

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14287

研究課題名(和文) マイクロUAV搭載型高分解能コンプトンカメラの開発

研究課題名(英文) Development of a high-resolution Compton camera for micro UAV

研究代表者

島添 健次 (SHIMAZOE, Kenji)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：70589340

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では良好なエネルギー分解能を有するヨウ化ストロンチウムの結晶作成技術、パッケージングおよびアレイ化技術の確立を行った。バックグラウンドが少なく発光量が多い。作成したコンプトンカメラをドローンに搭載できるように軽量化(<2kg)し、ピンホールコンプトンカメラの製作を行うことで特性X線および662keVのガンマ線による感度上昇が可能である。結晶はアレー化可能な四角型結晶を作成しPMT, APDおよびSiPMにおいて性能評価を行った。PMT, APDにおいて3%@662keV、SiPMで4%@662keVを達成し所望の性能を得た。ヨウ化ストロンチウム澱液化法を適用したブリッジマンで育成した。

研究成果の概要(英文)：In this research the technology of growth, packaging and array of Strontium Iodide scintillator was established, which has good energy resolution, high light yield and low background radiation. A Compton camera with the weight of less than 2kg was designed and fabricated as pin-hole Compton hybrid imager for detecting characteristic X-ray and 662 keV gamma-ray from ^{137}Cs source. The crystals were evaluated by coupling with PMT, APD and SiPM. The resolution of 3% @ 662 keV with PMT and APD, 4% @ 662keV with SiPM was measured and achieved. The used Strontium Iodide scintillators were fabricated by liquid Bridgeman method.

研究分野：放射線計測

キーワード：コンプトンカメラ ドローン ヨウ化ストロンチウム マイクロUAV

1. 研究開始当初の背景

本研究の学術的背景として、福島第一原子力発電所事故後放出された放射性核種(^{137}Cs および ^{134}Cs)により汚染された地域において除染作業や汚染状況の効果をモニタリングするためのマッピング技術として、上空からの航空機モニタリングが最も有効な手段であると考えられる。初期には航空機を用いたモニタリングにより 300m オーダーでの大まかな汚染マップが得られており除染の指針などに役立つデータを提供している。また我々のグループでは自動制御可能な無人ヘリに散乱エネルギー認識型のガンマカメラを搭載し m オーダーでの汚染マップが得られることを示してきた。一方で達成可能な位置分解能は Unmanned Aerial Vehicle (UAV) の飛行高度 (> 10 m) およびガンマカメラの角度分解能を決定する搭載している検出器のエネルギー分解能 (~6%) によって制限されてきた。このような問題を解決するため本研究においてはより高いエネルギー分解能もちバックグラウンドの少ないヨウ化ストロンチウム (SrI2) 検出器のアレイを用いてコンプトンカメラを構成し低空飛行 (~1 m) が可能なマイクロ UAV と組み合わせることで高空間分解能な検出器が構成可能であることに思い至った。しかしながらこの時点において、ヨウ化ストロンチウムのような非常に潮解性の高いシンチレータをアレイ化する技術は存在していなかった。またマイクロ UAV に搭載可能な軽量なイメージングシステムは開発されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的はマイクロ UAV に搭載可能な軽量型ガンマ線イメージングシステム構築のため高いエネルギーを有するヨウ化ストロンチウムのパッケージング、アレイ化技術の開発および軽量型コンプトンカメラのための回路技術の開発および最高製ソフトウェアの開発である。具体的には下記を目的とした。

- (1) 1つ目はヨウ化ストロンチウムのアレイ化製造技術に関わるものであり、ヨウ化ストロンチウムは高エネルギー分解能を有するが、一方で潮解性を有するため従来アレイ化が困難であり単結晶での利用にかぎられてきた。本研究提案においては、ユニオンマテリアル社櫻木氏の協力を得て結晶成長過程でアレイ構造を組み込むというアイデアを導入することにより本問題の解決を行いコンプトンカメラに必須の高エネルギー分解能アレイシステムを構築することを目的とした。本アレイ化方式へのチャレンジは他の潮解性を有する結晶のアレイ化についても道を開く可能性があるものである。
- (2) 2つ目はマイクロ UAV に搭載するため

にはガンマ線を可視化する装置は超小型かつ超軽量である必要があり飛行時間などの制約条件となってきた。重いコリメータを有するピンホール型ガンマカメラは使用することができず、高分解能のコンプトンカメラが必要となるが従来エネルギー分解能の制約から実現することが困難であった。本研究では 3% 台のエネルギー分解能を有するヨウ化ストロンチウムのアレイ検出器をシリコンフォトマル (SiPM) および小型デジタル変換回路 (dTOT) を用いて読み出すことで小型軽量化および高分解能化を同時に実現することにチャレンジする。後段の回路規模を小さくすることでヨウ化ストロンチウム検出器自体の面積および感度を高めることで UAV の高速飛行においても正確な線量マップが作成可能で広域をカバーできるようなシステムにチャレンジする。

