

## 1

## 超広角コンプトンカメラによるガンマ線可視化技術

高橋 忠幸<sup>†</sup>, 武田伸一郎<sup>†</sup>, 渡辺 伸<sup>†</sup>

キーワード ガンマ線イメージング, コンプトンカメラ, テルル化カドニウム半導体検出器, 放射性物質

## 1 ま え が き

可視光領域を電子ボルト (eV) であらわすと、およそ2~3eVとなるのに対して、X線は、数keVから数10keVとなる。それよりもエネルギーの高い領域をガンマ線と呼ぶのが天文学の習わしである。ここでは100keVから数MeVまでをガンマ線と呼ぶこととする。

光による天文学が、人類の歴史ほど古くから始まったのに対して、X線やガンマ線による天文学の歴史は極めて短い。それは、これらが、ほとんど大気に吸収されてしまい、地上で観測することができないからである。そのため、宇宙に、X線やガンマ線で輝いている天体が数多く存在するということをわれわれが知ったのは、ロケットという大気圏外に出る手段をもってからである。宇宙には、数千万℃を典型的な温度とし、X線を熱的放射のピークとするような極限環境を生み出す天体が、数多く存在することが明らかになったのである。中性子星、ブラックホールなど、理論的に予言されていたような天体が宇宙には確かに存在し、X線やガンマ線はこうした環境を選択的に探ることができることがわかってきた。

X線天文学の発展はめざましく、今では、表面を滑らかにした金属面に斜入射させるようにした望遠鏡を用いることで、X線を集光し、焦点面検出器にX線CCDを用いて数秒角というような角度分解能を確保したイメージングが可能となっている。そして、実際にパルサーの回りの高温プラズマの動きを精緻にとらえたX線画像をも、とらえることができるようになっていく。

ところが、光子のエネルギーが100keVを超え、ガンマ線とよばれるようになると、高い角度分解能を持つイメージングは極めて難しい。それは、このようなエネルギーでは、「集光が極めて困難」だからである<sup>1)</sup>。

## 2 ガンマ線によるイメージング

ガンマ線は、物質中を通過する際、直接、電離や励起を起こさない。原子核の周りの電子がガンマ線光子を吸収し、光電子とオージェ電子が放出される現象を光電吸収といい、反応を起こした場所やガンマ線が元々持っていたエネルギーは、これらの電子をとらえることで決定できる。ガンマ線光子のエネルギーが電子の結合エネルギーよりも充分大きなエネルギーをもつ数10keV以上の領域では、原子核の周りの電子は自由電子とみなすことができ、コンプトン散乱と呼ばれるガンマ線と電子との相互作用が支配的になる。

エネルギーが数100keV以上のガンマ線が物資中に入ると、ガンマ線光子はコンプトン散乱を繰り返しながらエネルギーを失い、最終的に光電吸収を起こして止まる。したがって、最後の光電吸収にいたるまでの反応を全部起こさせるのに充分な「厚さ」がないと、入ってきたガンマ線が、検出器から抜けてしまうことが起こる。可視光なら紙一枚で、また、エネルギーが数keVのX線でも薄いアルミ板で遮蔽できるのに比べて、数100keVのエネルギーを持つガンマ線光子をとめるには、数cmもの厚さの重い鉛が必要となることも、ガンマ線のイメージングを困難にしている要因である。

ガンマ線をイメージングする、すなわち、ガンマ線が到来する方向を知るための方法として、ピンホールカメラがある(図1(左))。ピンホールカメラでは、小さな孔の開いた鉛やタングステン製の遮蔽板(マスク)をガンマ線に感度のあるセンサの前方に配置し、ガンマ線の入射方向とセンサ上で検知されたガンマ線の反応位置とを1対1に対応付けることでイメージングを行う。ガンマ線源の形状決定精度(角度分解能)は、充分に高い位置分解能を持つセンサが用意された場合に、孔の大きさとマスク・検出器との距離によって決まる。

宇宙観測では、沢山の孔を規則的にあけた符号化マスク(コーデッドマスク)と、シンチレータや半導体センサレイを組合せてガンマ線イメージングを行う方法が用いられることが多い。コーデッドマスクは一つ一つの開口部がピンホールカメラの孔に対応していると考えればよく、観測さ

