

超広角コンプトンカメラについて

宇宙航空研究開発機構

宇宙ガンマ線高感度観測をめざし宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA)で開発中のガンマ線撮像装置。宇宙に於ける放射性物質の核種を識別し画像化する。地上応用では、広い視野(ほぼ 180度)と核種に固有なガンマ線を識別する能力を生かして、敷地や家屋に広く分布したセシウム 137 (Cs-137) やセシウム 134 (Cs-134)の可視化に適する。

背景

ISAS/JAXA 高橋研究室は過去 15 年にわたり、宇宙ガンマ線の高感度観測をめざして、シリコン(Si) とテルル化カドミウム(CdTe) イメージング素子で構成する独自の「Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ」の研究開発を進めてきた¹。Si/CdTe 半導体コンプトンカメラは、優れた位置分解能を持つ Si と CdTe の半導体イメージング素子を高密度積層したコンパクトな構造を持つ。高効率・高精度のガンマ線追跡を実現することによって、小型であっても高い感度が達成できる。現在、このコンセプトを用いて X 線天文衛星 ASTRO-H(2014 年打ち上げ予定)搭載用の軟ガンマ線検出器(SGD: Soft Gamma-ray Detector) 製作が進行中である²。

我々は、このたび、東京電力の相談を受けたことをきっかけに、この SGD のコンセプトを基礎として、さらに同様に Si と CdTe のイメージング素子を用いる ASTRO-H 搭載用硬 X 線イメージャー(HXI)の要素技術を組み合わせ、原理実証モデルとして「超広角コンプトンカメラ」を急遽、試作した。

コンプトンカメラの撮像原理と従来型ガンマカメラとの比較

セシウム 137 やセシウム 134 から直接放出される核ガンマ線のエネルギーは 600 キロ電子ボルトから 800 キロ電子ボルトの範囲である。この領域でのイメージング観測には、従来ピンホールカメラを用いた観測が行われている(図 1(a))。視野角はピンホールの開口角で規定され、40 度から 60 度である。入射ガンマ線の方向を前もって限定しておくことで、放射性物質の分布を画像化する。この手法は、周囲のバックグラウンドを低く抑えることができる場合や、マスクが入射ガンマ線をとめるのに十分な厚さを持つ場合に有効である。しかし、ガンマ線のエネルギーが数 100 キロ電子ボルトを超えると遮蔽が透明になることもあって、ガンマ線の可視化ができたとしても高いコントラストを得るのが難しい。十分な遮蔽を得るためには重量を重くせざるを得ない。

一方、このエネルギー領域でガンマ線の主要な相互作用となるコンプトン散乱を用いて入射ガンマ線の方向を知り、可視化を行なう技術が「コンプトンカメラ」である(図 1(b))。コンプトンカメラでは、ガンマ線が検出器の物質中の電子と散乱する際のコンプトン散乱によって、ガンマ線が電子に与えたエネルギー(E1)、散乱されたガンマ線のエネルギー(E2)、さらにコンプトン散乱を起こした位置(X1)と、散乱されたガンマ線が光電吸収された位置(X2)とを知ることで、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向を同時に求めるものである。放射性物質の分布は、統計的な処理を経て画像化される。コンプトンカメラは、ピンホールやコリメータを使用しない検出方法によって、ガンマ線可視化ができる。また、バックグラウンドの除去能力が高く、高い感度が得られるため、次世代型のガンマカメラと位置付けられている。