(3) 3つ目はマイクロ UAV への搭載による線量マッピングについてはリアルタイム画像再構成技術が必要である。本研究ではエネルギー制限型コンプトンカメラ方式によるカウントマッピング原理を導入しリアルタイム性および高位置分解能を同時に実現する。特に低空飛行により側面からのガンマ線の影響を受けやすいマイクロ UAV において、本コンプトンカメラ方式は特に有効な手段となる。

3. 研究の方法

ヨウ化ストロンチウムのアレイ化および軽量低消費電力回路の搭載による超軽量高分解能コンプトンカメラの開発を行う。ヨウ化ストロンチウム結晶 (密度 4.6 g/cm^3 , 発光量 $> 80000 \text{ photon/MeV}$) に関しては単結晶において 3% 台のエネルギー分解能を達成可能であることが示されてきた (図)。またエネルギー分解能が高いため線量マッピングに於ける核種弁別も容易に可能である。本研究においてはアレイ型検出器の開発として、新規にアレイ型内で結晶成長を行う方式を櫻木氏の協力のもと試験する。これにより同等のエネルギー分解能をもつ 10 mm 角のヨウ化ストロンチウムシンチレータ 4×4 アレイを作成する。 4×4 アレイを 2 段積層することで高空間分解能のコンプトンカメラを製作する UAV に搭載するガンマカメラは超小型、軽量であることが要求される。シンチレータからの信号読み出しは光検出器として小型化が可能でヨウ化ストロンチウムの発光波長である 430 nm と相性のよいシリコンフォトマルおよび代表者のグループで考案、開発してきた Dynamic ToT (dTOT) 法を用いた省電力アナログデジタル変換技術をもちいて小型化を実現し全体として軽量かつ小型のシステムを構成する (~40 g 程度)。検出器の初段および 2 段目の同時計数判定やエネルギー取得などは小型化が可能な FPGA を用いたパラレルデジタル信号処理を用いておこなう。また同時計数測

定されたエネルギーデータから線源強度分布を再構成するソフトウェアの開発を行う。リアルタイムマッピングのため検出されたイベントからエネルギー制限をかける新しい手法を導入することでカウント数だけでマップが可能な**リアルタイムアルゴリズムの開発**を行う。これにより周囲に存在する森などから入射するガンマ線にかかわらず、地表面の線量を正確にマッピングすることが可能となる。すでに基本的な再構成ソフトウェアは無人ヘリに於ける開発時に知識を有しているため、それを改良することで開発を進める。

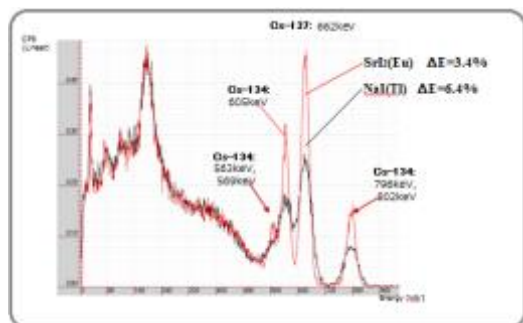


図 ヨウ化ストロンチウムシンチレータとNaIシンチレータとの性能比較

4. 研究成果

本研究開発においては、アレイ化が可能でかつSiPMに接続可能なキューブ型のSrI2シンチレータ結晶の育成およびパッケージ化を行うことで高い性能を有する10mm角のシンチレータアレイの作成に成功した。PMTとの組み合わせにおいて3%台@662 keVを有する結晶に対してそれぞれAPD (Avalanche Photo Diode) および SiPM (Silicon Photomultiplier) との接合試験を行いそれぞれ3%台@662 keV および4%台@662 keVを達成していることを確認した。(論文①、②) これによりコンプトンカメラのためのアレイ構築技術を確認した。



図 キューブ型パッケージングしたヨウ化ストロンチウム

また開発したキューブ型結晶については、温度依存性、最適な波形整形回路時定数、エネルギー分解能などの評価を行った。低温においてはより高い発光量、エネルギー分解能が観測された。波形整形時定数の評価においては6 μ sで最適なエネルギー分解能が観測された。3 μ s波形整形時定数および5度の環境においてはPMT (R6231-100)との接合時は3.4% @ 662 keV、またSiPM (S12642-0404A-50 Hamamatsu Photonics)においてはおよそ4.4% @ 662 keVであった。これらの結果は国際学会において報告された。また同様結晶においてAPD (Avalanche Photo Diode S8664-1010)で計測されたエネルギー分解能は3.5% @ 662 keVであった。結晶は澆液化法 (Liquinert Process)を用いたブリッジマン法により育成された。

