

放射線発見以来初の幾何光学に基づくガンマ線画像化法を発見・実用化 —ガンマ線完全可視化により放射線利用の安全評価が正確に—

概要：谷森 達 京都大学大学院理学研究科教授らの研究グループは、ガンマ線を幾何光学に基づき定量的に画像化する手法を発見し、福島地域におけるガンマ線観測でその実証に成功しました。原理提案から実用化手法まで通して提示した成果です。今後、ガンマ線完全可視化により、放射線利用の安全評価がより精緻に行われることが期待されます。

核ガンマ線は放射性同位体から放射されるガンマ線で、放射線の発見から百年以上経つ今も画像化技術は不完全な状態にあります。我々は、宇宙のガンマ線放射天体の謎を解明するため、ガンマ線と物質の相互作用を測定することで、一般的なカメラが光を捉えるのと同じようにガンマ線を捉えるガンマ線カメラ Electron-Tracking Compton Camera (ETCC) を世界に先駆け開発・実証しました。開発したカメラの画像化法を用いると、光学カメラで光を定量的に画像化すると同様にガンマ線の定量的な画像化が可能です。このカメラを用いて福島の汚染地域の撮像試験を行った際は、画像から地表面のセシウム量（ベクレル値）の分布を定量的に示すことができました。この放射線強度から IAEA の基準に従って求めた地上の線量分布 ($\mu\text{Sv/h}$) は、撮像実験とは別に測定した線量計の結果と一致しています (図 1)。

ETCC はホットスポットの特定だけでなく、除染区域に残るマイクロホットスポットも検出可能です (図 2)。画像内の特定の場所のガンマ線エネルギースペクトルも測定できる為、多種の放射性同位体も同時に認識でき、光学カメラでいう所のカラー画像撮影できます。一般的な低放射線量環境でも、その数百分の 1 の微量放射線源分布を画像化可能です。この原理を用いて、原子炉事故発生時の正確な放射線漏えい量の測定や、拡散モデルシミュレーションとの併用による放射線拡散予想が可能になると予想されます。事故発生時に限らず、廃炉作業全般で必要となる建屋内の放射線分布の正確な測定や、高精度な解体の事前シミュレーションへの利用も考えられます。その他にも医療分野や非破壊検査など、放射線を利用する各分野への応用も期待されます。論文は 2 月 3 日、*Scientific Reports* に掲載されました。

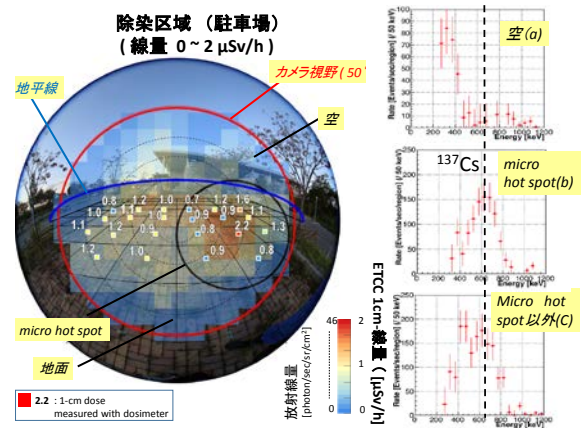


図 1：測定された除染区域の線量マップおよび各点のスペクトル。図中の数字は既存線量計での測定線

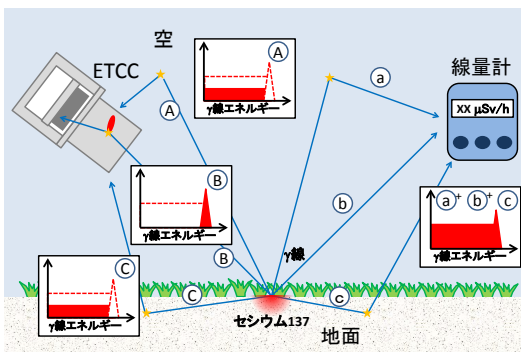


図 2：開発したガンマ線カメラ ETCC と一般的な線量計によるガンマ線測定の違い

1. 背景

宇宙で元素を作り出す天体現象の主な候補に超新星爆発がありますが、観測による証拠はまだ十分ではありません。元素合成時に放射される核ガンマ線の検出が最も信頼できる証拠になると考えられていますがこれまでに2回しか観測されておらず、21世紀になっても研究は進展していません。ガンマ線の画像化法が未熟なためだと考えられます。研究グループではこの状況を打破するため、2000年からガンマ線画像化法を実現する研究を始めました。