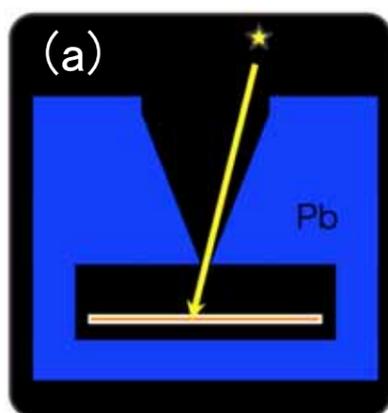
¹ 三菱重工業名古屋誘導推進システム製作所、アクロラドとの共同研究

² 名古屋大学、東京大学、広島大学、早稲田大学、スタンフォード大学他との共同開発

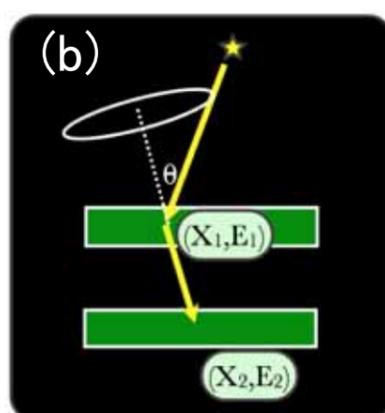
「超広角コンプトンカメラ」とは

「超広角コンプトンカメラ」は、ISAS/JAXA が開発した、Si と CdTe の半導体イメージング検出器を密に多層構造とした次世代型のコンプトンカメラである(図1(c))。これまでコンプトンカメラの原理は知られていたが、必要な効率や画像解像度で可視化を行ない、また比較的簡易な手法で現地での撮像ができるような装置は存在していなかった。超広角コンプトンカメラでは、コンプトン散乱したガンマ線が装置から逃げにくい構造となっており、結果として、超広角の視野が実現できる。今回、ホットスポットの正確な位置特定が可能な解像度を実現するために、250 ミクロンの位置分解能をもつ Si と CdTe ストリップ検出器 (128x128 画素) を開発した。特に CdTe 検出器に関しては、従来のガンマカメラに採用されてきたものが mm レベルの位置分解能であったことと比べると、格段に優れた位置分解能をもつ。図 2 に今回試作した検出器の写真を示す。実験室と実地での撮像試験で、180 度の視野に対して 128x128 画素の優れた解像度が得られる事を実証した。また、鉛等の遮蔽を使わずに高いコントラストのガンマ線画像をとることに成功しており、高い感度を軽い検出器で実現可能である。

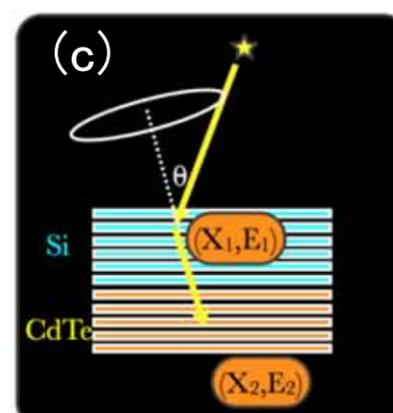
超広角ガンマカメラでは、ISAS が 1990 年代の終わりに ACRO RAD と開発に成功した、高いエネルギー分解能を持つ CdTe 半導体素子、および三菱重工業名古屋誘導推進システム製作所と開発した高密度実装技術が、実現の鍵を握る。CdTe 半導体は NaI(Tl)シンチレータやゲルマニウム半導体よりも光電吸収効率が高く、吸収体検出器として最適である。また、コンプトンカメラでは散乱体の電子の運動量分布によって角度分解能が制限されるが、Si を使うことで、この効果が軽減され到達可能な角度分解能はセシウム 137 からの 662 キロ電子ボルトでは 1-2 度程度である。



(a) 従来型のピンホールカメラ。ピンホール以外からのガンマ線を遮蔽する必要がある。



(b) コンプトンカメラの原理。ガンマ線がコンプトン散乱する反応を利用。



(c) ISAS/JAXA 高橋研究室が提唱してきた Si/CdTe コンプトンカメラの原理

図1 (a) 従来ガンマカメラ (b) コンプトンカメラの原理 (c) ISAS/JAXA 高橋研究室が世界に先駆けて提唱してきた Si/CdTe コンプトンカメラの原理。



図:2 JAXA が世界にさきがけて開発した Si/CdTe コンプトンカメラの原理実証モデルの写真。このモデルでは Si2層、CdTe3 層を密に多層構造にした。このような構造にすることで超広角の視野と核種固有のガンマ線を認識するエネルギー分解能を併せ持つ次世代型のコンプトンカメラが実現する。ここでは超広角コンプトンカメラを

構成する2ユニットを示す。

測定例

図3に宇宙科学研究所にて行った超広角コンプトンカメラによるイメージング試験結果を示す。この試験では、3種類の放射性校正線源（バリウム 133 (Ba-133), セシウム 137(Cs-137), ナトリウム 22(Na-22))を地面に置いて(図3左)、撮像を行った。図4のエネルギースペクトルに示したように、それぞれの核種から放射されるガンマ線に対して、別々のエネルギーウインドウを設定して解析することで、それぞれの核種の分布を同時に画像化できる。エネルギーで核種を分離できる能力を生かして、バリウム 133 を緑、セシウム 137 を赤、ナトリウム 22 を青で表示した。

