

全方向ガンマ線コンプトンイメージング法の
開発と応用

高橋 時音

全方向ガンマ線コンプトンイメージング法の
開発と応用

Development of 4π Field of View Gamma-ray Compton Imaging Method
and Its Application

2017年1月

名古屋大学大学院 工学研究科
量子工学専攻

高橋 時音

目次

第1章	序論	
1-1.	ガンマ線イメージング	1
1-2.	コンプトンイメージングの原理と応用	2
1-3.	全方向ガンマ線イメージングの原理と応用	7
1-4.	コンプトンイメージング法における信号対雑音比の課題	10
1-5.	本研究の目的	14
第2章	全方向ガンマ線イメージングの原理実証	
2-1.	全方向ガンマ線イメージングのための画像再構成アルゴリズム	17
2-2.	全方向ガンマ線イメージング用検出器	19
2-2-1.	CdTe 半導体 3次元アレイ検出器	19
2-2-2.	シンチレータスタック型検出器	21
2-3.	シンチレータスタック型検出器における小領域重心演算法による相互作用位置の特定	24
2-4.	シミュレーション計算に基づく検討	27
2-5.	全方向ガンマ線イメージングの原理実証実験	29
2-6.	まとめ	36
第3章	角度分解能の向上のための重みづけ逆投影法の開発	
3-1.	コンプトン散乱角別の逆投影図の特徴	35
3-2.	散乱角別の逆投影図の特徴を利用した重みづけ逆投影法の提案	41
3-3.	重みづけ逆投影法を用いた信号対雑音比の向上	43
3-4.	まとめ	53
第4章	全方向ガンマ線イメージングの応用	
4-1.	医療用サイクロトロン施設におけるガンマ線源分布測定	55
4-1-1.	光学写真と逆投影画像との重ね合わせ	56
4-1-2.	ガンマ線分布測定	60
4-2.	まとめ	69

第5章 結論と今後の展望	
5-1. 結論	71
5-2. 今後の展望	73
参考文献	74
謝辞	77
本論文を構成している発表論文	78

要旨

ガンマ線イメージングは、医療や環境モニタリング、核セキュリティ等の分野で特に関心が高まっており、特にコリメータを必要としない軽量、高感度、広視野を持つコンプトンイメージング方式を用いたガンマカメラであるコンプトンカメラが注目されている。コンプトンカメラは、ガンマ線が検出器中で一回コンプトン散乱したのち光電吸収される事象に対し、各相互作用点でのエネルギー付与量と2つの相互作用位置から散乱した際の散乱角を計算することで得られるコンプトンコーンを逆投影し、その重なりから線源方向を推定する手法である。一般にコンプトンカメラではガンマ線飛来方向を想定し、コンプトン散乱事象を収集する前置検出器の後方に光電吸収を収集する後方検出器を配置する体系をとるが、3次元的に対称な形状を持たせ、散乱、吸収を区別することなく動作させることにより、全方向に視野をもつガンマ線イメージングが可能となる。全方向ガンマカメラは、現在、主に半導体を使用した可搬型のものが開発されており、原子力関連施設内の汚染検査や環境中のホットスポットの特定で実績を上げている他、廃棄物中の放射性物質や核セキュリティ分野での放射性物質検知への応用が検討されている。

本研究では、主にシンチレータを用いた3次元位置敏感型検出器を用いた全方向ガンマカメラについて、シミュレーションと実験を通じた原理実証を行うとともに、全方向イメージング法の高度化のために、コンプトンイメージング法固有の空間的な信号対雑音比を改善し、角度分解能を向上させるための新たな逆投影法を開発した。また、全方向ガンマカメラの応用について検討を行った。

第1章 序論

本章では、ガンマ線イメージング法のうち、コンプトンイメージングについて、その原理、利点、およびコンプトンイメージング法の原理に由来する固有の課題である逆投影図上の空間的信号対雑音比の劣化について説明し、課題の解決に向けて取り入れられている既存の手法を紹介した。また、コンプトンイメージング法に基づいた全方向ガンマ線イメージングの原理を説明し、既存の全方向ガンマカメラの応用の紹介を通じて全方向ガンマカメラの応用可能性について説明した。

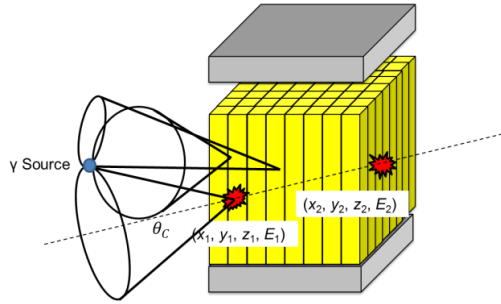


図1 シンチレータスタックを用いた全方向ガンマ線イメージングの概念図

第2章 全方向ガンマ線イメージングの原理実証

本章では、全方向ガンマ線イメージングのための3次元位置敏感型検出器として、シンチレータスタック型検出器とピクセル型半導体3次元アレイ検出器について、動作原理及び特性について説明し、モンテカルロシミュレーションおよび実験を通じて行った全方向イメージングの実証について述べた。

シンチレータスタック型検出器には、ロッド状の $\text{Ce:GAGG}(\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12})$ シンチレータを複数本束ねたスタックの両端に2次元位置敏感型の光検出器を配置したものを用いた。光検出器の位置情報によって相互作用したロッドを特定し、両端の光検出器の波高値の比からロッド長軸方向位置を推定することによって3次的に相互作用位置を特定する。検出器として、 $2.8 \times 2.8 \times 5.0 \text{ mm}^3$ のロッドを 16×16 本を隙間なく敷き詰めたものと、 8×8 本を 8 mm ピッチで設置したものの2つを作製し、効率、分解能の比較を行った。ピクセル型半導体3次元アレイ検出器は、 $8.0 \times 2.21 \times 12.5 \text{ mm}^3$ のサイズの CdTe 半導体素子を $12 \times 30 \times 4$ 個並べたものとなっており、それぞれの方向で位置分解能が異なることによる違いや、シンチレータに比べエネルギー分解能が優れる点がイメージングに与える影響について評価した。シンチレータスタック型検出器と CdTe 半導体3次元アレイ検出器を用い、全方向に対して ^{137}Cs 線源方向が特定可能であることをシミュレーション、実験の両面から示した。

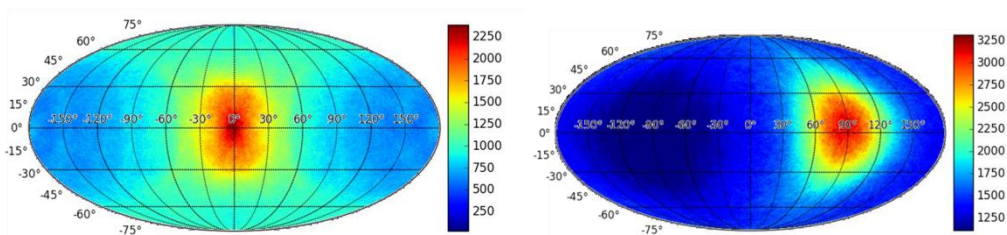


図2 ^{137}Cs 線源の逆投影図 (モルワイデ図法で表示) (左)シンチレータスタック型検出器 (右) CdTe 半導体3次元アレイ検出器

第3章 角度分解能の向上のための重みづけ逆投影法の開発

本章では、本研究で新たに開発したコンプトン散乱角によるイベントの振り分けを利用した重みづけ逆投影法について述べ、前章の結果に適用した場合の有効性を評価した。

線源方向推定に用いるコンプトンコーンを逆投影した際に、コーンの大部分が雑音として逆投影図上に現れてしまうという課題を解消するために、測定データを算出されるコンプトン散乱角の大きさ別に2つのグループに分け、それぞれのグループ別に逆投影した時に、雑音成分の現れ方に違いが生じることを利用し、得られる2つの逆投影図をお互いの重み係数とみなして掛け算することで、信号成分を強めながら雑音成分を除去する重みづけ逆投影法を提案した。2.8 mm 角の8×8 シンチレータスタック型検出器と CdTe 半導体3次元アレイ検出器の¹³⁷Cs線源測定結果に本手法を適用し、角度分解能がそれぞれ66°から22°、80°から63°に向上すること示し、信号対雑音比の改善と角度分解能の向上を実証した。

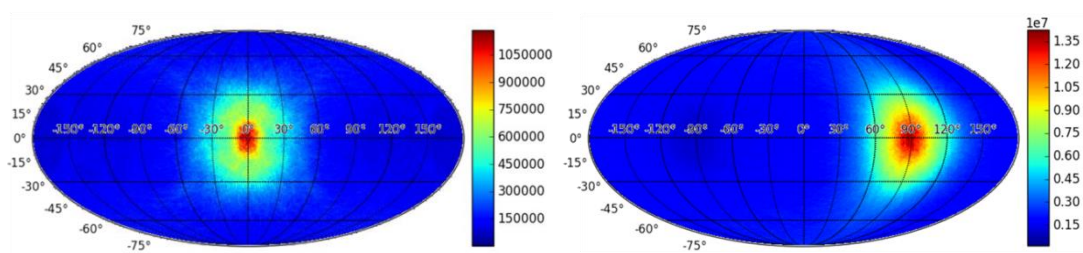


図3 重みづけ逆投影を適用した¹³⁷Cs線源の逆投影図 (左)シンチレータスタック型検出器 (右)CdTe半導体3次元アレイ検出器

第4章 全方向ガンマ線イメージングの応用

本章では、全方向ガンマカメラの応用として、医療用サイクロトロン施設での放射性物質分布のマッピングについて検討した。

全方向ガンマ線イメージングの応用の一例として、医療用サイクロトロン施設での壁等の放射化の分布測定を行った。サーベイメータを用いて測定した空間線量率分布との比較を行い、分布測定の有効性を評価した。

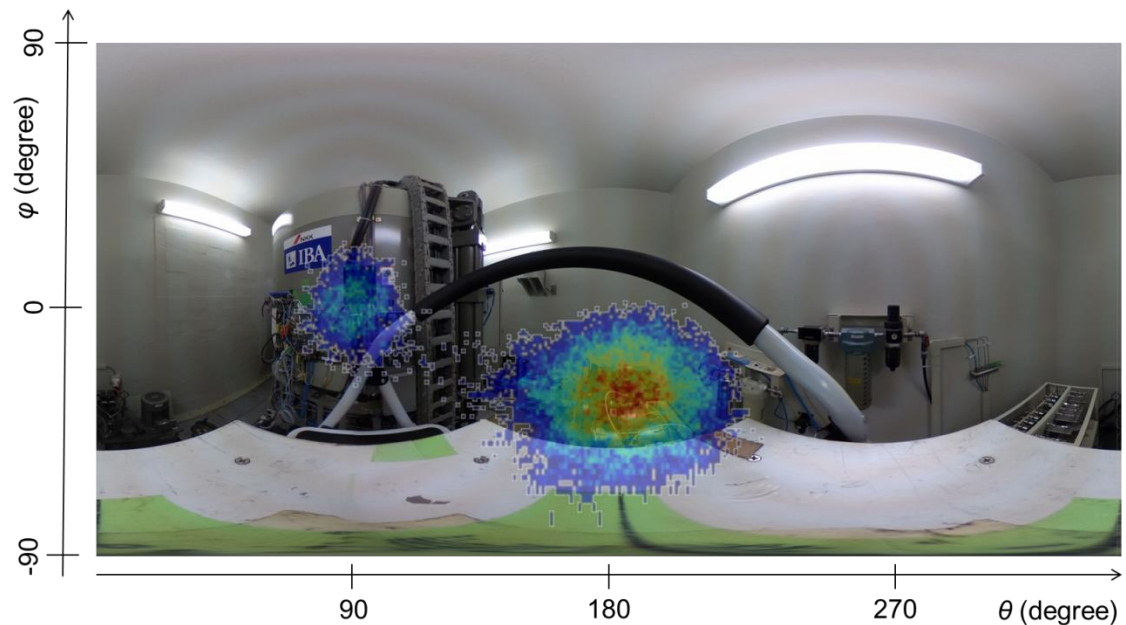


図4 医療用サイクロトロン施設での加速器周辺でのガンマ線源分布測定結果

第5章 結論と今後の展望

本章では、本研究のまとめと今後の展望について述べた。前章までで、3次元位置敏感型検出器を用いた全方向ガンマカメラの原理実証および全方向ガンマ線イメージングのための重みづけ逆投影法の開発を行い、また、実際に放射性物質が分布する場での全方向ガンマ線イメージングの実効性について検証した。

今後の展望として、重みづけ逆投影法の条件の最適化等を通じた発展や、検出器を移動させながら複数回の測定を行い、各位置で全方向ガンマ線イメージングを行うことで、線源位置の3次元情報を取得し、検出器との距離から概ねの線源強度を推定する手法への適用が望まれる。

第1章 序論

1-1. ガンマ線イメージング

ガンマ線のイメージングは、ガンマ線源の分布を可視化し、直感的に分かりやすい結果を提示する技術であり、特に、医療分野やモニタリング、核セキュリティの分野で応用が広がっている。ガンマ線は、可視光とは異なり、光学的レンズを用いて集光することができないため、イメージをとるために、様々な方法が開発されてきた。2つのコーンの頂点を合わせた様な形状をもつピンホールコリメータを用いたピンホールカメラ^[1]は代表例の一つであり、単一のピンホールコリメータを使用したものや、いくつかのピンホールコリメータを並べたものが医療用として開発されている^[2-4]。また、より鮮明な画像を得るために、ガンマ線の遮蔽材に、特定の配列パターンで複数の開口部を設けた、コードットマスクを用いたカメラなどが開発されてきた^[5-7]。これらのカメラは、ガンマ線が光電吸収によって遮蔽されやすく、効率よくコリメートされる 100 keV 以下の低エネルギーのガンマ線のイメージングにおいて、特に有効である。一方で、数百 keV~数 MeV のガンマ線は、コンプトン散乱が支配的となるため、開口部やコリメータ内部、検出器部分での散乱の影響が大きくなる。これに対し、コンプトン散乱過程を利用したイメージング手法であるコンプトンイメージングは、数百 keV~数 MeV のガンマ線のイメージングに有効であり、コンプトンイメージング法を用いたガンマカメラは、近年の電子デバイスの発展や計算機の実力の向上にともない性能が飛躍的に向上しており、放射性物質の迅速な検知やモニタリングの効率化、医療分野での短時間での画像診断の実現など様々な分野において期待が高まっており、注目されているイメージング法である。

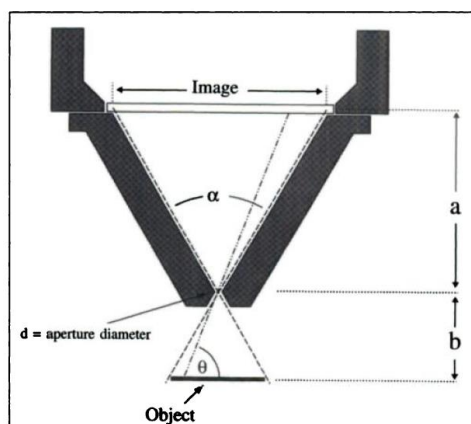


図 1-1-1 ピンホールコリメータ型ガンマカメラの例^[3]



図 1-1-2 特定の開口パターンを持つコーデットマスクの一例^[6]

1-2. コンプトンイメージングの原理と応用

コンプトンイメージング法^[8]は、物質とガンマ線との相互作用の一つであるコンプトン散乱に着目したイメージング法である。ガンマ線と電子との相互作用の一つであるコンプトン散乱は、電子と光子の弾性散乱として扱うことができ、電子が静止しており、エネルギーが保存されると仮定する場合には、エネルギー保存と運動量保存から、散乱前のガンマ線のエネルギー E_γ と散乱後のエネルギー E'_γ と散乱角 θ の関係は次のように表すことができる。

$$\frac{1}{E'_\gamma} - \frac{1}{E_\gamma} = \frac{1 - \cos \theta}{m_e c^2}$$

ここで、 m_e は電子の静止質量、 c は光速である。この式からコンプトン散乱時における散乱角は、入射した光子の全エネルギー E_1 、散乱時に電子に付与するエネルギー E_2 を用いて、

$$\theta = \cos^{-1} \left[1 - m_e c^2 \frac{E_1}{E_2(E_1 + E_2)} \right]$$

で表されるため、一度コンプトン散乱したガンマ線を光電吸収により捕らえ、それぞれの相互作用を起こした点でのエネルギー付与量を測定することにより、散乱時の角度を求めることができる。このとき、各相互作用点の位置の情報があれば、飛来したガンマ線はエネルギーによって計算される角度で散乱した後、

2点を結ぶ直線の方に飛んだと推定される。よって、飛来したガンマ線は2点を結ぶ直線を中心線とし、計算される散乱角を開口角に持つコーンの円周上のいずれかの方向から来たと考えられる。

コンプトンカメラでは、ガンマ線が散乱した際に電子に付与したエネルギーおよび散乱位置を測定するとともに、散乱後のガンマ線を光電吸収によって捕らえ、そのエネルギーと吸収された位置を測定する必要がある。従来のコンプトンカメラでは、図 1-2-1 に示すように、被写体に対して奥行き方向に2層あるいは複数の層の位置敏感型スペクトロメータを設置し、前方の検出器でコンプトン散乱したガンマ線を後方検出器で光電吸収させ、両方の相互作用点の位置とエネルギー付与量を測定する方法がとられている。測定された位置とエネルギー付与量から、前述のようにコンプトンコーンを計算し、逆投影する。これを多数のイベントについて繰り返し、それぞれのイベントについてコンプトンコーンを求め逆投影していくと、図 1-2-2 に示すように線源がある方向にのみコーンの円周が重ね合わさっていき、結果として線源方向のみが相対的にカウントが高くなる。コンプトンイメージング法では、以上のようにして線源方向を推定する。

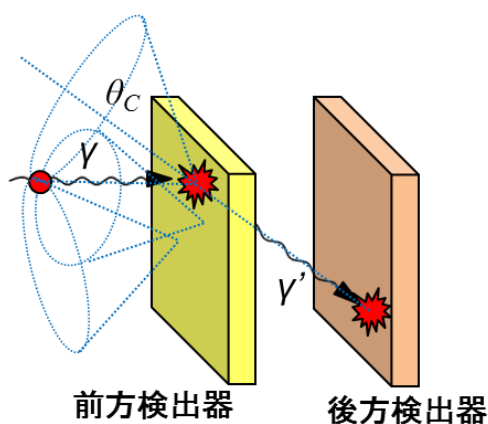


図 1-2-1 従来のコンプトンカメラの概念図

前置検出器でコンプトン散乱を起こし、後方検出器で吸収されるイベントを測定する。

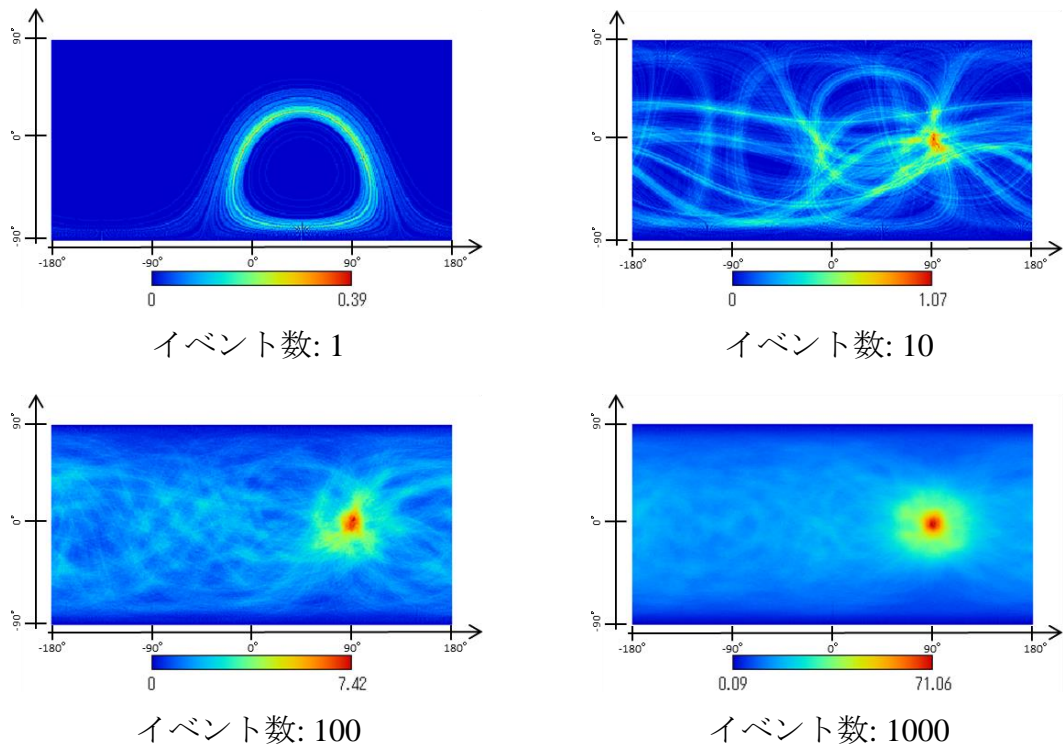


図 1-2-2 コンプトンイメージングの一例

測定されたイベントからコンプトンコーンを計算し逆投影する。逆投影されるイベント数が増加するにつれて、示される線源方向が鮮明になっていく様子がわかる

コンプトンイメージング法は、ピンホールカメラやコーデットマスクを用いたカメラのように物理的なコリメータを必要としない。そのため、広い範囲から飛来するガンマ線を効率よく検出することができ、広視野、高効率を持ったイメージングを行うことができる。加えて、システム全体をコンパクトで軽量なものとすることができ、可搬性を持った扱いやすい検出器の作製に向いている。但し、コンプトン散乱イベントを測定する必要があるため、測定対象が低エネルギーのガンマ線である場合にはイベント数を稼ぐことが困難な場合があり、前方検出器での散乱を誘導するために原子番号の小さい物質を使用するなどの対応が求められる。

コンプトンカメラの主な応用先として、医療用 PET(Positron Emission Tomography)や SPECT(Single Photon Emission Tomography)と呼ばれる画像診断技術向けのものが多数開発されており^[9, 10]、高い検出効率を活かして短時間でのイメージングを行うことにより、投与する薬剤の減量や診断の効率化を図り、患

者への負担を軽減することが期待されている。例えば、前置検出器として、原子番号の小さい Si 半導体検出器を採用し、後段の検出器として LaBr₃ を用いたものなどがある。その他、広い視野を活かした環境中の広範囲にわたる 2 次元的 3 次元的な放射性物質分布のプロファイリングを目的として、多層の半導体検出器を用いたものや^[11, 12]、Ce:GAGG(Gd₃Al₂Ga₃O₁₂)シンチレータのプレート状検出器を 2 層並べたものを用いたものや^[13, 14]、小型のヘリコプターに載せ、上空から広範囲に亘ってホットスポットをプロファイリングする応用例が報告されている^[15, 16]。また、核セキュリティへの応用として、荷物の中の放射線源を検知するための比較的大型のコンプトンカメラ^[17]や、宇宙物理の分野では、高エネルギーの X 線を捕らえるための望遠鏡として、Si 半導体検出器と CdTe 半導体検出器を組み合わせたものが開発されている^[18]。

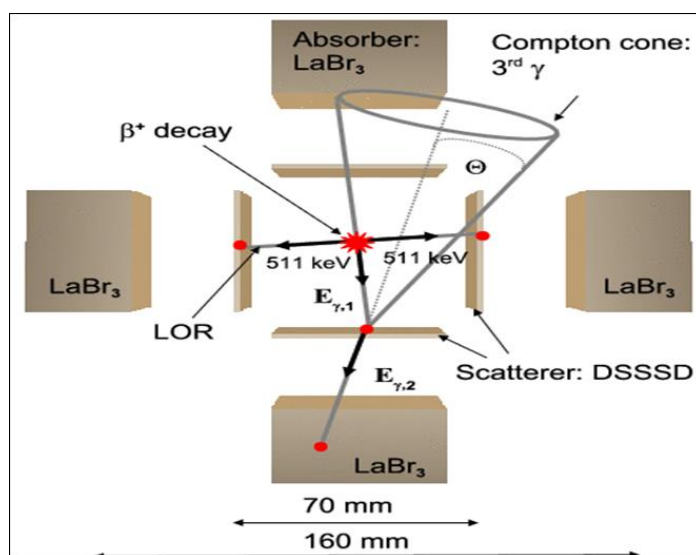


図 1-2-3 PET 用コンプトンカメラの一例の体系図

前置検出器としてシリコンストリップ検出器(図中 DSSSD)を、後方検出器として LaBr₃ 検出器を用いており、視野を囲むように 4 方向に設置されている

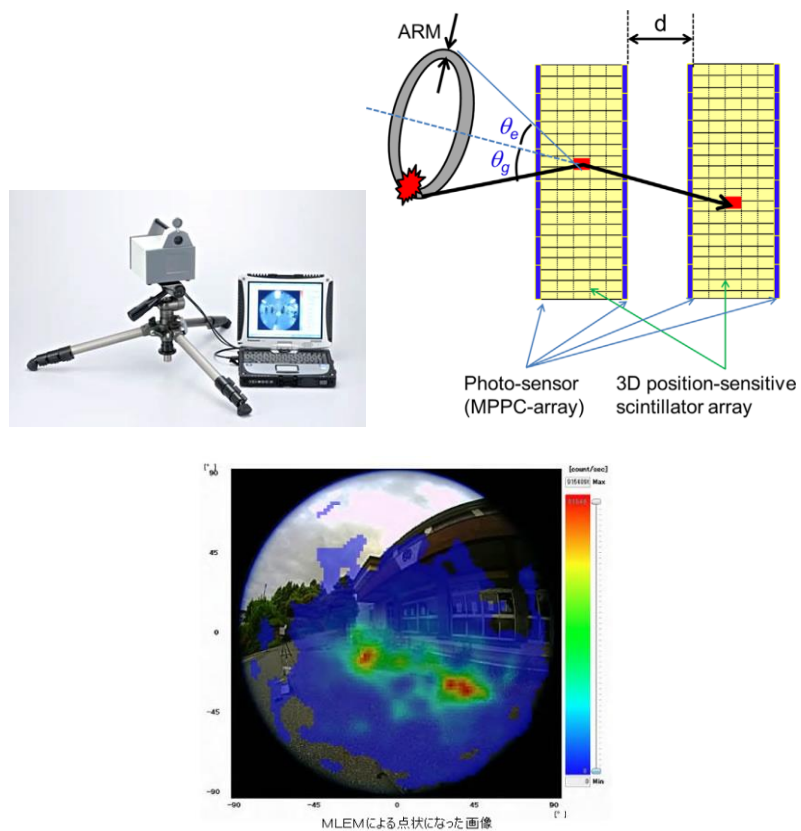


図 1-2-4 福島第一原子力発電所サイトでの放射性物質分布の測定に向けて開発されたコンプトンカメラ^[13]

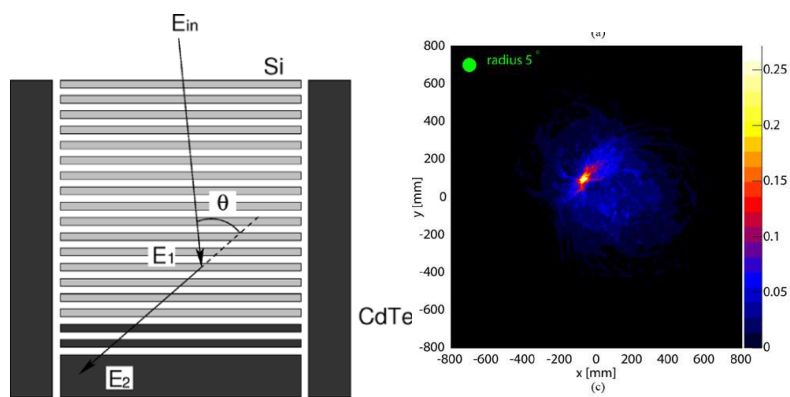


図 1-2-5 宇宙望遠鏡として開発されているコンプトンカメラ^[18]

1-3. 全方向ガンマ線イメージングの原理と応用^[19]

従来のコンプトンイメージング法では、前述のように想定した視野方向に対して奥行き方向に複数の層の 2 次元位置敏感型スペクトロメータを設置した形状をとり、前方の検出器を散乱検出器、後方の検出器を光電吸収検出器として動作させるなど、想定した視野方向に対してのみのイメージングを前提とした設計、最適化がなされてきた。コンプトンイメージング法は原理的にはどちらの方向から飛来したガンマ線に対してもコーンの重ね合わせにより線源方向を推定することが可能である。そこで、検出器を 3 次元的に対称に設置し、前方・後方を区別することなく動作させることにより、検出器周囲のあらゆる方向について感度を均一化し、全方向視野を持ったイメージングが可能になる。

全方向ガンマ線イメージングは、イメージングの対象物がある方向を想定せずに運用することができ、特に被写体となる放射性物質の分布が不明な場合に有効であると考えられる。例として、原子力災害時におけるブルームの動態の監視、避難区域でのモニタリング、その後の除染に向けたプロファイリングなど広い範囲にわたる迅速な測定が求められる場合。また、原子力関連施設や放射線治療を行う施設、核融合施設などにおける放射化分布の測定、核不拡散・核セキュリティ分野での持ち運ばれる核物質、放射性物質の検知など、分布や位置が不明な場合に特定するときに特に有効であると期待される。

3 次元位置敏感型のスペクトロメータを用いた全方向ガンマ線カメラとして、CdZnTe 半導体検出器を用いたものが市販されている^[20]。この検出器では CdZnTe 半導体のストリップ検出器が用いられており、各方向の電極で検出される電流の量から相互作用位置を割り出し、全方向ガンマ線イメージングを行っている。原子力関連施設での配管中の ^{60}Co の分布の測定など、実際の使用例が報告されている^[21]。また、シンチレータを用いた全方向ガンマ線カメラとしては、CsI(Tl) を用いた検出器の開発が行われており、主に汚染検査を目的とし、周囲の放射性物質の分布をリアルタイムで測定する応用がなされている^[22]。

