コンプトンカメラは複数薬剤の同時画像化装置として、高い潜在能力を持つことが分かった。しかし、実用化に向けた課題もある。ひとつはプロトタイプ機の感度が低いことであるが、これは半導体検出器を多層化することで改善でき、例えば Si を 32 層、CdTe を 8 層積層する ASTRO-H 衛星の SGD 検出器のデザインならば、検出器モジュールひとつで、現行の SPECT システムに比して約 4 倍の感度が期待できる。もうひとつは、「3D」画像化である。生体は 3 次元の構造をもつので、集積分布を 3D 画像化することは、実用途では必須である。そこで、Geant 4 ベースのモンテカルロシミュレーターを用いて、データ解析方法や検出器配置の最適化の研究を進めた。

分子イメージング用に装置最適化を図り、2014 年打ち上げ予定 ASTRO-H 衛星搭載の軟ガンマ検出器 (SGD) をベースデザインとして、マルチヘッドの検出器システムを提案した。下図左に示したのが、SGD-Light Array Detector (SGDLAD) のデザインである。撮像対象の周りにリング状に検出器を配置し、多角度から見たデータを用いて、「3D」再構成をおこなう。例として、正八面体の頂点に配置した 6 つの点線源に対して、SGDLAD で得られる MIP (Maximum Intensity Projection) 画

像をシミュレーションしたものを下図右にしめす。500 keV のガンマ線を各点から等方的に 4.8×10^8 個放射した。1 MBq の線源強度とすると 480 秒の測定に相当する。点線源間の距離は 3.5 mm である。画像からは各点源がきれいに「3D」分解されていることがわかる。ガンマ線のエネルギーを変えながらシミュレーションを行い、数 100 keV から MeV の帯域で、2-3 mm 程度の「3D」空間分解能が達成できることが分かった。この程度の分解能があれば、マウスのような小動物であっても、腹部各器官への集積を分離できるようになる。コンプトンカメラを用いた第一世代実用機のデザインとして、分子イメージングで要求される装置レベルを満たしていると考えられる。今後、解析方法の更なる研究をすすめ、定量性に優れた解析法を開発するとともに、SGDLAD 実現に向けた検出器開発を進める。



5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Shin' ichiro Takeda, Hirokazu Odaka, Shin-nosuke Ishikawa, Shin Watanabe, Hiroyuki Aono, Tadayuki Takahashi, Yousuke Kanayama, Makoto Hiromura, Shuichi Enomoto, "Demonstration of in-vivo multi-probe tracker based on a Si/CdTe semiconductor Compton camera" IEEE Trans. Nucl. Sci. 査読有, Vol. 59, pp. 70-76, 2012

- ② Shin' ichiro Takeda, Tadayuki Takahashi, Shin-nosuke Ishikawa, Hirokazu Odaka, Shin Watanabe, Hiroyasu Tajima, Naoki Kawachi, Takashi Nakano, "Simulation study of 3-D gamma-ray imager with Si/CdTe semiconductor Compton camera", Sensor application symposium 2010 IEEE, 査読無, pp. 170-174, 2010
- ③ Shin' ichiro Takeda, Tomonori Fukuchi, Yousuke Kanayama, Shinji Motomura, Makoto Hiromura, Tadayuki Takahashi, Shuichi Enomoto, "Millimeter-order imaging technique from 100 keV to MeV based on germanium Compton camera", Proc. SPIE, 査読無, Vol. 7805, pp. 780515-9, 2010

[学会発表] (計 3 件)

- ① Shin' ichiro Takeda, "in-vivo multiple-probe tracker based on astrophysical gamma-ray detector technologies", 2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSSMIC 2011), 2011. 10. 26, Valencia Spain
- ② Shin' ichiro Takeda, "Applications and imaging techniques of a Si/CdTe Compton gamma-ray camera", Technology and Instrumentation in Particle Physics 2011 (TIPP 2011), 2011. 6. 11, Chicago, USA
- ③ Shin' ichiro Takeda, "Millimeter-order imaging technique from 100 keV to MeV based on germanium Compton camera", SPIE Optics + Photonics Optical Engineering + Applications, 2010. 8. 4, San Diego, USA

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 伸一郎 (SHIN' ICHIRO TAKEDA)

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 研究員

研究者番号：80553718