

コンプトンカメラで放射性物質の飛散状況を可視化する◇◇◇話題◇◇◇

高橋 忠幸
武田 伸一郎
渡辺 伸

（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 e-mail: takahashi@astro.isas.jaxa.jp）

（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 e-mail: takeda@astro.isas.jaxa.jp）

（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 e-mail: watanabe@astro.isas.jaxa.jp）

2011年3月に東北地方を襲った大地震によって福島第一原子力発電所から放出された放射性物質が、国民生活に大きな影響を与えており、効率の良い除染がわが国の喫緊の課題となっている。われわれは、次期X線衛星ASTRO-Hのために開発を行ってきたSi/CdTeコンプトンカメラの技術を応用し、超広角コンプトンカメラと呼ばれるガンマ線カメラを急遽作り上げた。現地において、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イメージング実験を行い、その源となっている放射性物質の分布を知る事ができる事を示した。

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、我が国に大きな傷跡を残した。大地震によって福島第一原子力発電所から放出された放射性物質が、国民生活に大きな影響を与えており、この放射性物質を、いかにして除去するかが、わが国にとって重要な課題である。

原子力発電所の事故により、ヨウ素 ^{131}I やセシウム ^{134}Cs 、セシウム ^{137}Cs などの放射性物質を含んだ塵が広範囲に飛来した¹⁾。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か、もし、 ^{137}Cs などから直接放出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。それが、ガンマ線カメラを用いた可視化の試みである。

われわれのグループは、硬X線やガンマ線とよばれる領域で新しい天文学を切り拓くことをめざし、20年前から大気球実験や、「すぐく」衛星、そして次のX線天文衛星ASTRO-H²⁾を舞台にして、高感度ガンマ線センサーの開発を行なってきた。震災がおこり、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た事実を知るにつけ、われわれ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出来ないでしょうか」という問い合わせがあり、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。

2. 求められている事

何とか、できる事で貢献しようと決意はしたものの、実際には、現場はどのような空間線量なのか、どのようなエネルギーのガンマ線がとんでいるのか、そしてホットスポットがどのように観測されるのか見当もつかない状況であった。われわれ自身が現地での状況を知らないままで、ガンマ線イメージング用にわれわれが開発している「コンプ

トンカメラ」がそもそも機能するのかすらも判断できなかつたのである。そこで、2011年夏より、関係諸機関の許可を得、週末に、線量計や簡単なガンマ線検出器をもって現地にでかけることとなった。その結果、公開されているような強度の空間線量の場所があること、またそこでは、地上5cmで空間線量の10倍程度の線量を示すホットスポットが確かに存在する事を知り、 ^{134}Cs や ^{137}Cs から直接放出されるエネルギーの決まったガンマ線の他、それらのガンマ線が周囲の地面や建物で散乱して低いエネルギーに変わつて出て来たガンマ線が多くを占めることも観測できたのである。そして、われわれのコンプトンカメラであれば、放射性物質の場所を見つけることが十分可能で、役にたてそうであることも分かった。

現地に出かけて測定を行なった結果、ガンマ線カメラに求められている性能は

1. ^{134}Cs や ^{137}Cs から放出されるエネルギーの決まった核ガンマ線を識別するための必要なエネルギー分解能(3% ($\Delta E/E$)程度)。
2. 効率の良い除染を行なうためには、除染の前後で撮像を行い識別されたホットスポットが本当に取り除かれたかどうかを知ることが必要である。そのための周囲一帯のホットスポットのマップを効率よく作成するための十分広い視野。
3. 1メートル先であれば10–20センチメートル、また、10メートル先の1–2メートル程度のホットスポットを識別する事が可能な角度分解能。
4. 環境バックグラウンドが0.5から数 $\mu\text{Sv}/\text{h}$ の状況で、レベルの増加に寄与しているホットスポットを識別できる感度を有すること。実際には、バックグラウンドの強度に応じて検出できるホットスポットの強度が決まってしまうので注意が必要であり、数分から数10分程度で周囲全体のホットスポットのマップが作れるような感度を有する事。

と識別し、こうした条件を満たすガンマ線カメラを急遽作って現地に持ち込む事とした。

^{134}Cs や ^{137}Cs 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。エネルギーが高いため、遮蔽をしたり、コリメータを作るのが難しい。医療などでよく用いられるガンマ線の可視化の方法にピンホールカメラがある。この手法では、小さな孔の開いた鉛製の遮へい板をセンサー前方に配置し、ガンマ線の入射方向とセンサー上の位置とを一対一に対応付けることでイメージングを行う。この方法では、単位時間に測定可能なガンマ線のフラックスはその孔の大きさによって決まる。また、孔を通過しないガンマ線が画像バックグラウンドになるため、遮蔽として数センチ厚の鉛でセンサーをとりかこむ必要がある。