<sup>†</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

"Visualization of Radioactive Substances with an Ultra-wide Angle Compton Camera" by Tadayuki Takahashi, Shin'ichiro Takeda and Shin Watanabe (Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), JAXA, Sagamihara)

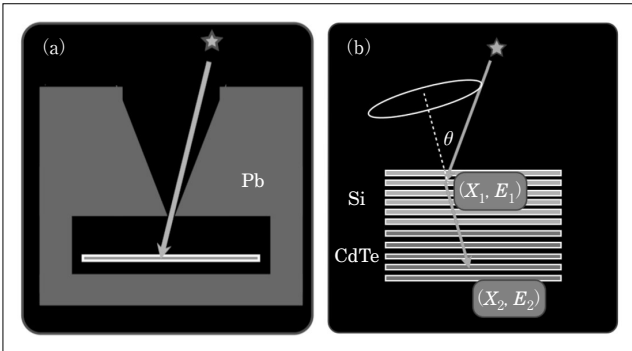


図1 (a) ピンホールカメラの原理。ピンホール以外からのガンマ線を遮蔽する必要がある。視野角はピンホールの開口角で規定され、 $40^\circ$  から  $60^\circ$  である。(b) Si/CdTe コンプトンカメラの原理。入射したガンマ線はSiのイメージング素子で散乱され、CdTeのイメージング素子で吸収される。それぞれで測定したエネルギーと反応位置から、コンプトン散乱の運動学を用いてガンマ線の入射方向に制限を加える。(口絵カラー参照)

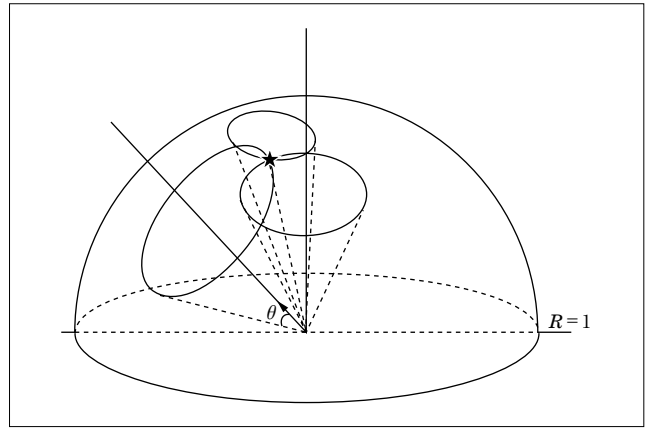


図2 ガンマ線は散乱をおこした位置から、コンプトン散乱の運動方程式を解いて得られる角度  $\theta$  から飛来している。したがって、複数のガンマ線の情報を用いることで、ガンマ線源の位置(図中星印)を知ることができる。この解析方法をバックプロジェクション法と呼ぶ。

れる画像は複数のピンホールからの画像の重ね合わせになる。したがって、取得したデータから、用いたマスクの幾何学的パターンに応じ、フーリエ変換などを用いて光源の画像を再構成することになる。

ピンホールカメラも  $100\text{keV}$  程度のエネルギーのガンマ線であれば、比較的容易に作るができる。しかし、ガンマ線のエネルギーが高くなるにつれて、マスクそのものがガンマ線に対して透明になってしまうため、数cm厚もの鉛の板にピンホールを作る必要がある。また、放射性物質が四方に分散している状況では、ガンマ線センサの後方から入ってくるバックグラウンドのガンマ線を遮蔽するための鉛シールドも必要である。そのために、重い検出器となってしまう。

これまでにイメージングが難しかった数  $100\text{keV}$  から数  $\text{MeV}$  のエネルギー領域で、最近、着目されているのが、コンプトンカメラの技術である。

コンプトンカメラは、装置内部で起こった「コンプトン散乱」のプロセスを記録し、そのエネルギー・位置情報とコンプトン散乱の運動方程式から、ガンマ線の到来方向を求めるカメラである。従来のガンマカメラで用いられてきたピンホールやコリメータを必要としないばかりか、シールドすら必要としない次世代型ガンマ線カメラとして位置づけられている。

### 3 Si/CdTe 半導体コンプトンカメラ

コンプトンカメラは1970年代に提唱され、いちはやく宇宙観測に使用された。NASA CGRO衛星コンプテル (COMPTEL) ガンマ線望遠鏡 (1991-2000) は、ガンマ線帯域において優れた感度で宇宙天体観測を行ったが、サイズ  $2\text{m}$ 、総重量  $1.5\text{t}$  の巨大なシステムで、地上用途へと展開するのは不可能であった。その後、半導体検出器やガス検出器の著しい発展を背景として、さまざまな次世代コンプト

