

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13796

研究課題名（和文）超高線量場用の低コストな方向弁別型放射線検出器の開発

研究課題名（英文）Development of a low-price direction sensitive radiation detector

研究代表者

中森 健之（Nakamori, Takeshi）

山形大学・理学部・准教授

研究者番号：30531876

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：小型・軽量・安価という要請を満たす、 $^{137}\text{Cs}$ 由来のガンマ線源が存在する方向を検知する検出器システムを開発した。3 cm角の鉛ブロックの6面に取り付けられたGAGG:Ceシンチレータの計数パターンから線源の方向を推定する。目標とした $22.5^\circ$ 以下の方向精度を達成した。カード型PC Raspberry Piによるデータ収集系と解析ソフトウェアを開発し、屋外でも動作を実証した。更に使いやすさの向上のため、4チャンネルADCの基板を採用し、構造の最適化を行った。制御とモニタ用のスマートフォンアプリケーションも合わせて開発した。

研究成果の概要（英文）：We develop a small, light-weight and low-price gamma ray detector which is sensible to source directions. The detector consists of a 3-cm cubic lead block with its all faces having GAGG:Ce scintillators, and calculate the source directions from a combination of count rates of the scintillators. We established the designed accuracy of  $22.5^\circ$ . We also develop a data acquisition system and analysis softwares on a card-type PC, Raspberry Pi, and performed a demonstration outside. For further convenience, we apply a 4-channel ADC board and optimize a detector structure. Finally we develop an application running on a smart phone to operate and monitor the whole system.

研究分野：放射線物理学

キーワード：MPPC ガンマ線 方向検知 Raspberry Pi Android

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災が引き金となり福島第一原発事故が発生し、環境中に大量の放射性物質が拡散した。精力的な除染活動により避難指定地域の住民帰還が始まっている地域もある。その一方で、原子炉の廃炉作業は30年程度の長いタイムスケールで進められる計画であり、原子炉建屋内部のロボットによる潜入調査が始まったばかりであった。解体へ向けた計画を立てるためには、放射性物質の分布を知ることが極めて重要である。

既に市場にはガンマ線源の分布を可視化するガンマカメラが投入されているが、それぞれに欠点がある。空間分解能に優れるピンホールタイプは視野外からのガンマ線を遮蔽するための鉛が搭載されており、軽量化と小型化に難がある。一方、遮蔽体が不要で小型化が容易なコンプトンカメラは、シンチレータあるいは半導体のセンサ部品と複雑な信号処理と演算を行うシステムのコストのため高価(>1000万円)という問題がある。

我々はこれまでに、環境中の<sup>137</sup>Cs線源の方向を特定できる、安価な(予想販売価格2-30万円)放射線検出器を目指して開発を続けてきた。662 keVガンマ線の光電吸収ピークに対応する信号を取り出し、その計数率から方向を推定する原理である。

### 2. 研究の目的

本研究は非常に高い空間線量下で動作する、主たる放射線源の方向を検知する検出器を開発する。福島第一原発の原子炉建屋内部における数Sv/hという強烈な線量場の中での使用を前提とし、瓦礫の隙間を通り抜けて進入するロボットに搭載できることを想定するため、小型・軽量であることが求められる。また高線量下ではセンサ本体だけでなく回路系などシステム全体が被爆ダメージを受け、長期の安定使用が困難である。そのため、安価で「使い捨て」が現実的に可能となる低コストの実現を目指す。本研究では<sup>137</sup>Csの662 keVガンマ線を主に想定し、後述する角度推定精度が全方位に対して22.5°となるよう、シンチレータの形状を始めとするセンサ部の最適化を行う。

### 3. 研究の方法

<sup>137</sup>Csからの662 keVガンマ線の遮蔽材として機能する鉛の立方体ブロックの各面にシンチレータを取り付ける。ガンマ線が到来する方向(=ガンマ線源が存在する方向)により、6つの検出器での計数率が変化する。計数率の組み合わせパターンと線源の方向を対応付けるルックアップテーブル(LUT)をあらかじめ保持しておき、測定結果と比較照合することにより線源の方向と強度をカイ二乗検定を元に推定する。