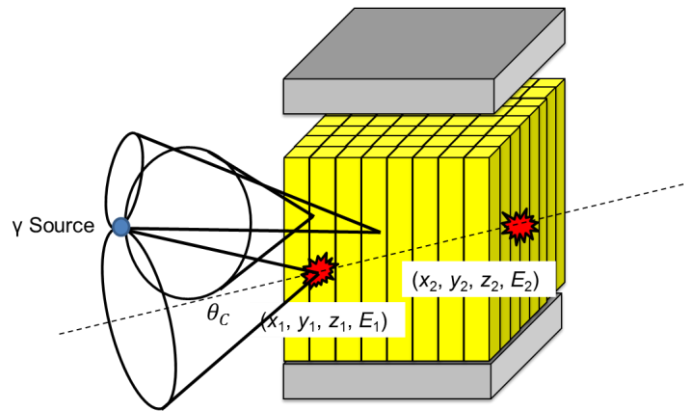


図 1-3-1 全方向ガンマカメラの概念図

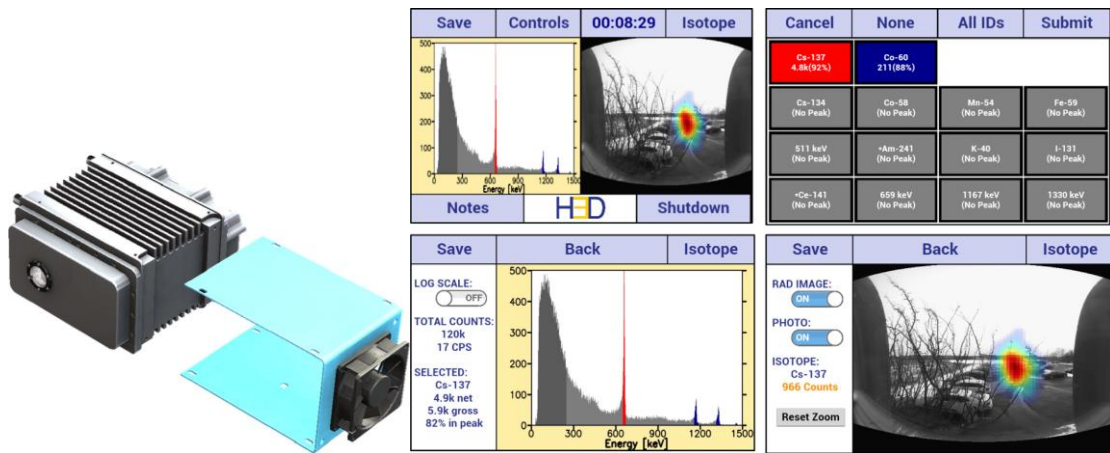


図 1-3-2 CdZnTe 半導体ストリップ検出器を用いた全方向ガンマカメラ^[20]

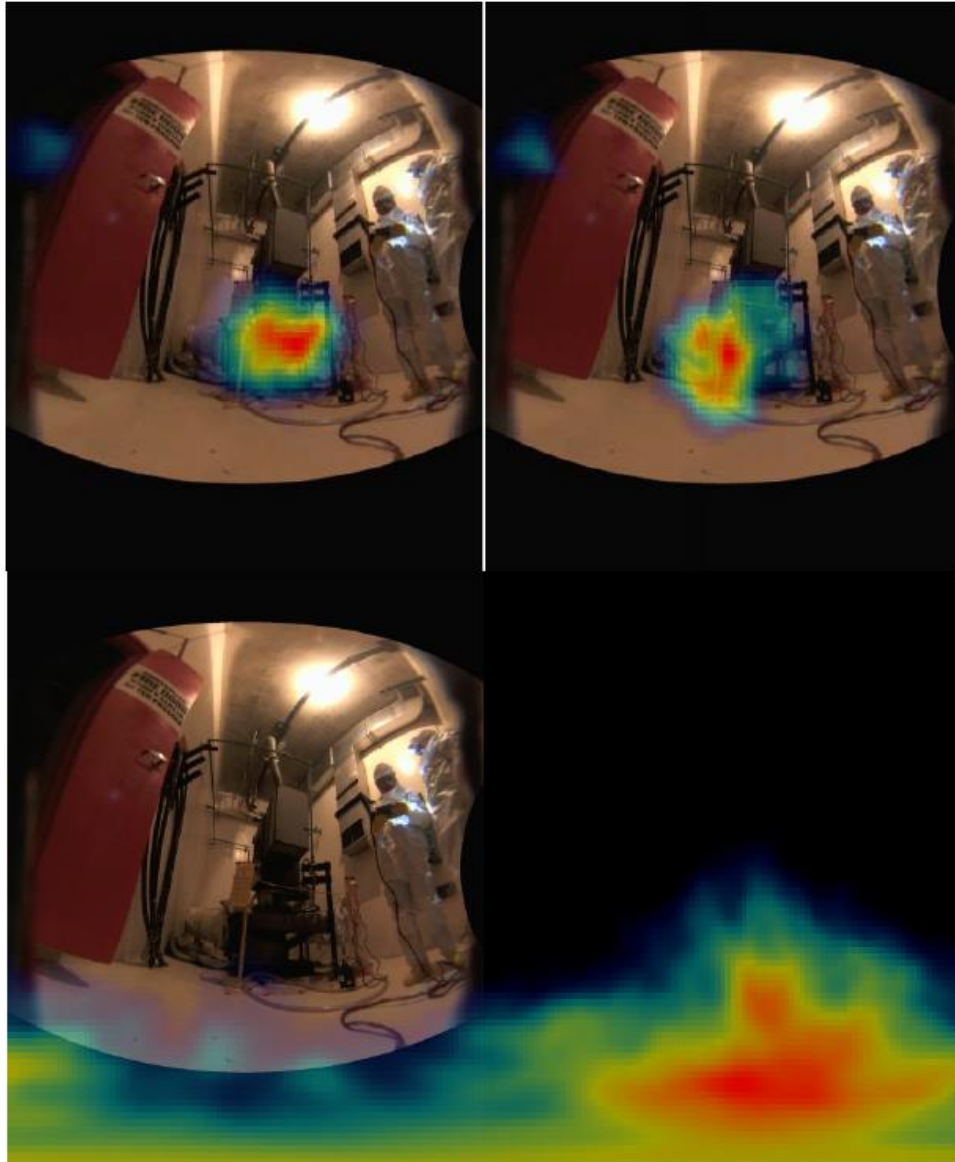


図 1-3-3 全方向カメラを用いた原子力発電所の残留熱除去系ポンプ付近での測定例
核種ごとに分布を測定しており、上部 2 つはそれぞれ(左) ^{58}Co 、(右) ^{60}Co の 2π 方向のイメージであり、下の画像は ^{137}Cs の全方向イメージとなっている^[21]

1-4. コンプトンイメージング法における信号対雑音比の課題

前述のように、コンプトンイメージング法は測定されたイベントデータを用いてコンプトンコーンと呼ばれるコーンを逆投影し、その重なりによって線源方向を推定する。このとき、一つ一つのコーンはある程度の広がりを持っているが、飛来したガンマ線の真の方向はコンプトンコーンの1点のみであり、それ以外の部分のコーンはすべて雑音として逆投影される。このため、コンプトンイメージングは原理的に信号対雑音比が悪くなるという課題を持っている。これを解決する方法としていくつかの手法が提案されている。

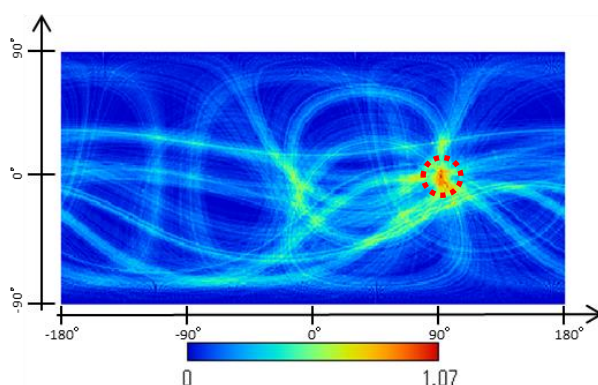


図 1-4-1 逆投影図に現れるコンプトンコーンの様子 図中の赤い点線で囲まれた部分が真の線源方向を表す信号成分となり、他の部分はすべて雑音として現れている

解析的手法として、電子飛跡追跡型検出器を用いたコンプトンカメラがある^[24]。これは、ガンマ線がコンプトン散乱した際に生成される電子の検出器内での飛跡を得ることで散乱時の情報を補う手法である。図 1-4-2 に示すように、従来のコンプトンカメラで測定していた散乱後のガンマ線の方角と散乱角に加え、反跳電子の飛ぶ方向を得ることで、線源方向をコンプトンコーン上の一点に絞ることができる。この手法には、電子飛跡をとることができる検出器を散乱検出器として用いることが必要であり、これまでにガス検出器を使用した例が報告されているが、検出効率を犠牲にしなけりばならなかった。最近では、固体検出器を用いた電子飛跡追跡型検出器の導入も行われており、高い効率を維持した電子飛跡追跡型コンプトンカメラが期待されている^[25]。

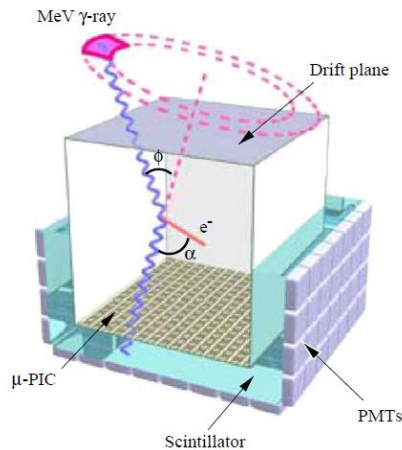


図 1-4-2 電子飛跡追跡型コンプトンカメラの概念図^[24]

統計的手法は、いくつかの種類があるが、多くのコンプトンカメラに取り入れられており、広く用いられることの多い手法である。以下に、各種の統計的手法を列挙する。

最尤推定期待値最大化法 (Maximum Likelihood – Expectation Maximization: ML-EM 法)^[26]

ML-EM 法は、統計的手法のうち最も広く用いられている方法である。あらかじめ、あらゆる方向から飛来するガンマ線に対して、逆投影結果がどのように得られるか応答関数を取得しておき、その応答関数を用いて測定結果を解析する。測定結果は必ず元の分布と応答関数との畳み込みになるため、その広がり応答関数との逆畳み込みを利用して補正する。

現在では、1つ1つのイベントから得られるコンプトンコーンに対して応答関数を用意し、個々のイベントから描かれるコンプトンコーンの形から飛来するガンマ線の方の期待値を最大化する List Mode ML-EM 法の研究が進んでおり^[27]、前述の全方向ガンマ線カメラに適用されるなど、実際の運用に導入されている^[28]。この手法は、従来の ML-EM 法が積算したイベントから得られる集合で再構成される像を対象とするのに対して、個々のイベントを処理することにより、リアルタイム測定の中で ML-EM 法を適用し、より迅速に鮮明な画像を得ることを目的としている。

ML-EM 法は繰返し計算によって雑音を取り除き鮮明な像を得ることができるが、繰返し計算の回数が増加するにつれて次第に特定の雑音が目立つようになる傾向を持ち、計算を繰り返すたびに像に現れる線源分布の強度が変化してしまう。これについては、最適な繰返し回数を決定する理論が構築されていないなどの課題を持っているため、現在も様々な検討が行われている。

逐次近似画像再構成法(Ordered Subset Expectation Maximization: OS-EM 法)^[26]

OS-EM 法は ML-EM 法を基とした画像再構成法である。ML-EM 法が全ての検出部に対して応答関数を用意する必要があるのに対し、OS-EM ではサブセットと呼ばれる複数のセットの応答関数を用いて解析を行う。用意する応答関数の数を適切に選ぶことにより数を減らし、繰り返し計算の一回当たりの計算時間を減らすことができる。

OS-EM 法は ML-EM 法に比べ、測定前にシミュレーションあるいは実験により用意するデータを省略することができるが、応答関数の数を減らした分収束が遅く、繰り返し計算の回数を増やすことが求められる。また、ML-EM 法と同じく繰り返し回数によるデータの変動があり、最適な繰り返し回数を決定する指標が得られていない課題を依然として抱えている。

Stochastic Origin Ensemble (SOE)法^[29]

SOE 法は、コンプトンイメージングへの適用が新たに試みられている逐次再構成法であり、すでにいくつかの報告がなされている。SOE 法では、各コンプトンコーンが描くサークルが通過するピクセル上にランダムな点を選択しそれをさらにランダムに移動させたときに、画像再構成によって得られたヒートマップを利用して、周囲のヒートマップ上の強度(イベント密度と呼ばれる)の変化を用いて以前の点と新たな点のどちらがより真の飛来方向でとして確からしいかを推定する過程を繰り返す。これは、メトロポリス・ヘイスティング法を用いたモンテカルロマルコフ連鎖法に基づいており、この過程を複数回繰り返すことで事象は収束し、無限回の反復に近い値を得ることができる。SOE 法は ML-EM 法とは異なり、繰り返し回数を重ねることで不自然なピークが現れるといったことは避けられるが、原理上測定後の解析で行う必要があるためリアルタイム測定に不向きであること、収束が遅く時間を要することなどの欠点が挙げられる。

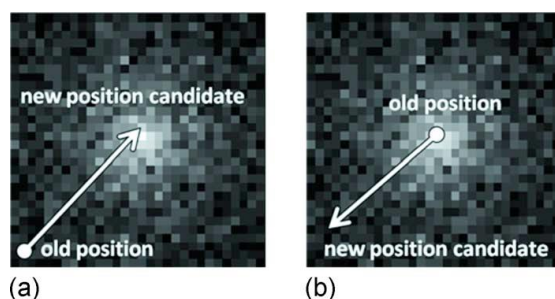


図 1-11 SOE 法の概念図 コンプトンコーンが通過するピクセルのうちランダムな位置に移動したときに、(a)周囲のイベント密度が大きくなったときは新たな点に移動し、(b)イベント密度が小さくなった時には移動は棄却される

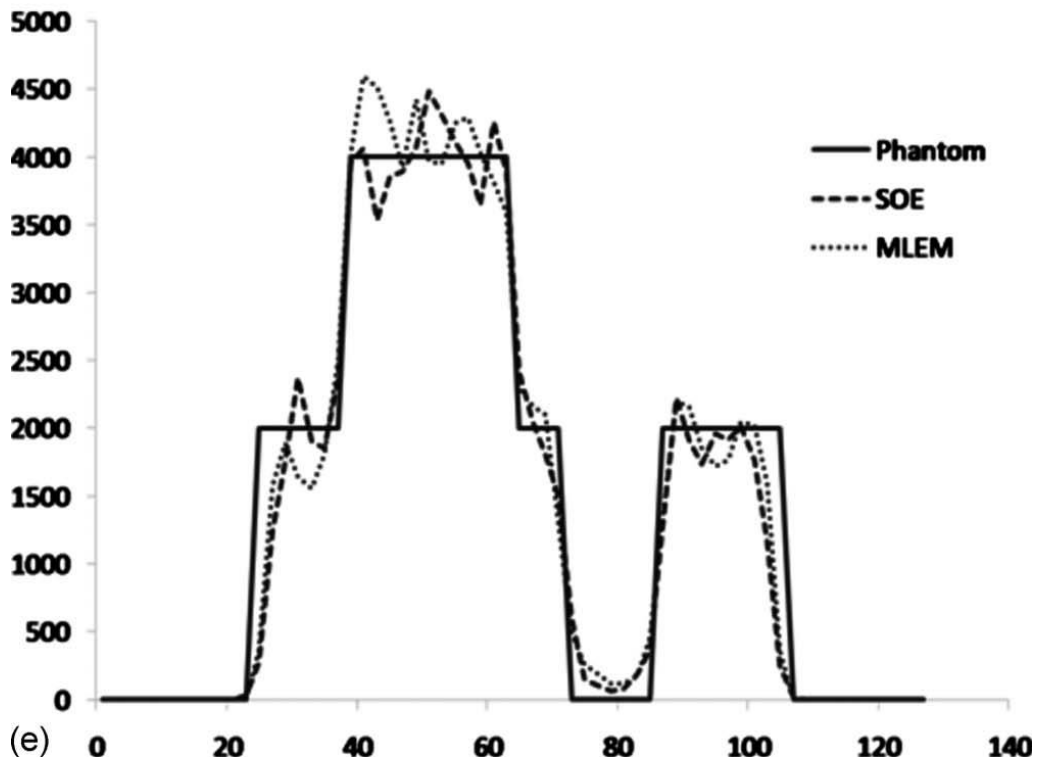
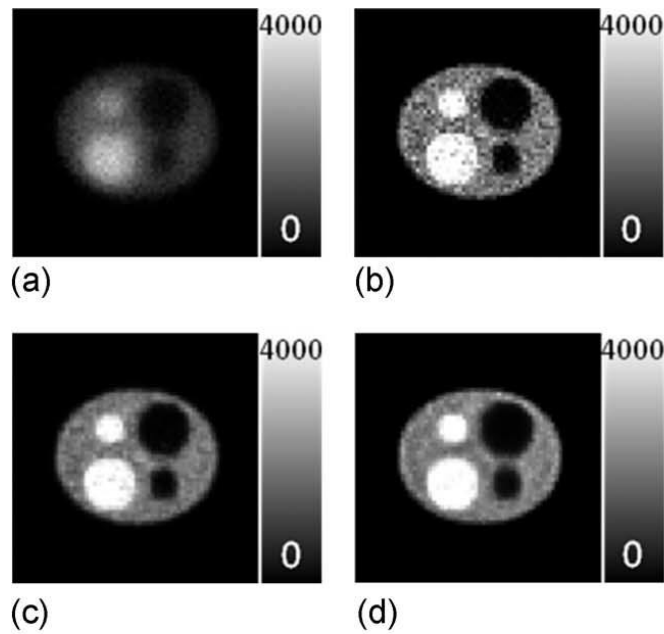


図 1-12 SOE 法を用いた再構成画像の補正 (上、a)SOE による 100 回繰返し (上、b)SOE による 1000 回繰返し (上、c)SOE による 2000 回繰返し (上、d)ML-EM による 50 回繰返し (下)真値と SOE、ML-EM との比較

1-5. 本研究の目的と論文の構成

本研究では、環境モニタリングにおいて、短時間で大まかな放射性物質分布を取得すること、また、核セキュリティ分野での放射性物質の探知といった応用を目指して、検出効率が高く小型で持ち運び可能な検出器の開発を行った。全方向に対してコンプトンイメージングを行う際に、2点の同時計数が生じた際に散乱点と吸収点を区別することなく扱った場合にも全方向ガンマ線イメージングが可能であることを実証した。また、コンプトンイメージングの課題である再構成画像の S/N 比の向上に関して、従来法とは異なり、逐次再構成法を用いない新たな方法を提案し、線源強度の情報を維持しつつ画像の角度分解能を向上させる重みづけ逆投影法を導入した。

本論文は 5 章で構成される。第 1 章では、コンプトンイメージングの原理を説明し、既存のコンプトンカメラとそれらの応用について紹介した。また、コンプトンイメージングにおける S/N 比向上の方法として、逐次再構成法をはじめとするいくつかの方法を挙げ、それらの利点および課題について紹介し、本研究の課題を明らかにした。

第 2 章では、本研究で用いた検出器の体系、特性を紹介し、シミュレーションによるモデル計算および原理実証実験を通じて全方向ガンマ線イメージングの実証を行った。本研究では、比較的エネルギー分解能に優れた CdTe 半導体検出器と検出効率に優れた Ce:GAGG シンチレータを用いたシンチレータスタック型検出器を用いており、それぞれの検出器を用いた全方向ガンマ線イメージングについて、シミュレーションと実験を通じて、原理実証を行った。

第 3 章では、本研究で新たに提案する重みづけ逆投影法について、その考え方とノイズ成分を抑制する方法について説明し、実際の実験結果に対して適用した結果を述べた。検出器の形状や分解能、測定するガンマ線のエネルギーに依らず有効な方法であることを確認し、どのような場合についても単純逆投影の場合と比べ、S/N 比、角度分解能を改善できることがわかった。

第 4 章では、実際の全方向ガンマ線イメージングの応用として、医療用サイクロترون施設における放射性物質の分布測定を行った結果について述べた。実際の応用に向けて、イメージング結果を直感的にわかりやすくするために、イメージング手法を改良し、実際の測定場所での光学的全天球写真とイメージング結果とを重ね合わせて表示させた。既存の分布測定の手法であるサーベイメータによる空間線量率分布の測定結果と照合し、イメージング結果の妥当性を評価した。また、分布を持つイメージング結果に対して重みづけ逆投影法が適用できることを確かめた。

第 5 章では、本研究の結論を述べるとともに、重みづけ逆投影法を用いた全方向ガンマ線イメージングの今後の展望について述べた。

第2章 全方向ガンマ線イメージングの原理実証

2-1. 全方向ガンマ線イメージングのための画像再構成アルゴリズム

コンプトンイメージングでは、ガンマ線が検出器内で1度だけコンプトン散乱した後、同じく検出器内の違う箇所で光電吸収されるイベントを収集する。このとき、散乱してから吸収されるまでの時間は極めて短くどちらが散乱でどちらが吸収であるかを時間的に区別することができない。従来の視野を限定したコンプトンカメラでは、前置検出器での相互作用点を散乱点、後方検出器での相互作用点を吸収点として扱いイメージングを行う。このとき、散乱と吸収の順序を誤認することが考えられるが、これは前置検出器に後方検出器より原子番号の小さい物質を用いることにより、低減することができる。対して、全方向ガンマ線イメージャでは、感度を均一にするために原子番号の異なる検出器を配置することは困難であるため、2つの相互作用点の順序をどのように扱うのかが重要になる。例えば、散乱点と吸収点の位置およびエネルギーを基準として判断を行う方法が考えられるが、散乱する角度はガンマ線のエネルギーにより頻度が増えるため、エネルギーによっては誤認率が高まってしまうなどの問題点が挙げられている^[28]。そこで、本検出器では、2つの相互作用点 P_1 と P_2 のうち、 P_1 が散乱点で P_2 が吸収点である場合と、逆に P_2 が散乱点で P_1 が吸収点である場合の2通りの場合についてそれぞれコンプトンコーンを計算し、その両方を逆投影して画像を再構成する。このとき、それぞれの相互作用位置での付与エネルギー量によっては、片方の場合についてしか散乱角が計算できない場合も存在するが、その場合には計算可能な片方の場合についてのみ逆投影を行う。アルゴリズムの一連の流れをまとめたものを図2-1-1に示す。

また、本研究では、測定データをもとにした線源方向推定像として、全天球イメージで用いられるモルワイデ図法を用いて像を作成した。モルワイデ図法は地球の温度や雨量など物理的な量の分布を表示する際に用いられることの多い図法で、全天球のうちどの位置においても面積が保存される正積図法であることから、方向別に得た画像に対して線源強度などを均一に評価可能であることが期待される。例として、モルワイデ図法を用いて描かれた地球とそれに世界の平均気温の分布を重ねたものを図2-1-2に示す。

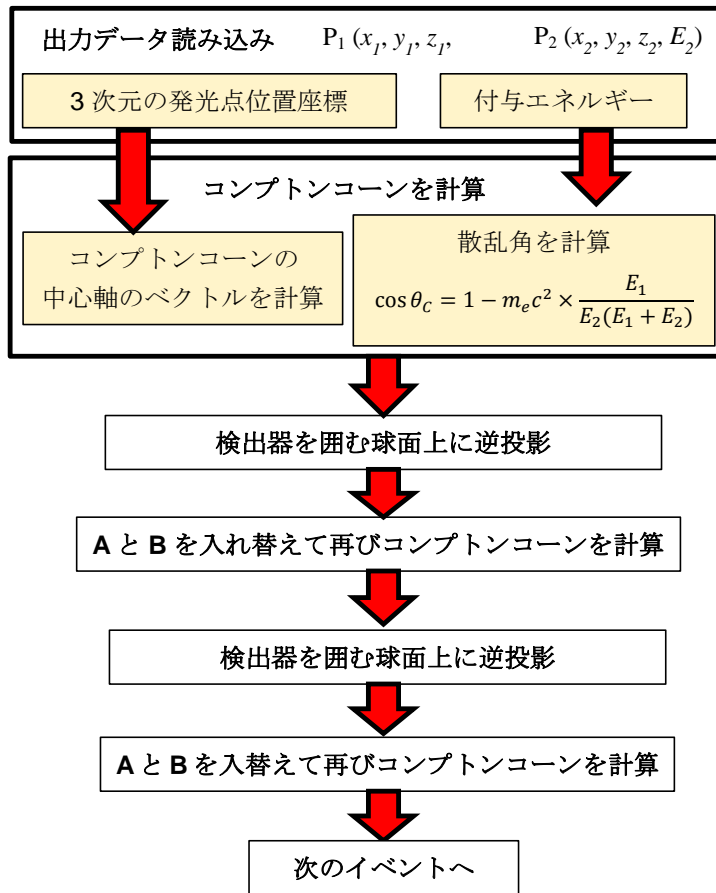


図 2-1-1 全方向イメージングのための画像再構成アルゴリズム

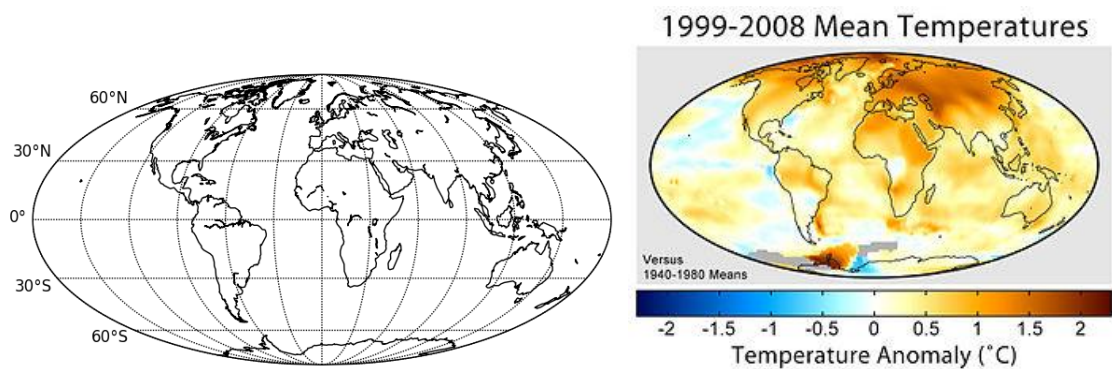


図 2-1-2 (左)モルワイデ図法を用いて描かれた地球儀のサンプル (右)モルワイデ図法を用いた平均気温上昇度の分布

2-2. 全方向ガンマ線イメージング用検出器

全方向視野を持ったガンマ線イメージャの実現には、ガンマ線の付与エネルギー量とガンマ線が相互作用した 3 次元的な位置情報の取得が必要となる。本研究では、環境中での使用を想定し、小型で持ち運び可能な検出器の実現を目指すため、常温で動作可能なスペクトロメータとして、シンチレーション検出器と CdTe 半導体検出器の 2 種類を用いた、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器とシンチレータスタック型検出器について、それぞれの特性評価を行った。

CdTe 半導体検出器は、エネルギー分解能に優れ、コンプトンイメージングの際に計算される散乱角度の不確かさを小さく抑えることができると考えられる。一方で、シンチレーション検出器は原子番号の大きいものを採用することで、ピーク効率を向上させ、より短時間での測定や低い強度のガンマ線源分布に用いることができると期待される。

2-2-1. CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器

半導体検出器は、ガンマ線が入射した際に生じる電子が検出器内を通過する際に他の電子を、価電子帯から伝導帯に励起することを利用し、ガンマ線由来の電子・正孔対によって生じる電流を測ることでガンマ線を検出する検出器である。この際生じる電荷量はガンマ線によって付与されたエネルギーに比例するため、スペクトロメータとして用いることができる。CdTe 半導体は常温で動作する半導体検出器であり、高純度 Ge 半導体検出器とは異なり冷却装置を必要としないため、環境中で用いる持ち運び可能な検出器に使用することができる。本研究では、 $8.0 \times 2.21 \times 12.5 \text{ mm}^3$ の大きさの CdTe 素子を $12 \times 30 \times 4$ 枚アレイ化したものを全方向ガンマ線イメージャとして用いた。図 2-2-1、図 2-2-2 に CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器の概要を示す。素子毎に、閾値以上の信号が検出された際に、タイムスタンプ、素子の空間座標、信号量が記録される。時間幅を適切に選択することにより同時計数を取得し、コンプトンイメージングを行う。タイムスタンプは、50 ns 単位で記録される。これを用いて同時計数をとる時間幅を調整し、時間幅内に入ったイベントすべてのエネルギーを積算した時のエネルギースペクトルを取得した。ピークのカウントが全体のカウントの中で占める割合が最大となる 1.5 μs を最適な時間幅として用いた。図 2-2-3 に、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器で測定した 662 keV ガンマ線のエネルギースペクトルの一例を示す。