ンカメラが提案されている。しかしながら、必要な効率や画像分解能で可視化を行い、また、比較的簡便な手法で現地での撮像ができるような装置は存在せず、実証は実験室レベルにとどまっていた。

筆者らのグループは、ガンマ線領域で新しい天文学を切り開くことをめざし、20年前から大気球実験や、「すざく」衛星、そして次のX線天文衛星ASTRO-H<sup>11)</sup>を舞台にして、高感度ガンマ線センサの開発を行ってきた。特に、最近ではシリコン (Si) とテルル化カドミウム (CdTe) 半導体のイメージング素子を組合せたSi/CdTe半導体コンプトンカメラを提案、日本の次期X線衛星ASTRO-Hへの搭載をめざして、開発を進めてきた<sup>8)~10)</sup>。優れた位置分解能と高いエネルギー分解能、高い時間分解能をあわせもつようなSiとCdTeの半導体イメージング素子を作ることができれば、それらを組合せることで、非常にコンパクトで、角度分解能 (画像の細かさ) の優れたカメラが実現するからである。

Si/CdTe半導体コンプトンカメラの概念図を図1(右)に示す。ここではSiは主に散乱体として機能し、CdTeは吸収体として機能する。エネルギー  $E_{in}$  の入射ガンマ線に対して、そのコンプトン散乱の位置 ( $X_1$ ) と反跳電子の運動エネルギー ( $E_1$ )、散乱されたガンマ線の吸収位置 ( $X_2$ ) とエネルギー ( $E_2$ ) を計測すると、

$$E_{in} = E_1 + E_2 \tag{1}$$

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

のコンプトン散乱の運動学を使うことで、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向  $\theta$  を計算することができる。ここで、 $m_e c^2$  は電子の静止エネルギーである。一つのガンマ線に対して、入射方向は  $X_1$  を頂点として作った円錐の表面に制限され、天球上の円環として描かれる。複数のガンマ線を計測し、円環を重ね合わせることで、ガンマ線源の位置を特

定できることになる\* (図2)。半導体検出器は優れたエネルギー分解能と位置分解能を持つため、式(1)、式(2)でも示されるように、高い角度分解能( $\theta$ の高い決定精度)が実現可能であり、イメージング能力に重要な役割を果たす。

Si半導体は原子番号が14と小さいため、コンプトン散乱を起こす確率が光電吸収に比べて高く、また、ドップラーブロードニング効果の影響が小さいという利点がある。この効果は、コンプトン散乱が、式(1)、式(2)で仮定されているように静止した自由電子ではなく、実際には原子核に束縛されている電子との間でおこることによる不定性である。これがコンプトンカメラによる角度分解能の限界を決定する。数100  $\mu$  mの位置分解能のセンサを用いたSi/CdTeコンプトンカメラでは、600keV程度のエネルギーを持つガンマ線の到来方向を2°程度の角度分解能で識別することができる<sup>13)</sup>。

#### 4 超広角コンプトンカメラを用いた 放射性物質の分布の可視化実証試験

原子力発電所の事故により、ヨウ素131 (<sup>131</sup>I) やセシウム134 (<sup>134</sup>Cs)、セシウム137 (<sup>137</sup>Cs)などの放射性物質を含んだ塵が広範囲に飛来した<sup>14)</sup>。放射性物質中の原子核が崩壊して安定な原子核になる過程で放出されるガンマ線の強度が高いと体に悪い影響を及ぼす可能性がある。したがって、早急に放射性物質を含んだ塵を取り除くこと、つまり、除染が必要である。そのためには、放射性物質がどこにあるかを知る必要がある。線量計を持って地面をくまなく探してもよいが、もし、<sup>137</sup>Csなどから直接放射されるガンマ線を見ることができれば、その源となっている放射性物質の場所も知ることができる。

