

## プレスリリース

配布先：文部科学記者会、科学記者会、大阪科学・大学記者クラブ、  
兵庫県政記者クラブ、各社社会部・科学部

2019年12月9日

早稲田大学/兵庫県立大学/大阪大学

# 超小型 MeV ガンマ線カメラの開発に成功 50kg 級の小型衛星で宇宙物理「最後の窓」開拓へ

早稲田大学理工学術院の片岡 淳（かたおかじゅん）教授らの研究チームは、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の宮本 修治（みやもとしゅうじ）特任教授、大阪大学核物理研究センターの嶋 達志（しまたつし）准教授と共同で、1-10 メガ電子ボルト（MeV）のガンマ線を高精度に可視化する、コンパクトなカメラを開発しました。さらに、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が運営するニュースバル放射光施設で準単色ガンマ線ビームを用いたイメージング実験に挑戦し、1.7MeV および 3.9MeV のガンマ線を最高レベルの解像度でイメージングすることに成功しました。本装置は数キログラム（kg）と軽量のため 50kg 級の小型衛星にも搭載可能で、宇宙物理に残された「最後の窓」MeV ガンマ線の観測にむけ、新たな切り札として期待されます。

光の仲間であるガンマ線は、波長が電子・原子のサイズに匹敵するほど短く、波ではなく粒子として振る舞います。とくに 1-10 MeV のガンマ線は透過力の強さと反応の複雑さゆえ、これを直接「観る」技術は望まれつつも、いまだ確立していません。宇宙観測においては、1991 年に米国 NASA からコンプトン宇宙ガンマ線天文台(CGRO 衛星)が打ち上げられ、ここに搭載されたコンプテル(COMPTTEL) 検出器（※注 1）が観測に挑みました。コンプテルは高さ 2.6m、重さ 1,500kg に及ぶ巨大装置のため、開発や打ち上げの困難さもあり、以降 30 年ものあいだ観測が停滞しています。しかしながら、1-10MeV のガンマ線は励起した様々な原子核から生じ、星の内部や宇宙の元素合成を紐解く、重要な鍵が得られると期待されます。

今回、研究チームは 1-10MeV 観測に特化した軽量小型コンプトンカメラ(※注 2)を独自に開発し、ニュースバル放射光施設の準単色ガンマ線ビームを用いた高精度イメージングに成功しました。これにより、同カメラを 20×20cm<sup>2</sup>に拡張するだけで、コンプテルに迫る観測を簡単に実現できることを示しました。最先端科学の実証の場としての小型衛星開発は、ビッグサイエンスが主流の現代科学において突破口となる可能性を秘めています。

本研究成果は、Nature Research が運営する英国のオンライン科学雑誌『Scientific Reports』に 2019 年 12 月 6 日午前 10 時（現地時間）に掲載されました。

**論文名：** Development and performance verification of a 3-D position-sensitive Compton camera for imaging MeV gamma rays

**掲載 URL：** <https://www.nature.com/articles/s41598-019-54862-z>

## ポイント

- 1-10MeV のガンマ線に特化した、軽量・コンパクトな高精度カメラを開発
- 1.7MeV, 3.9MeV の準単色ガンマ線を用いて、実機で性能検証
- 50kg 級小型衛星でも巨大衛星に迫る観測が可能なることを実証

## 1. 研究の背景

ガンマ線は光の仲間であるにもかかわらず、人間の目には直接見ることはできません。透過力が強くレンズや反射鏡でも集光できないため、そのイメージングは困難を極めます。とくに、1-10MeV のガンマ線は“粒子”としてエネルギーの一部を電子に渡し、自らは別な方向へ散乱される「コンプトン散乱」と呼ばれる複雑な反応を起こします。サッカーの一場面に例えると、キッカーが蹴ったボールをキーパーが弾いてゴールネットを揺らす場面に良く似ています(図 1)。ボールの到来方向を知るには、キーパーがはじいた位置とエネルギー、ネットを揺らす位置とエネルギーの両方を知る必要があります。つまり、電子と散乱ガンマ線、両方の運動学を同時かつ正確に紐解くことで、はじめてガンマ線の到来方向を決定でき、これを「コンプトンカメラ」と呼びます。コンプトンカメラの原理そのものは 1970 年代に提案された古いアイデアですが、その技術的困難さから、実現と広い普及を阻んできました。

