

次世代放射線検出器開発と宇宙・医療への応用

研究代表者 片岡 淳
(先進理工学部・応用物理学科 教授)

1. 研究課題

本研究は次世代放射線検出器の開発を通じて高エネルギー宇宙物理から医療・環境を広く包含する分野横断型研究を展開する。具体的には、既存の X 線・ガンマ線天文衛星を用いた高エネルギー天体の放射機構解明と次世代衛星へ向けた装置開発、これを医療へと応用した新しい分子イメージング法や放射線治療モニタの開発、さらには福島県下（とくに森林部）での除染や廃炉作業に向けた新しいガンマ線カメラの開発等を平行して実施する。

2. 主な研究成果

2.1 高エネルギー宇宙物理学

本研究室も開発に大きな貢献をした「ひとみ」衛星は、残念ながら 4 月 28 日を以って正式に運用を断念した。一方で、打ち上げ後ひと月における初期観測成果は、*Nature*, *ApJ Letter* にそれぞれ出版済みで、分野に大きなインパクトをもって迎えられた。「ひとみ」衛星搭載用に本学で開発した APD (Avalanche Photodiode) 光センサーは CALET や「あらせ」にも搭載され、今後も継続的な活躍が期待される。観測データの解析においては、米国の衛星 NuSTAR を用いて、本来「ひとみ」衛星で行う予定であったアイデアを試みた。具体的には、活動銀河核の中で、ジェット放射が視線方向を持つブレイザー天体に着目し、その中でもシンクロトロン放射が 10 キロ電子ボルト以上に伸びる天体の硬 X 線スペクトルを詳細に調べた。これまで、ブレイザーのフレア中での挙動は多々注目されてきたが、本研究ではあえて光度が暗い時期を狙い、シンクロトロン放射に重畳する逆コンプトン散乱成分の検出を目指した。

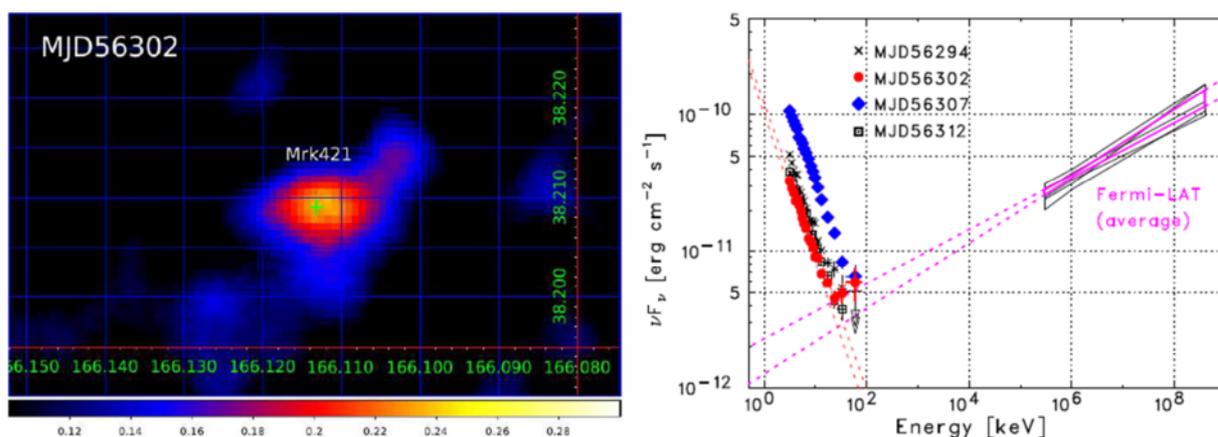


図 1: (左) NuSTAR による Mrk421 の硬 X 線イメージ ($E > 40$ keV) (右) NuSTAR が検出した硬 X 線超過成分と、Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡が観測したスペクトルの接続。いずれも逆コンプトン散乱で理解される (Kataoka & Stawarz 2016, *ApJ*)