またドローン搭載用のコンプトンカメラとしては重量として1 kg以下の超軽量システムが必要とされる。ここではdynamic Time over Threshold (dTOT)と呼ぶ新たな信号処理技術を導入した回路を搭載し、FPGA (Field Programmable Gate Array)を用いたデジタル信号処理を行いSDカード内のメモリへの書き込みを行うシステムを構築することで所望の軽量化を実現し、マイクロUAVへの搭載を実現し、飛行試験を実施した。マイクロUAVとしてはMatrice100(DJI)を使用した。



ここでの最大搭載量は800 gであり最終的に検出器、ケーブル、電源回路を含めて780 gの測定システムを構築した。下図にマイクロUAVに搭載したピンホールコンプトンカメラの写真を示す。

図 開発したピンホールコンプトンカメラ(下部)、信号処理回路(上部)を搭載したマイクロUAV

また軽量化においては、従来のピンホールカメラは重いコリメータを用いるため搭載が困難であった。本研究では当初コンプトンカメラを搭載することによるイメージング方式を提案していた。本研究では新たに¹³⁷Csから放出される特性X線およびガンマ線の同時撮像による感度の向上のため新たにピンホール機能を有する散乱体と吸収体を組み合わせた新たなピンホールコンプトンカメラを考案した。本方式においては散乱体に設置されたピンホールを透過したイベントをエネルギー制限により特性X線イベントとし、

散乱体、吸収体で一定時間窓内に同時計測されたイベントをコンプトン散乱イベントとして扱いそれぞれ別の画像再構成を行うことで感度の上昇が可能である。

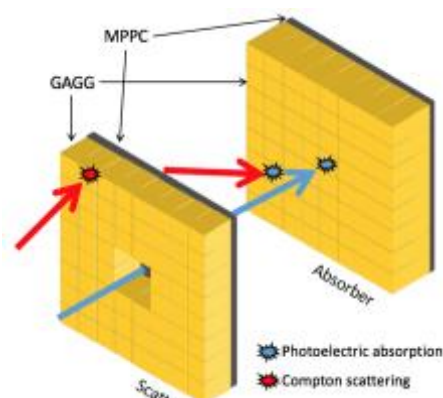


図 考案したピンホールおよびコンプトンカメラ同時撮像方式

下図に散乱体および吸収体の同時計測によって得られたコンプトン散乱を利用した ^{137}Cs の再構成画像を示す。画像再構成はフィルターバックプロジェクション (FBP)を用いている。これにより ^{137}Cs 点線源が撮像されていることを確認した。検出器の固有検出効率は0.5%程度であった。

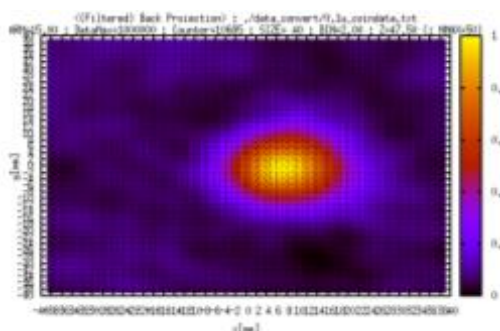


図 画像再構成した画像 (^{137}Cs コンプトン散乱イベントを利用)

以上により軽量型コンプトンカメラ実現に必要な高分解能シンチレータアレイ技術の確立、軽量信号処理回路の開発と組み込み及び実装、マイクロ UAV への搭載、画像再構成ソフトウェアの開発までを実施した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① Shimazoe, K., Koyama, A., Takahashi, H., Sakuragi, S., & Yamasaki, Y. (2016). Fabrication and characterization of cubic SrI 2 (Eu) scintillators for use in array detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 810, 59-62. 査

読有

② Shimazoe, K., Koyama, A., Takahashi, H., Sakuragi, S., & Yamasaki, Y. (2017). Fabrication and characterization of rectangular strontium iodide scintillator coupled to TSV-MPPC array. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 845, 503-506. 査読有

[学会発表] (計 3 件)

① 福島における環境放射能測定のためのピンホールコンプトンガンマカメラの開発 * 中田 直樹、高橋 浩之、島添 健次、志風 義明 2017 日本原子力学会春の大会 2017/3/27-29 東海大学湘南キャンパス 平塚市

② アレイ検出器用キューブ型ヨウ化ストロンチウム結晶の特性評価 * 島添 健次、小山 晃広、高橋 浩之、櫻木 史郎、山崎 康司 2016 日本原子力学会春の年会 2016/3/26-28 東北大学 川内キャンパス 仙台

③ Fabrication and characterization of cubic SrI 2 (Eu) scintillators for use in array detectors Shimazoe, K., Koyama, A., Takahashi, H., Sakuragi, S., & Yamasaki, Y. VCI 2016 2016/2/15-19 Vienna University of Technology, Vienna

[その他]

ホームページ等

<http://sophie.q.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島添 健次 (SHIMAZOE Kenji)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：70589340

(2) 研究協力者

中田 直樹 (NAKADA Naoki)

志風 義明 (SHIKAZE Yoshiaki)