ガンマ線は高エネルギー光子であり、波としてより粒子として振る舞う為、屈折など光学的手法が使えません。ガンマ線が物質の電子と散乱するコンプトン散乱反応を、ガンマ線1事象毎に散乱ガンマ線と反跳電子の両方の方向・エネルギーを測定し、運動量保存則を用いて入射ガンマ線の方向を求め、計算機上で幾何光学に基づく集光を行い画像化しています。電子の反跳方向測定は長年の間困難と考えられており、物理量のみを測定しコンプトン散乱角のみを得る手法(コンプトンカメラ)が研究されてきました。コンプトンカメラではガンマ線の到来方向が一方向に決められず像も円環状に広がってしまう為、円環を1事象ずつ重ねてガンマ線分布を推測する疑似画像化が使用されています。疑似画像化法は提案から40年が経ちますが、福島事故対応で初めて市販品が登場した状況です。我々は当初から電子の反跳方向の情報が画像化精度を決定する鍵と判断し、電子の反跳方向に感度を持ち得るガス検出器を独自に開発してきました。ガス検出器はベータ線のような荷電粒子には有効な検出器ですが、物質量が小さくガンマ線検出には不利だと考えられてきました。そこで我々は微細加工技術を用いたガス検出器を開発し、ガンマ線毎の散乱現象を完全に解き、計算機上でレンズと同様に点としてガンマ線を集光させ画像を描くことに成功しました(図3)。

2. 研究手法・成果

まずガンマ線がガス検出器内のガス分子とコンプトン散乱する事象を測定します。コンプトン散乱で生ずる反跳電子の飛跡を検出し、同時に散乱ガンマ線はガス検出器を囲むシンチレーション検出器¹で測定します。コンプトン散乱で生ずる全ての粒子の運動方向とエネルギーを計測する事により、運動量保存則を用いてガンマ線の到来方向を求めることでガンマ線画像を撮像します。

核ガンマ線は多くの放射性物質から放射されます。そのため本技術では、多数の放射性物質の定量的な可視化が実現できます。幾何光学原理に基づく手法であり、宇宙のような無限遠の放射線源や通常の環境放射線量の数千分の1という超微弱量も画像化可能です。また、粒子識別能力を持つため他粒子の雑音除去能力があり、宇宙環境・粒子線治療など高放射線環境でも使用できます。画像分解能は物理的制約限界の約1度で、人間の視野以上に広い視野角を持ちます。

今まで核ガンマ線の画像化は、放射線強度・エネルギー・必要な視野角・放射線雑音環境などに応じて、異なる疑似画像化法を用いてきました。これまでの手法では鮮明な画像は得られませんでした。今回の研究成果を用いることで幾何光学という基本原理に基づき、統一的な開発・正確な性能予想が可能だと考えられます。

放射線はその危険性に加え「見えない」という不安要素があるにもかかわらず、その有益性から社会の各所で利用されてきました。汎用的画像化法を開発できたことでより正確な放射線のコントロールにつながると考えられます。大型衛星による宇宙観測では、従来法より3桁よい感度でのガンマ線観測が一気に実現すると考えられます。観測可能な天体が30から数千以上に拡大し、宇宙最遠方の初代星の観測

¹ 放射線を受けると発光する素材を用いた放射線検出器

など研究上の大躍進が期待されます。

3. 波及効果、今後の予定

医療では低エネルギーガンマ線・陽電子消滅ガンマ線にそれぞれの手法 (SPECT, PET) が使用されるなど、これまでガンマ線は目的に応じ適切と思われる疑似的画像化が行われてきました。今回の新手法は 1 台ですべてのガンマ線に対応できるため、今後の改善によっては更なる低線量化による人体への負担軽減が期待できます。また、ETCC は画像から各場所の放射物質質量と種類の同定、スペクトルの散乱成分から地中分布や落葉の影響も観測することができます (図 5 右)。またガンマ線の透過性を利用し、木などを切らずにその場で放射物質の内部分布も測定可能です。原子炉近傍では建物の壁面の汚染量が正確に画像化でき、この情報を計算機に入力すれば原子炉付近の空間の線量分布が再現し、炉解体手順による線量変化が正確に予測することで安全で効率的な工程の事前予測が可能です。同様に原子炉建屋を外部から監視すれば事故の時の放射能物質の種類・量・拡散速度など大半の物理量をリアルタイムで定量測定が可能となり、大気拡散モデルと組み合わせることで事故後の正確な放射能拡散予測が実現できると考えられます (図 5 左)。その他、建屋内に設置すれば従来のモニター検知限界の数百分の 1 の放射能漏れを場所も含めて画像として検知可能となるなど、放射線に関する安全評価に幅広く応用できると考えられます。

加えて、この技術は地球上の鉱物石油探査や、月・火星の資源探査に用いる可能性もあります。例えば、高度 100 km を周回する衛星からの画像化により、天体表面を km スケールでの探査が可能となり、鉱物資源・水分布などの精密な資源マップの作成に応用される可能性があります。