図 2-2-1 CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器 (左)外観 (右)内部

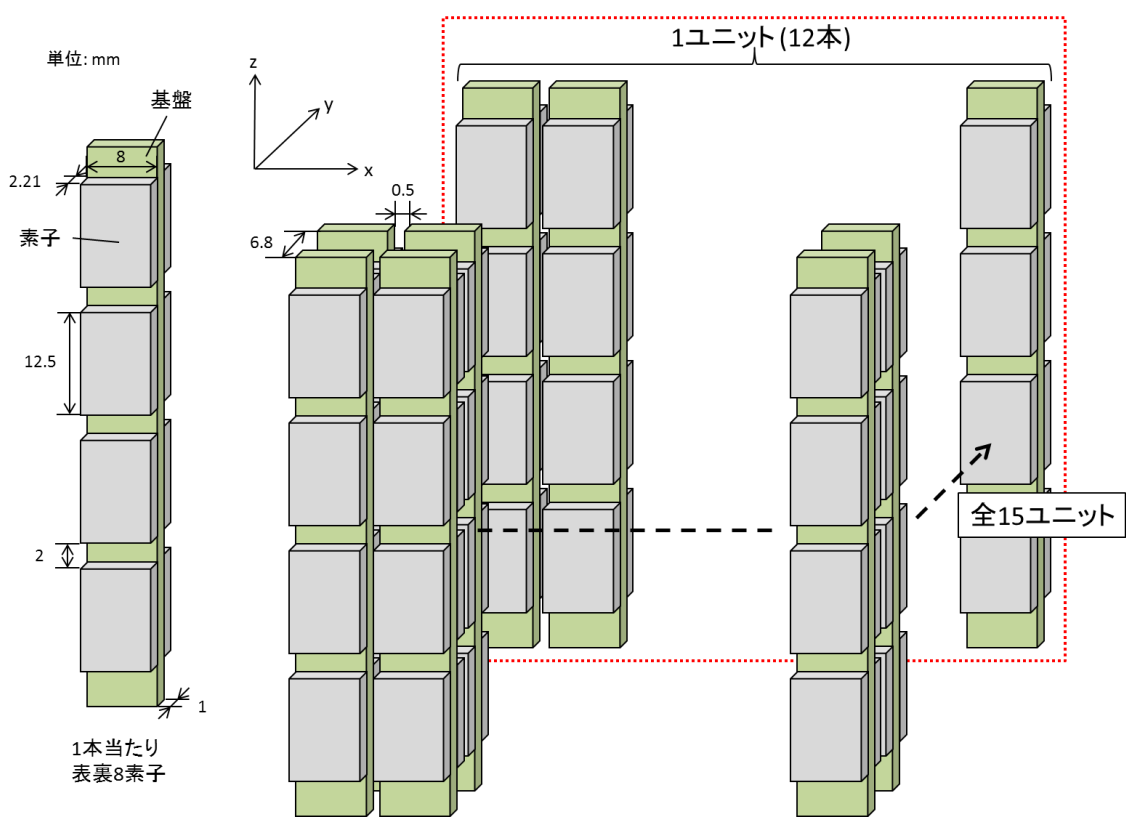


図 2-2-2 CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器体系図

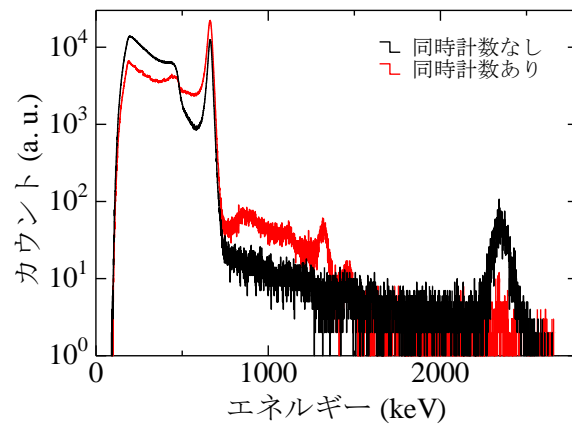


図 2-2-3 CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器で測定した ^{137}Cs 線源のエネルギースペクトル

2-2-2. シンチレータスタック型検出器

シンチレーション検出器は、ガンマ線スペクトロメータとして広く用いられている。ガンマ線がシンチレータ内で相互作用を起こすと、生成された電子がシンチレータ内を通過する際に周囲の電子を励起する。励起された電子は一定の時間経過とともに脱励起し、その際遷移するエネルギー準位差に応じた可視光を発光する。このとき励起される電子の数はガンマ線によって付与されたエネルギーに比例するため、放出される光子の数を測ることでエネルギー付与量を測定することができる。

Tl:NaI シンチレータは優れた発光量を持ち、最も広く用いられるシンチレーション検出器であるが、本研究では、高い発光量、大きな原子番号、高い密度を持った固体シンチレーション検出器である Ce:GAGG($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)^[31]を採用した。Ce:GAGG の特性および比較のために Tl:NaI の特性を表 2-1 に示す。

表 2-1 Ce:GAGG と Tl:NaI シンチレータの特性の比較

名称	Ce:GAGG ($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)	Tl:NaI
主な構成元素	^{64}Gd , ^{31}Ga	^{11}Na , ^{53}I
密度 (g/cm^3)	6.63	3.67
発光量 (photon/MeV)	~45,000	~40,000
潮解性	無し	有り
発光中心波長 (nm)	520	415

シンチレータスタック型検出器は、固体シンチレータである Ce:GAGG を角柱状のロッドにし、2次元に並べたものの両端に2次元位置敏感型光検出器を設置した形状になっており、前述のようにシンチレータ内部でガンマ線によるエネルギー付与量に応じて生じる光子を数える。シンチレータ内で生じた光子はロッドの両端に届くまでに指数関数的に減衰し、数が減少するため、ロッドの両端で光子を測定しその比をとることにより、ロッド長軸方向の位置を推定する。一方の端から相互作用点までの距離を d 、ガンマ線との相互作用点で生じる光子の数を N_0 とすると、両端に届く光子の数 N_1 、 N_2 は、ロッドの長さ L 、減衰係数 μ を用いて、

$$N_1 = N_0 \exp(-\mu d), \quad N_2 = N_0 \exp\{-\mu(L - d)\}$$

で表される。したがって、長軸方向の相互作用位置 d は、

$$d = \frac{L}{2} \left(1 + \frac{1}{\mu L} \ln \frac{N_2}{N_1} \right)$$

となる。また、両端で測定された光子数を用いて、発生した光子数 N_0 は、

$$N_0 = N_1 / \exp(-\mu d) \quad \text{または} \quad N_0 = N_2 / \exp\{-\mu(L - d)\}$$

で表すことができる。以上の式を用いると、シンチレータロッドの内部でのガンマ線との相互作用位置とその位置でのエネルギー付与量を算出ことができ、これらのロッドを2次元のアレイにすることにより、3次元位置情報とエネルギー付与量を得る。

2次元の位置敏感型光検出器は、シンチレーション検出器用の光検出器として従来用いられてきたマルチアノード光電子増倍管(Multi-Anode Photo Multiplier : MA-PMT)または、半導体光検出器である Multi Pixel Photon Counter (MPPC)を用いることができる。Ce:GAGG は従来のシンチレーション検出器と比較して発光中心波長が長波長であり、量子効率の観点から、長波長側により高い感度を持つ MPPC との組み合わせが有効であると考えられる。また、MA-PMT の動作には-1000 V 程度の高電圧源が必要であるのに対し、MPPC の動作には安定直流電圧源のみが求められるため、装置全体を軽量でコンパクトなものにできる。本研究では、シンチレータスタック型検出器として、 $2.8 \times 2.8 \times 50 \text{ mm}^3$ の Ce:GAGG ロッドを用いた 16×16 本のシンチレータスタックと 8×8 チャンネルの MA-PMT を組み合わせもの(プロトタイプ A)と、同サイズのロッドを 8 mm ピッチで 8×8 本アレイし各ロッドの両端に MPPC を取り付けたもの(プロトタイプ B)の2種類を試作した。

それぞれの試作検出器について、 ^{137}Cs 線源から放出される 662 keV のガンマ線を測定した際のエネルギースペクトルを測定した。また、図 2-2-6 に示すように、ロッド長軸方向の一部にのみガンマ線が入射するよう 1 mm のスリット状の

コリメータを用いて実験を行い、各検出器の長軸方向の位置分解能の評価を行った。代表的なものとしてプロトタイプ B で測定したエネルギースペクトルと長軸方向位置分解能を図 2-2-7 に示す。

本検出器では、いずれかのチャンネルに閾値以上の信号が検出されたときに、全てのチャンネルの信号量を出力する形式で同時計数をとる。その際、各イベントで閾値以上の信号量をもつチャンネルが 2 つあるものを抜き出して、イメージングに用いた。但し、プロトタイプ A については、それぞれのロッドと光検出器のチャンネルが 1 対 1 に対応していないため、後述する読み出し方法を用いて相互作用したロッドの特定を行った。

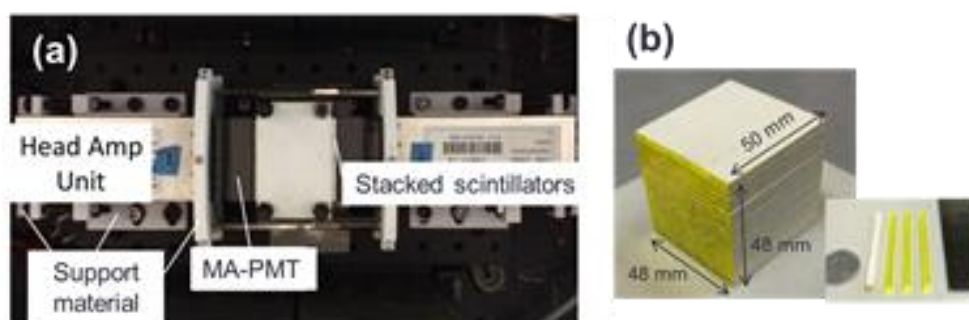


図 2-2-4 16×16 本のシンチレータスタックを採用したプロトタイプ A の体系図

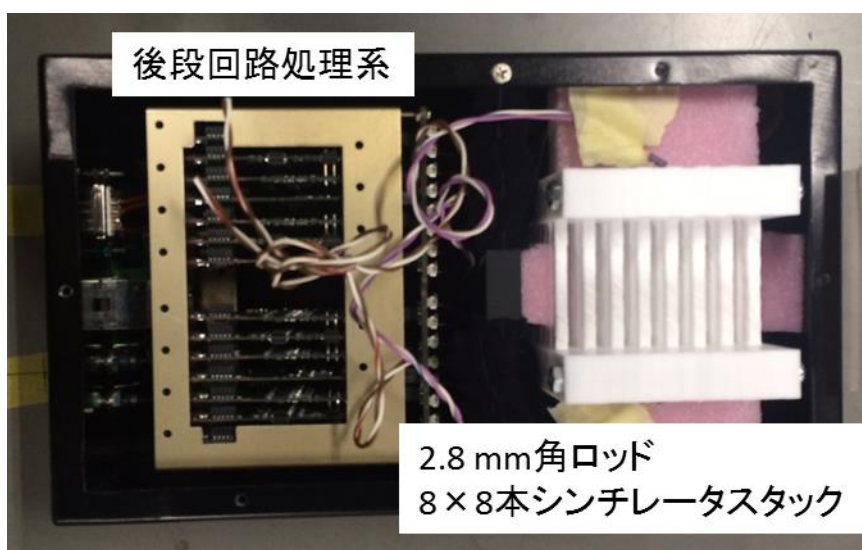


図 2-2-5 8×8 本のシンチレータスタックを採用したプロトタイプ B の体系図

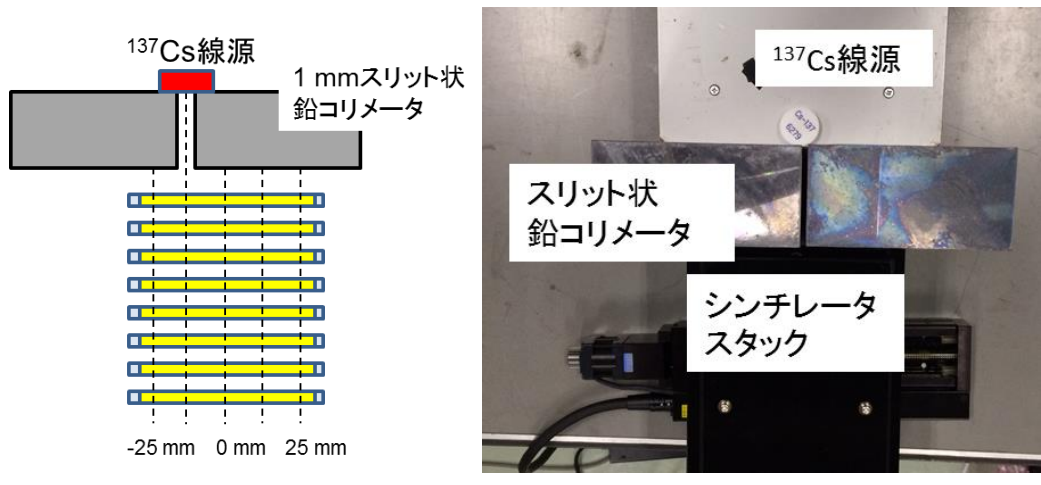


図 2-2-6 長軸方向位置分解能評価のためのスリット状コリメータを用いた実験の体系

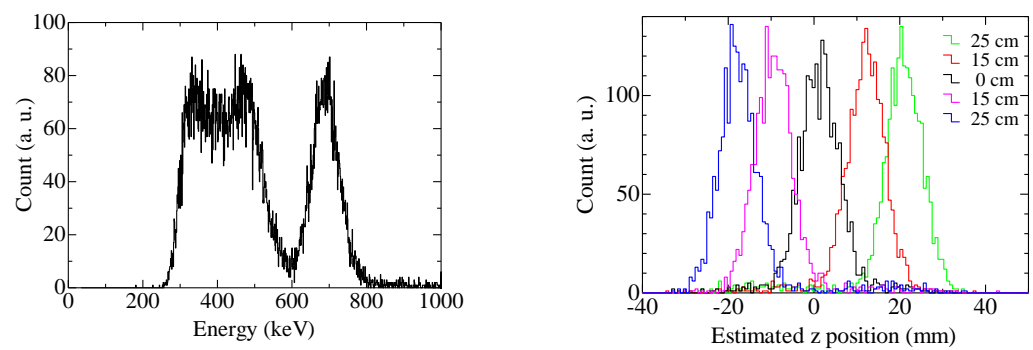


図 2-2-7 プロトタイプ B を用いた(左)¹³⁷Cs 線源のエネルギースペクトルおよび(右)長軸方向位置分解能の測定結果

2-3. シンチレータスタック型検出器における小領域重心演算法による相互作用位置の特定

シンチレータスタック型検出器のうち、プロトタイプ A ではアレイ化したシンチレータロッドの数が 16×16 であるのに対し、光検出器として用いる MA-PMT のチャンネル数が 8×8 チャンネルであるため、ガンマ線が相互作用を

起こしたロッドを特定するために小領域重心演算を用いた。各シンチレータロッドのサイズが $2.8 \times 2.8 \text{ mm}$ 角であるのに対し、MA-PMT の各チャンネルサイズは $6.08 \times 6.08 \text{ mm}^2$ であるため、反射材としてそれぞれのロッドに巻き付けたテフロンテープを考慮すると、各チャンネルに 2×2 本のロッドが接合する位置関係になる。ガンマ線由来で放出される可視光は理想的にはロッドそのものが接しているチャンネルのみに届くが、実際には接しているチャンネルの周りにクロストークとして染み出してしまいが、1つのチャンネルに対して4本のロッドの配置されている位置が対称でないため、周辺のチャンネルで検出されるクロストークにも相互作用したロッドによって偏りが生じる。小領域重心演算法では、これを利用して周囲のクロストークの量から重心位置を求め、 2×2 本のシンチレータのうちどのロッドの内部で相互作用を起こしたのかを推定する。本検出器はコンプトンカメラとして用いるため、測定されたイベントのうち、2つの高い信号量を持つイベントを用いてイメージングするが、最も高い2つの信号が隣り合ったチャンネルで検出された場合には、小領域重心演算を適用することができないため、これらのイベントはプロトタイプ A では用いなかった。

図に小領域重心演算の概念図を示す。局所的に高い信号量が得られたチャンネルを中心として、周囲8チャンネルの2次元方向位置座標を x_i, y_i 、信号量を h_i とすると、小領域重心演算により、2次元での発光位置 X, Y は、

$$X = \frac{\sum_{i=1}^9 h_i x_i}{H}, \quad Y = \frac{\sum_{i=1}^9 h_i y_i}{H}$$

で表される。ここで、 H は中心とその周囲の8チャンネルの全9チャンネルで検出された信号量の総和であり、

$$H = \sum_{i=1}^9 h_i$$

で表される。まず 2×2 本のシンチレータスタックを用いて1チャンネルのみにシンチレータを配置し、周りのチャンネルのクロストークを用いることによってそれぞれのロッドが特定可能であることを確かめた。実験体系および測定結果から得られた位置 X, Y の頻度分布を図 2-3-1、2-3-2 に示す。さらに、すべてのロッドを配置し、 ^{137}Cs 線源を用いて測定したデータに対して、小領域重心演算法を適用した際に推定された位置 X, Y の頻度分布を図 2-3-3 に示す。図に現れているように、MA-PMT の各チャンネル上に4つずつのピークが確認され、それぞれのロッドを分けて測定することができることが示された。但し、最も外殻の層では、周囲のチャンネルのクロストークの情報が不足するために4つのピークの判別が困難であったため、これらの位置での相互作用を含むイベントをイメージングに用いるイベントから取り除いた。

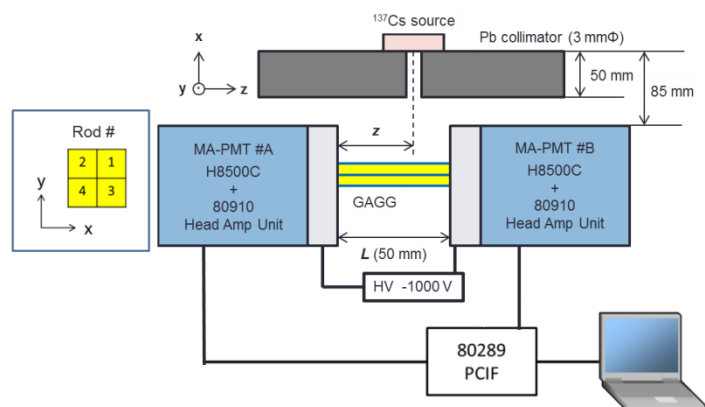


図 2-3-1 2×2本のシンチレータスタックを用いた小領域重心演算法によるロッド特定実験の実験体系

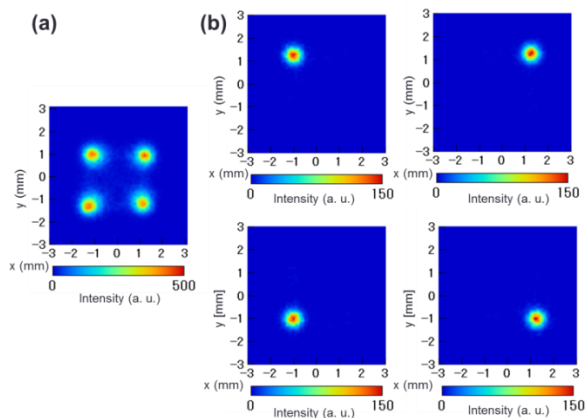


図 2-3-2 1チャンネル上に4本のシンチレータロッドを設置した場合の小領域重心演算によって推定された相互作用位置の頻度分布

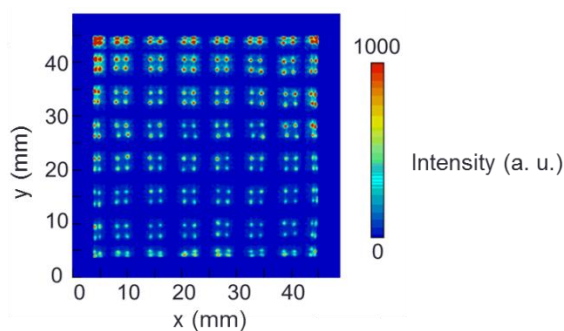


図 2-3-3 16×16本のロッドに対して8×8チャンネルのMA-PMTで測定した結果について、小領域重心演算を用いて発光したロッドを推定した時の2次元ヒストグラム

2-4. シミュレーション計算に基づく検討

モンテカルロシミュレーションを用いたモデル計算を行った。シミュレーションには、電磁カスケードシミュレーションコード EGS5 を用いた。図 2-4-1 に EGS5 で使用した Ce:GAGG16×16 本、8×8 本(2.8 mm 角)と CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器の計算モデル体系を示す。線源は ^{137}Cs 線源を模擬し、662 keV 単色の点線源とした。このうち、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器と 2.8 mm 角の Ce:GAGG シンチレータロッドを 8×8 本用いたプロトタイプ B について、検出器の正面および上部に線源を設置した場合を模擬し、シミュレーションおよび画像再構成を行った。ここで、エネルギー分解能および、シンチレータロッドの長軸方向の位置分解能は、前節で実験的に求めた値を用いて、不確かさをつけた。図 2-4-2 にシミュレーション結果の一例として、それぞれの検出器に対して 50 本のガンマ線を照射したときのトラック図を示す。

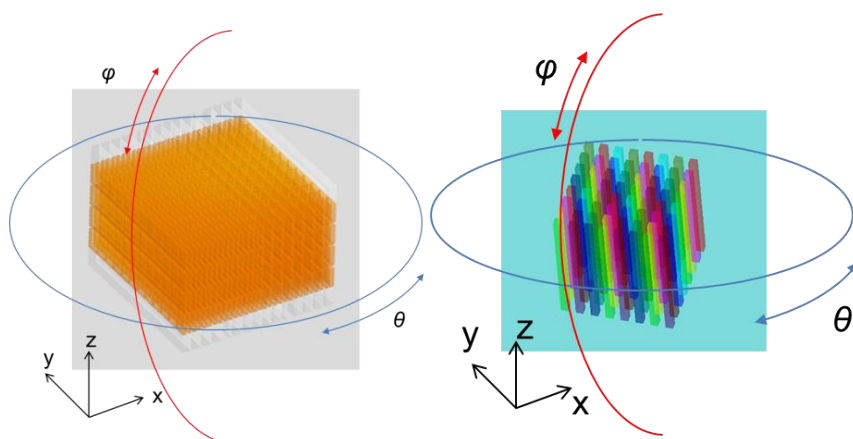


図 2-4-1 シミュレーション上で模擬した各検出器のモデル (左)CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器 (右)8×8 本シンチレータスタック型検出器

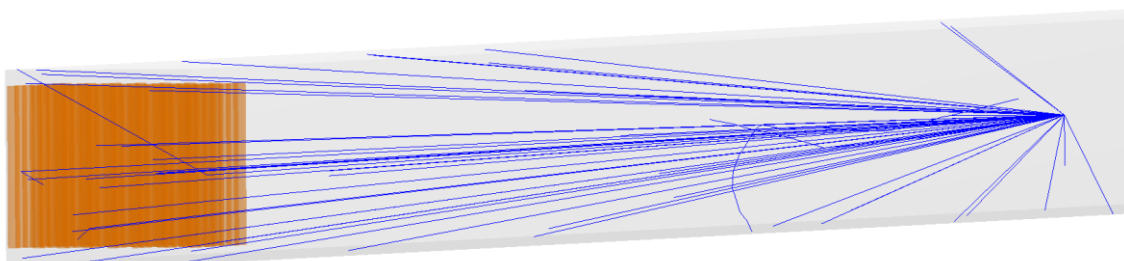


図 2-4-2 シミュレーションによって得られたガンマ線のトラック図
青線がガンマ線の飛跡を表している

シミュレーション結果のうち、1つの光子の運動中に2つの素子・シンチレータロッドにエネルギー付与があったイベントのみを抜き出しコンプトンイメージングを用いて画像再構成を行った。

はじめに、CdTe 半導体 3次元アレイ検出器のモデルに対して、x, y, z それぞれの方向に検出器中心から 20 cm 離れた位置に等方点線源を設置した場合のシミュレーションを行った。線源は ^{137}Cs 線源を模擬し、662 keV の単色線源とした。図 2-4-3 は、各方向に設置した場合のシミュレーション結果から、コンプトンイメージングにより線源方向を再構成した結果である。ここで、相互作用位置は CdTe 半導体検出器の素子中のいずれかの位置であるため、素子のサイズを用いて一様分布で不確かさを付与している。コンプトンイメージングにより再構成される画像では、いずれの方向に対しても線源方向に単一のピークを確認できている。

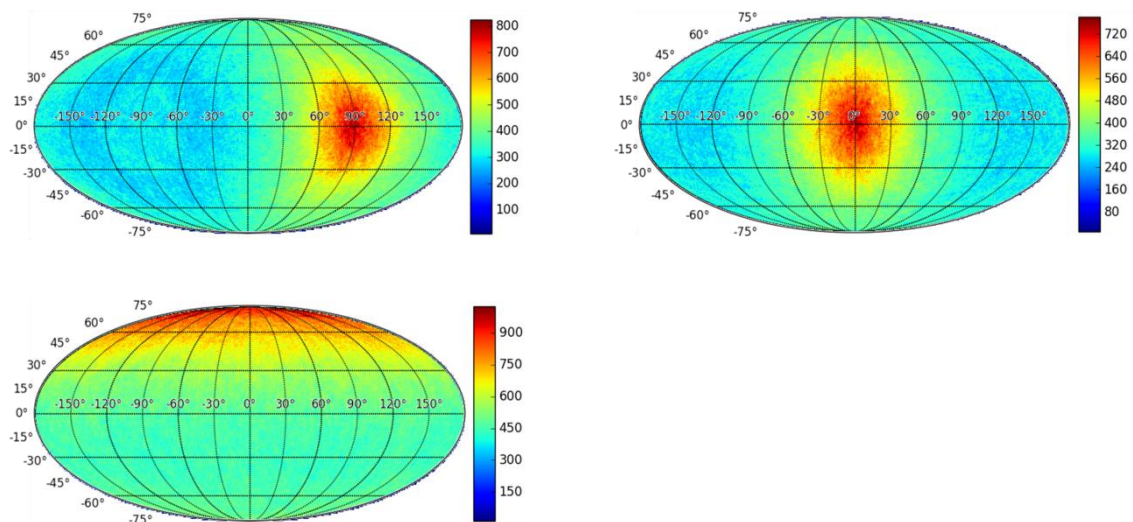


図 2-4-3 CdTe 半導体 3次元アレイ検出器による ^{137}Cs 線源のイメージングシミュレーション結果 線源方向は、(左上) $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 0^\circ)$ (右上) $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ (下) $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 90^\circ)$

シンチレータスタック型検出器のモデル計算では、前述のようにロッド長軸方向に対しては、実測した位置分解能を用いてガウス分布に従う不確かさを付与した。x, y 方向に関しては、正方形のロッドの中心の位置を相互作用位置として扱った。CdTe 半導体 3次元アレイ検出器の場合と同様に、 ^{137}Cs 線源を模擬した単色等方線源を検出器周りの各方向に設置した場合のシミュレーションを行い、画像再構成を行った。得られた再構成画像を図 2-2-4 に示す。全方向に対し

て線源方向に正しくピークが得られたが、z方向に設置した場合には、線源方向からみた検出器の断面積が小さくなるため、発生するイベント数に対して、測定されるイベント数が減少することが分かった。

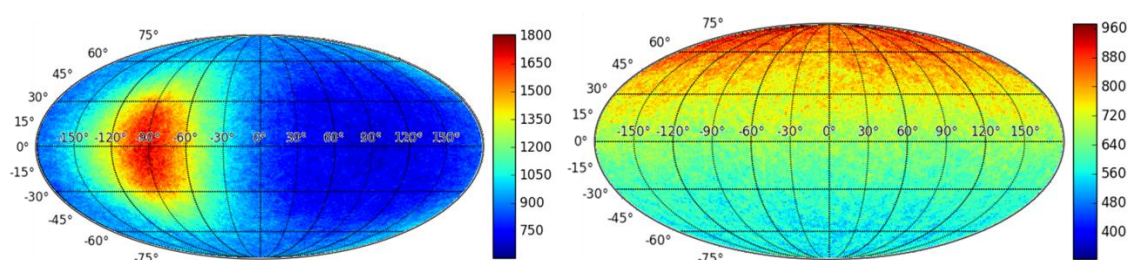


図 2-4-4 プロトタイプ B による ^{137}Cs 線源のイメージングシミュレーション結果 線源方向は、(左) $(\theta, \varphi) = (-90^\circ, 0^\circ)$ (右) $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 90^\circ)$

2-5. 全方向ガンマ線イメージングの原理実証実験

2-5-1. CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器を用いた全方向ガンマ線イメージング

CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器はシンチレータスタック型検出器に比べ優れたエネルギー分解能を持つが、位置分解能が 3 次元のそれぞれの方向について異なるため、方向別に角度分解能が異なることが予想された。そこで、CdTe 半導体 3 次元アレイの x、y、z それぞれの方向に設置した ^{137}C 線源について、それぞれ測定を行い、結果を比較した。以下では、再構成画像のすべてのピクセルの値を頻度分布化し、その時の最頻値をノイズレベルとして扱った。また、その時のノイズレベルとピーク値の半値全幅を角度分解能として用いた。

図 2-5-1 はそれぞれの方向別に取得した ^{137}Cs 線源の逆投影図である。予想された通り、方向別に角度分解能が大きく異なる像が得られ、最も良かった x 方向からの入射では 83° が得られたのに対し、z 方向から入射させた場合には 126° まで劣化することが分かった。x 方向からの入射の場合には検出器の断面像が 12×4 の粗いものであるのに対し、z 方向からの入射では検出器の断面像は 12×30 とよりピクセル数の多い、細かな検出部となっている一方で、入射方向に対して奥行き方向のピクセル数は x 方向からの方が圧倒的に多く、位置分解能も高いことから、得られる再構成画像の角度分解能には、ガンマ線入射方向に対して奥行き方向の分解能による寄与が大きいが示された。検出器の位置分解能による角度推定の精度への寄与では、入射方向に対して奥行き方向の厚さの

寄与が最も大きくなることが報告されている[32,33]。

異なるエネルギーのガンマ線であってもイメージングが可能であることを検証するために、 ^{60}Co 線源の測定を行った。図 2-5-2 に示す結果の通り、 ^{60}Co 線源では、角度分解能は 60° となり、 ^{137}Cs 線源に比べてより優れた分解能を得ることができた。これは、ガンマ線のエネルギーが高いことにより前方散乱事象が増えたことによるものだと考えられる。