モンテカルロシミュレーションを基に方向決定精度を評価したのちに、実機を制作して実験室内で方向推定実験を行う。本研究で

は角度決定精度を以下のように定義する。ある方向からガンマ線が入射したときの測定データから推定を行うというサイクルを50または100回繰り返して結果の分布を得る。最頻値を中心とする円を描いたとき、試行結果のうち90%が含まれる半径(90% containment radius; r90)を方向決定精度と定める。

なお計数には662 keVの光電吸収ピークのみを用いる。具体的には662 keV±3σに対応する波高のイベントを計上する。線源の方向を正しく検知するためには、環境中で散乱して検出器に到達するガンマ線を排除する必要があるためである。光電吸収イベントのみを用いることで、検出器まで直進・直接到達した<sup>137</sup>Cs由来のガンマ線のみを使って到来方向が推定できる。

シンチレータの読み出しには小型で信号増幅機能を持つ半導体センサMulti Pixel Photon Counter (MPPC)を用いる。方向算出の計算には名刺サイズのLinux PCであるRaspberry Piを採用し、格段のコストダウンを図る。MPPCを駆動する高圧電源もRaspberry Piで制御する。

### 4. 研究成果

#### (1) 6面検出器の方向決定精度

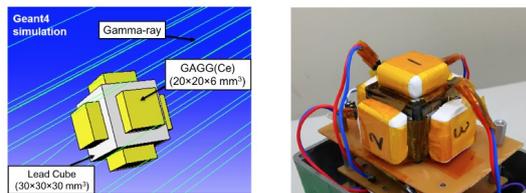


図1 検出器の構造(左)と実際の写真(右)。

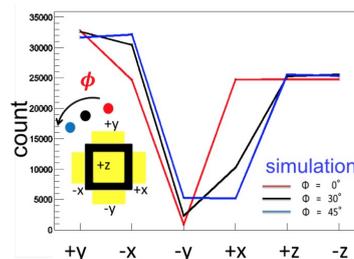


図2 ガンマ線の入射方向による計数の違い。6つ計数の組み合わせで判別する。

図1(左)に示すような検出器を構成した。総重量が500グラム程度で小型で軽量という要求しよを満たしている。

Geant4によるシミュレーションによって、検出器に対して球面を立体角でほぼ等分割するジオデシックドームに対応する980の方向から平行光として662 keVガンマ線を照射し、6面のGAGG:Ceシンチレータで得られる計数パターンを取得した。このデータセットが実際の測定時の方向決定時に参照されるテンプレートデータである。図2にその一部

を示す。

次に同じ 980 方向から 0.15 uSv/h の線源を 1 分間測定する設定でシミュレーション実験を行った。全方向につきそれぞれ 100 回試行で方向決定精度を評価したところ、すべての方向について r90 が 18° 以下であることが分かり、目標の角度精度を満たした。

図 1 (右) のように検出器を実際に組み上げ、実験室内で同様の方向推定実験を行った。実験室内にはバックグラウンドとなるカウントが存在するため、方向推定計算に未知のパラメタを増やす必要があった。バックグラウンドの空間線量が 0.25 uSv/h であるのに対し、0.30 uSv/h を与える位置に 137Cs 線源を設置して方向推定実験を行った。1 つの配置に対して 1 分間の測定を 50 回繰り返し、推定された方向の分布を得た。図 3 に結果の一例を示す。バックグラウンドというパラメタが増えたが目標精度は問題なく達成されていることを確認した。

さらに、バックグラウンドの線量率がさらに高い場合の方向精度の見積もりを行った。その結果、全方位から入射するバックグラウンド空間線量が 1.0 uSv/h であっても、0.3 uSv/h を与える線源の方向を 20° 以下の精度で検知できることがわかった。