2011年3月11日に、わが国に震災がおり、セシウムからの放射線が多くの人々の生活に影響を与えている事実を知るにつれ、筆者らが開発してきた半導体を用いた検出器で何とか役にたてないかと思っていた矢先、東京電力から「宇宙でX線を観測する技術で、放射線の強いところ、弱いところがどこか、広範囲にわたって一度に見分けることができなにか」という問合せがあり、宇宙観測のために開発していたガンマ線のイメージング技術をこの国難に役立てることとなった<sup>2)~7)</sup>。

図3に、実証実験用に製作したコンプトンカメラの写真を示す。2層のSi検出器と3層のCdTe検出器から構成されている。各層を数mmのギャップで積層することにより、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、カメラの正面から80°離れた位置から入射するガンマ線であっても、検出効率の低下は20%程度である。このような超広角の視野は、現地で放射

\* 散乱体中での電子飛跡をも求めることができると、入射ガンマ線の到来方向は円環上の一点に定められる。しかし、高い角度分解能を得るために必要なエネルギー分解能と、位置分解能、さらに充分な検出効率を確保しつつ、電子飛跡をとらえるイメージング素子を得ることは現状では難しい。

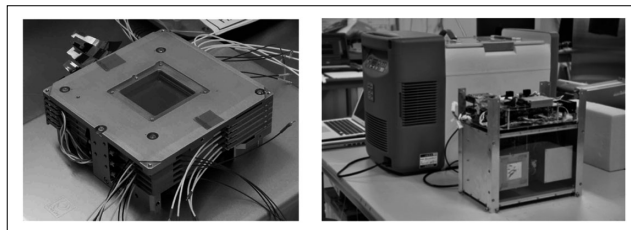


図3 試作した超広角コンプトンカメラの写真

(左)SiとCdTeのイメージャ(両面ストリップ検出器)をそれぞれ、2層と3層積み重ねた検出器。本カメラのために開発された読み出し用の低雑音多チャンネルASICには電荷増幅アンプ、整形アンプ、コンパレータ、そしてA/Dコンバータが組み込まれており、検出器の信号はデジタル信号に変換された上で出力される(右)冷却用の可搬型冷蔵庫と2台用意したコンプトンカメラ。冷蔵庫の外側に超広角レンズをつけた小型デジタルカメラを装着した。(口絵カラー参照)

線物質の分布の可視化を行うときに、極めて有効であることから、筆者らは、この試作機を「超広角コンプトンカメラ」と呼ぶことにした。

超広角コンプトンカメラのもう一つの特徴は、一度の撮像で、複数の核種の分布をカラー画像化できることにある。図4は、宇宙科学研究所で行ったコンプトンカメラのデモ実験で得たガンマ線画像とスペクトルである。

この実験では、宇宙科学研究所の中庭に<sup>133</sup>Ba、<sup>22</sup>Na、<sup>137</sup>Csの3種の較正用点線源を配置し、約3m離れた地点からコンプトンカメラで撮像を行った。コンプトンカメラで測定したエネルギー情報から、解析の段階で、それぞれの放射線源から放出される特定のエネルギー(<sup>133</sup>Ba: 356keV、<sup>22</sup>Na: 511keV、<sup>137</sup>Cs: 662keV)のイベントを抜き出し、バックプロジェクション法によって画像化した。各点線源の位置は、魚眼レンズを装着したデジタルカメラ画像での位置とよく一致しており、複数の核種を識別できる能力を示す。

「超広角コンプトンカメラ」による放射性物質の撮像実証試験は、2012年2月、計画的避難区域に指定されている福島県飯舘村などにおいて実施された<sup>2)</sup>。超広角コンプトンカメラによる画像から識別されるガンマ線強度が線量計ではかったものとコンシステントであるかを検証するために日本原子力開発機構、東京電力の線量測定機器とともに測定が行われた。

製作した超広角コンプトンカメラは、市販の車載用冷却ボックスに入れ、-5℃に冷却した状態で測定を行った。冷却ボックス前方には、小型の魚眼レンズを装着したデジタルカメラを取り付け、可視光画像とガンマ線画像を重ね合わせることで、放射性物質の分布を視覚的にとらえることができるようにした。魚眼レンズを採用したのは、コンプトンカメラの広角撮像能力を十分に生かすためである。

一例として、空間線量が3  $\mu$  Sv/h程度の地域で取得したガンマ線画像を図5に示す。画像中、赤色がガンマ線の強度が強い場所を示している。ここは、建物の屋根をつたって雨水が落ちる場所になっており、最大30  $\mu$  Sv/hのホッ