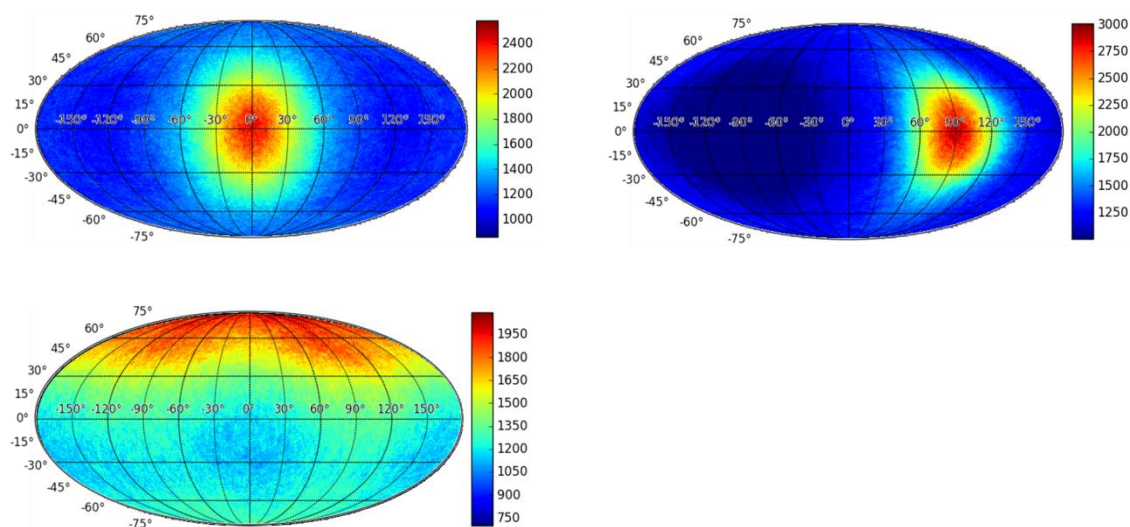


図 2-5-1 CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器を用いて測定した ^{137}Cs 線源の再構成画像 線源方向は、(左上) $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$ (右上) $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 0^\circ)$ (下) $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 90^\circ)$

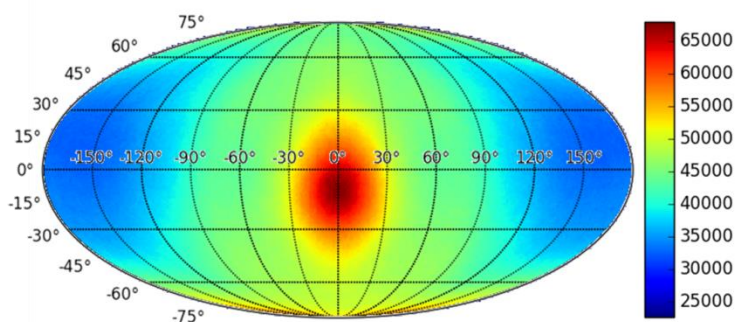


図 2-5-2 CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器による ^{60}Co 線源の再構成画像 線源方向は、 $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$

2-5-2. シンチレータスタック型検出器を用いた全方向ガンマ線イメージング

全方向ガンマ線イメージングの原理実証実験として、様々な方向に設置した点線源の測定を行った。図 2-5-3 に、8×8 本のシンチレータロッドを用いたプロトタイプ B を用いた際の実験体系を示す。本実験では、全ての方向に対して正確に線源方向が推定できるかどうかの検証を行うために、 ^{137}Cs 線源を検出器の xy 平面上(θ 方向)、xz 平面状(φ 方向)について位置を移動させて測定を行った。また、 ^{60}Co 、 ^{22}Na 線源といった放出するガンマ線のエネルギーが異なるものに対しても同様にイメージングが可能であることを確認するとともに、それらを同時に測定した場合に、エネルギーでイベントを選択することで、核種別に線源方向が推定可能であることを確かめる実験を行った。各線源が放出するガンマ線を測定対象とするため、次の表 2-2 に示すものをエネルギー幅として用いた。

表 2-2 ガンマ線核種別のエネルギー幅

核種	^{137}Cs	^{60}Co	^{22}Na
ガンマ線エネルギー(keV)	662	1173、1332	511、1250
エネルギー幅 (keV)	600-720	1100-1400	460-560

図 2-5-5 は、コンプトンイメージングの単純逆投影法を用いて各方向に設置した ^{137}Cs 線源の方向を推定した結果となっている。ここでは、 ^{137}Cs 線源のイメージングのため、測定データのうち、2 点で付与されたエネルギーの和が 600 keV から 720 keV のイベントのみを用いて逆投影を行っている。線源位置が変化すると推定される線源の方向も追従しており、検出器のあらゆる方向について線源方向を正確に表していることが確認できた。これにより、シンチレータスタック型検出器を用いた全方向ガンマ線イメージングが実証された。

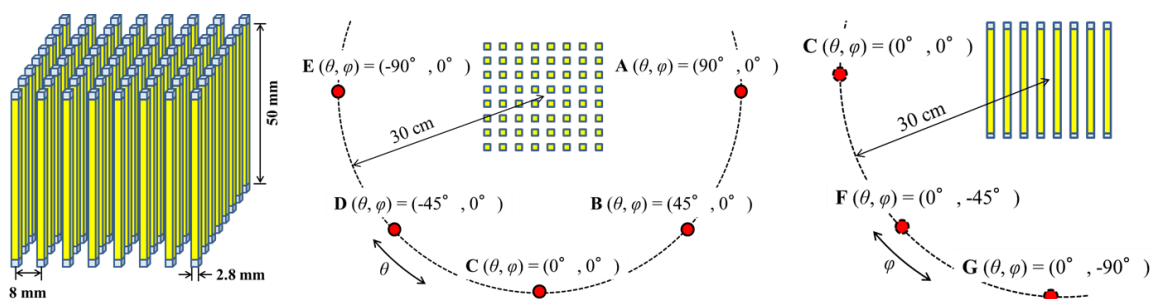


図 2-5-3 プロトタイプ B 検出器を用いた全方向ガンマ線イメージングの実証実験の実験体系

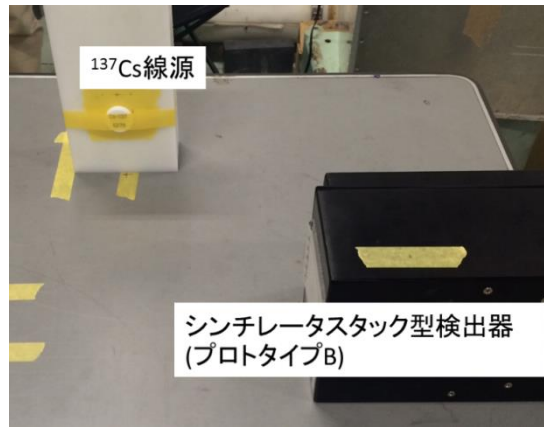


図 2-5-4 プロトタイプ B を用いた ^{137}Cs 線源測定の様子

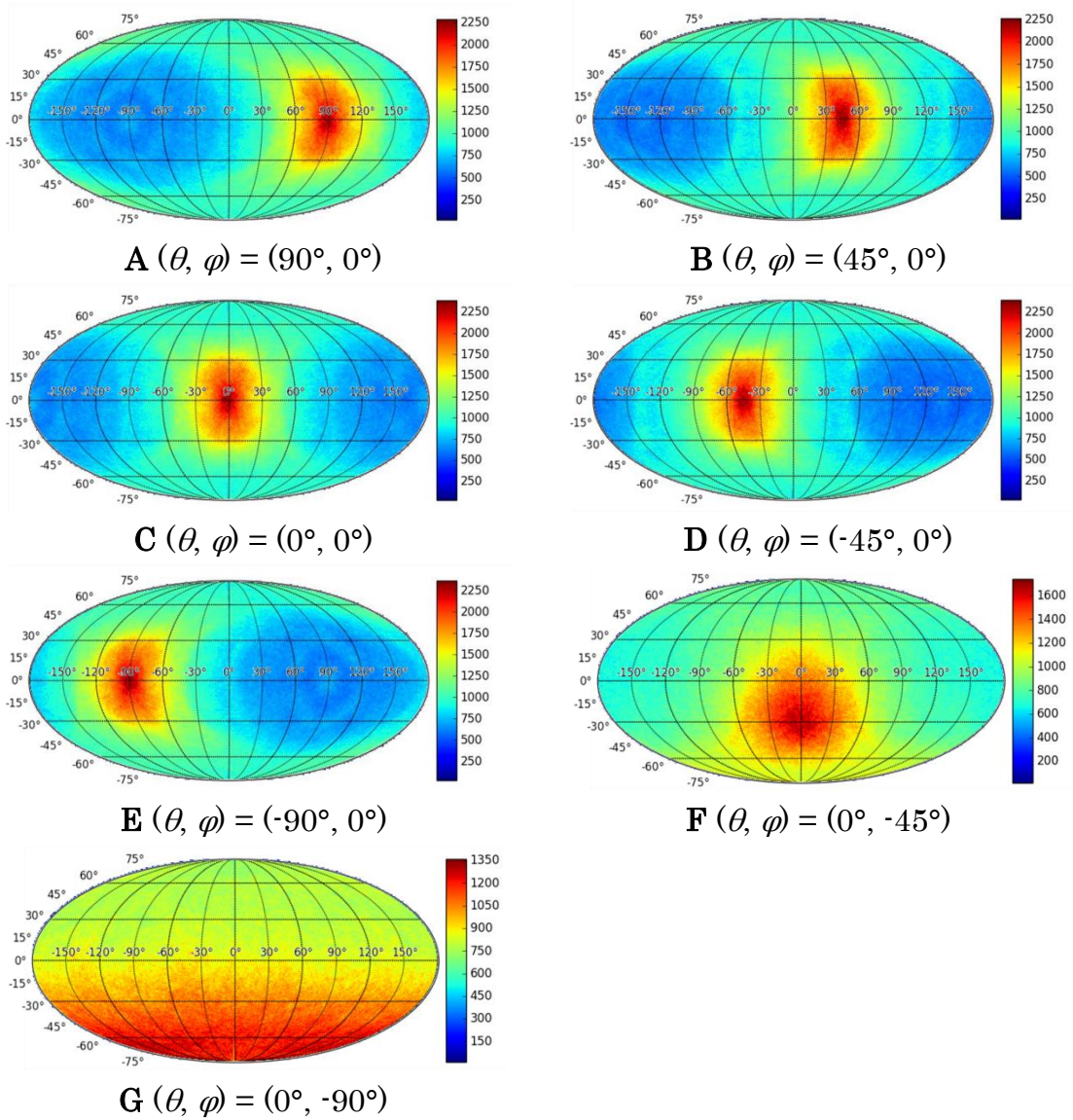


図 2-5-5 (θ, φ) 方向に設置した ^{137}Cs 線源の再構成画像

得られた各画像についてラインプロファイルを用いて角度分解能の評価を行った。図 2-5-6 は、線源位置を θ 方向に変化させていった時の各方向での線源強度のラインプロファイルである。これにより、 θ 方向については角度分解能 $70 \pm 4^\circ$ (半値全幅) で推定可能であることが分かった。また、 θ 方向では再構成画像上のピーク強度がどの方向に対しても同程度となったが、 $\theta = -90^\circ$ の時には、信号処理系が検出部分と線源との間に挟まれる位置関係となるため、 $\theta = -135^\circ$ 、 -90° 、 -45° ではピーク強度の若干の減少が確認された。また、 ^{60}Co 線源、 ^{22}Na 線源についても同様に単純逆投影によって線源方向を推定することができた。図 2-5-7 に逆投影結果を示す。

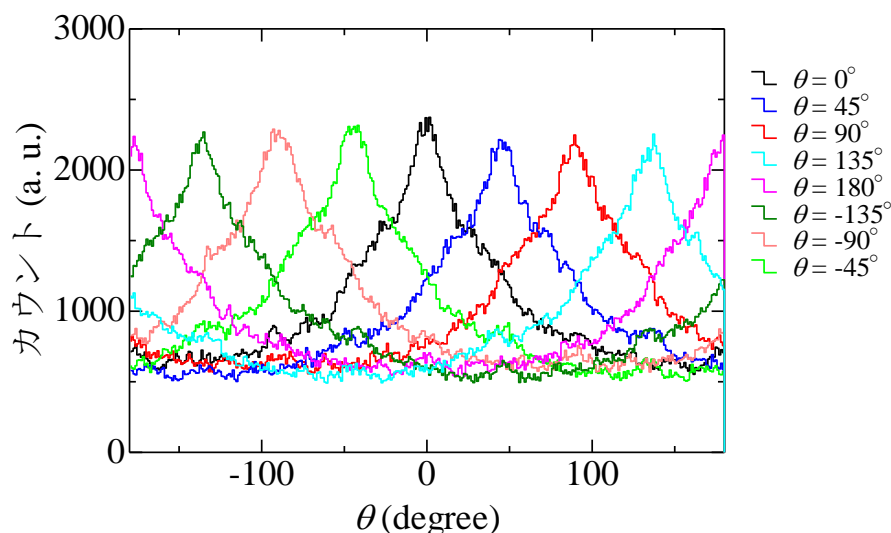


図 2-5-6 各方向に設置した ^{137}Cs 線源の再構成画像の θ 方向のラインプロファイル

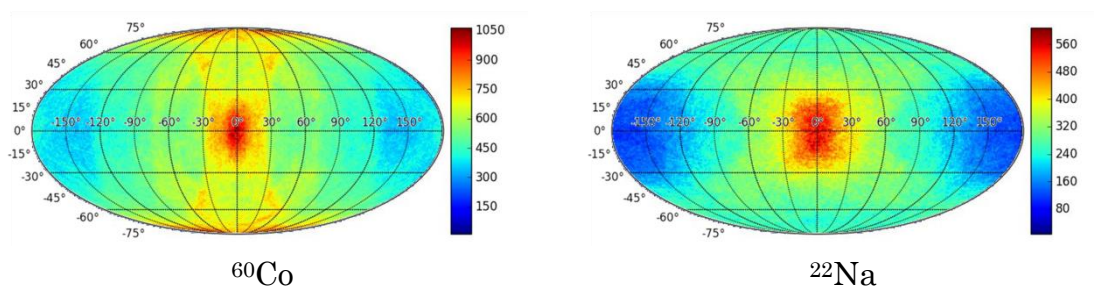


図 2-5-7 ^{60}Co 、 ^{22}Na 線源の再構成画像 線源方向は、 $(\theta, \varphi) = (0^\circ, 0^\circ)$

複数の線源を同時に測定する実験として、 $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 0^\circ)$ 、 $(\theta, \varphi) = (-90^\circ, 0^\circ)$ といった検出器を挟んで対向する方向に、それぞれ ^{60}Co 線源と ^{137}Cs 線源を設置した場合と、 90° 毎に ^{22}Na 線源、 ^{60}Co 線源、2つの ^{137}Cs 線源の計4つの線源を設置した場合について測定を行った。図2-5-8に実験体系を示す。また、各測定で得られたエネルギースペクトルを図2-5-9に示す。測定結果から各エネルギーウインドウ別にイメージングを行った結果を図2-5-10、図2-5-11に示す。ここで、全エネルギーは測定対象を絞らずに、シンチレータスタック型検出器の検出閾値として100 keVを用いていることから、2点でのエネルギー付与量の和が200 keVから2000 keVのものを用いたものを指す。

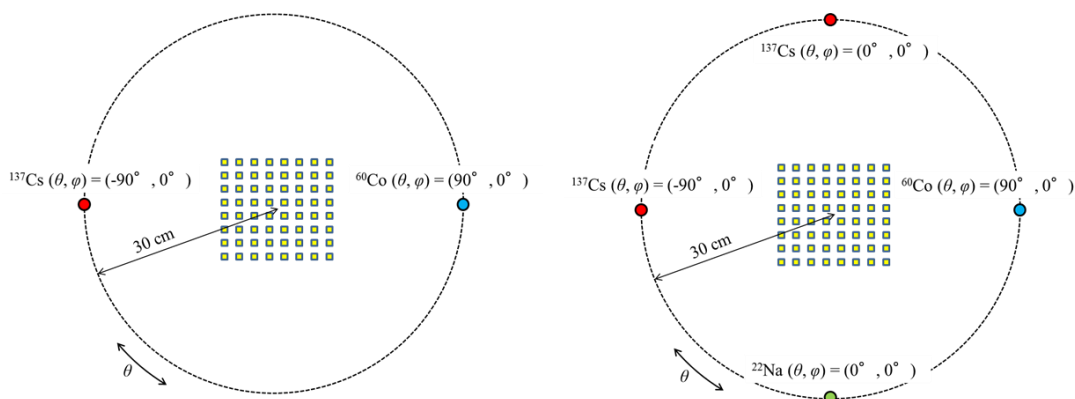


図2-5-8 複数線源の同時測定 (左、複数線源測定#1) ^{137}Cs と ^{60}Co の測定 (右、複数線源測定#2) ^{22}Na 、 ^{60}Co 、 $^{137}\text{Cs}\times 2$ の測定

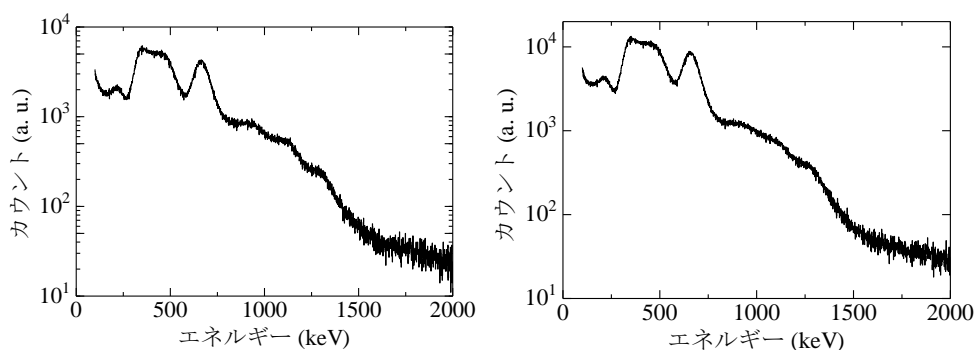


図2-5-9 複数線源の同時測定で得られたエネルギースペクトル (左)複数線源測定#1 (右)複数線源測定#2

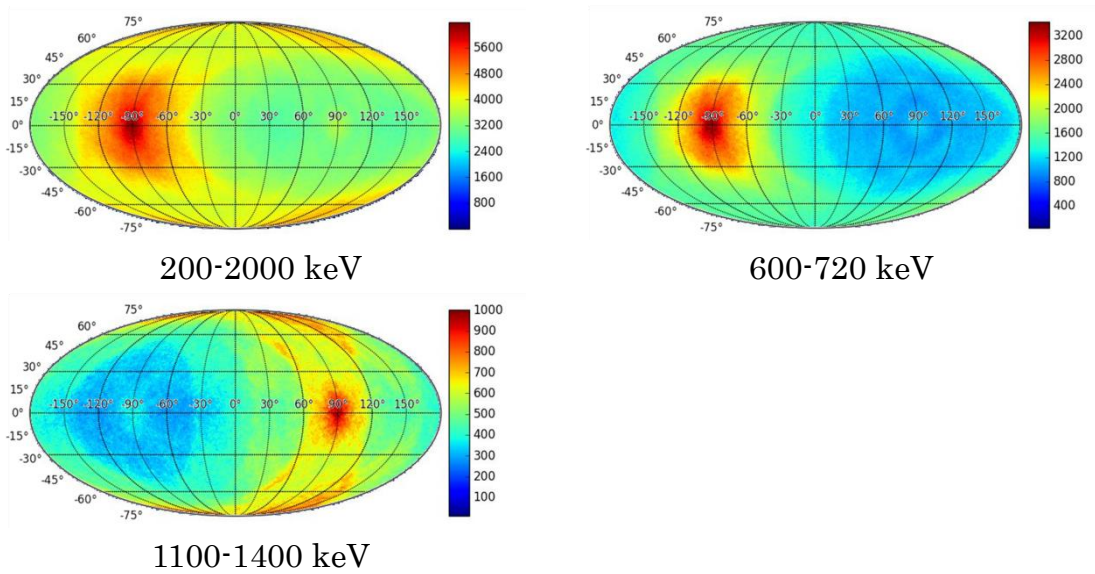


図 2-5-10 複数線源測定#1 のエネルギー毎の再構成画像

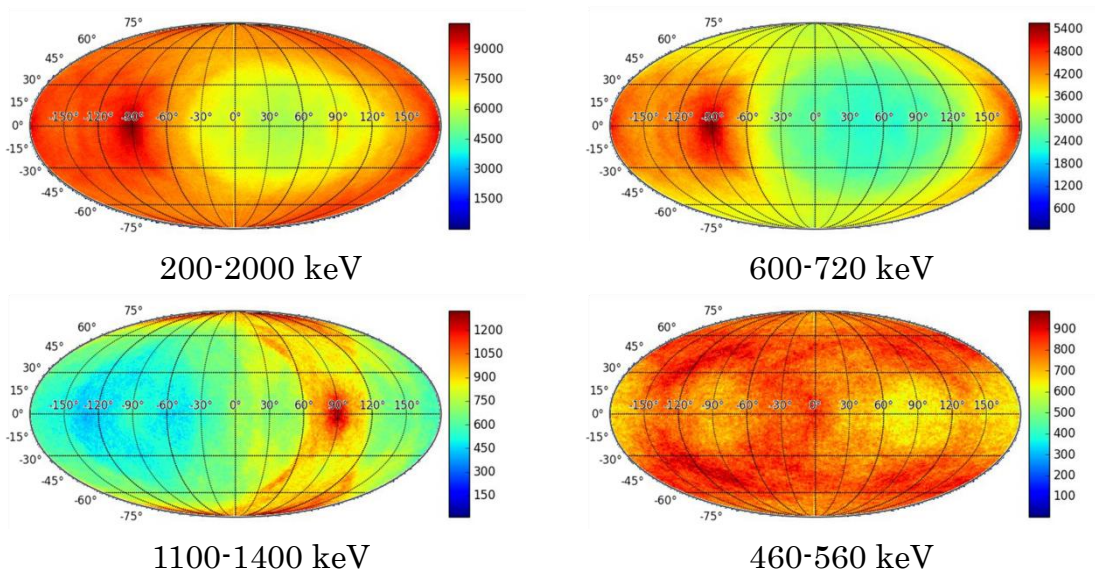


図 2-5-11 複数線源測定#2 のエネルギー毎の再構成画像

複数線源測定#1 では、全エネルギーをイメージング対象とした場合には、 ^{137}Cs 線源の設置方向にピークが確認されたが、 ^{60}Co 線源は相対的に強度が弱いため設置した方向にピークを確認することはできなかった。エネルギーごとに測定データを選択してイメージングした結果では、測定対象として選んだ核種を設

置した方向のみにピークが得られた。これにより、付与エネルギー量で測定データ選択することにより各種別にそれぞれの像を取得することができるという、コンプトンカメラの特徴を生かしたイメージングを実証することができた。一方、複数線源測定#2では、全エネルギーでのイメージングでは、 ^{137}Cs 線源の方向にピークが確認できるものの、バックグラウンドレベルが高く全体にカウントが広がっている。エネルギーごとのイメージングでは、 ^{60}Co 線源、 ^{137}Cs 線源のピークは明らかになるものの、 ^{22}Na 線源については、線源方向にピークを確認できなかった。これは、測定対象とした ^{22}Na の511 keVのガンマ線のエネルギーが ^{137}Cs 線源の662 keVと近く、また、 ^{137}Cs 線源の強度が相対的に高いことから、662 keVガンマ線のコンプトン連続部のノイズとしての影響が大きいことが原因と考えられる。

2-6. まとめ

ガンマ線の相互作用点の位置情報を3次元的に取得可能なスペクトロメータであるCdTe半導体3次元アレイ検出器とシンチレータスタック型検出器を用いた全方向ガンマ線イメージングについて、モンテカルロシミュレーションを用いたモデル計算および実証実験を通じてその原理実証を行った。2つの相互作用点が同時に計測されたイベントを用いた全方向ガンマ線イメージングアルゴリズムとして、それぞれの相互作用点を区別せずに両方が散乱点・吸収点として扱える場合には、両方の場合についてコンプトンコーンを計算し、逆投影する方法を用いた。検出器周囲のあらゆる方向から飛来するガンマ線の線源方向を取得することができた。また、イベント毎のエネルギー付与量により核種選択的にイメージングが可能であることを確かめた。

第3章 角度分解能の向上のための重みづけ逆投影法の開発

3-1. コンプトン散乱角別の逆投影図の特徴

全方向イメージングを行った際に、逆投影図に現れるコーンの大きさや現れ方は、そのコーンのもつ開口角すなわちコンプトン散乱角に大きく依存する。図3-1-1は、CdTe半導体3次元アレイ検出器で $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 0^\circ)$ に設置した ^{137}Cs 線源を測定したデータについて、付与エネルギー量から計算されるコンプトン散乱角の頻度分布を表している。この散乱角を用いて 10° 毎にイベントを分け、それぞれ別々に逆投影を行い再構成した画像を図3-1-2に示す。散乱角別にイベントを選択して逆投影することにより、再構成される画像に差異が生じることが確認できる。特に、線源を設置した方向とは正反対の $\theta = -90^\circ$ を中心とした、 $\theta = 0^\circ \sim -180^\circ$ の領域で、ノイズ成分の現れ方に顕著な違いが現れている。

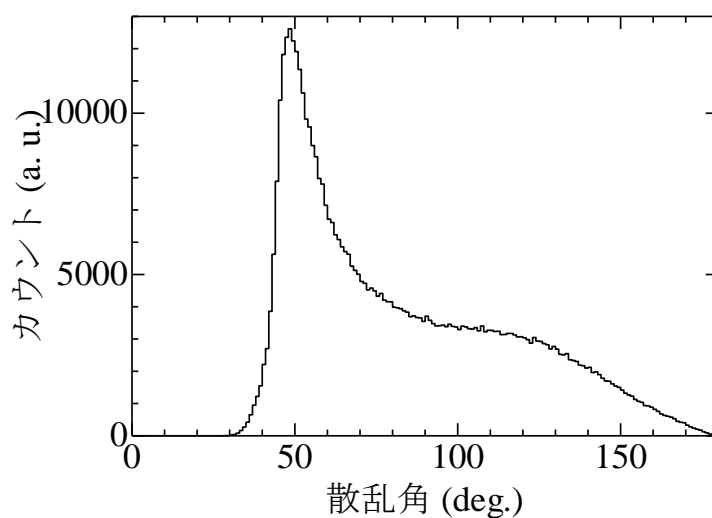
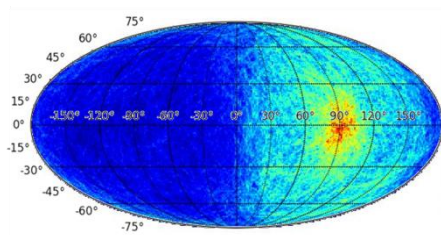
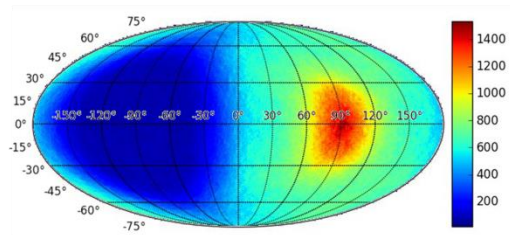


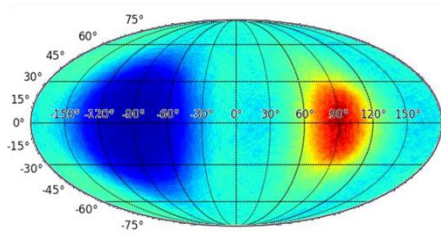
図3-1-1. CdTe半導体3次元アレイ検出器を用いた ^{137}Cs 線源の測定結果のうち、600~720 keVのエネルギー付与量を持つイベントについて、算出した散乱角の頻度分布