一方、このエネルギー領域で主要な反応であるコンプトン散乱を積極的に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。コンプトンカメラはコンプトン運動学を使って入射ガンマ線の方向を知ることができる。特に入射するガンマ線のエネルギーが決まっている場合には、その条件も使うことができるため、厚く、重い遮蔽で囲まずに高い感度を実現することができる。コリメータやピンホールなどを用いることなくイメージを取得できるコンプトンカメラは、医療や、非破壊検査、またガンマ線モニター測定、またセキュリティなどにおいて非常に有望な技術であると考えられている。

3. Si/CdTe コンプトンカメラ

コンプトンカメラは、1970年代に提唱された。いちはやく宇宙環境で使用されたのが、NASA CGRO衛星コンプテル (COMPTEL) ガンマ線望遠鏡(1991-2000)である。当時、コンプテル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 m、総重量 1.5 トン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、様々な次世代コンプトンカメラが提案されている。

われわれのグループは、15 年ほど前からシリコン (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み合わせた Si/CdTe コンプトンカメラを提案、開発を進めてきた^{3, 4, 5)}。数 100 ミクロンの優れた位置分解能、半値全幅 (FWHM) で数 keV の高いエネルギー分解能、そして数マイクロ秒という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事ができれば、それらを組み合わせることで、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。

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学から導かれる式から、ガンマ線の入射方向を求めるカメラである。Si/CdTe コンプトンカメラの概念図を図 1(左)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。コンプトン

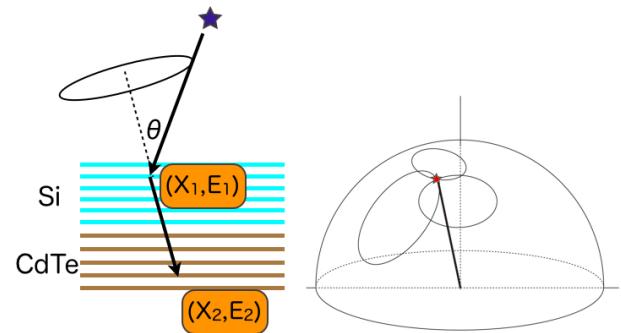


図 1 (左)Si/CdTe コンプトンカメラの原理。入射したガンマ線は Si のイメージング素子で散乱され、CdTe のイメージング素子で吸収される。それぞれで測定したエネルギーと反応位置から、コンプトン運動学を用いてガンマ線の入射方向に制限を加える。(右) ガンマ線の飛来方向は散乱をおこした位置から角度 θ の方向から飛来する。したがって、複数のガンマ線の情報を用いることで、ガンマ線源の位置を知ることができる。この解析方法をバックプロジェクション法と呼ぶ。

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、

$$E_{\text{in}} = E_1 + E_2, \quad (1)$$

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

のコンプトン散乱の運動学を使うことで、 θ を計算することができる。1 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 1(右))。半導体検出器により、優れたエネルギー分解能と位置分解能との実現が可能で、これらは式 (1), (2) でも示されるように、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⁶⁾ 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), (2) で仮定されているように自由電子ではなく、原子核に束縛されていることに起因する不定性で、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。

CdTe 半導体は、NaI(Tl) シンチレータと同等のガンマ線阻止能力を持つ、新しい半導体検出器である。Ge 半導体と異なり、ほぼ室温での動作が可能であることも特徴である。CdTe 半導体は、素子内で発生した電子・正孔対を集めきるのが難しく、高いエネルギー分解能をもった検出器の実現は困難とされていた。われわれは、これまでに、数 10 keV のエネルギーのガンマ線に対して、1 keV (半値全幅 FWHM) をきるような、エネルギー分解能の極めて高い半導体素子の開発に成功し、イメージングが可能な撮像素子