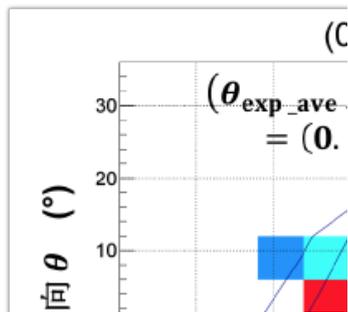


図 3 実機による 50 回の方向推定結果の分布。コントラで示されたシミュレーションの結果分布と矛盾しない。

## (2) 2 つの線源がある場合の方向決定性能の評価

ここまで述べた方向推定計算は、線源が 1 つであることを仮定したモデルでの検定であった。複数の線源が存在する場合、得られる計数のパターンは線源が 1 つの場合のいずれのケースとも類似しない。そのため、方向算出時に計算されるカイ二乗が明らかに大きくなり、線源が 1 つであるという仮定が誤りであり、複数の線源が存在することを示唆することができる。そのような場合、2 つの線源を仮定したモデルで検定することによって、それぞれの線源の強度と方向を求めることが原理的に可能である。

137Cs 線源が 2 つ存在するときに双方の線源の方向決定の精度を見積もるシミュレーション実験を行った。図 4 にその結果の一例を示す。1.0 uSv/h を与える線源が 2 つ、(仰

角, 方位角) = (0°, 0°) と (0°, 135°) に存在するとき方向が正しく推定できている結果である。青丸で示される測定した計数値の組み合わせを、LUT データの重ね合わせとして線源強度もパラメタとしてフィットした結果が線で示されている。

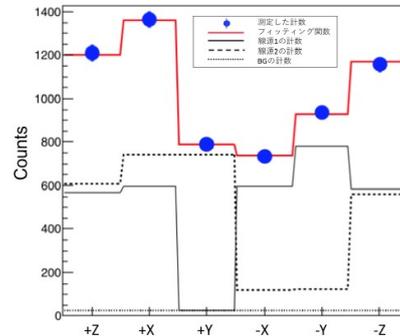


図 4 2 つの線源に暴露したときの計数とフィッティング結果。

方向の組み合わせと線源の強度比の組み合わせを様々に変えて検証した。その結果、多くの場合で 90% 以上の確率で方向精度の目標値を達成した。しかしながら、いくつかの組み合わせでは、得られる計数を再現する複数の方向・強度の組み合わせが存在することも明らかになった。そのようなケースでは誤った推定をしてしまう。逆に、「間違った答えを返している可能性がある解」が網羅できているため、推定結果がそれらに該当した場合には、検出器を数 10 度回転させて再測定を促すなどのアラート機能を実装することはできるだろう。

## (3) 屋外測定実験

Raspberry Pi で制御される計数測定とデータ収集システムを制作した。試作した基板には、MPPC を駆動する高圧電源と、信号処理系としてオペアンプ・コンパレータ・カウンタ・I/O インタフェイスの各 IC を搭載した。Raspberry Pi 上でコマンドを実行することにより、検出器の起動から計測と方向算出までのすべての操作が行えるソフトウェア群を整備した。

屋外にこれらのシステムを設置し、線源の方向を検出する実証実験を行った。図 5 にその結果の一例を示す。0.4 uSv/h の線量を照射し、40 秒間の計測と方向算出を 10 回繰り返した。推定された線源の方向は 10 回とも目標の精度に収まっていた。さらに、分布がやや下方向に寄っていることとカイ二乗が複数の線源を示唆したことから、2 線源モデルで方向推定を適用した。すると鉛直下方にも線源を検出した。これは、実験室内で想定していたバックグラウンドの計数パターンよりも、屋外で地面からくる計数が増加したことを意味している。検出器を様々な環境へもって行って使用する際には、バックグラウンドの取り扱いに注意が必要であるという知見を得ることができた。