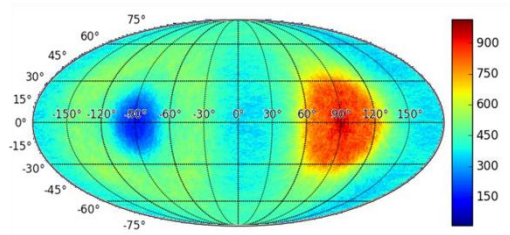
30°~40°



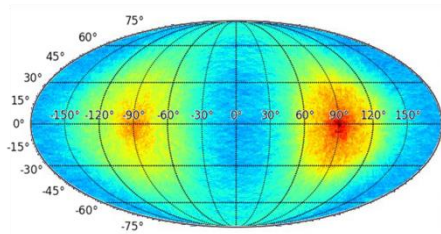
40°~50°



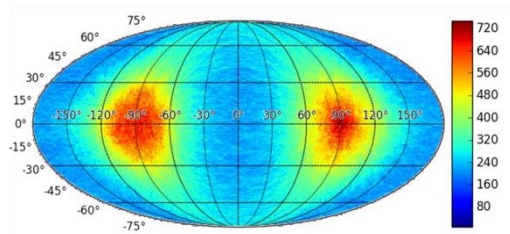
50°~60°



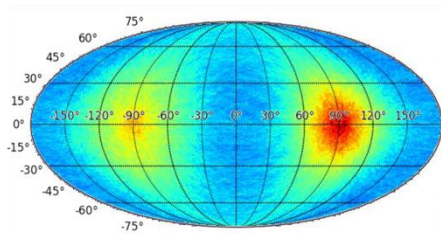
60°~70°



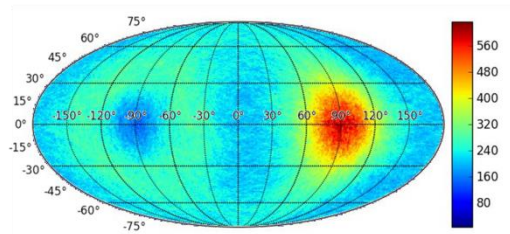
70°~80°



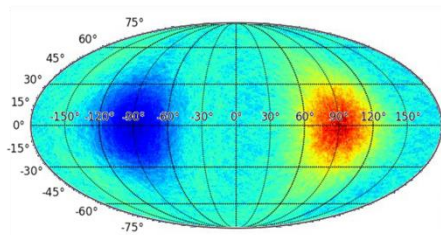
80°~90°



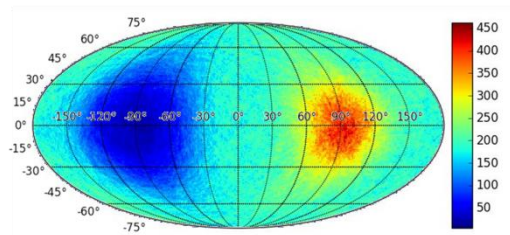
90°~100°



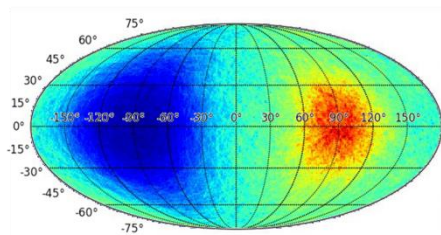
100°~110°



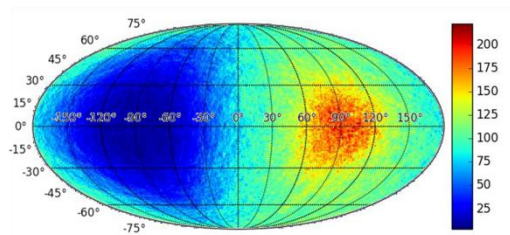
110°~120°



120°~130°



130°~140°



140°~150°

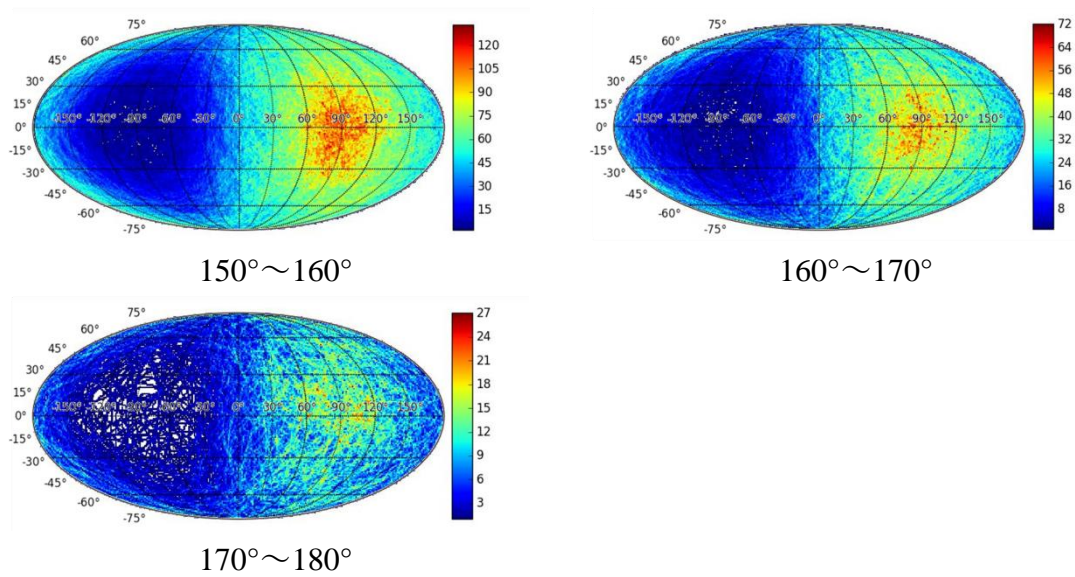


図 3-1-2. 散乱角別での逆投影によって得られた再構成画像
線源設置方向は、 $(\theta, \varphi) = (90^\circ, 0^\circ)$

散乱角が小さい領域では、線源方向のみに単一のピークが現れ、反対の方向にはノイズを含めてカウントが生じないことがわかるが、ピークの周囲に小さなコンプトンコーンが集中して描かれるため、ピークが広がる。散乱角が直角に近づくと、線源方向にシャープなピークが現れ、幾何形状が現れなくなるが、線源方向と正反対の方向に擬似ピークが現れることが分かる。これは、コンプトンコーンが大円(球面と球の中心を通る平面が交わる線で作られる円)として、逆投影を行う球面上に現れることに由来すると考えられる。コンプトンコーンは線源方向の決まった一点を通過するため、コンプトンコーンが大円である場合、ある一点を通過したコーンは必ず反対の点を通過する。これは地球儀上の子午線が北極と南極を必ず通過するのと同様である。このため、コンプトンコーンのうち、線源方向以外の部分、すなわちノイズ成分が線源方向と正反対の方向に集中し、擬似ピークが生じてしまう。

さらにコーンの散乱角が大きくなり後方散乱の領域に入ると、再度線源方向のみのピークのみが強く現れる。この原因として、図に示すように、後方散乱の場合にはコンプトンコーンの中心のベクトルが前方散乱の時とは真逆の方向をとるのに対して、散乱角が鈍角になることで前方散乱の時と同じように線源の方向にコーンが逆投影されるからであると考えられる。さらに前方散乱と後方散乱を比較すると、前方散乱領域では、検出する閾エネルギーが損じするため、 40° 以下の散乱のイベントを検出器できないのに対して、後方散乱ではコン

プトン散乱角に物理的な制約が無い場合、より小さな開口角を持ったコーンを描くことができる。コーンの大きさが小さい場合には、必然的にコーンの S/N 比が良いことが期待されるため、後方散乱側のコーンが真である場合には、より S/N 比の良いコーンが得られると考えられる。

本検出器では、前述の通り、2つの相互作用点のうちどちらが散乱点でどちらが吸収点であるかを区別することなく、散乱角が計算可能な場合にはどちらの場合についてもコンプトンコーンを計算し逆投影を行っている。図 3-3-3 は、同じ測定データを用いて、片方の相互作用点 P_1 におけるエネルギー付与量を横軸、計算されるコンプトン散乱角を縦軸として、Case1 では P_1 を散乱点、もう一方の相互作用点 P_2 を吸収点として扱った時の計算される散乱角を、Case 2 では、 P_2 を散乱点、 P_1 を吸収点として扱った時の散乱角をそれぞれプロットしたものである。図 3-1-3 より、Case1 で鋭角の散乱角、すなわち前方散乱として算出された場合には、Case2 においては鈍角すなわち後方散乱として算出されることが分かる。これはどのイベントに対しても同様であり、図 3-1-4 に示すように、2つの場合についてコンプトンコーンを計算した場合には、2つのコーンが同様に線源方向に逆投影されることを表している。

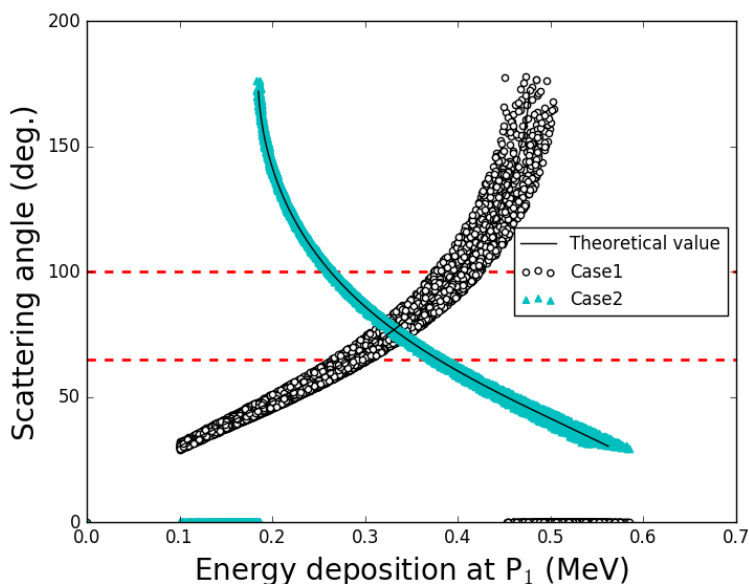


図3-1-3 片方の相互作用点 P_1 におけるエネルギー付与量と算出されるコンプトン散乱角との関係 (Case 1) P_1 を散乱点として扱った場合 (Case 2) P_1 を吸収点として扱った場合

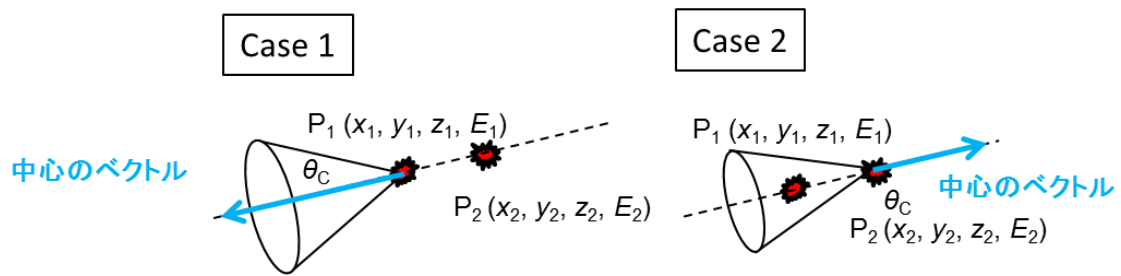


図 3-1-4 P_1 を散乱点として扱った時(Case 1)に鋭角のコーンが計算される場合、入れ替えて扱った時(Case 2)では鈍角のコーンが算出され、同じ方向に投影される

3-2. 散乱角別の逆投影図の特徴を利用した重みづけ逆投影法の提案

前節で述べたように、コンプトン散乱角別にイベントを分けて逆投影を行うことで、それぞれ異なる特徴を持った再構成画像が得られる。これらの特徴を生かして、より S/N 比を改善した再構成画像を得るために、測定データを線源方向と正反対の方向に擬似的なピークが現れる散乱角が直角に近い領域(グループ A)と、得られるピークが単一である散乱角が鋭角・鈍角である領域(グループ B)の 2 つのグループに分けた。CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器で ^{137}Cs 線源を測定したときのデータについて、散乱角が $70^\circ \sim 100^\circ$ のものをグループ A、それ以外(グループ B)とした時に、それぞれのグループのイベントのみで得られる再構成画像を図 3-2-1 に示す。

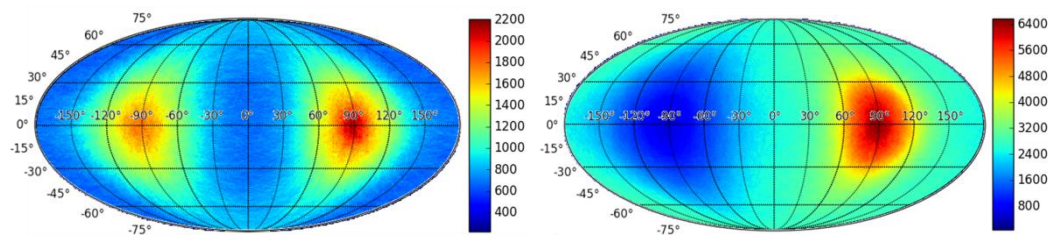


図 3-2-1 直角に近い領域($70^\circ \sim 100^\circ$ 、左)とそれ以外(右)の散乱角を持つイベントのみで逆投影を行った再構成画像

この 2 つのグループにイベントを分けた場合には、上で述べた散乱角ごとの特徴がより顕著になる。これは、第 1 章でコンプトンイメージングの課題として述べたコンプトンコーン自身の S/N 比が原因であると考えられる。コンプトンコーンを逆投影した際に描かれるリングのうちシグナル成分は線源方向にのる一部分のみであり、それ以外の部分はノイズになる。グループ A で描かれるリングは大円に近い形状をとるため、ピーク周辺では重なりが少なく線源方向に現れるピークがより鋭くなる一方、正反対の方向でノイズが重なり合い擬似ピークを作ることが問題になる。対してグループ B では小さいリングがピーク周辺に多数描かれることになり、単一のピークがえられるもののピーク周辺でノイズの重なりが顕著になり、なだらかなピークとなってしまう。このようにこれらの再構成図では、シグナル成分が現れる領域は共通するのに対し、ノイズが顕著に現れる領域が異なる。図 3-2-2、3-2-3 は、グループ A、グループ B のそれぞれから得られる再構成画像について、 θ 方向のラインプロファイルをとったものである。グループ A では、ほぼ同じ強度を持つピークが検出器を挟んで対向する方向に 2 つ見られるのに対し、グループ B では、ピークに対して反対の方向は谷になっていることが確認できる。これらのことから、グループ A から得られる再構成画像はグループ B のイベントから得られるコーンの重み係数のマップとして、グループ B から得られる再構成画像はグループ A のイベントから得られるコーンの重み係数のマップとしてみなすことができ、これらの再構成画像を掛け合わせることで、シグナル成分をより強調し、ノイズ成分を打ち消し合うことができると考えられる。本手法を重みづけ逆投影として、コンプトンイメージングにおける S/N 比改善の新たな手法として提案した。

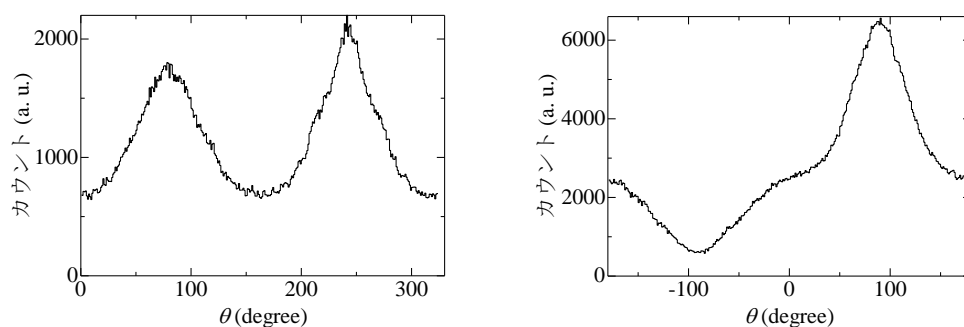


図 3-2-2 再構成画像の θ 方向のラインプロファイル (左)直角に近い散乱角を持つイベント(グループ A)から得られる (右)直角に近い散乱角を持つイベントを除いたイベント(グループ B)

3-3. 重みづけ逆投影法を用いた信号対雑音比の向上

CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器で ^{137}Cs 線源を測定した測定結果に重みづけ逆投影法を導入し再構成した画像を図 3-3-1 に示す。また、重みづけ逆投影法を用いた場合と用いなかった場合を比較するため、 $\varphi = 0^\circ$ のラインプロファイルと比較したものを図 3-3-2 に示す。ここで、ノイズレベルは、これまでと同様に、画像のすべてのピクセルの値の最頻値とし、ノイズレベルをオフセットとして扱った場合のピークの半値全幅を角度分解能とした。また、ノイズレベルの値とピーク値の比を S/N 比として評価した。S/N 比は、単純逆投影では 3.4 であったのに対し、重みづけ逆投影を行った場合には、8.3 まで改善された。また、角度分解能においても 80° から 63° まで良くなっていることが確認された。同様に ^{60}Co を測定した場合の重みづけ逆投影図およびラインプロファイルの比較を図 3-3-3、3-3-4 に示す。 ^{60}Co 線源を測定した場合においても S/N 比が 2.1 から 3.3 まで、角度分解能が 60° から 47° まで、それぞれ向上することが分かった。

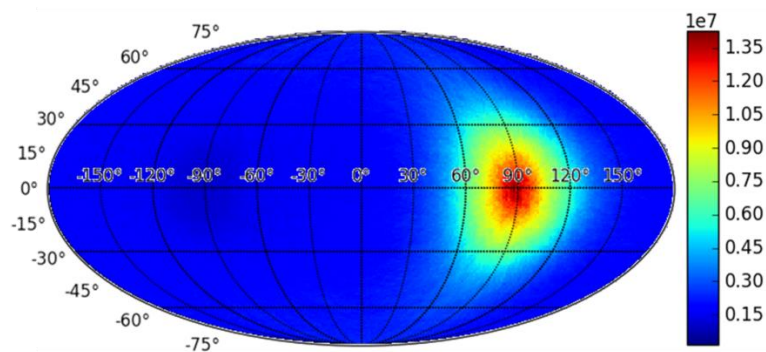


図 3-3-1 CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器を用いて ^{137}Cs 線源を測定した時の重みづけ逆投影法を利用した再構成画像

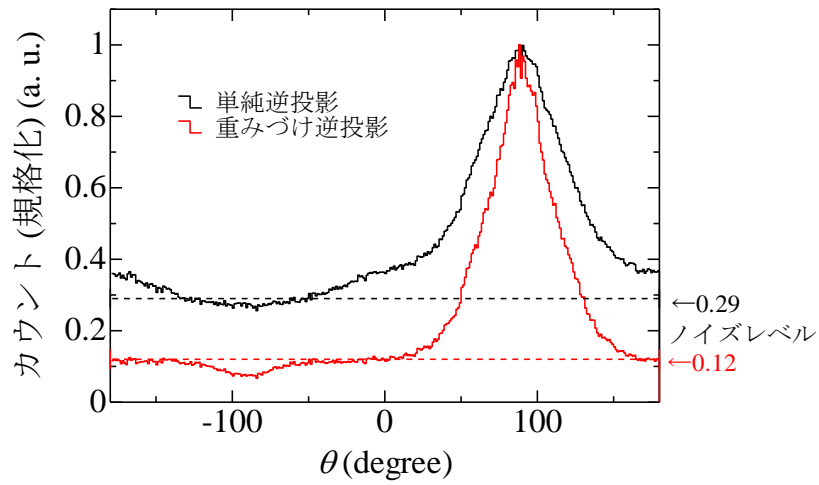


図 3-3-2 単純逆投影と重みづけ逆投影を用いた場合の θ 方向ラインプロファイルの比較

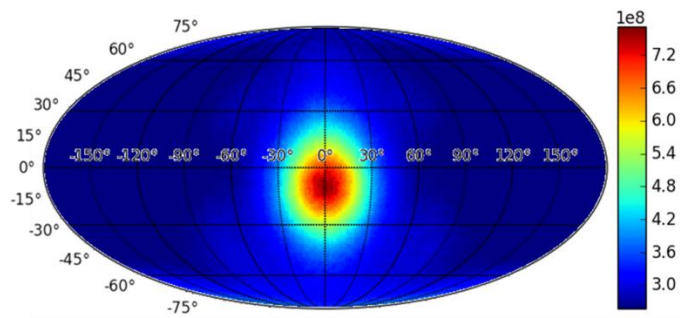


図 3-3-3 ^{60}Co 線源の重みづけ逆投影法を用いた再構成画像

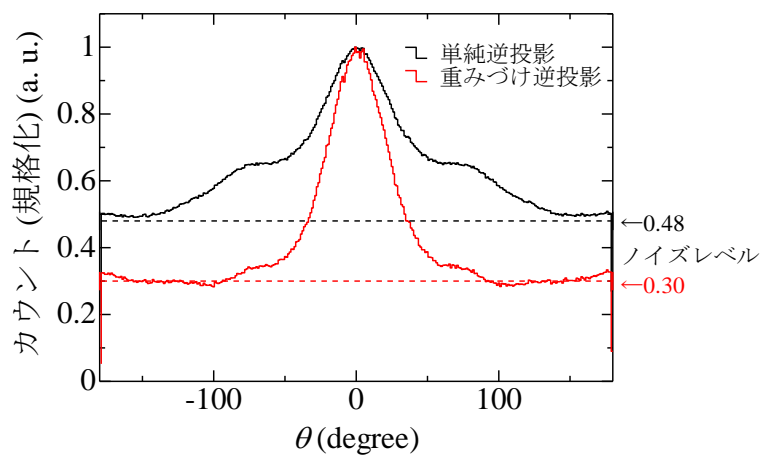


図 3-3-4 ^{60}Co 線源の単純逆投影と重みづけ逆投影を用いた場合の θ 方向ラインプロファイルの比較

複数の ^{137}Cs 線源が存在する場合に同じように S/N 比の改善が可能であることを検証するために、検出器を挟んで対向する位置に同じ強度の ^{137}Cs 線源を検出器表面から 10 cm 離れた位置に設置した場合について測定を行った。実験体系を図 3-3-5 に示す。得られた測定データを用いて、単純逆投影と重みづけ逆投影を行い比較した。2つの方法で得た再構成画像とラインプロファイルの比較を図 3-3-6 および 3-3-7 に示す。複数の線源が存在する場合においても、線源方向以外の部分で不自然なカウントが生じることなく角度分解能を改善できることが示された。

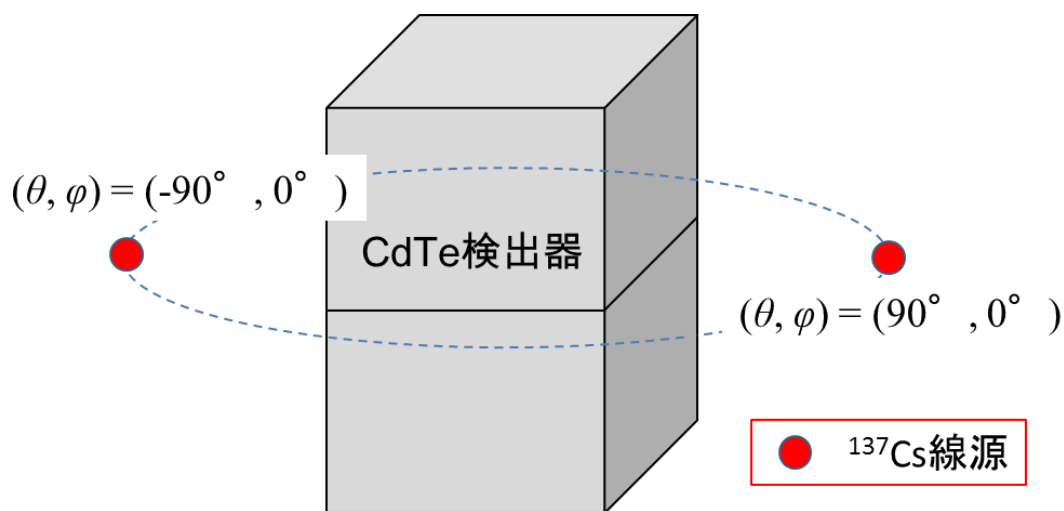


図 3-3-5 検出器を挟んで対向方向に設置した ^{137}Cs 線源の測定の際の体系図

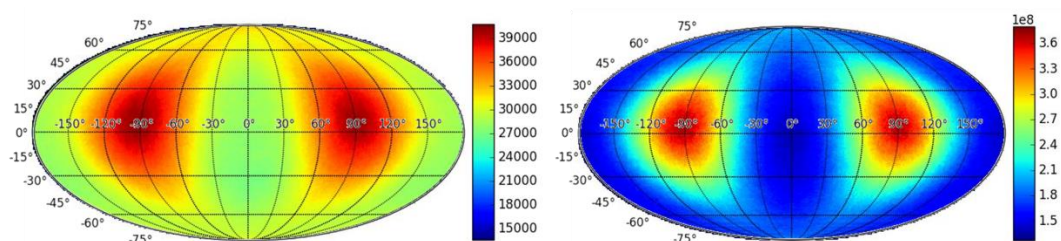


図 3-3-6 2つの同じ強度の ^{137}Cs 線源を測定した場合の再構成画像 (左)単純逆投影 (右)重みづけ逆投影

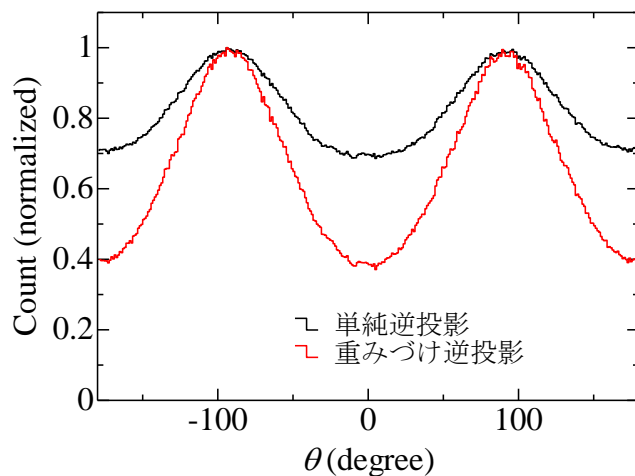


図 3-3-7 2つの¹³⁷Cs線源の測定について単純逆投影と重みづけ逆投影を用いた場合の θ 方向ラインプロファイルの比較

同様にシンチレータスタック型検出器についても重みづけ逆投影法を導入した。2.8×2.8 mm 角の Ce:GAGG ロッドを 8×8 本用いたプロトタイプ B で¹³⁷Cs 線源を測定した際の測定データについて、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器の場合と同様に、散乱角のヒストグラムおよび、計算された散乱角別にイベントを分け、それぞれのイベントのみを用いて再構成した画像を図 3-3-8、3-3-9 に示す。角度別に逆投影を行うことにより、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器の場合と同様の傾向がみられた。このうち、散乱角が直角に近い 65°から 100°のイベントをグループ A、それ以外のイベントをグループ B としてそれぞれの逆投影図を取得し、それを用いて重みづけ逆投影を行った。各グループから得られる逆投影図と重みづけ逆投影を行った際の再構成画像を図 3-3-10 に示す。また、単純逆投影の場合と重みづけ逆投影の場合の $\varphi = 0^\circ$ のラインプロファイルを比較したものを図 3-3-11 に示す。この検出器を用いた場合には、S/N 比、角度分解能はさらに向上し、それぞれ 3.4 から 10、66°から 22°に改善した。これは、シンチレータスタック型検出器の幾何形状から生じるノイズが、重みづけ逆投影により、より強く抑制された結果であると考えられる。また、あらゆる方向に対して重みづけ逆投影法が適用できることを検証するために、第 2 章で示したいくつかの方向に設置した¹³⁷Cs 線源の測定結果について重みづけ逆投影を用いて画像を再構成したものを図 3-3-12 に示す。いずれの方向についても S/N 比および角度分解能の向上が確認され、重みづけ逆投影が有効であることが示された。

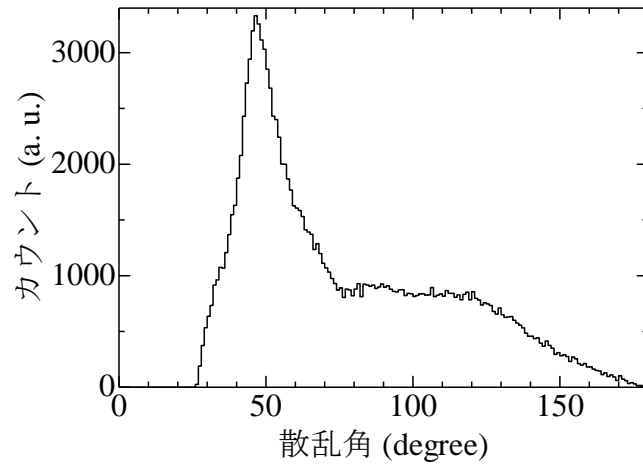
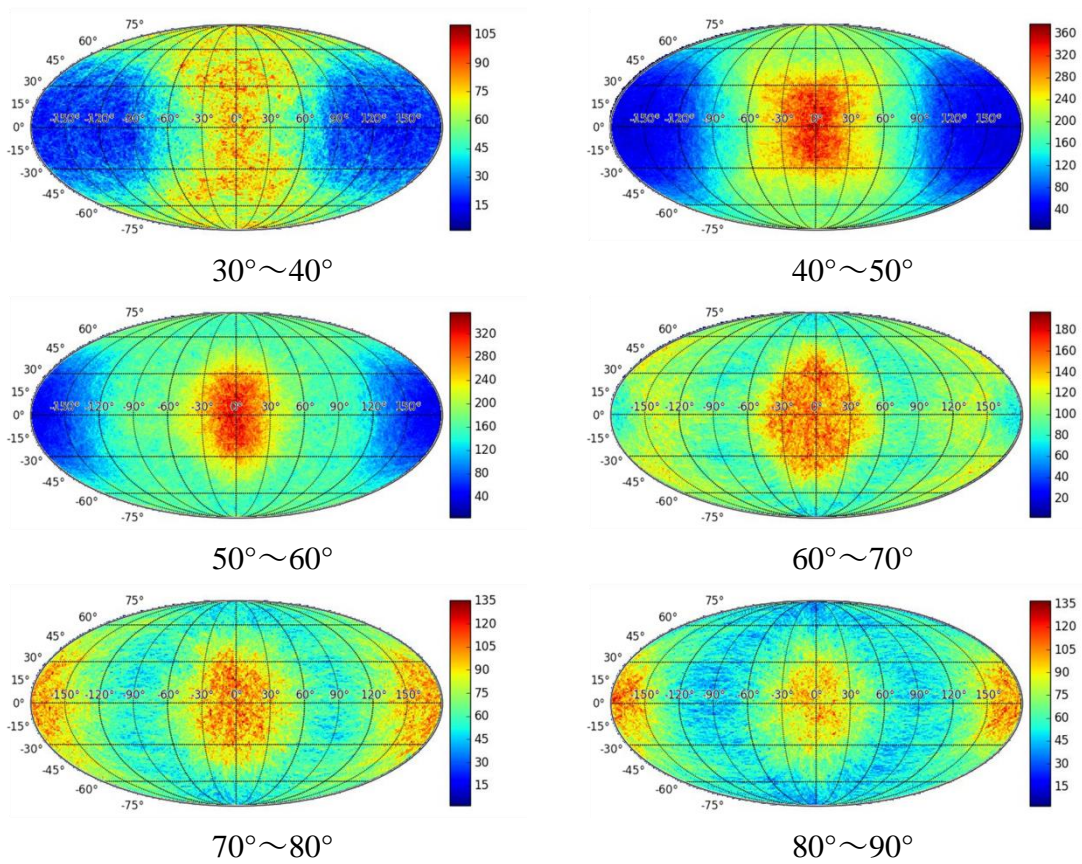