科学的な視点に立つと、1-10MeV のガンマ線は原子核物理を探るうえで重要かつ最適な宝庫です。励起状態の原子核(たとえば酸素や炭素)から出るガンマ線(核ガンマ線)は、1-10MeV に集中しており、宇宙の元素合成を解く、重要な鍵が得られます。実際、1991 年に米国 NASA から打ち上げられた CGRO 衛星には巨大なコンプトンカメラ(コンプテル検出器)が搭載され、銀河面から超新星爆発由来と考えられる  $^{26}\text{Al}$ (アルミニウム: 1.8 MeV) や  $^{44}\text{Ti}$ (チタン: 1.1 MeV) の空間分布を調べることに成功しました。しかしながら、コンプテルは高さ 2.6m、重さ 1,500kg に及ぶ巨大装置であり、膨大な開発コストやロケット搭載重量の制限から、その後 30 年間にもわたり、1-10MeV 領域の観測が停滞しています。そのため、電波・可視光・X 線などほかの波長帯にくらべ MeV ガンマ線の観測は 2~3 桁も浅く、「宇宙物理に残された最後の窓」と比喻されることもあります。

ところが近年、世界中でピギーバック衛星など数十 kg 級の小型衛星開発が盛んに行われ、安価かつ短期間での供給が可能となっています。コンプテルと同等、あるいは凌駕する性能をもつ軽量・コンパクトなガンマ線カメラが開発されれば、小型衛星にも搭載し、MeV ガンマ線天文学の新たな一歩が約束されます。そして「小型衛星が科学をリードする」新しい未来へと展望が広がります。

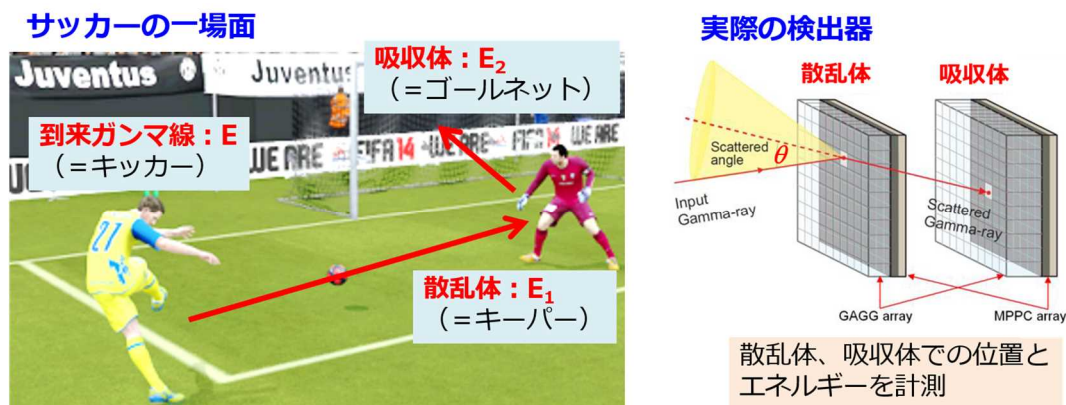


図 1: サッカーの一場面にたとえた、コンプトンカメラのイメージング原理

## 2. 方法

このたび、早稲田大学・片岡研究室では 1-10MeV のイメージングに特化した新型コンプトンカメラを開発しました。図 2 に示す通り、装置はコンパクトかつ軽量で、大きさ  $5 \times 5 \times 10 \text{ cm}^3$ 、重さ 1kg 程度です。本装置の鍵は、独自開発の「3D シンチレータ」(特許 6145248 号) です。ガンマ線阻止能に優れた Ce:GAGG シンチレータ (ガドリニウム アルミニウム ガリウム ガーネット) を採用し、これを光センサーである上下の光半導体増幅素子(MPPC)で挟み込むことで、ガンマ線の反応位置を 3 次元かつ 2 mm の精度で計測します。さらに、上下 MPPC から独立に得られる位置情報を比較することで、検出器内で多数回散乱したイベントの 90%以上を除去し、同時に得られるスペクトル情報から、検出器外にガンマ線が逃げてしまうエスケープイベントを除去します。これにより、軽量コンパクトでありながら、1-10MeV で高精度のガンマ線イメージングが可能となりました。