4. 研究プロジェクトについて

1. 日本学術振興会科学研究費補助金基盤 S および挑戦的萌芽研究の支援を受けました。
2. 福島除染地区の画像化研究は、JST 先端分析機器開発事業の支援で行いました。堀場製作所を代表としたグループでは我々がガンマ線天文用装置の小型化を行ってきました。この測定では堀場製作所は現地予定地の事前調査と交渉を担当しました。この事業は 2015 年度で終了し、以後は堀場製作所と京大がそれぞれ独立に開発を継続してきました。論文 1 の成果はこの事業終了後に発見されています。論文 2 ではこの新手法を過去に測定されたデータに再適用することで得られた結果です。今後、堀場製作所は本成果をどのように取り入れるか、販売モデルを開発するかを我々と検討中です。

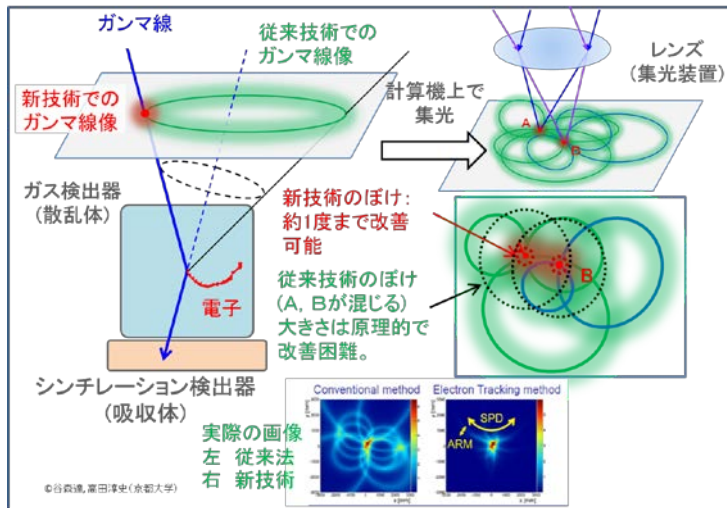


図3：新技術と従来技術でのガンマ線画像化法の違い。

従来法は新方式のような集光が不完全であり、しかも改善困難な数10度の画像ぼけがあるため、右図のように2点の情報が混じり画像が不鮮明。



図4：福島の大環境ガンマ線撮影で使用した可搬型ETCC。

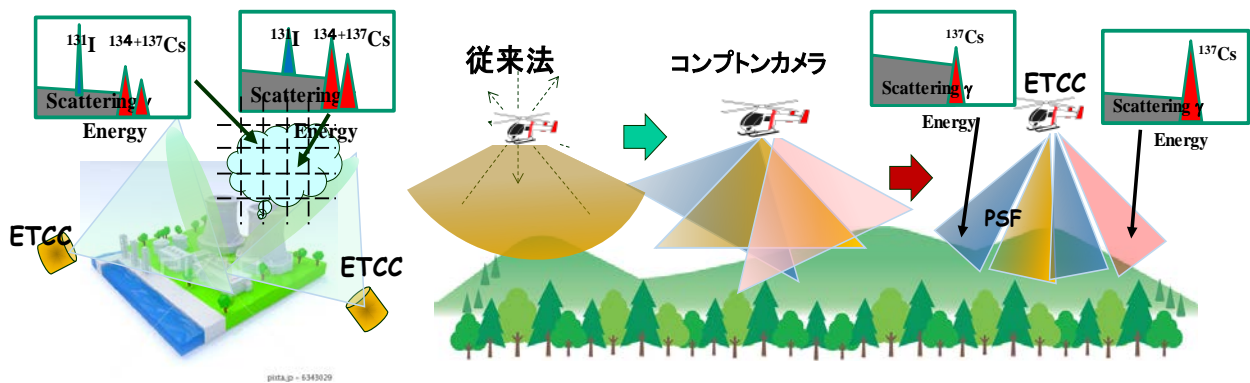


図5：右図-原子力施設からの放射線漏えいではオンラインで繊細な3次元スペクトル画像が取得され、漏洩放射物質、量、方向、速度を特定できる。

左図-広域汚染地区に対して数10m区画単位で精密スペクトルから放射物質量が求まる。

<論文タイトルと著者>

1. Establishment of Imaging Spectroscopy of Nuclear Gamma-Rays based on Geometrical Optics

著者：谷森達，水村好貴，高田淳史，他（理学研究科物理学第二教室 宇宙線 MeV ガンマ線グループ，宇宙総合学研究ユニット，他）

掲載誌：Scientific Reports

2. First On-Site True Gamma-Ray Imaging-Spectroscopy of Contamination near Fukushima Plant,

著者：友野大，水本哲矢，高田淳史，谷森達，他（理学研究科物理学第二教室 宇宙線 MeV ガンマ線グループ，宇宙総合学研究ユニット，他）

掲載誌：Scientific Reports