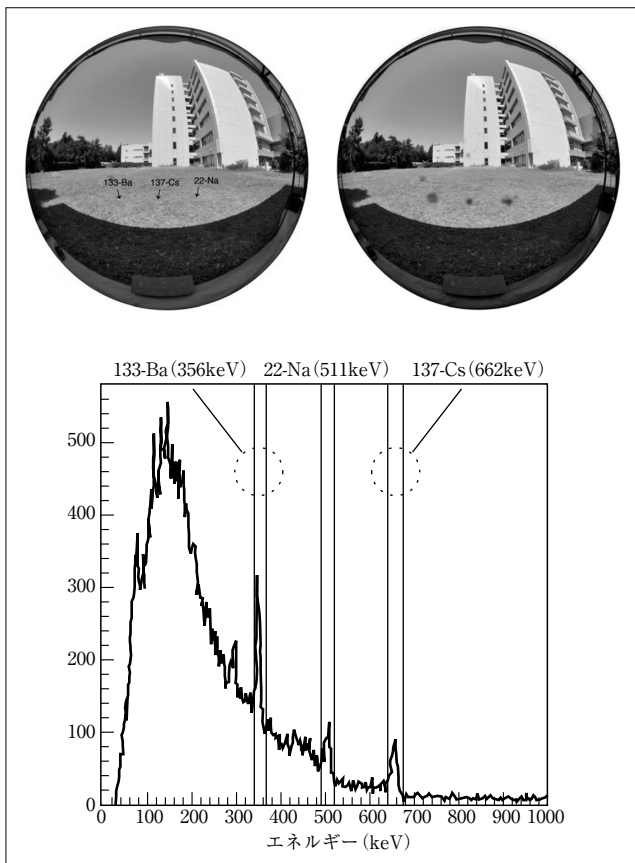


図4 (上左)魚眼レンズをつけたデジタルカメラの写真。左からバリウム133 ( $^{133}\text{Ba}$ )、セシウム137 ( $^{137}\text{Cs}$ )、ナトリウム22 ( $^{22}\text{Na}$ )の放射性校正線源を地面に設置。それぞれのエネルギーは、356keV ( $^{133}\text{Ba}$ )、511keV ( $^{22}\text{Na}$ )、662keV ( $^{137}\text{Cs}$ )である。(上右)超広角コンプトンカメラと魚眼レンズのデジタルカメラの画像を重ねたもの。(下)同時に取得されたエネルギースペクトル。解析時に指定したエネルギー範囲のガンマ線事象を用いてイメージを構成する<sup>13)</sup>。(口絵カラー参照)

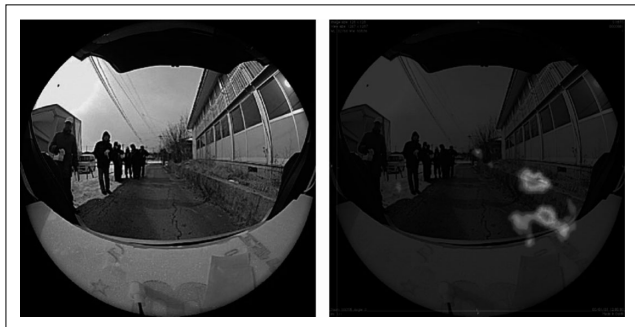


図5 飯舘村で取得した画像

(左)魚眼レンズを装着したデジタルカメラの可視光画像。(右)可視光画像にガンマ線画像を重ねた画像。 $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ から直接放出される605、662、796、802keVのガンマ線の強度(フラックス)分布。赤が強度が高く、青が強度が低い。最大30  $\mu\text{Sv/h}$ のホットスポットが明るく見えている。撮像時間60分。(口絵カラー参照)

トスポットが存在している。このように、今後除染が必要となるエリアにおいて、実際にホットスポットの画像化に成功し、除染作業における本装置の適用が効果的であることがわかった。

## 5 医療への応用

核医学や小動物イメージングなど、医療イメージングの分野においても、コンプトンカメラの応用が期待されている<sup>12) 15) 16)</sup>。この分野では、放射性核種を薬剤にラベルした放射性薬剤を生体に投与し、外部のイメージング装置で放射性核種からのガンマ線を検出して、薬剤の体内分布、体内動態を画像化する。コンプトンカメラを用いることの利点として、装置の高感度化による患者と従事者の被曝量の低減を挙げることができる。