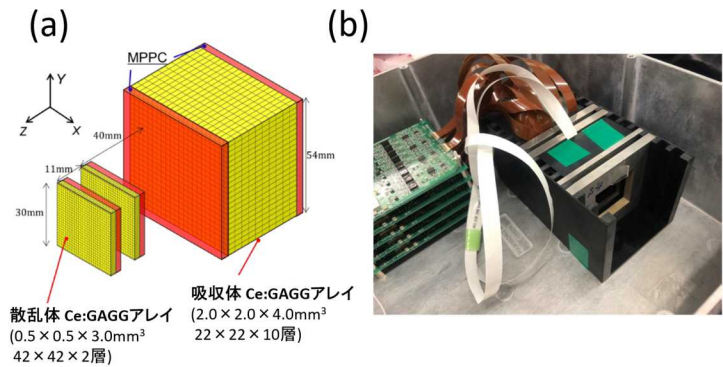


図 2 : (a) 開発したコンプトンカメラの構成 (b) 実機カメラの写真

本研究では、兵庫県にある大型放射光施設

SPring-8 内に併設された ニュースバル放射光施設において、MeV ガンマ線イメージング実験に挑戦しました。ニュースバルは兵庫県立大学を中心に整備された施設であり、SPring-8 で加速された高エネルギー電子ビームをレーザー光(Nd レーザーや CO<sub>2</sub> レーザー)に衝突させることで、1-40MeV の準単色ガンマ線を発生します。アイソトープなど放射線源では実現できない高エネルギーガンマ線を提供できる世界屈指の実験施設であり、様々な科学・応用研究に役立てられています。

## 3. 結果 : 1.7MeV/3.9MeV ガンマ線の高精度イメージング

実験では、コンプトンカメラの正面および 20° の方向から 1.7MeV, 3.9MeV のガンマ線を照射し、それぞれの画像を取得しました。図 3 に結果を示します。解像度は 1.7MeV ガンマ線に対し  $3.4 \pm 0.1^\circ$  (0° から照射: FWHM)、 $3.8 \pm 0.1^\circ$  (20° から照射: FWHM) となり、同エネルギーにおけるコンプトンの解像度 (3.9°: FWHM) を凌駕する、優れた値が得られました。さらに、3.9MeV ガンマ線に対してもイメージングに

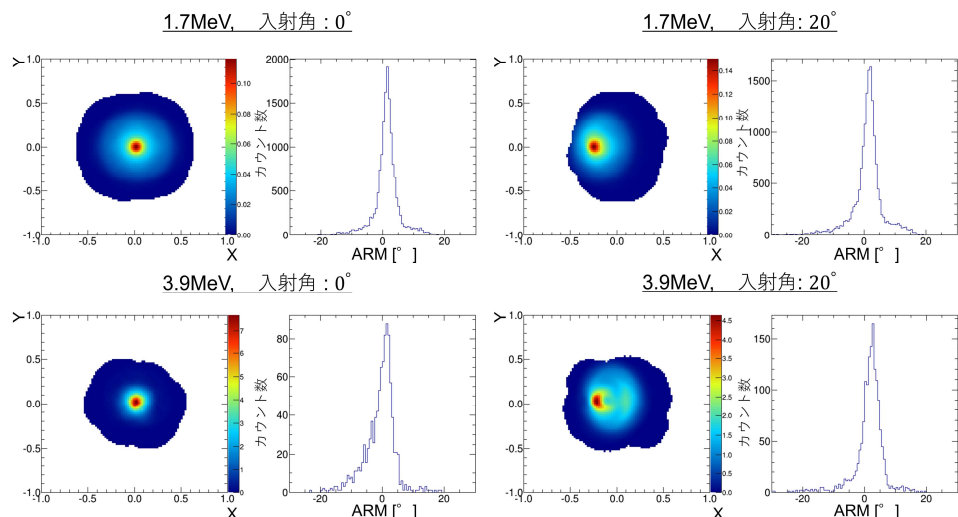


図 3: コンプトンカメラで取得した、準単色ガンマ線の画像 (左上) 1.7MeV、正面 (右上) 1.7MeV、20° 方向 (左下) 3.9MeV、正面 (右下) 3.9MeV、20° 方向をイメージング