図 3-3-8 シンチレータスタック型検出器を用いた ^{137}Cs 線源の測定結果のうち、600~720 keV のエネルギー付与量を持つイベントについて、算出した散乱角の頻度分布



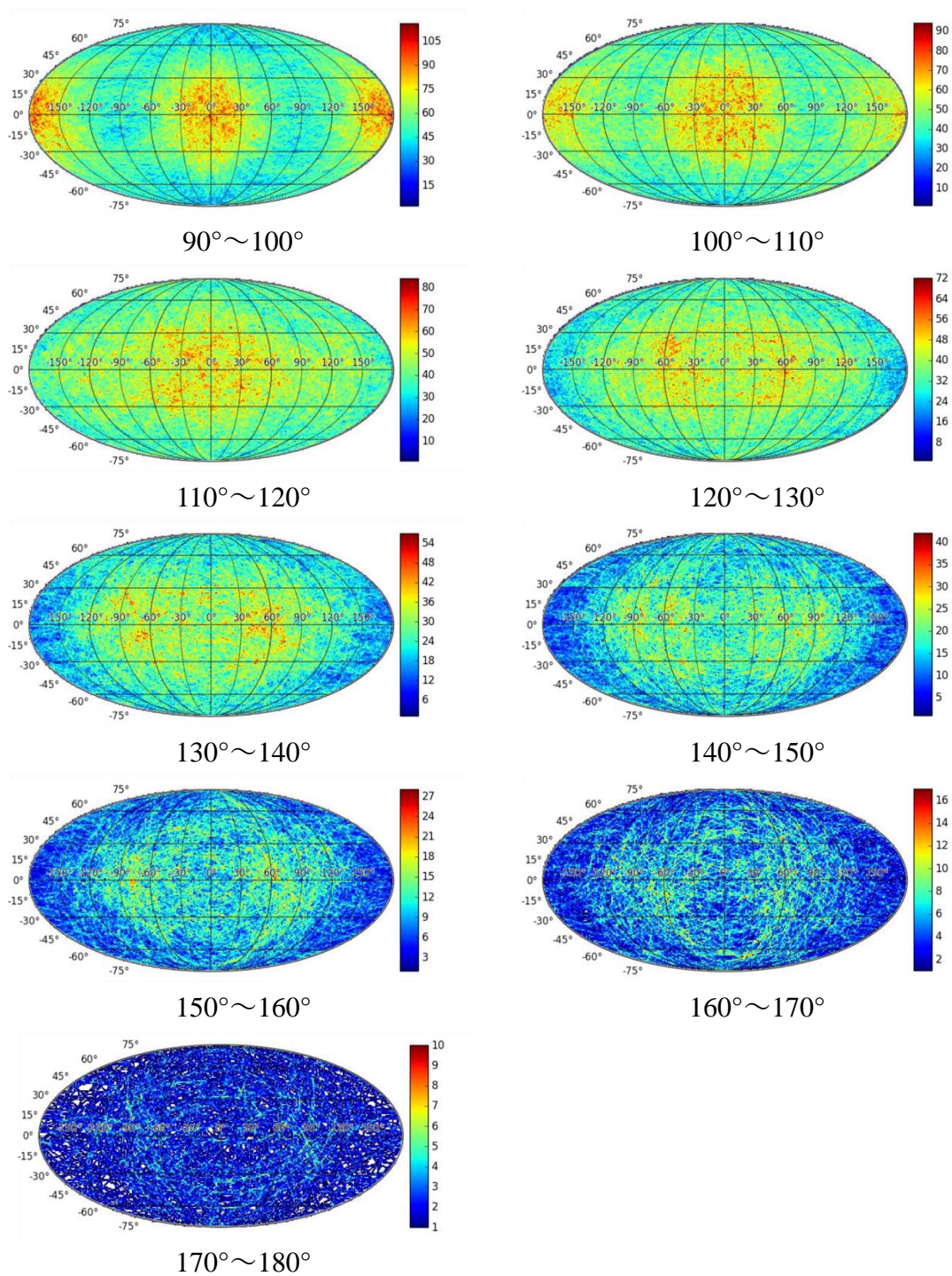
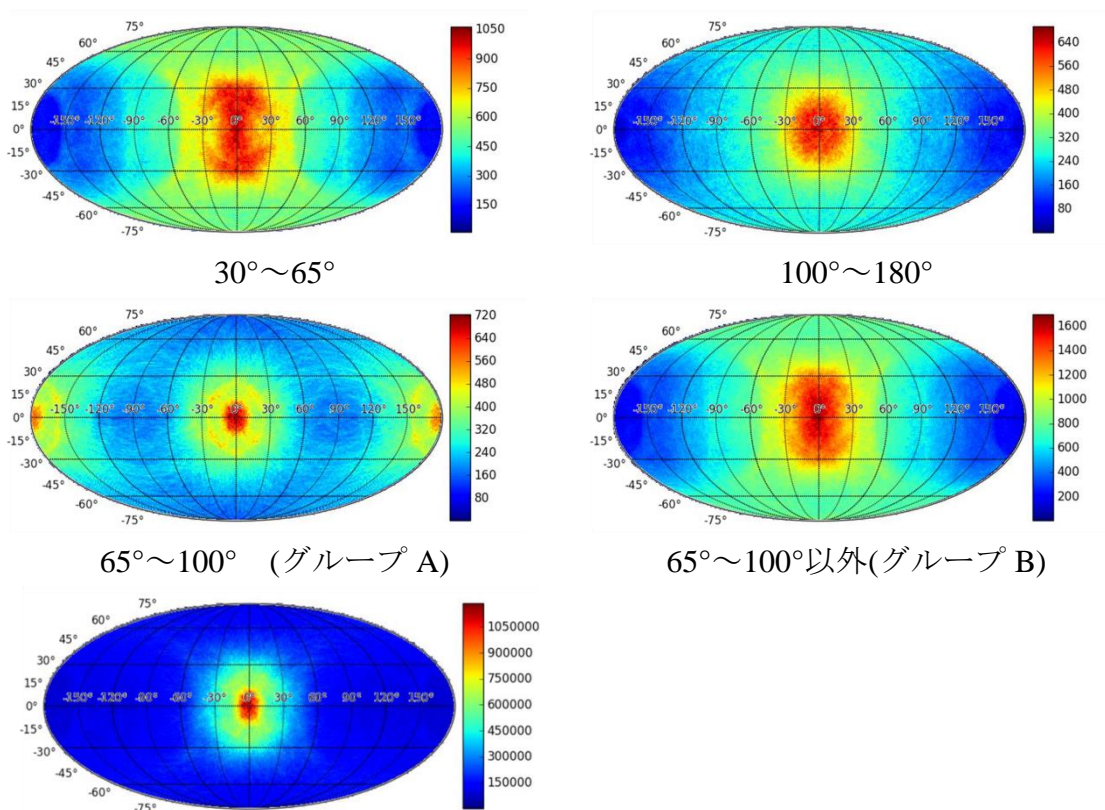


図 3-3-9 プロトタイプ B を用いた ^{137}Cs の測定結果から散乱角別での逆投影によって得られた再構成画像



重みづけ逆投影法による再構成画像

図 3-3-10 再構成画像の特徴別に散乱角の範囲を選択した再構成画像および重みづけ逆投影法を用いた再構成画像

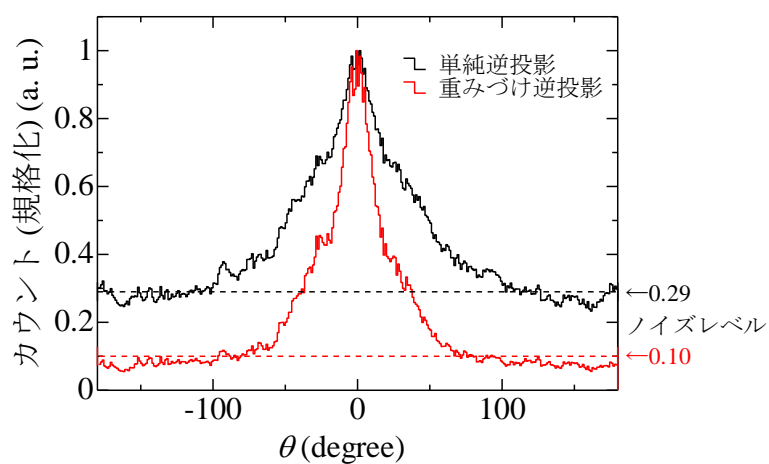


図 3-3-11 シンチレータスタック型検出器での ^{137}Cs 線源の測定についての単純逆投影と重みづけ逆投影を用いた場合の θ 方向ラインプロファイルの比較

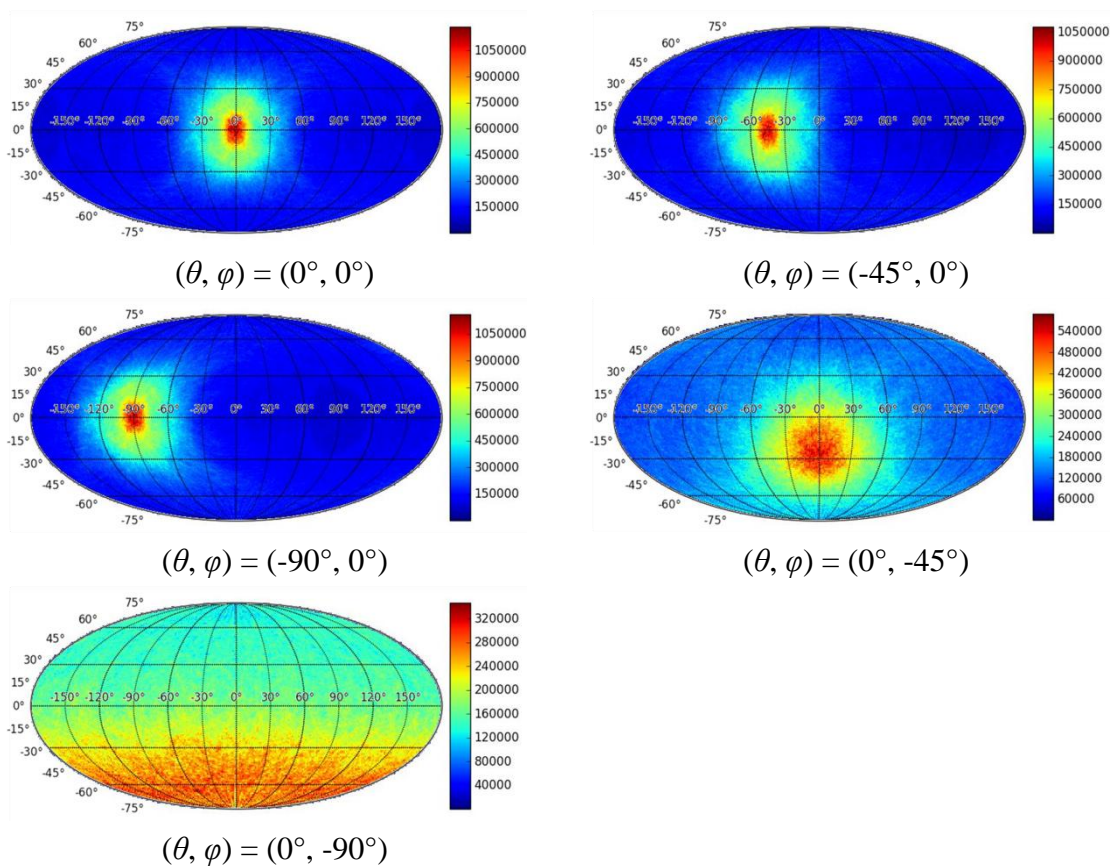


図 3-3-12 重みづけ逆投影法を用いた各方向に設置した線源の再構成画像

異なるエネルギーへの適用が可能であることを確認するために、 ^{60}Co 、 ^{22}Na 線源の測定についても重みづけ逆投影を用いた画像再構成を行った。得られた再構成画像を図 3-3-13 に示す。第 2 章で示した単純な逆投影法で得た再構成画像と比べると、どちらの線源についても S/N 比が大きく向上したことが分かる。また、複数の異なるエネルギーのガンマ線を放出する核種を同時に測定した場合における適用可能性を確認するために、第 2 章で述べた複数線源測定#1、#2 のデータを用いて重みづけ逆投影を行った。複数線源測定#1 について、逆投影に用いるイベントのエネルギーを 200-2000 keV、600-720 keV、1100-1400 keV とした時の重みづけ逆投影結果をそれぞれ図 3-3-14 に示す。第 2 章で示した単純逆投影の図と比べてどの図においても S/N 比と角度分解能の向上が確認された。特に核種を指定しない全エネルギー範囲(200-2000 keV)での逆投影図においては、線源強度の違いにより見えていなかった ^{60}Co 線源の方向のピークが、重みづけ逆投影によってはっきりと見えるようになっている。さらに、複数線源測定#2 について、逆投影に用いるイベントのエネルギーを 200-2000 keV、600-720

keV、1100-1400 keV、460-560 keV とした時の重みづけ逆投影結果を図 3-3-15 に示す。エネルギーで選択することのみでは、従来の単純逆投影法を用いた場合では確認することができなかった ^{22}Na 線源のピークが、重みづけ逆投影法を用いることにより現れることが分かった。

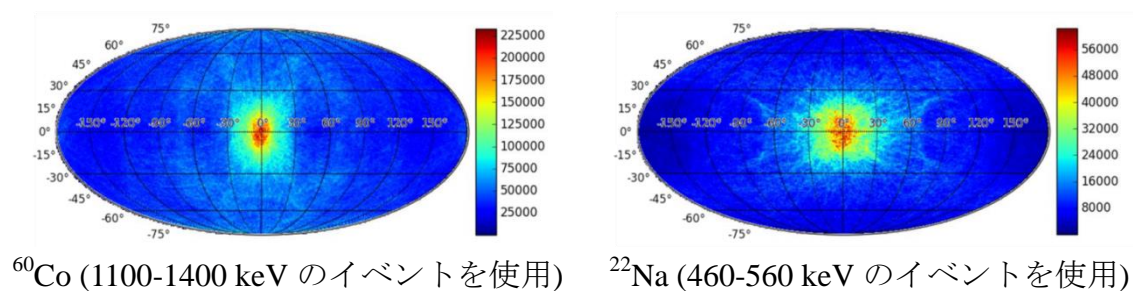


図 3-3-13 ^{60}Co 、 ^{22}Na 線源の測定結果について重みづけ逆投影を適用した再構成画像

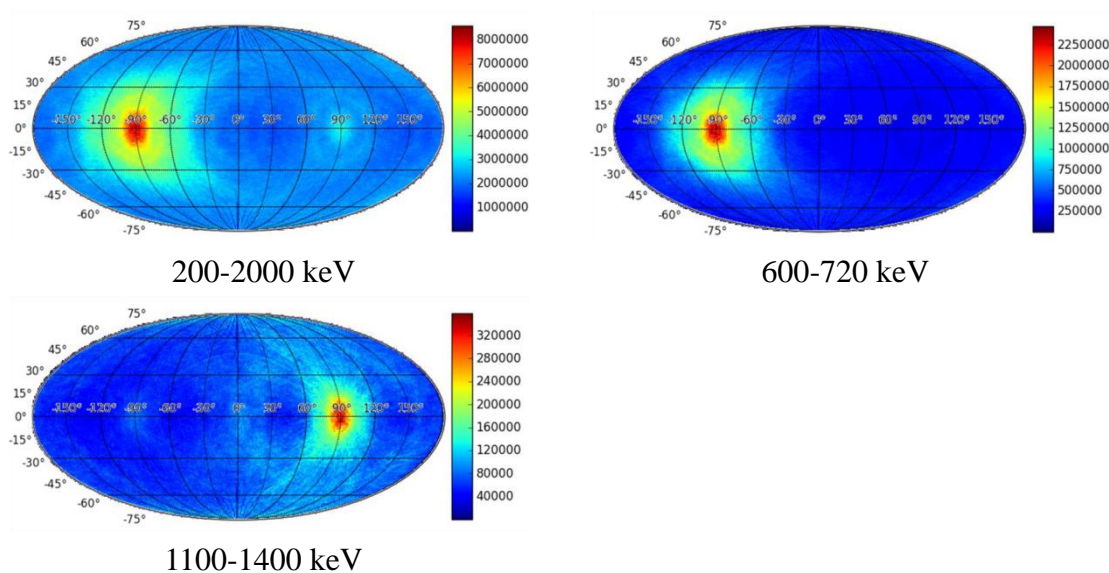


図 3-3-14 複数線源測定#1 の重みづけ逆投影による再構成画像
付与エネルギーによりイベントを選ぶことで線源別に再構成すると同時に、重みづけ逆投影を用いることで角度分解能が改善できている

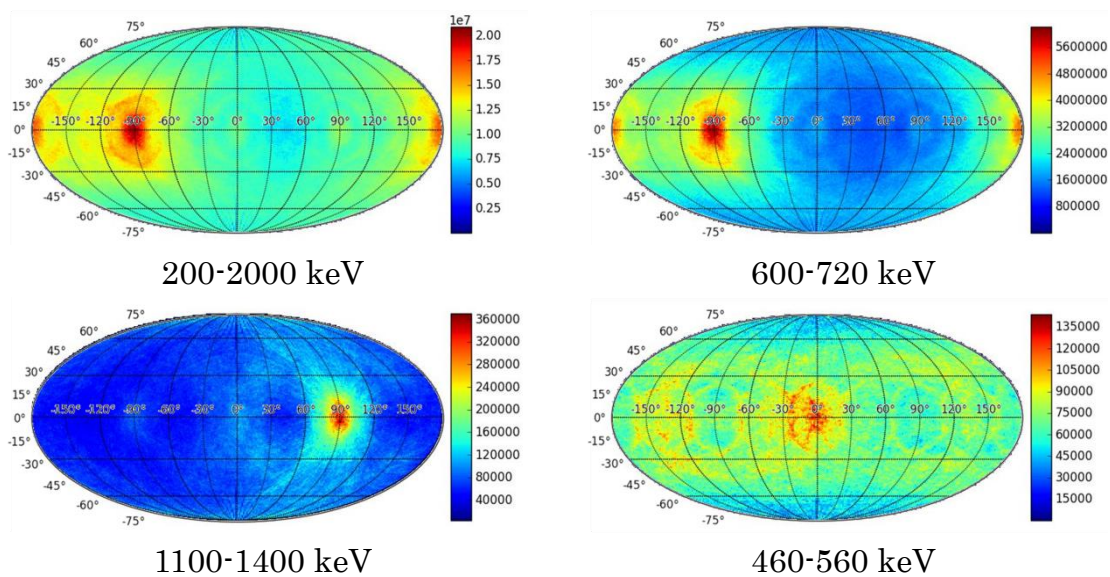


図 3-3-15 複数線源測定#2 の重みづけ逆投影による再構成画像

重みづけ逆投影により得られた再構成画像において、線源強度の反転などが起こらないことを確認するために、重みづけ逆投影に用いるイベント数に対する再構成画像のピーク強度の依存性を求めたものを図 3-3-16 に示す。元の単純逆投影では、線源が 1 つであれば、測定されるデータ数に対してピーク強度は比例する。対して重みづけ逆投影では線形性は失われるものの単純増加でピーク強度が増していくことが確認され、強度の反転は起こらないことが示された。また、従来のコンプトンイメージングで広く用いられてきた逐次再構成法とは異なり、繰り返し回数などに依らず一定の増加傾向があるため、補正を行うことで元の線源強度を推定可能であることが考えられる。

本手法は、第 1 章で紹介した逐次再構成法とは異なり、あらかじめ応答関数を用意する必要がなく、また、単純に測定されたデータから算出される散乱角で弁別し、それぞれ別の像に逆投影したものを掛け合わせればよいので、リアルタイム測定に適用できることなどが利点として挙げられる。

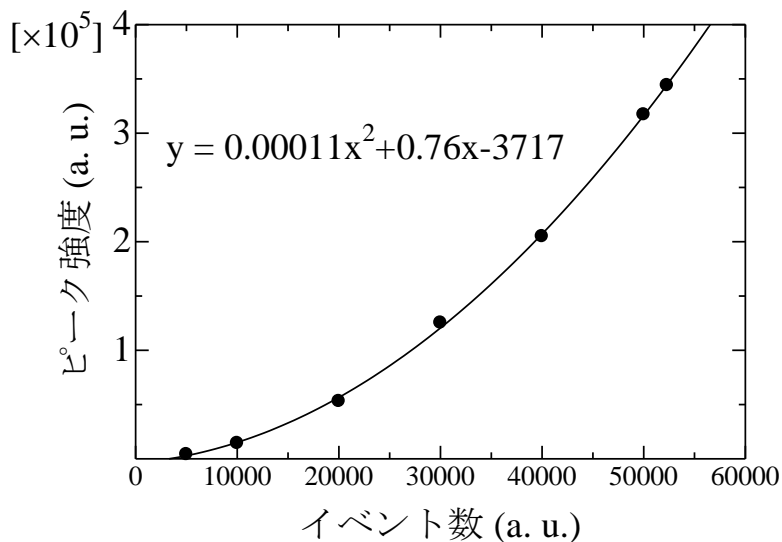


図 3-3-16 重みづけ逆投影を用いた場合の測定されたイベント数の増加に対するピーク強度の変化

3-4. まとめ

本章では、コンプトンイメージングで問題となる空間的 S/N 比の劣化を改善するための新たな手法として、全方向ガンマ線イメージングの際に計算されるコンプトン散乱角の大きさ別にイベントを分けて逆投影することで再構成画像に大きな特徴の違いが現れることを利用し、それぞれの特徴を生かしてコンプトンコーンのノイズ部分を再構成画像上から除去し、S/N 比と角度分解能を改善する重みづけ逆投影法を提案し、その有効性を評価した。本研究で用いた、体系や分解能が大きく異なる CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器および Ce:GAGG シンチレータスタック型検出器について重みづけ逆投影法を導入し、本手法が検出器の形状や特性に依らず有効であることを確認した。また、測定するガンマ線のエネルギーが異なるときにも適用できることを確認すると同時に、2 種類の核種を同時に測定した場合であっても同じように角度分解能を向上させることができることを確認した。

第4章 全方向ガンマ線イメージングの応用

4-1. 医療用サイクロトロン施設におけるガンマ線源分布測定

放射線を用いた医療向け画像診断法として、単一光子放射断層撮影(SPECT)や陽電子放射断層撮影(PET)が広く用いられるようになってきている。これらの画像診断では、患者に放射性物質を含む薬剤を投与し、一定の期間を経たのちに、その薬剤を捕らえた細胞の分布を放射線測定により特定する方法である。いずれの方法にしても、放射性物質を含む薬剤の調剤が必要であり、このとき用いられる放射性物質は数時間から数日程度の短い半減期を持つものが適しているため、これらの放射性物質は診断を行う医療施設で作製される。作製には、医療用サイクロトロンと呼ばれる小規模の加速器が用いられる。これは、ターゲットに加速した陽子線を照射し目的の放射性物質を得る施設で、10 MeV や 18 MeV といった高速の陽子線を照射する。このとき、副次的に生成される中性子がサイクロトロン周囲の構造物に衝突することで構造物が放射化され、サイクロトロン施設の空間線量率を高めることが分かっている。現場で調剤する医師らの被曝量の評価、低減のために、エリアモニタの設置やサーベイメータを用いた空間線量率の細かな測定が行われているが、サーベイメータを用いた空間線量率の測定には時間や手間を要する。そこで、全方向ガンマ線イメージングを用いて放射化された物質がどこに存在するかといった、いわゆるホットスポットを特定することで、迅速に放射化の影響を調べることができると期待される。本研究では、全方向ガンマ線イメージングの応用の一例として、医療用サイクロトロン施設での CdTe 半導体 3次元アレイ検出器による放射化分布測定を行った。

今回は名古屋放射線診断クリニックの医療用サイクロトロン施設で測定を行った。本サイクロトロンでは 10 MeV の陽子ビームをターゲットに照射し、薬剤を生成する^[34]。表 4-1 に生成される放射性核種、生成反応をまとめた。

表 4-1 名古屋放射線診断クリニックのサイクロトロンで生成される薬剤

生成される核種	生成反応	崩壊形式
^{18}F	$^{18}\text{O}(\text{p}, \text{n})^{18}\text{F}$	β^+ (97%)、軌道電子捕獲(3%)
^{15}O	$^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})^{15}\text{O}$	β^+ (99.9%)
^{13}N	$^{13}\text{C}(\text{p}, \text{n})^{13}\text{N}$	β^+ (100%)

4-1-1. 光学写真と逆投影画像との重ね合わせ

実際の場合で取得する放射性物質分布を分かりやすく示すために、これまでのように得た画像を光学写真と組み合わせ、どこにホットスポットがあるのかを示すような画像を作成した。光学カメラとして、全天球写真を撮影することができる RICH Theta s を用いた。放射性物質分布を測定するための模擬実験として、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器周りに ^{22}Na 線源と ^{137}Cs 線源を同時に置いて測定を行った。図 4-1-1 に、実験体系および検出器の位置で RICH Theta s を用いて撮影した全天球写真を示す。この写真は専用のアプリケーションを利用することで視点を中心とした球状の写真として鑑賞することができるが、元のデータは正距円筒図法を用いたものとなっている。この写真に重ねるための逆投影図を得るためには正距円筒図法の逆投影図が必要となるが、正距円筒図法は面積を保存する正積図法ではないため、特に鉛直方向で線源強度が誤って表示されてしまう。そこで、正積図法の一つであるランベルト正積円筒図法を用いて得た逆投影図を鉛直方向に引き伸ばし、正積図法で得られた強度分布を維持したまま正距円筒図法と同様の画像を得ることを行った。ランベルト正積円筒図法を用いて描かれた世界地図を図 4-1-1 に示す。正距円筒図法は角度毎にピクセルを区切った図法であり、その大きさは 360×180 pixels の整数倍となる。一方ランベルト正積円筒図法では、図上の面積を保存するために、単純に鉛直方向のピクセルの幅を極に近づけにしたがって短くしていった図法であるため、鉛直方向の長さは、

$$\int_{-\pi}^{\pi} \theta \cos \theta d\theta = \frac{2}{\pi}$$

となり 360×120 pixels の整数倍のサイズの図が作成される。よって、ピクセルの鉛直方向位置に応じて幅を元に戻すように補正し、引き伸ばすことで正距円筒図法に合わせた画像を得ることができる。図 4-1-2 に、ランベルト正積円筒図法に投影した逆投影図と、それを引き伸ばして正距円筒図法に合わせた図、さらに、その透過率を 60% として全天球写真と重ね合わせた図を示す。図 4-1-2 に示される通り、逆投影で得られたピークの位置と線源位置が重なっていることが確認できる。さらに ^{137}Cs 線源、 ^{22}Na 線源のエネルギーごとにイメージを得た時の画像を図 4-1-3、4-1-4 に示す。第 3 章で得られた時と同様に、線源ごとにイメージングできていることが確認されたのと同時に、各線源を設置した方向がピークと重なっている様子が明確に示された。

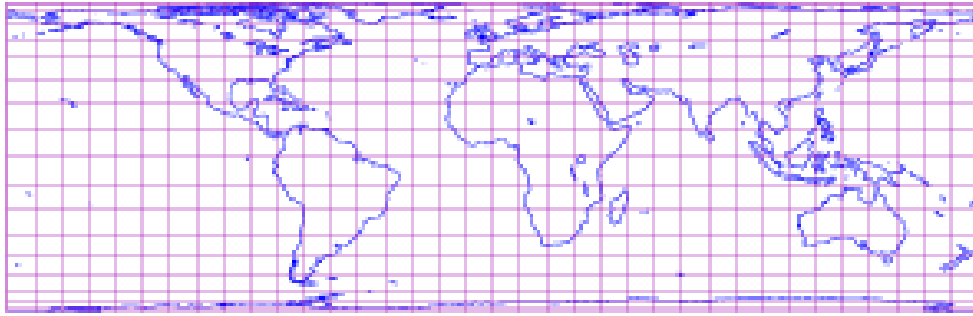


図 4-1-1 ランベルト正積円筒図法で描かれた世界地図

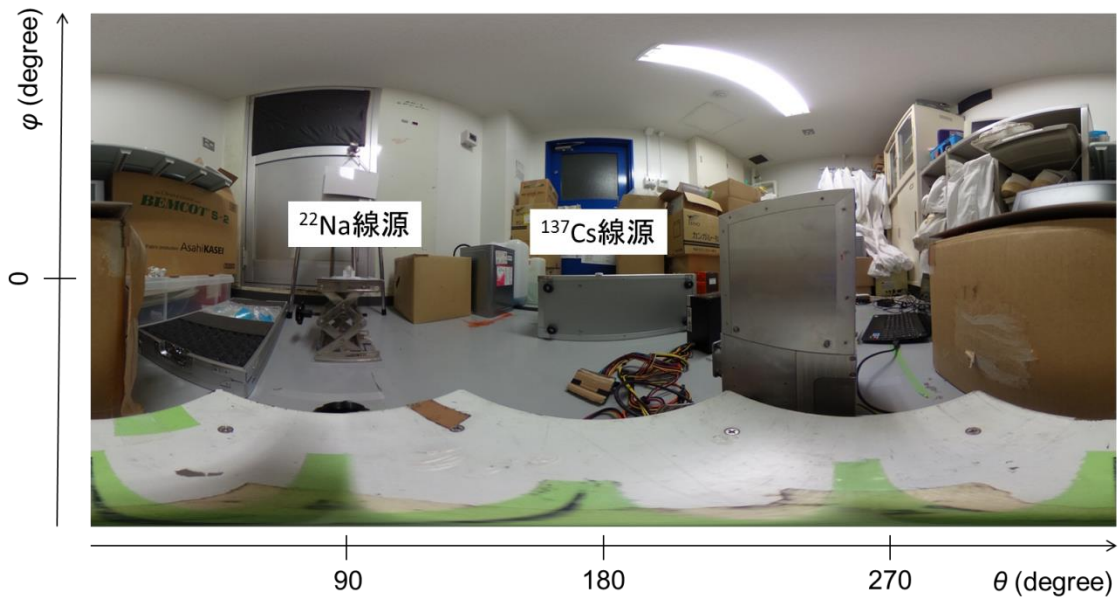
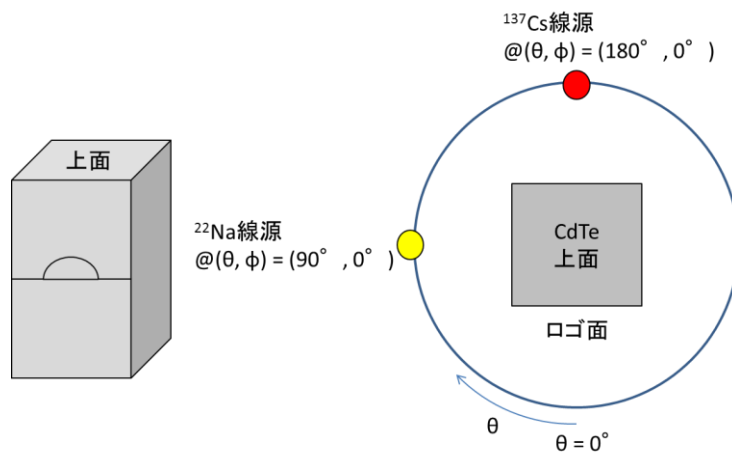