これまでのイメージング装置では、鉛もしくはタングステン製のコリメータやピンホールマスクを検出器の前方に配置し、ガンマ線の方向と検出器上の位置とを対応付けることで、放射性薬剤の画像化を実現してきた。しかしながら、依然として装置の感度は低く、放出されたすべてのガンマ線に対して、実際に装置で検出しているものは、わずか0.01%に過ぎない。これは、直径3~5mmの孔を通過してきたガンマ線しか検出できないためであり、コリメータやピンホールマスクを使う撮像方法の原理的な限界である。もし、装置の感度を飛躍的に高める別の方法があれば、薬剤の投与量の低減と撮像時間の短縮が図れ、被曝量の低減につながる。

コンプトンカメラの場合には、コリメータやピンホールマスクを用いることなくイメージを取得できる。特に、Si/CdTe半導体コンプトンカメラの広角撮像能力は、装置前方のあらゆる方向からのガンマ線を検出できることを意味しており、小型の装置で高い感度を達成する上で有利である。同時に、散乱体にシリコンを用いることで実現した優れた角度分解能は、従来機器にくらべても遜色のない、数mmの空間分解能での撮像を可能とする(図6)。この他にも、粒子線治療におけるモニタとしての利用も考えることができ、将来的には放射線医学の発展に資するべく、群馬大学重粒子線医学研究センターとの共同研究が行われている。

## 6 む す び

筆者らは、独自に開発を行った超広角コンプトンカメラを用い、福島県の計画的避難区域などにおいて、ガンマ線可視化装置の実証を行った。このカメラを用いることで180°の視野において、10m先で1m程度の大きさのホットスポットの存在を可視化できる。一方で、今後の除染作業において、超広角コンプトンカメラのコンセプトを最大限に生かすためには、感度を数倍から10倍程度向上させて、実証機が数10分かけて撮像しているような場所で数分以内で画像化することが必要である。また、住宅の周囲ばかりではなく、山林などにおいて使うことを求められているために、持ち運びが容易なように数kg程度の重量におさえること、さらに、除染作業による操作を容易にすることが、今後の課題であることも学んだ。

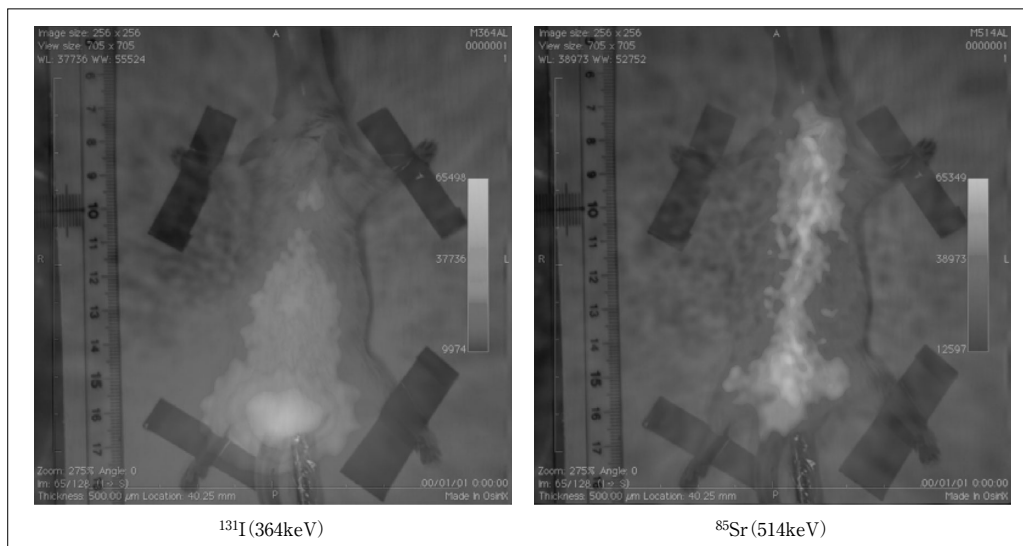


図6 Si/CdTe コンプトンカメラの実証機を用いて取得したマウスの画像（マウスはうつぶせとなっている）ヨウ素とストロンチウムが集中している場所が違う様子がわかる。ストロンチウムには骨に集中している<sup>12)</sup>。（口絵カラー参照）