を凌駕する、優れた値が得られました。さらに、3.9MeV ガンマ線に対してもイメージングに

成功し、解像度は  $4.0 \pm 0.5^\circ$  ( $0^\circ$  から照射)、 $4.6 \pm 0.4^\circ$  ( $20^\circ$  から照射) となりました。図 4 は  $0^\circ$ 、 $20^\circ$  からのガンマ線画像を合成し感度補正した画像で、同じ強度のガンマ線ビームが、入射方向に依らず正しく撮影できている様子が分かります。さらに、ガンマ線に対する検出感度（固有効率）も 2MeV 以下でコンプテルを上回る、優れた結果が得られました。これらは、G 電磁シミュレーション(Geant-4)の結果とも正確に一致しており、設計通りのパフォーマンスを示すことが実証されました。

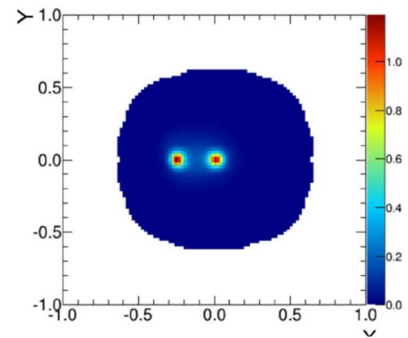


図 4:  $0^\circ$ 、 $20^\circ$  からの 1.7MeV ガンマ線強度を感度補正した

#### 4. 展望：小型衛星搭載にむけて

これらの結果を受け、本論文では小型衛星搭載にむけ装置を最適化し、期待される性能について議論しています。たとえば 50kg 級の小型衛星(おおよそ 50cm 立方サイズ)を想定すると、装置面積を  $20 \times 20$ cm まで拡張することが可能です。また、シンチレータの厚みを厚くし、1-10MeV での感度を高めることが期待できます。ここでは、散乱体の厚み 10mm (現状では 3mm を 2 層)、吸収体の厚み 60mm (現状では 40mm) が最適と仮定しました。実験と同じ条件でシミュレーションを行った結果を図 5 に示します。上はカメラの解像度、下は感度に相当する固有効率を占めています。青が前章の実機カメラ、黒がコンプテルの性能、赤がここで提案する「小型衛星用」カメラの性能です。いずれも、2MeV 以下の領域においてコンプテルの性能に匹敵、もしくは凌駕することが分かります。コンプトンカメラのような非集光型装置では、有効面積の指標として検出器の面積 (S) と立体角 ( $\Omega$ ) の積がしばしば用いられます。S $\Omega$  が大きいほど優れた装置であり、コンプテルの場合 S $\Omega$  は 1MeV で  $15\text{cm}^2\text{sr}$ 、2MeV で  $20\text{cm}^2\text{sr}$  となります。一方で、今回提案する装置の S $\Omega$  は 1MeV で  $11\text{cm}^2\text{sr}$ 、2MeV で  $6\text{cm}^2\text{sr}$  であり、圧倒的に軽量小型ながらも、コンプテルに迫る観測が期待できます。

最後に、典型的な衛星軌道 (Low Earth Orbit: 軌道高度 500km) を想定し、2 週間程度の観測(1Msec)を行った場合に期待できる感度を図 6 に示します。合わせて、1-10MeV の代表天体であるカニ星雲(Crab)で期待されるスペクトルを点線で示しました。カニ星雲と同程度の明るさであれば、小型衛星でも 2MeV 程度までの観測が十分可能であることが示されました。