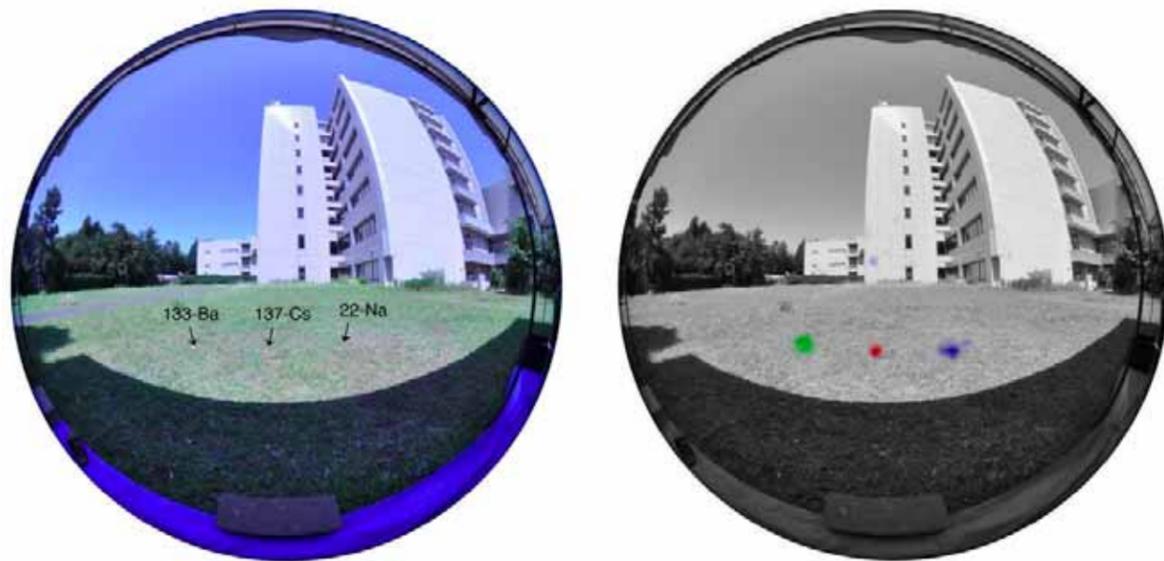


図:3 (左) 魚眼レンズをつけたデジタルカメラの写真。左からバリウム 133 (Ba-133), セシウム 137(Cs-137), ナトリウム 22(Na-22)の放射性校正線源を地面に設置。それぞれのエネルギーは、356 キロ電子ボルト (Ba-133)、511 キロ電子ボルト(Na-22)、662 キロ電子ボルト(Cs-137)である。(右)超広角コンプトンカメラと魚眼レンズのデジタルカメラの画像を重ねたもの。