を実現した^{7, 8)}。これが、Si/CdTe コンプトンカメラの実現の鍵となっている。

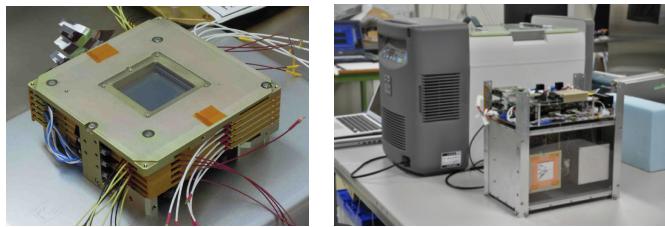


図 2 試作した超広角コンプトンカメラの写真。(左) Si と CdTe のイメージャーをそれぞれ、2層と 3 層積み重ねた検出器。本カメラのために開発された読み出し用の低雑音多チャンネル LSI には ADC が組み込まれており、検出器の信号はデジタル信号に変換された上で出力される。(右) 冷却用の可搬型冷蔵庫と 2 台用意したコンプトンカメラ。冷蔵庫の外側に超広角レンズをつけた小型デジタルカメラを装着した。

4. 超広角コンプトンカメラ

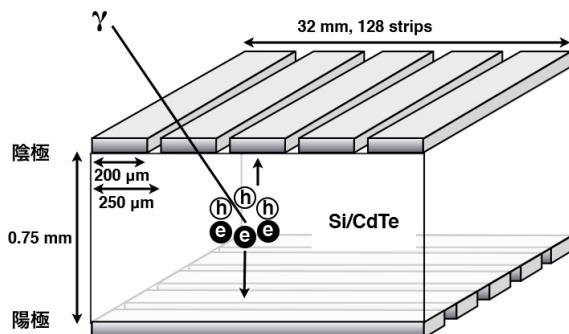


図 3 両面ストリップ検出器では Si や CdTe 半導体素子の両面に数 100 ミクロンの幅の電極を形成する。陽極面と陰極面とで電極の向きを直交させ、それぞれから同時に読み出すことで、反応したガンマ線のエネルギーと反応箇所を知る事ができる。

日本の次期 X 線衛星 ASTRO-H は 2015 年度の打ち上げに向けて、現在開発中である。ASTRO-H は 2 台の軟 X 線望遠鏡とそれらの焦点面検出器であるマイクロカロリメータと X 線 CCD の他、2 台の硬 X 線望遠鏡のための硬 X 線イメージング検出器 (HXI)，そして、軟ガンマ線検出器 (SGD) を搭載する²⁾。SGD は天体からやってくる微弱なガンマ線信号を検知するために、32 層の Si 検出器と 8 層の CdTe 検出器を積層した、多層型の Si/CdTe コンプトンカメラである⁹⁾。われわれは、ASTRO-H 衛星に搭載することをめざして、Si/CdTe コンプトンカメラを提案し、様々な試作機でその性能を試験してきた。実際、Si と CdTe の両面ストリップ検出器(図 3)を組み合わせたものでは、662 keV のガンマ線に対して 2.5 から 4° 程度の角度分解能 (FWHM)¹⁾を実現している⁵⁾。

¹⁾ 実際のガンマ線源の方向と、天球に描いた円環との最小離角分布の半値全幅 (FWHM)。線源が円環の内側にある時を正、外側にある時を負で定義する

東京電力からの依頼を受けた段階で、前述した要求性能を満たし、持ち運びにも耐えるものは存在しなかった。ASTRO-H はちょうど詳細設計の段階になつていて、そこで使われるコンプトンカメラの設計図はできており、部分的な試作もはじまっていたが、そのまま現地に持つていく事は技術的にも難しく、新たに専用機を試作することになった。そして、急遽、ASTRO-H の HXI の構造 (5 層のセンサー)¹⁰⁾をそのまま使い、500 keV 以上のガンマ線に対する感度を向上させるために使用する 250 ミクロンピッチの Si と CdTe の両面ストリップ検出器をそれぞれを 2 枚と 3 枚 (HXI は 4 枚と 1 枚) に変更、さらに読み出しのアナログ LSI を SGD 用の広帯域タイプに変更したハイブリッド型の検出器を組み上げた。

図 2 に福島での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 間隔で積層することにより、コンプトン散乱したガンマ線が層間の隙間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 度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、現地で放射線物質の分布の可視化を行なうときに、極めて有効であることから、われわれは、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。

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、マイナス 5°C 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なった。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。

5. 放射性物質の分布の可視化実証試験

「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 11 日、福島県飯館村において、われわれ宇宙航空研究開発機構と日本原子力研究開発機構、東京電力株式会社との共同で実施された¹¹⁾。