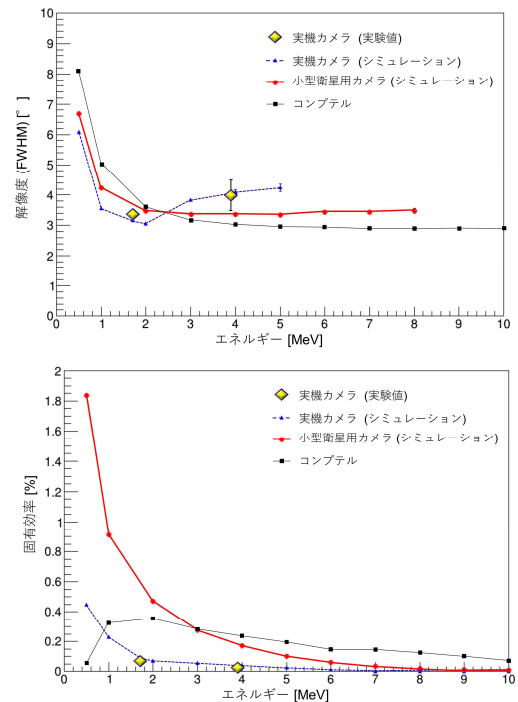


図 5: 本研究の装置 (青) コンプテル (黒) 小型衛星用装置 (赤) の性能比較。上は解像度、下は検出感度 (固有効率)

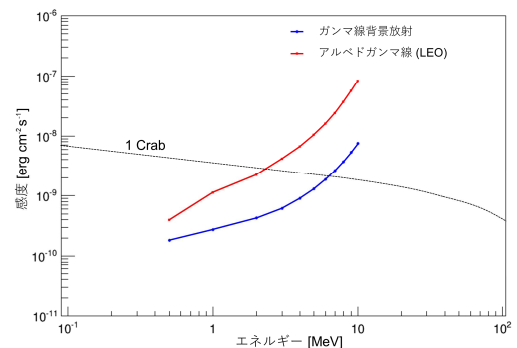


図 6: 典型的な軌道(LEO)を想定した場合、小型衛星による 2 週間程度の観測 (1Msec) で実現される感度

## 5. 研究の波及効果や社会的影響

近年、あらゆる科学分野が高度化し、その進展は多額の資金と多数の研究者を動員して行われる巨大プロジェクト（いわゆるビッグサイエンス）に委ねられる傾向が益々強くなっています。このような巨大科学は大きな恩恵を得られる反面、膨大なマンパワーと国際協力が必要で小回りが利かないこと、また成果が出るまでに長い時間を要し、開発の難しさやコストの調達など、様々な面で不可避のリスクもあります。とくに衛星開発においては、打ち上げ失敗によるリスクなどが加算され、宇宙科学の発展の高いハードルとなっている事実は否めません。これに対し、数十kg級の小型衛星は、開発コストと技術的ハードルが桁違いに低く機動性が高い反面、サイズの小ささゆえに、先端科学に貢献することは困難と考えられてきました。小型衛星は宇宙ビジネスの一翼を担うと期待されつつも、現時点では一部の通信衛星や民生部品、新規開発部品の宇宙動作実証など、用途が工学分野に限定されており、理学面での恩恵は少ないと言わざるをえません。

本研究は、このような現状に大きな一石を投じるものです。図7に示す通り、数十kg級の小型衛星でも、搭載装置を高性能化することで数トンクラスの巨大衛星と互角に渡り合えること、これにより、宇宙物理に残された「最後の窓」を開拓できる可能性を実機で検証しました。宇宙創成のビッグバン以来、我々の身の回りにある元素がどのように生成され、蓄積されたのか？ 元素合成の歴史は宇宙進化の歴史そのものと言えます。1-10MeVのガンマ線観測により、宇宙科学に新たな1ページが加わることは間違いありません。

## 6. 今後の課題

本研究は原理実証として MeV ガンマ線カメラの動作確認を行いました。今後は小型衛星搭載に向けた  $20 \times 20 \text{cm}^2$  のプロトタイプ装置開発が必要です。さらに、衛星軌道上では地磁気に補足された荷電粒子の混入や、バックグラウンドとなるガンマ線の効率よい除去方法を確立することが不可欠です。より進んだフェーズにおいては、実際に搭載する小型衛星や軌道の選定、電気・通信インターフェースの調整や噛み合わせも重要な課題となります。本研究はようやくその第一歩を踏み出した段階であり、今後の進展にご期待ください。