図 4-1-2 分布測定の実験体系および CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器周囲の全天球写真

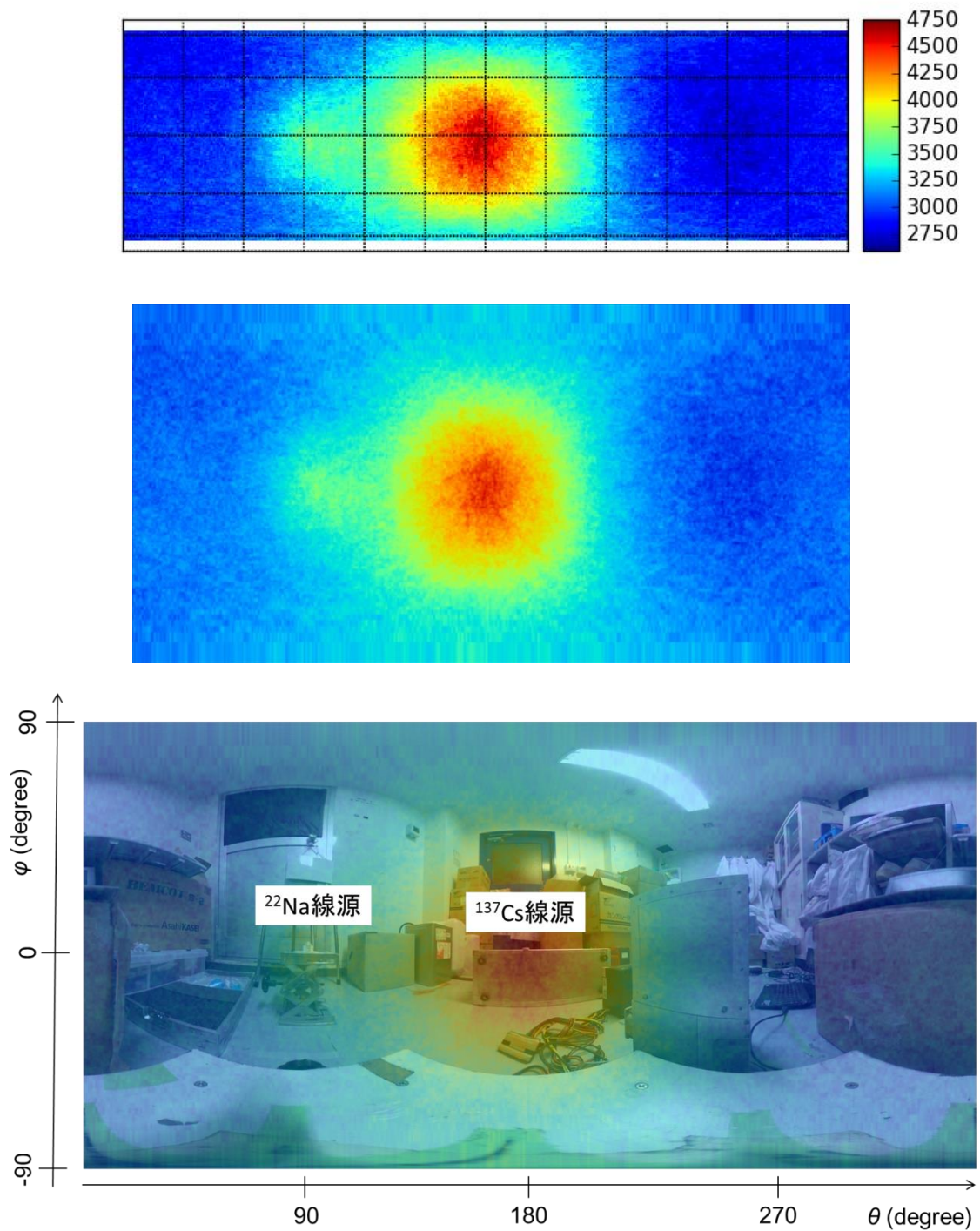


図 4-1-3 200-2000 keV のイベントを用いた逆投影図のランベルト正積円筒図法から正距円筒図法への変換 (上)ランベルト正積円筒図法 (中)正距円筒図法 (下)光学写真との重ね合わせ

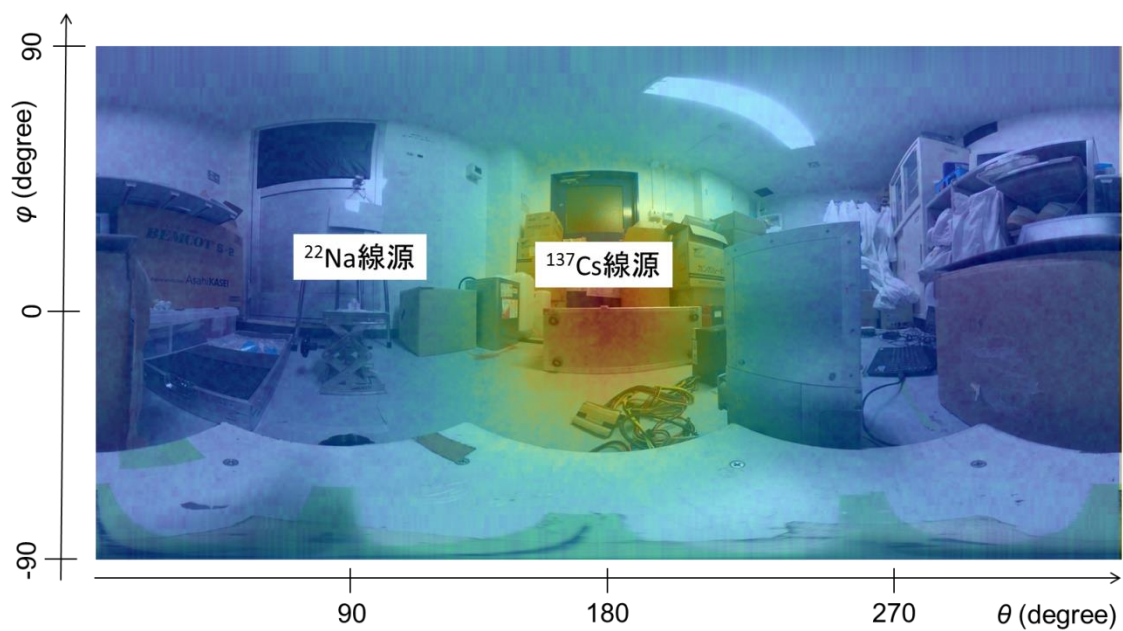


図 4-1-4 600-720 keV のイベントを用いた逆投影図と写真との重ね合わせ

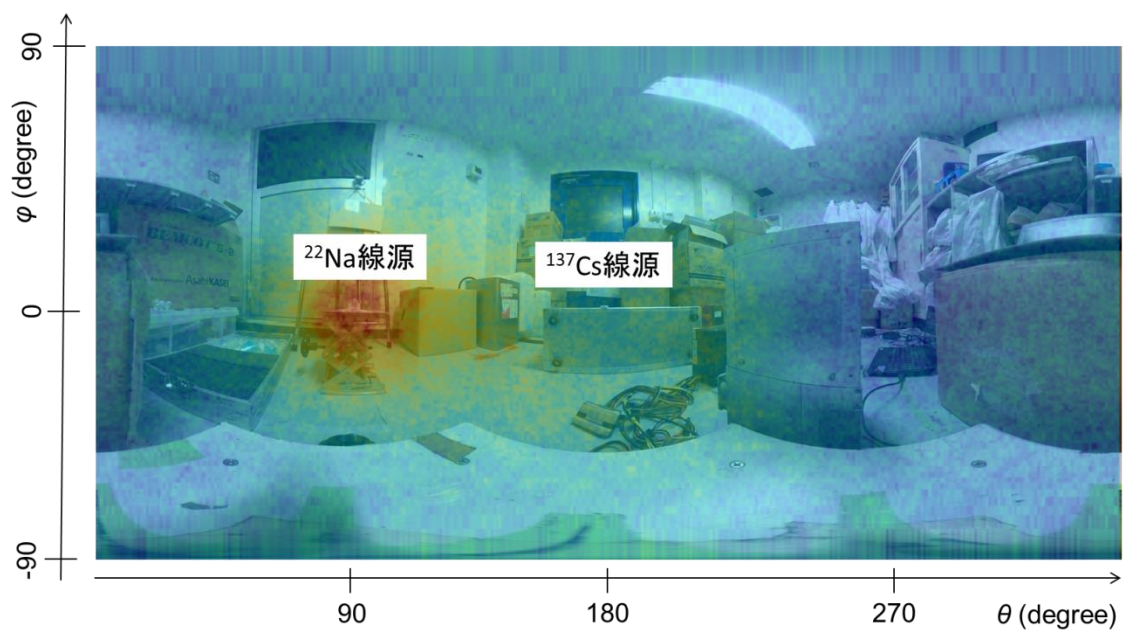


図 4-1-5 460-560 keV のイベントを用いた逆投影図と写真との重ね合わせ

4-1-2. ガンマ線分布測定

図 4-1-5 は、測定を行った名古屋放射線診断クリニック(名古屋市中村区)にある医療用サイクロトロン¹の配置図および、CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器を設置した位置①～③を示したものである。各位置にてサーベイメータによる空間線量率分布測定を同時に行った。測定を行った日は平常業務がなされており、その日の午前にはターゲット 6 のビームラインが、午後にはターゲット 5 のビームラインが稼働していた。測定点は稼働したビームラインを見込むような位置を選択し、ビームラインと同じ地面から 150 cm の高さに検出器を設置した。

サーベイメータを用いた空間線量率分布の測定結果を図 4-1-6 に示す。特に当日稼働していたターゲット 5、6 のビームラインの出口付近の空間線量率は 20 $\mu\text{Sv/h}$ を超えるなど高い値が得られた。また、部屋の奥に設置されていた小型空気圧縮機から高い値が得られた。

図 4-1-7 は、各測定点で取得したエネルギースペクトルである。中性子を放出することで生成される β^+ 崩壊核種から放出される 511 keV のガンマ線をはじめ、中性子由来の放射化で作られる放射性 ^{54}Mn 、 ^{24}Na などのピークが見られる。今回の測定では、代表的なエネルギーとして、中性子の放射化によりできることの多い様々な β^+ 崩壊核種から放出される 511 keV と ^{54}Mn から放出される 834 keV のガンマ線を対象としてイメージングを行った。

図 4-1-8～4-1-13 は、各測定点での逆投影図を光学全天球写真と重ね合わせたものである。全体の特徴として、視野に見込んだサイクロトロン¹のビームの窓と一致する方向にピークが現れていることが確認できる。511 keV と 834 keV を対象としたイメージング結果を比較すると、511 keV のピークの中心がやや下方に位置している。これは、834 keV がビームの窓を中心にサイクロトロン¹内部に分布しているのに対し、511 keV を放出する β^+ 崩壊核種は外のコードなどの周辺の構造物にも分布しているために、ピーク位置がずれたことが原因と考えられる。また、測定点①、測定点②で 834 keV を対象にした逆投影図では、直前まで使用されていたビームラインを中心とした上下方向に共通して分布が見られることが確認できる。測定点③では、511 keV を対象にした場合には 2 つのピークが見られるのに対して、834 keV を対象にした場合には片方のピークが消え、サイクロトロン¹の窓の方向のみになることが分かる。511 keV で現れ 834 keV では消えるピークは前述の小型空気圧縮機がある方向であり、同時に測定された空間線量率分布と比べても妥当な結果であることが分かる。これにより、小型空気圧縮機には β^+ 崩壊核種のみが堆積していることが判明した。原因としては、小型空気圧縮機内部に β^+ 崩壊核種を生成しやすい材質が存在するか、あるいはサイクロ

トロンの稼働中にサイクロトロン内で生成された β^+ 崩壊核種が、何らかの過程を通じて小型空気圧縮機に集中してしまうことが考えられる。

イメージング結果から、線源分布のうち特に強度の強い領域をより見やすくするために、得られた分布のうちカウントの高い部分のみを残して表示させている操作を行った。図に示すように得られた元の画像は 360×180 pixels で構成されており、ピクセルごとに値を持っている。このピクセルの値を用いて頻度分布を作成し、最も頻度の高い値をイメージングのオフセットとして扱った。オフセットと最大値の中間値をとり、その値以下のカウントをもつピクセルは表示させないこととした。この操作を用いて測定点③での結果について作成した画像を図 4-1-15、4-1-16 に示す。

サイクロトロンでの測定結果に第 3 章で述べた重みづけ逆投影を導入した。測定点③でのデータに対して、重みづけ逆投影によって得られた逆投影画像を光学写真に重ねたものを図 4-1-17、4-1-18 に示す。重みづけ逆投影の結果、どちらの画像についてもピークが細くなり、より精度の高い分布測定が可能になることが示された。特に、エネルギーの高い 834 keV を対象とした場合には、S/N 比が大きく改善され、ピークとサイクロトロンの窓がほぼ重なった。

全ての測定点において、サーベイメータによる空間線量率分布の測定結果のうち特に高い空間線量率を持つ位置と全方向ガンマ線イメージングによる線源分布のピークの一致が見られ、妥当なイメージングが行われたことが確認できた。今回はサイクロトロンの稼働直後に測定を行ったために、特にサイクロトロン内部や、稼働中に集積した β^+ 崩壊核種の影響が目立つ結果となった。目的となるサイクロトロン周辺の放射化分布を取得するためには、サイクロトロン停止後数日程度経過した状態で、改めて測定を行う必要があるが、今回の結果により、視覚的な放射化分布の測定が可能であるという見込みが得られた。