図 4 に、超広角コンプトンカメラによって取得されたスペクトルをしめす。複数のラインを検出していることがわかる。¹³⁴Cs からの 605 keV, 796 keV, 802 keV と ¹³⁷Cs からの 662 keV のそれぞれのラインに対して、図中に示したエネルギーウインドウを設定し、このウインドウに含まれない事象は棄却する。569 keV のラインは連続成分の混入が大きいため、ここでは使用していない。

コンプトン散乱の運動学より計算した散乱角 θ と、光子の散乱方向ベクトルから、イベントを天球の円環へと投影する過程をバックプロジェクション (逆投影) とよぶ。カウント保存のために、円環は積分値が 1 となるように規格化

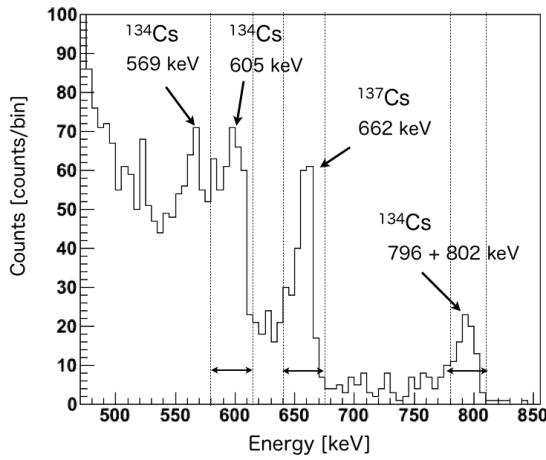


図 4: 現地で取得したガンマ線スペクトル

する。複数のイベントを検出し天球に円環を重ね合わせていくことで、放射性物質の方向を特定する(図 1(右))。ひとつの円環は、到來方向の確率密度と見なすことができ、最終的にホットスポットの可視化に至るまでには統計的な処理を必要とする。

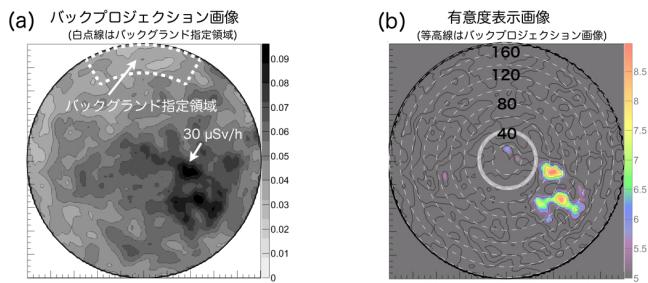


図 5 飯館村における可視化実験の結果。(左) コンプトン運動学を用い、バックプロジェクション法によって得られた強度分布。(右) 左図に有意度マップを重ねた図。図中の円は中心からの視野角を示す。

ここで、最初の散乱でガンマ線が電子に与えたエネルギーを測定する検出器と散乱されたガンマ線のエネルギーを測定する検出器で測定したエネルギーの和が、検出器のエネルギー分解能の範囲で、対象とするガンマ線のエネルギーと等しい事象を選んで画像を再構成することが重要である。放射性物質から放出されるエネルギーの決まったガンマ線が地面や建物でコンプトン散乱されると、エネルギーの低いガンマ線となる広い分布をもったエネルギースペクトルとなる。放射性物質からのガンマ線が直接検出器に飛んで来たガンマ線をできるだけ選択するようにエネルギー範囲をしづらって画像を作ることで、高いシグナル/バックグラウ

解説 コンプトンカメラで放射性物質の飛散状況を可視化する

ド比の画像を得ることができる。

検出したガンマ線一つ一つについてコンプトン運動学を解いて求められる円環を重ね合わせていくと画像に濃淡が生まれる。今回試作を行なった超広角コンプトンカメラでは、点線源を観測した場合にイメージの広がり(点拡がり関数(Point Spread Function))はひろい裾野成分をもつ。そのため、放射性物質の集積が作り出すイメージの定量化のためには、この裾野成分を考慮した解析が必要である。