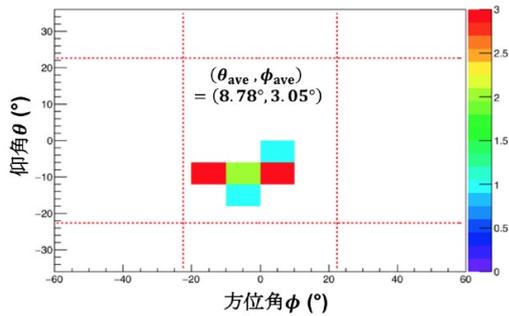


図 5 屋外での方向推定実験の結果。直線で囲まれた中央部が目標値に対応しており、この範囲に分布が収まっていればよい。

#### (4) GROWTH ADC 基板の採用

ここまで開発したシステムは、光電吸収イベントを単純に識別するためにコンパレータを採用していた。しかし各チャンネルの閾値の設定が煩雑であり、また予期せぬゲインや収集光量の変動に対応しにくいという難点があった。また検出器を人が手に持ったり、構造物に取り付けるなどした場合、検出器は前面方向に感度を持っていけば十分という考え方があり得る。

上記の背景を受けて、雷雲ガンマ線観測実験 GROWTH で開発された 4 チャンネルの ADC 基板を採用した。図 6 に示すように、この基板は Raspberry Pi で動作し、安価・小型という条件を満たしている。我々の検出器から読み出される信号のスペクトルを計測し、光電ピークのイベント数を算出するスクリプト群を新たに作成した。



図 6 GROWTH ADC 基板。Raspberry Pi と直結するコネクタを持つ。

(5) 4 面検出器の設計とシミュレーション  
GROWTH 基板は 4 チャンネルしか扱えないため、6 面検出器をそのまま適用することができない。前述のとおり、有感方向を前方立体角  $2\pi$  に限定したときに 4 センサで目標の角度精度が達成できる検出器の構造を決める必要がある。さまざまな形状の検出器を考案し、モンテカルロシミュレーションでガンマ線の照射実験を行った。6 面検出器と同じジオデシックドームの 490 方向のすべてで  $r90$  が

目標値を達成する構造を探索した。その結果、鉛製正三角柱の側面と上面にシンチレータを取り付ける構造が解の 1 つとして見つかることができた。検出器重量を 500 グラム以下に抑えるため、三角形の一边は 5.2 cm、高さは 3.0 cm である。

#### (6) Android アプリケーションの開発

本システムを操作する際、Raspberry Pi にいちいちログインしてコマンドを入力するのは現実的ではない。組み込みの無線機能で通信する Android 端末用のアプリケーションを開発した。図 7 に示すように、検出器に固定された広角カメラ画像上に推定方向が表示される。またスペクトルも表示することができる。そして測定の制御や各種のモニタ情報が見ることができる。



図 7 方向検出器と連動する Android アプリケーションのスクリーンショット。右：算出した線源の方向を表示するモード。左：センサ毎のスペクトルを表示するモード（ゲイン・光収集効率の低下も

#### 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 1 件)

“Development of Gamma-Ray Detector Sensitive to Source Directions using GAGG(Ce) Scintillators and MPPCs”, Kojima, K., Nakamori, T., et al., IEEE-NSS, Conference Record, 2016

[学会発表] (計 1 件)

“Development of Gamma-Ray Detector Sensitive to Source Directions using GAGG(Ce) Scintillators and MPPCs”, Kojima, K., Nakamori, T., et al., IEEE-NSS, Strasburg (France) 2016

[図書] (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

本研究に関わる大学院生の獲得資金

（1）Kojima, K.: The Valentin T. Jordanov Radiation Instrumentation Travel Grant (IEEE)

（2）Kojima, K.: The Trainee Grant (IEEE)

（3）小島圭貴：山形大学ふすま同窓会海外留学支援

本研究に関わる大学院生の表彰

小島圭貴：山形大学校友会会長賞（2017）

本研究に関わる学位論文

（1）小島圭貴「MPPC を用いた全方位指向型ガンマ線検出器の開発と方向精度評価」、山形大学理工学研究科修士論文（2017）

（2）根本大暉「Raspberry Pi を用いた全方位指向型ガンマ線検出器の読み出し基板の開発」山形大学理学部卒業論文（2017）

（3）首藤瑞樹「前方領域指向型ガンマ線検出器開発のためのシミュレーション実験」山形大学理学部卒業論文（2018）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中森健之 (NAKAMORI, Takeshi)

山形大学・理学部・准教授

研究者番号：30531876

### (2) 研究協力者

郡司修一 (GUNJI, Shuichi)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：70241685