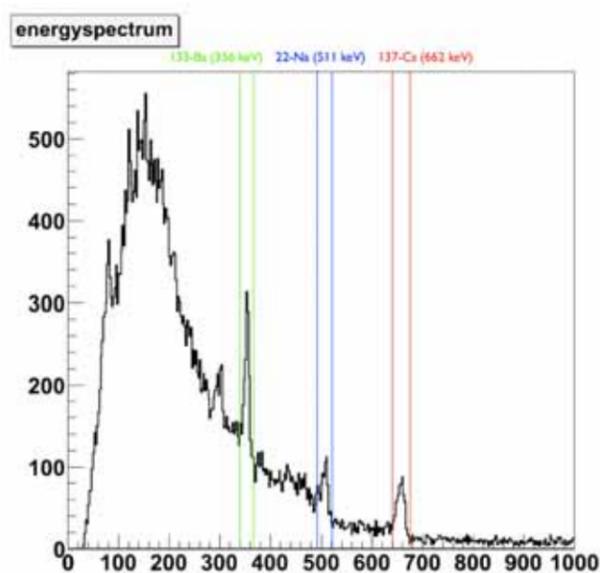


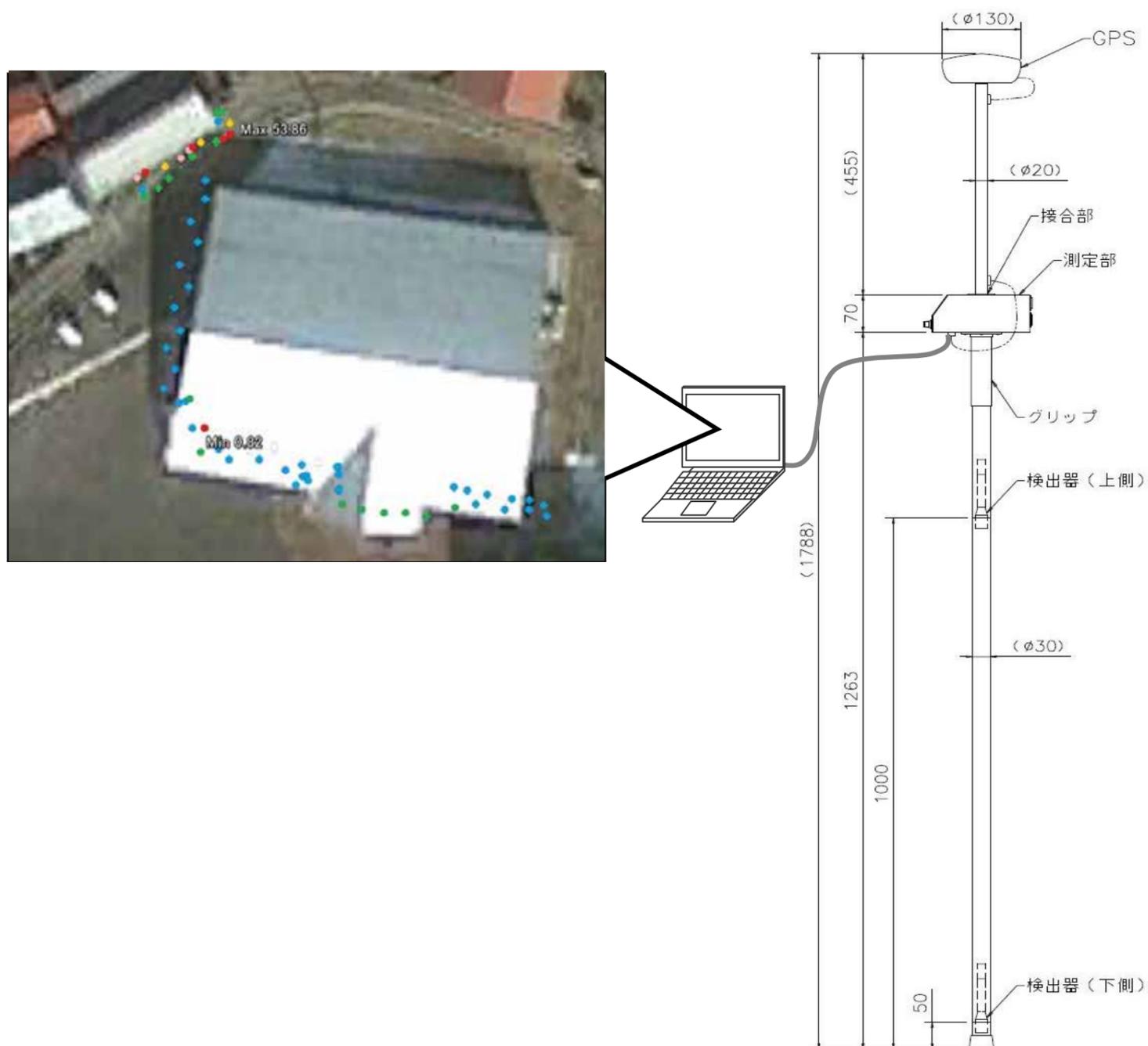
図:4 バリウム 133 (Ba-133), セシウム 137(Cs-137), ナトリウム 22(Na-22)の放射性校正線源を設置したときに超広角コンプトンカメラで得られるエネルギースペクトル。グラフの横軸はエネルギー (キロ電子ボルト)。

以上

ガンマプロッターHについて

日本原子力研究開発機構

ガンマプロッターH(Horizontal)は地表 5 cm及び 100 cmの位置にプラスチック・シンチレータ検出器をセットしたステッキを持って歩くことにより、環境中の放射線計測を実施するとともに測定地点を衛星測位システム(GPS)で計測し、放射線量率が地図上にプロットされ容易に放射線量率マップを作成することができる放射線計測器である。



特徴

- (1) 地表 5 cm及び 100 cm位置の空間線量率(0.1~300 μ Sv/h)を正確に測定可能
- (2) 放射線量率及び位置情報を自動記録(任意の時間間隔)及び任意記録が可能
- (3) 設定した放射線量率範囲を 6 色に分け放射線量マップを作成可能
- (4) 警報設定によりホットスポット検出をブザーで認知可能
- (5) バッテリー容量:3 時間程度

以上