図 5(左)に飯館村における観測において、計 717 事象から得られたコンプトン円環を重ね合わせて得たバックプロジェクションの図を示す。われわれは、画像上に、信号の混入が無いバックグラウンド領域を定め、バックグラウンド領域の単位ビンあたりの強度分布の平均値(オフセット値)と分散を求め、画像全体からオフセットを差し引いた上で、バックグラウンド領域の分散の値から有意度を判定した。図 5(右)が、バックプロジェクション画像の等高線の上に、スレッシュホールドを分散値の 5 倍とした有意度マップを重ねたものである。バックプロジェクション画像の濃い部分が、有意度マップ上でも高い有意度で表示されている事がわかる一方、有意度マップに表示されないバックプロジェクション画像の濃淡は、有意な集積とは判定されなかった場所になる。図 6 に、この有意度マップ(ガンマ線の強度分布)を、同時に取得した魚眼レンズをつけたデジタルカメラの画像と重ねた図をしめす。飯館村における観測では、原子力機構の協力により、GPS 受信機付きサーベイメータでマッピング観測を行い、超広角コンプトンカメラで得られた強度分布とコンシスティントであることを確認した¹¹⁾。

除染作業に超広角コンプトンカメラを資するためには、得られたイメージから、放射性物質の強度分布(Bq/cm^2)を正確に定量化するアルゴリズムの確立が急務である。現在、現地等における較正実験の他、現地の状況を模擬したモンテカルロシミュレーションのコードの開発が進められている。また、複数の観測を組み合わせることで、原理的には、放射性物質までの距離を求めることが可能であり、現在そのアルゴリズムの開発も進めている。

6. おわりに

われわれは、独自に開発をおこなった Si/CdTe コンプトンカメラを用い、福島県の計画的避難区域において、ガンマ線可視化装置の実証を行なった。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、試作機が数 10 分かけて撮像している様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事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、除染作業者による操作を容易にすることが、今後の



図 6 左は魚眼レンズを付けたカメラ、右は超広角コンプトンカメラで撮影した画像。 ^{134}Cs , ^{137}Cs から直接放出される 605, 662, 796, 802 keV から再構成されたガンマ線の強度（フラックス）分布。分布の中心に向かうほど強度が高い。サーベイメータの測定では中心の場所で地上 1cm の強度が約 $30 \mu\text{Sv}/\text{h}$ 、またカメラの付近における環境バックグラウンドは約 $3 \mu\text{Sv}/\text{h}$ であった。

課題である事も学んだ。現在、こうした課題を解決するためにより高感度なカメラを作る計画が進められている。

今回試作した「超広角コンプトンカメラ」は、エネルギー分解能の優れた CdTe 半導体を用いた検出器技術と極めて高度な実装技術が鍵となって実現した。これは、本研究室のこれまでの大学院生、アクロラド社、三菱重工業名古屋誘導システム製作所ほか、多くの方々の協力を得て進められてきた。また、シリコン検出器や読み出し用のアナログ LSI は名古屋大学の田島との、また、スペースワイヤに基づくデータ収集装置は大阪大学の能町との共同研究の成果がこめられている。

参考文献

- 1) <http://radioactivity.nsr.go.jp>
- 2) T. Takahashi et al., SPIE **8443** (2012) 8443 1Z-1. SPIE, **7732** (2010) 77320Z.
- 3) T. Takahashi et al., New Astronomy Reviews **48** (2004) 309, SPIE **4851** (2003) 1228.
- 4) S. Watanabe et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **52** (2005) 2045.
- 5) S. Takeda et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., **56**, no. 3, pp. 783-790 (2009), IEEE Trans. Nucl. Sci., **59** (2012) 70, NIM, **37** (2012) 859.
- 6) A. Zoglauer and G. Kanbach, SPIE **4851**, 1302 (2003) 1302.
- 7) 高橋忠幸, 中澤知洋, 物理学会誌 **59** (2004) 26.
- 8) 渡辺伸, 佐藤悟朗, 高橋忠幸, 放射線 **36** (2010) 59.
- 9) H. Tajima et al., SPIE **7732** (2010) 773216, S. Watanabe et al. SPIE **8443** (2012) 844326
- 10) M. Kokubun et al., SPIE **7011** (2008) 70110R-1
- 11) JAXA 記者発表 (http://www.jaxa.jp/press/2012/03/20120329_compton-j.html)

(2013 年 7 月 15 日原稿受付)

Visualization of Radioactive Substances with an Ultra-wide Angle Compton Camera

Tadayuki Takahashi, Shin'ichiro Takeda, and Shin Watanabe

abstract: Dust containing radioactive materials dispersed following the Fukushima nuclear power plant accident in March 2011. Gamma-rays are emitted in the process when unstable nuclei in the materials decay. Based on the technology of Si/CdTe Compton Camera, we have manufactured a quick prototype model for the use in the field. The camera, now called an “Ultra-Wide-Angle Compton Camera” was successfully applied to visualize the distribution of radio-active substances in the Fukushima area.