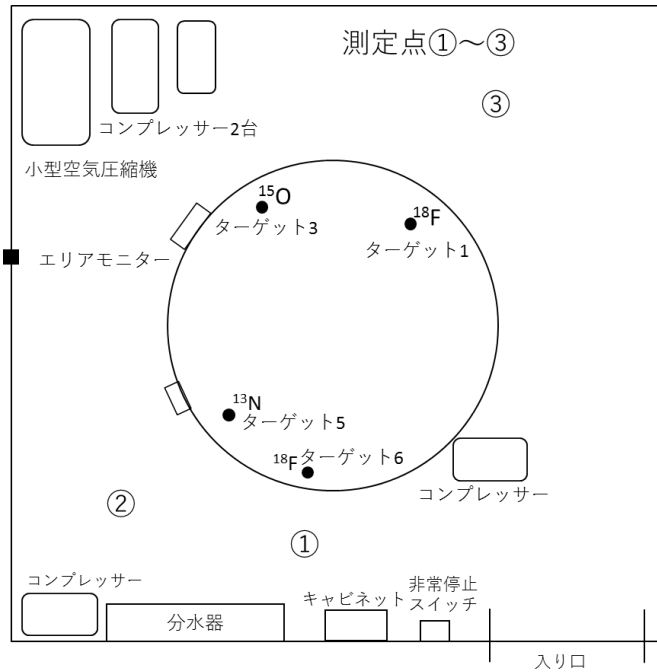


図 4-1-6 名古屋放射線診断クリニックのサイクロトロン施設の室内構造および CdTe 半導体 3 次元アレイ検出器を設置した配置

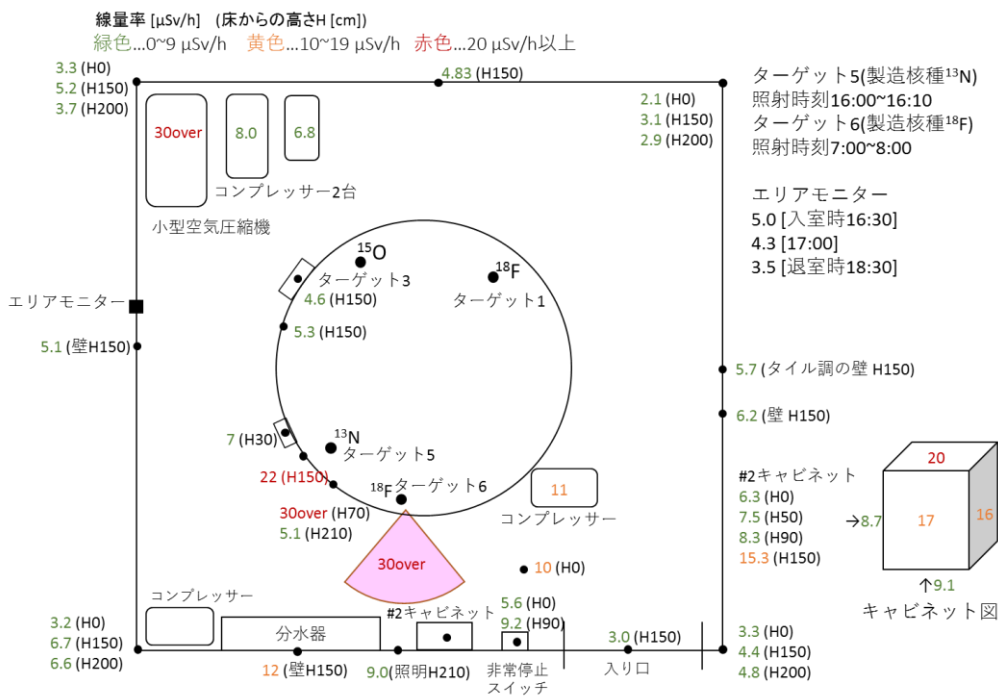


図 4-1-7 サーベイメータを用いて測定した空間線量率分布

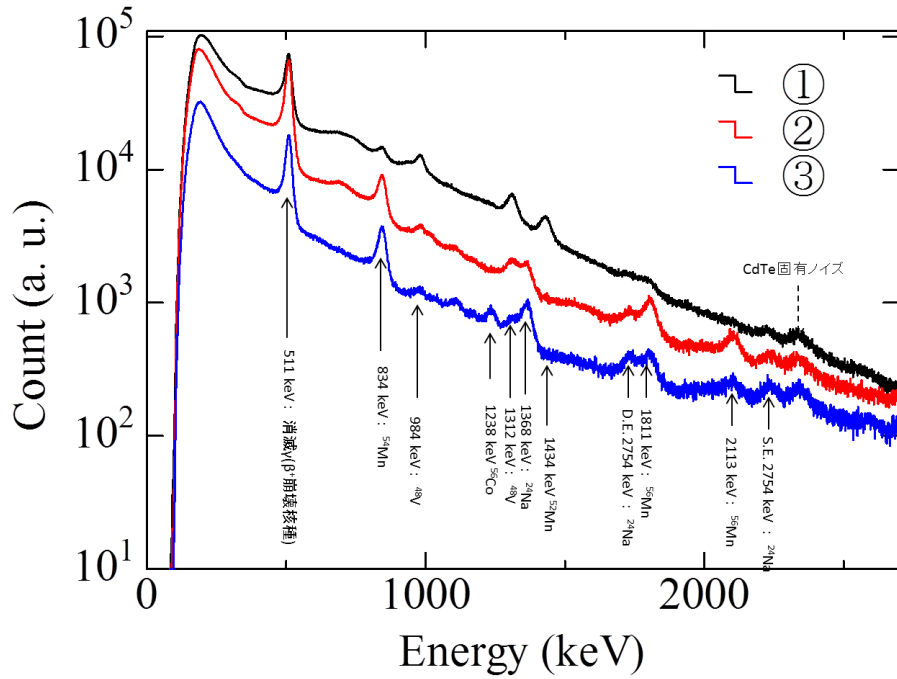


図 4-1-8 各測定点において取得したエネルギースペクトル

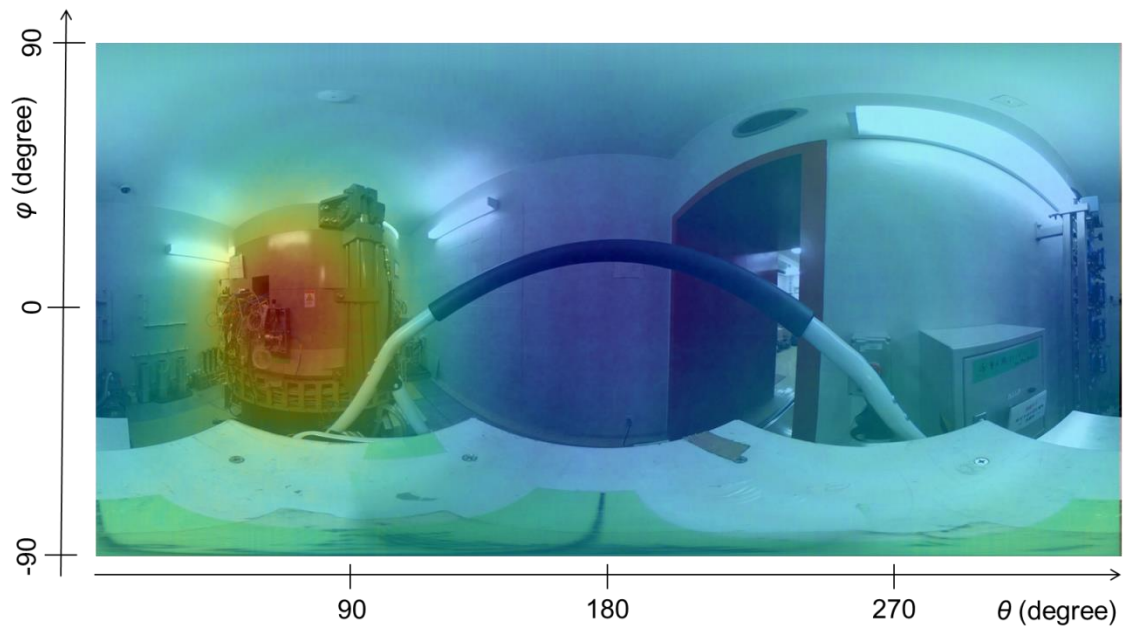


図 4-1-9 測定点①での測定結果から得られた再構成画像
対象エネルギー460-560 keV

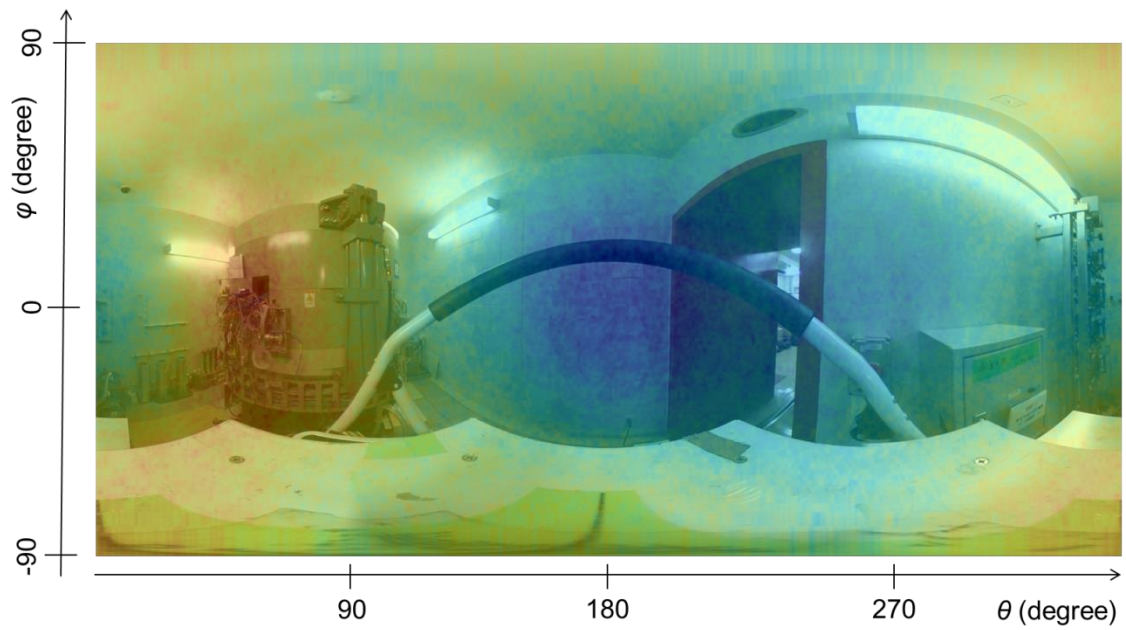


図 4-1-10 測定点①での測定結果から得られた再構成画像
対象エネルギー810-880 keV

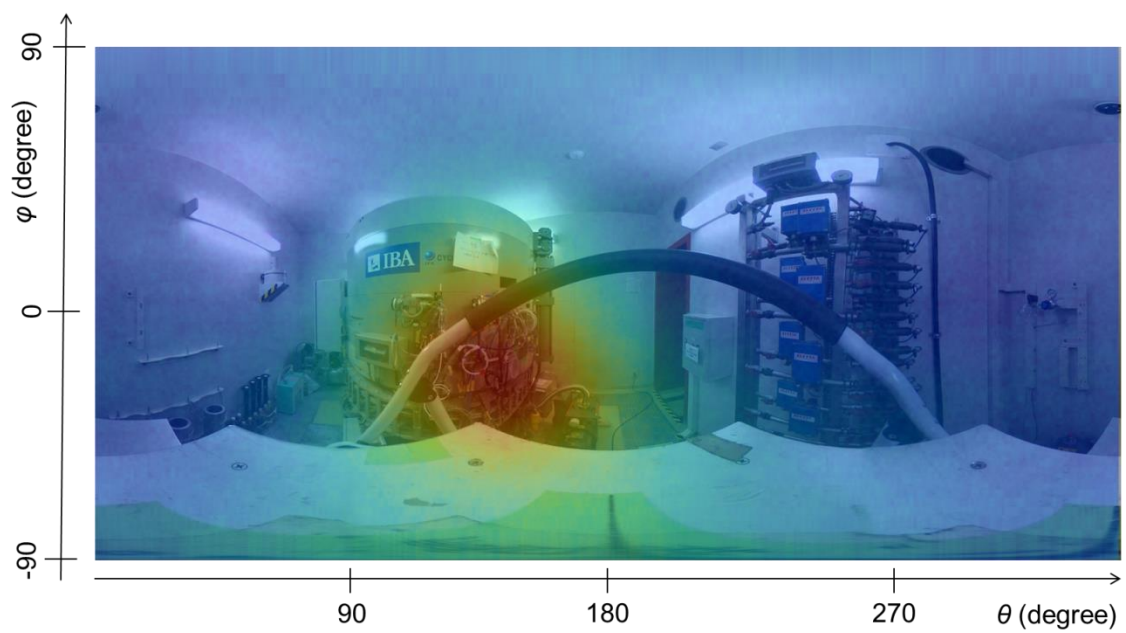


図 4-1-11 測定点②での測定結果から得られた再構成画像
対象エネルギー460-560 keV

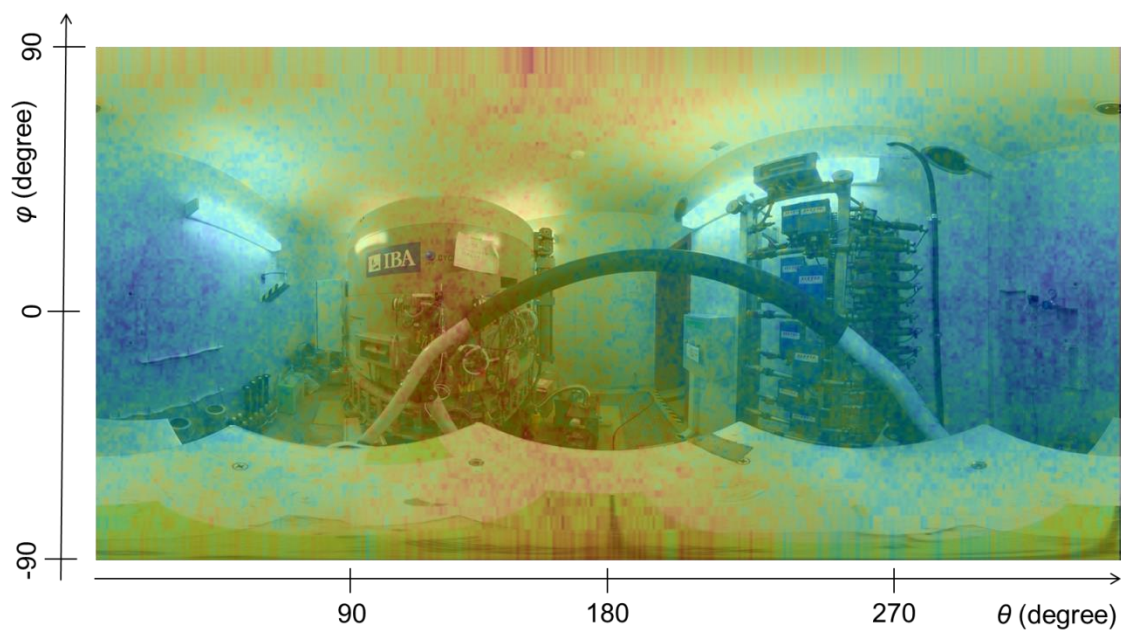


図 4-1-12 測定点②での測定結果から得られた再構成画像
対象エネルギー810-880 keV

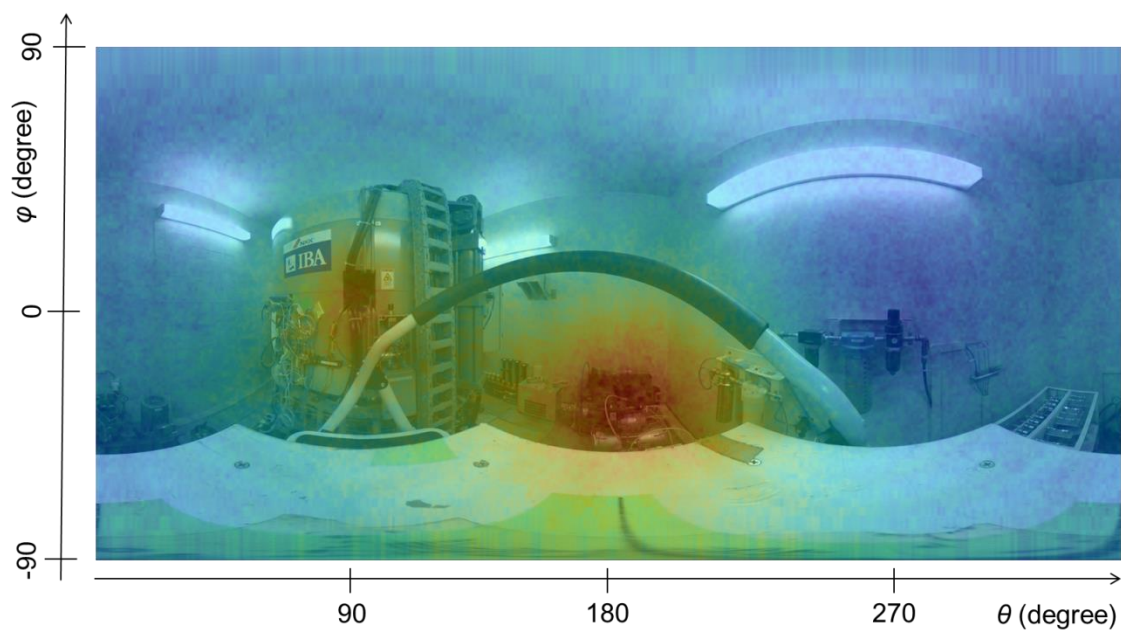


図 4-1-13 測定点③での測定結果から得られた再構成画像
対象エネルギー460-560 keV

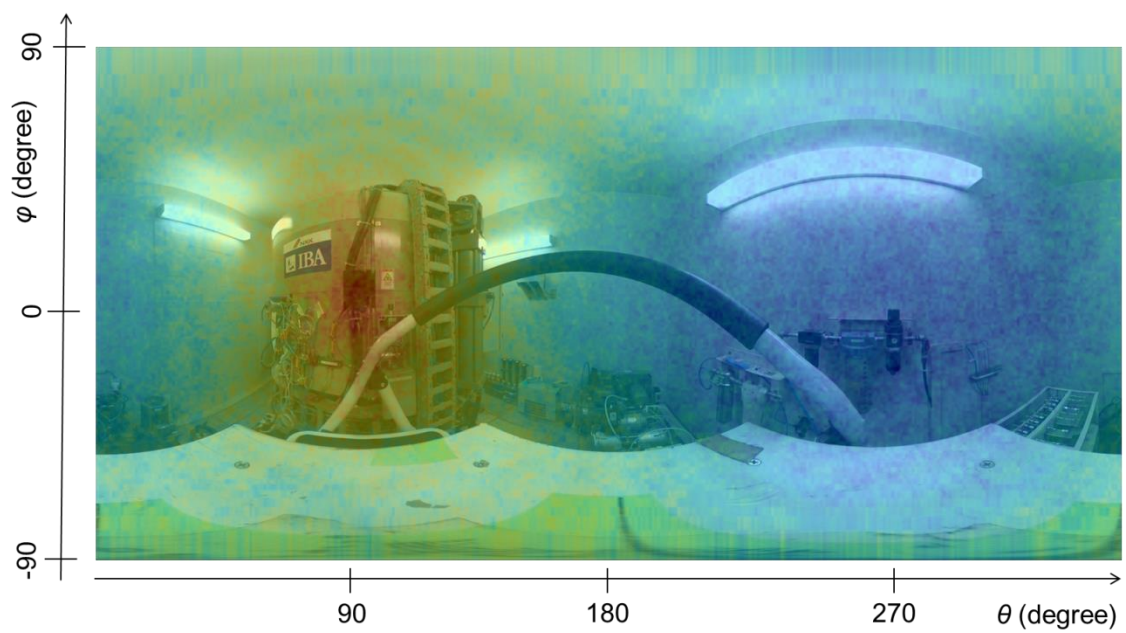


図 4-1-14 測定点③での測定結果から得られた再構成画像
対象エネルギー460-560 keV

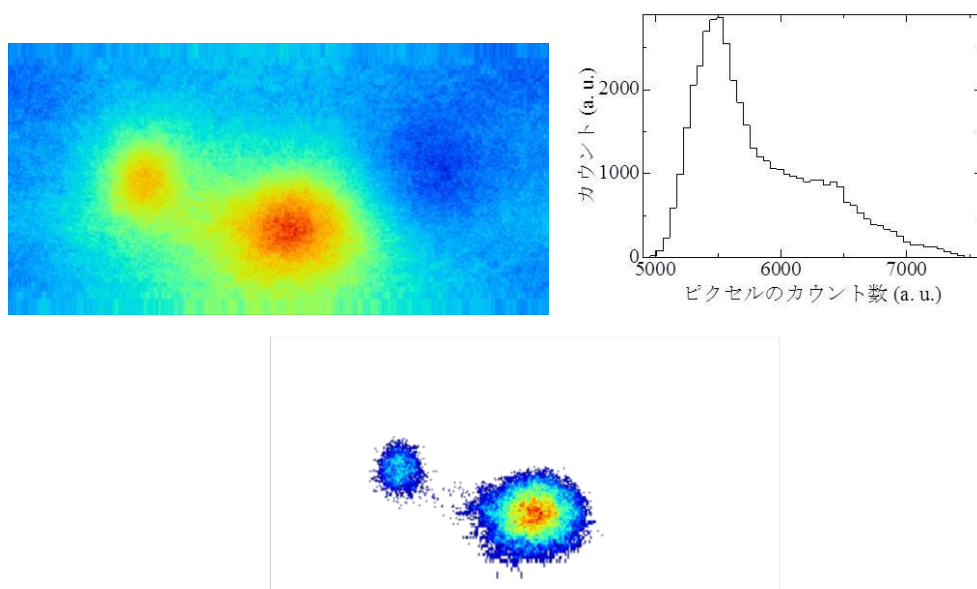


図 4-1-15 元の再構成画像(左上)からピクセルごとのカウントの頻度分布(右上)を作成し、最頻値と最大値の中間値以下のピクセルを除去した画像(下)

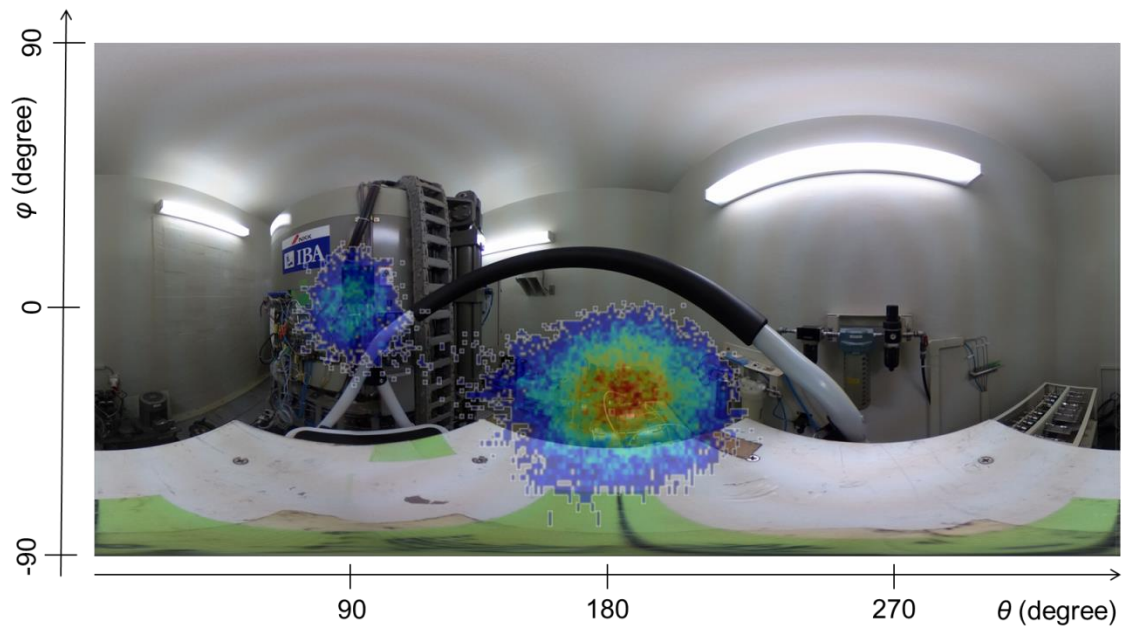


図 4-1-16 測定点③での測定結果から得られたピーク以外の部分を除去した再構成画像 対象エネルギー460-560 keV

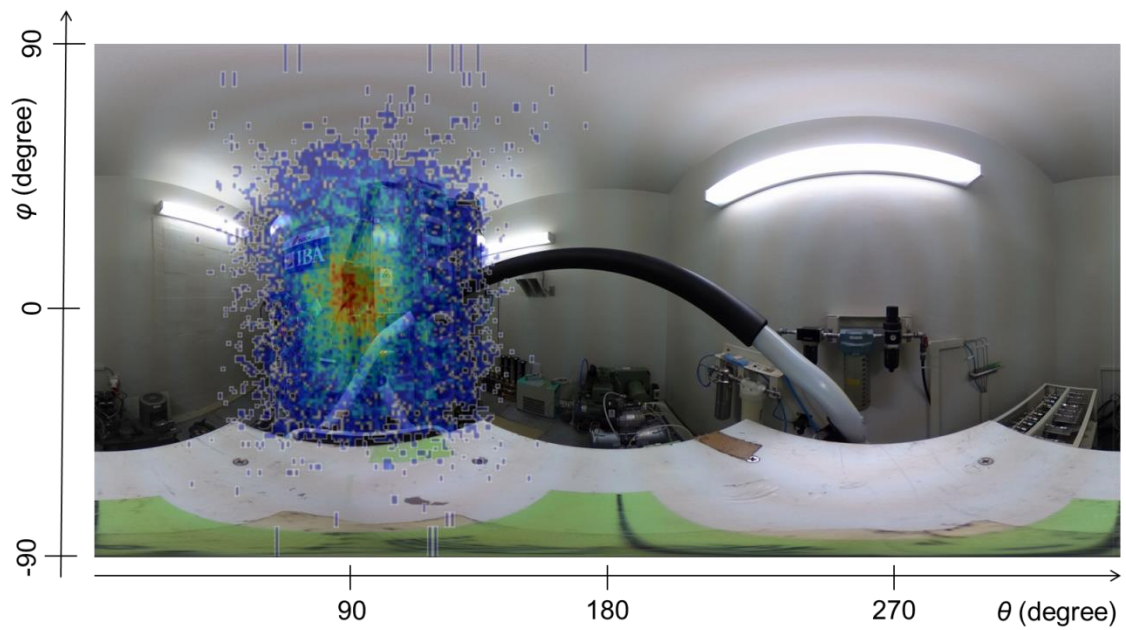


図 4-1-17 測定点③での測定結果から得られたピーク以外の部分を除去した再構成画像 対象エネルギー810-880 keV

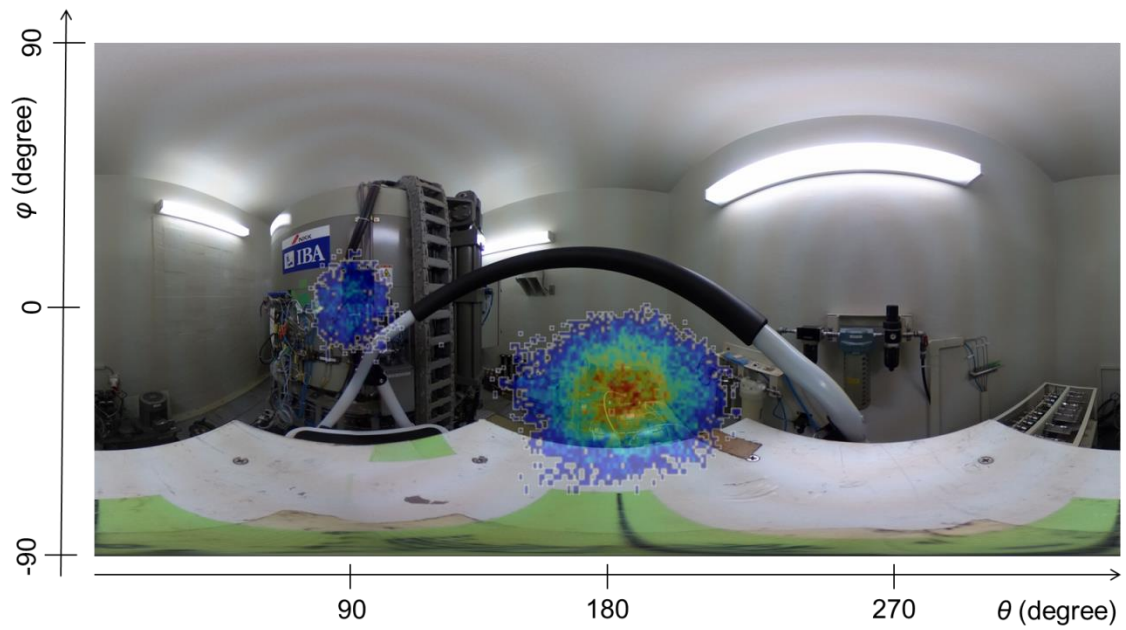


図 4-1-18 測定点③での測定結果から得られたピーク以外の部分を除去した重みづけ逆投影法を用いた再構成画像 対象エネルギー460-560 keV

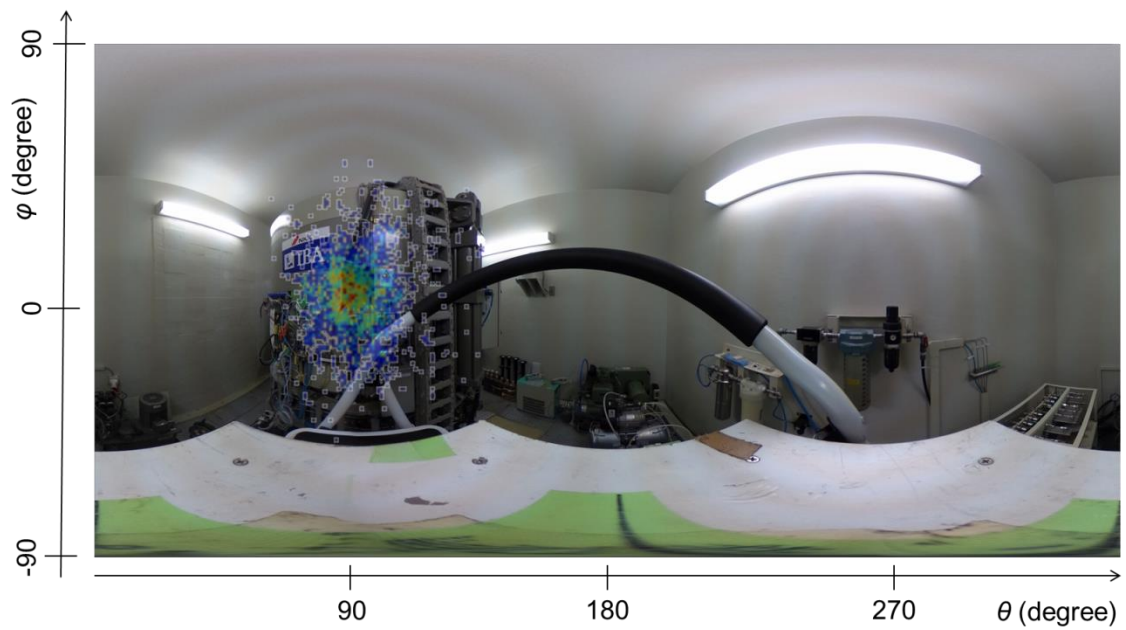


図 4-1-19 測定点③での測定結果から得られたピーク以外の部分を除去した重みづけ逆投影法を用いた再構成画像 対象エネルギー810-880 keV

4-2. まとめ

本章では、全方向ガンマ線イメージングの実際の応用の一例として行った医療用サイクロトン施設における放射性物質の分布の測定結果について述べた。応用に向けた準備として、イメージング方法を改良し、測定場所の光学的全天球写真とイメージング結果を重ね合わせる表示方法を導入した。イメージング結果とサーベイメータによる空間線量率分布を比較したところ、高い空間線量率が得られた箇所がイメージングにおいてもホットスポットとして現れ、よい一致が得られていることを確認した。また、各測定結果について重みづけ逆投影法を適用し、実際の分布測定においても S/N 比を向上させることができたことがわかった。

第5章 結論と今後の展望

5-1. 結論

あらゆる方向から飛来するガンマ線の線源分布を取得するための全方向ガンマ線イメージングについて、3次元位置敏感型のスペクトロメータを用いた実証実験を行った。また、S/N比を向上させるための新たなイメージング方法として、散乱角別の逆投影によって得られる再構成画像において、信号と雑音が見られる領域が異なることを利用した重みづけ逆投影法を導入した。従来広く用いられる逐次再構成法などと比べて、本手法では元の単純逆投影で得られた線源強度の情報を維持したまま角度分解能を向上させることができることが示された。実際に放射性物質が分布している場での測定においても本手法の有効性を確認し、リアルタイムで測定する場合への指針を得た。

本研究で得られた結果についての要約を以下に示す。

(1) 全方向ガンマ線イメージングの実証

3次元位置敏感型スペクトロメータとして、CdTe半導体3次元アレイ検出器およびシンチレータスタック型検出器を用いて、全方向ガンマ線イメージングの実証実験を行った。本研究で用いたイメージングアルゴリズムでは、2点で相互作用が同時に起きたイベントを対象として、2点のうち散乱点と吸収点を区別せず、2つの場合が両方ありうる時には両方の場合についてコンプトンイメージングを行うが、この手法を用いた場合であってもあらゆる方向について線源方向を推定可能であることが分かった。

(2) 重みづけ逆投影法の提案

測定されたイベントを、そのエネルギー付与量から算出される散乱角によって分け別々に逆投影を行うと、得られる再構成画像で特にコンプトンコーンのノイズ成分の現れ方が大きく異なることを見出した。直角に近い散乱角を持つイベントから再構成される画像では、線源方向と反対の方向でノイズが重なり合い、疑似的なピークが生じるのに対し、それ以外のイベントで再構成される画像では、線源方向に比較的鈍い単一のピークが現れ、反対方向にはノイズ成分がほとんど現れないという特徴をもつ。これらの特徴から、それぞれの再構成画像を掛け合わせることにより、ノイズ成分を抑制し、角度分解能を向上させる重みづけ逆投影法を提案した。本手法は従来の逐次再構成法とはことなり、アルゴリズムが簡便であること、応答関数の用意など測定以前の準備を省略できること、線源強度の情報が維持されることを示した。

(3)全方向ガンマ線イメージングの有効性

実際に放射性物質の分布が不明な医療用サイクロترون施設における測定を行い、全方向ガンマ線イメージングの有効性を確認した。イベントをエネルギーによって選別し核種ごとに再構成画像を得ることにより、どの核種がどのような場所に集まりやすいかといったような、既存の手法であるサーベイメータによる空間線量率分布測定や、スペクトル測定では得られない情報を取得することができた。

5-2. 今後の展望

重みづけ逆投影法を用いた画像再構成において直角に近い領域を選択する際に、検出器の形状や配置、測定される位置やエネルギー情報の不確かさに応じて、適切な角度を選択するための指針を求める、または、さらに発展させ、グループ分けの方法や重みの付け方を工夫することにより、より効率的なノイズの除去方法を確立することが望まれる。

また、応用例としてあげた医療用サイクロトロンにおけるガンマ線分布測定では、稼働直後のサイクロトロン周辺のように高い空間線量率を示す場において、一度の設置、測定で周囲すべての分布が取得可能な全方向ガンマ線イメージングは、作業の簡略化、効率化による被ばく量の低減においても有効であると考えられる。今後、放射性物質分布の迅速な測定のために、リアルタイムで信号処理を行い、全天球での動画撮像との連携を通じた測定方法の高度化や、測定中の検出器の移動や複数点での測定結果を用いた 3 次元的な放射性物質の位置特定、分布の取得が期待される。

参考文献

- [1] H. Anger, Scintillation Camera, *The Review of Scientific Instruments* Vol. 29 No. 1 (1958) 27-33
- [2] T. Peterson, L. Furenlid, SPECT detectors Anger Camera and beyond, *Physics in Medicine and Biology* 56 (2011) R145–R182
- [3] D. Weber, M. Ivanovic, Pinhole SPECT Ultra-High Resolution Imaging for Small Animal Studies, *The Journal of Nuclear Medicine* 36 12 (1995) 2287-2289
- [4] N. Schramm, *et al.*, High-Resolution SPECT Using Multipinhole Collimation, *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, VOL. 50, NO. 3 (2003) 315-320
- [5] G. Skinner, Imaging with Coded Aperture Masks, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 221 (1984) 33-40
- [6] Z. Mu, *et al.*, Aperture Collimation Correction and Maximum-Likelihood Image Reconstruction for Near-Field Coded Aperture Imaging of Single Photon Emission Computerized Tomography, *IEEE TRANSACTIONS ON MEDICAL IMAGING*, VOL. 25, NO. 6 (2006) 701-711
- [7] R. Accorsi, A Coded Aperture for High-Resolution Nuclear Medicine Planer Imaging With a Conventional Anger Camera Experimental Results, *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, VOL. 48, NO. 6 (2001) 2411-2417
- [8] G. W. Phillips, Gamma-ray imaging with Compton cameras, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 99 (1995) 674-677
- [9] P.G. Thirolf, *et al.*, A Compton camera prototype for prompt gamma medical imaging, *EPJ Web of Conferences*, NN2015 (2016)
- [10] A. Sauve, *et al.*, 3D image reconstruction for a Compton SPECT camera model, *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, VOL. 46, NO. 6, (1999) 2075-2084
- [11] D. S. Judson, *et al.*, Compton imaging with the PorGamRays spectrometer, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 652 (2011) 587–590
- [12] H. Odaka, *et al.*, High-resolution Compton cameras based on Si/CdTe double-sided strip detectors, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* 695, 179-183 (2012)
- [13] J. Kataoka, *et al.*, Handy Compton camera using 3D position-sensitive

scintillators coupled with large-area monolithic MPPC arrays, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 732 (2013) 403–407

[14] K. Takeuchi, *et al.*, Stereo Compton cameras for the 3-D localization of radioisotopes, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 765 (2014) 187–191

[15] J. Jiang, *et al.*, A prototype of aerial radiation monitoring system using an unmanned helicopter mounting a GAGG scintillator Compton camera, Journal of Nuclear Science and Technology, 53 7, (2016) 1067–1075

[16] 鳥居建男, 放射線を面でとらえる (1) 空からの測定, Radioisotopes, 64, (2015) 775-782

[17] A. Poitrasson-Rivière, *et al.*, Monte Carlo investigation of a hi-efficiency, two-plane Compton camera for long-range localization of radioactive materials, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 760 (2014) 40–45

[18] S. Watanabe, *et al.*, A Si_CdTe Semiconductor Compton Camera, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, 52 5 (2005)

[19] C. E. Lehner, 4-PI Compton gamma imaging using a single 3-D position sensitive CdZnTe detector, University of Michigan, Ph. D. Thesis

[20] C. G. Wahl, *et al.*, The Polaris-H imaging spectrometer, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 784 (2015) 377–381

[21] C. G. Wahl, *et al.*, Polaris-H measurements and performance, Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2014 IEEE

[22] A. Haefner, *et al.*, Gamma-ray momentum reconstruction from Compton electron trajectories by filtered back-projection, APPLIED PHYSICS LETTERS 105, 184101 (2014)

[23] W. Lee, T. Lee, 4π FOV compact Compton camera for nuclear material investigations, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 652 (2011) 33–36

[24] A. Takada, *et al.*, Development of an advanced Compton camera with gaseous TPC and scintillator, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 546 (2005) 258-262

[25] K. Vetter, *et al.*, First demonstration of electron-tracking based Compton imaging in solid-state detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 652 (2011) 599–601

[26] 篠原広行, 他, 断層映像法の基礎 第 32 回 ML-EM 法と OS-EM 法, 断層映像研究会雑誌 37 3 (2011) 1-8

- [27] S. J. Wilderman, *et al.*, Fast Algorithm for List Mode Back-Projection of Compton Scatter Camera Data, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 45, NO. 3, 1998
- [28] C. E. Lehner, Z. He, F. Zhang, 4π Compton Imaging Using a 3-D Position-Sensitive CdZnTe Detector Via Weighted List-Mode Maximum Likelihood, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 51, NO. 4 (2004) 1618-1624
- [29] A. Andreyev, *et al.*, Fast image reconstruction for Compton camera using stochastic origin ensemble approach, Medical Physics 38 (1), (2011) 429-438
- [30] 村石浩, 他, コンプトンカメラ法における新しい画像再構成法の提案, J Japan Health Science 17 3 (2014)
- [31] K. Kamada, *et al.*, Composition Engineering in Cerium-Doped (Lu,Gd)₃(Ga,Al)₅O₁₂ Single-Crystal Scintillators, Crystal Growth & Design, 2011, 11, 4484–4490
- [32] M. Singh, An electronically collimated gamma camera for single photon emission computed tomography. Part I: Theoretical considerations and design criteria, Medical Physics 10 4, (1983) 421-427
- [33] T. Çonka-Nurdan, *et al.*, Impact of the Detector Parameters on a Compton Camera, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 49, NO. 3, 2002, 817-821
- [34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, TECHNICAL REPORT No. 468, Cyclotron Produced Radionuclides Physical Characteristics and Production Methods

謝辞

本研究を進め、本論文を執筆するにあたり、名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻の井口哲夫教授には、大学 4 年生の研究室配属時から研究全般についてご指導、ご助言をいただき、さらには論文審査の主査としてご指導をいただきました。名古屋大学大学院工学研究科量子工学専攻の富田英生准教授には、研究遂行に必要な基礎的なものから種々の技術に至るまでご指導していただくとともに、本研究に関する議論に多くの時間を割いていただき、また本論文においては副査として助言をいただきました。名古屋大学大学院マテリアル理工学専攻の渡辺賢一准教授、名古屋大学大学院量子工学専攻の曾田一雄教授、静岡大学電子工学研究所の青木徹教授には本論文において副査としてご助言を頂きました。

さらに、東京都市大学大学院工学研究科共同原子力専攻の河原林順教授には、本研究の立ち上げからお世話になり、研究に関するご助言をいただきました。富山高等専門学校電気制御システム工学科の高田英治教授には、検出器の読出し回路系の設計、製作を行っていただきました。医療法人名古屋放射線診断クリニック様には、施設内部での測定の依頼に快く応じていただきました。また、研究室とともに全方向ガンマ線イメージングの開発を行ってきた菅野君、不破君、一ノ瀬君、松井君、上間君には、研究生活を支えていただきました。井口研究室と一緒に時間を過ごした先輩方、同期、後輩の皆さまには、研究に限らず多くのことを学ばせていただきました。

本研究を支えてくださった皆様に厚く御礼申し上げます。

高橋時音

本論文を構成している発表論文

学会誌等

- 1) T. Takahashi, J. Kawarabayashi, E. Takada, H. Tomita, T. Iguchi, “Development of omnidirectional gamma-imager with stacked scintillators”, Advancements in Nuclear Instrumentation and their Applications (ANIMMA), 2013 3rd International Conference on, Marseille, pp. 1 – 4
- 2) Y. Fuwa, T. Takahashi, J. Kawarabayashi, H. Tomita, D. Matui, E. Takada, T. Iguchi, “Crystal Identification in Stacked GAGG Scintillators for 4π direction Sensitive Gamma-ray Imager”, JPS conference proceeding, Proceeding of the international symposium on radiation detectors and their use 2016

国際会議

- 3) T. Takahashi, J. Kawarabayashi, E. Takada, D. Matsui, H. Tomita, T. Iguchi, “Performance Test of Stacked Scintillation Detector for Omnidirectional Gamma-ray Imaging
- 4) T. Takahashi, Y. Fuwa, H. Tomita, J. Kawarabayashi, E. Takada, T. Iguchi, “Crystal Identification Technique and Advanced Imaging Algorithm for 4π Gamma-ray Imager with Stacked Scintillator Rods

本論文の第1章は1)を、第2章は1)、3)を、第3章は4)をそれぞれ参考に行っている。