### 【論文情報】

- ・ **掲載誌** : Scientific Reports
- ・ **論文名** : Development and performance verification of a 3-D position-sensitive Compton camera for imaging MeV gamma rays
- ・ **著者** : Hiroki Hosokoshi, Jun Kataoka, Saku Mochizuki, Masaki Yoneyama, Soichiro Ito, Hiroaki Kiji, Fumiya Nishi, Shuji Miyamoto, Tatsushi Shima
- ・ **掲載 URL** : <https://www.nature.com/articles/s41598-019-54862-z>

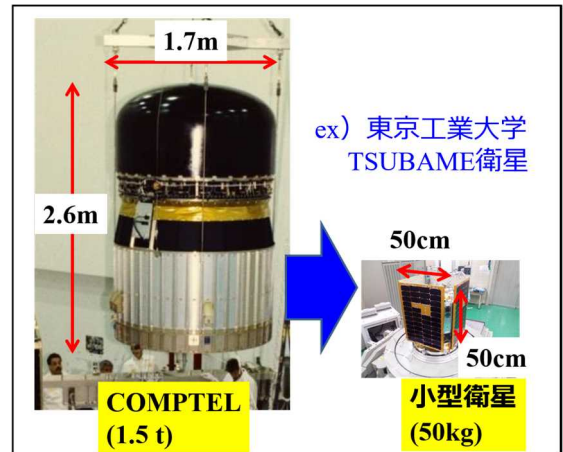


図7: コンプテル衛星と、本研究で想定する50kgクラス小型衛星のサイズの違い。小型衛星でも、巨大衛星に負けず先端科学に貢献できる可能性を裏付けた

### 【研究メンバー】

- ・早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻  
細越 裕希 (実験リーダー)、片岡 淳、望月 早駆、米山 昌樹、伊藤 颯一郎、木地 浩章、西 郁也
- ・兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 宮本 修治
- ・大阪大学 核物理研究センター 嶋 達志

### 【補足情報】

#### ※注1 コンプテル(COMPTTEL) 検出器

詳細は以下の文献を参照下さい：

- ・Diehl , R. et al., "COMPTEL observations of Galactic  $^{26}\text{Al}$  emission", *Astron. & Astrophys.* 284, 445-460, (1995)

#### ※注2 コンプトンカメラ

コンプトンカメラ全般の原理や詳細については、以下の文献をご覧ください

- ・日本光学会機関紙「光学」2016年8月号「放射線物質を可視化するコンプトンカメラ」(片岡 淳、武田 伸一郎、高橋 忠幸) 第45巻 pp.289-299
- ・応用物理学会「応用物理」2019年11月号「ガンマ線イメージングがつかなく宇宙と医療」(片岡 淳、第88巻, No.11 pp. 730-734)

本研究は、科学研究費補助金・基盤研究 (S) (H27~31年度)「実用化へ向けた高解像度 3D カラー放射線イメージング技術の開拓」(代表：片岡 淳：早稲田大学理工学術院・教授)の支援を得て実施したものです。

### 【内容に関するお問い合わせ先】

早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 物理学及応用物理学専攻

教授 片岡 淳

Tel : 03-5286-3081 E-mail : [kataoka.jun@waseda.jp](mailto:kataoka.jun@waseda.jp)

### 【報道に関するお問い合わせ先】

早稲田大学広報室広報課

Tel : 03-3202-5454 E-mail : [koho@list.waseda.jp](mailto:koho@list.waseda.jp)

兵庫県立大学高度産業科学技術研究所

Tel : 0791-58-0249 E-mail : [cast-clerk@lasti.u-hyogo.ac.jp](mailto:cast-clerk@lasti.u-hyogo.ac.jp)

大阪大学核物理研究センター庶務係

Tel : 06-6879-8902 E-mail : [kakubuturi-syomu@office.osaka-u.ac.jp](mailto:kakubuturi-syomu@office.osaka-u.ac.jp)