超広角コンプトンカメラは、構成するSiやCdTeイメージング素子の枚数を増減することが容易な設計となっている。そのため、実証に用いたカメラの10倍以上の感度を持ち、数10分かかっていた撮像時間を数分以内にするような高感度化を現在科学技術振興機構の支援のもと、三菱重工業、名古屋大学と共同で進めており、商用化をめざしている。

謝 辞

「超広角コンプトンカメラ」の研究開発は、本研究室のこれまでの大学院生、アクロラド社、三菱重工業名古屋導システム製作所、さらに名古屋大学太陽地球環境研究所の田島宏康、大阪大学理学部の能町正治、群馬大学医学部中野隆史、岡山大学榎本秀一ほか、多くの方々の協力を得て進められてきた。超広角コンプトンカメラの技術を発展させたASTRO-H衛星の硬X線イメージャ(HXI)や軟ガンマ線検出器(SGD)は、JAXA宇宙科学研究所の他、東京大学、名古屋大学、広島大学、早稲田大学、東京工業大学などからなるチームが力をあわせ、開発を行っている。

(2013年1月7日受付)

〔文 献〕

- 1) 井上一, 小山勝二, 高橋忠幸, 水本好彦: “宇宙の観測II「高エネルギー天文学」, シリーズ現代の天文学17, 日本評論社 (2008)
- 2) JAXA 記者発表, [http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120329\\_compton.html](http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120329_compton.html)
- 3) 渡辺伸, 武田伸一郎, 高橋忠幸: “科学”, 岩波書店 (July 2012)
- 4) 高橋忠幸, 渡辺伸, 武田伸一郎: “宇宙科学研究所ISASニュース”, 2012年7月号, <http://www.isas.jaxa.jp/ISASnews/No.376/ISASnews376.html>
- 5) 武田伸一郎, 渡辺伸, 高橋忠幸, 日本アイソトープ協会 Isotope News, 2012年10月号, アドコム・メディアOplusE, 2012年12月号

- 6) T. Takahashi et al.: "2012 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record" (2012)
- 7) 高橋忠幸, 武田伸一郎, 渡辺伸, 物理学会誌 (出版予定) (2013)
- 8) T. Takahashi et al., New Astronomy Reviews, **48**, pp.309-313 (2004), SPIE, **4851**, pp.1228-1235 (2003)
- 9) S. Watanabe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **52**, pp.2045-2051 (2005)
- 10) T. Takahashi et al.: "CdTe detectors and their applications to gamma-ray imaging", in Biological and Medical Sensor Technologies (CRC Press) (2012)
- 11) T. Takahashi, et al., SPIE, **8443**, pp.8443 1Z-1-8443 1Z-22 (2012) SPIE, **7732**, pp.77320Z-77320Z-18 (2010)
- 12) S. Takeda, et al., IEEE Trans.Nucl.Sci., **59**, pp.70-76 (2012)
- 13) S. Takeda, et al., IEEE Trans.Nucl.Sci., **56**, 3, pp.783-790 (2009), Physics procedia, **37**, pp.859-866 (2012)
- 14) <http://radioactivity.mext.go.jp>
- 15) S. Motomura, et al., IEEE Trans.Nucl.Sci., **54**, 3, pp.710-717 (2007)
- 16) S. Kabuki, et al., NIM A, **580**, pp.1031-1035 (2007)



**高橋 忠幸** 1987年, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修了。東京大学理学系研究科助手, 1995年, 旧文部科学省宇宙科学研究所(現JAXA宇宙科学研究所)助教を経て, 2001年より, 同研究所教授。現在, X線天文衛星ASTRO-Hのプロジェクトマネージャを務める。専門分野は高エネルギー宇宙物理学, 放射線検出器。博士(理学)。



**武田伸一郎** 2009年, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修了。理化学研究所基礎科学特別研究員を経て, 2011年より, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所研究員。宇宙, 医療, セキュリティ分野におけるガンマ線検出器の研究開発に取組んでいる。博士(理学)。



**渡辺 伸** 2004年, 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻修了。日本学術振興会特別研究員(SPD)を経て, 2006年, 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所本部(現, 宇宙科学研究所)助手。2007年より, 同研究所助教。現在, X線天文衛星ASTRO-H軟ガンマ線検出器の副リーダーを務める。博士(理学)。