その結果、Mrk421 のもっとも暗い時期のスペクトルにおいて、20keV 以上に有意なスペクトル超過を発見し、この超過成分が Fermi 衛星の観測したガンマ線スペクトルに滑らかに接続することを発見した (Kataoka & Stawarz 2016, ApJ)。TeV ガンマ線を放出するブレーザー天体において、X 線領域での逆コンプトン散乱の検出は世界初の成果である。また、有元は Fermi 衛星の観測したガンマ線バースト GRB141207A の詳細解析から熱的・非熱的放射の定量的寄与を見積もり、時間発展を統一的に理解する新たな理論のフレームワークを構築した (Arimoto et al. 2016, ApJ)。さらに、銀河中心に存在する巨大なガンマ線の泡構造「フェルミバブル」の X 線構造探査を継続し、論文投稿を準備中であるほか (Akita et al. in prep)、電波銀河 NGC1275 や Loop-I 領域のガンマ線放射機構の解析が進んでいる (Tanada et al. in prep)。

2.2 医療応用へむけて

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)の支援のもと、様々な開発が進んでいる。本章では特に、本年度最大の成果である、医療用コンプトンカメラの開発について述べる。分子イメージングとは生体内に薬剤を投与し、これをマーカーとすることで分子の動きを可視化する技術であり、特に PET はガン(癌)やアルツハイマー病の早期発見に有効とされている。PET は数ミリ程度の解像度を實現する優れた分子イメージング法であるが、マーカーとして使える薬剤はポジトロン生成核種に限られ、511 キロ電子ボルトの対消滅ガンマ線のみが対象となる。また、薬剤生成にサイクロトロンのような大型設備が必要なことも多く、生成コストの割高感も否めない。任意のエネルギーのガンマ線を自由に可視化することができれば、使えるマーカーも多種多様となり、特性や集積箇所の異なる多数のマーカーを同時に追跡することができると期待される。そこで本研究室は昨年までに開発したコンプトンカメラの高精度化に挑み、重量わずかに 580 グラム・大きさ 10cm 足らずの世界最小・最軽量の高感度ガンマ線カメラの開発に成功した。図 2 に生体マウス(生後 8 週間) 2 匹に 3 種類の放射性薬剤、ヨウ素 ^{131}I (364 keV: 4MBq 半減期 8 日)、ストロン

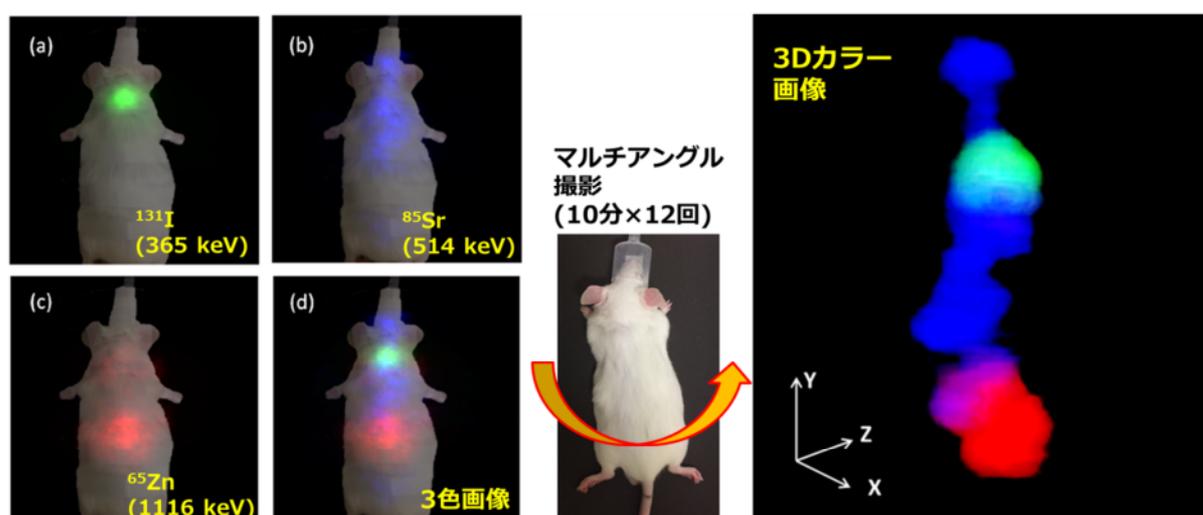


図 2: (左) 生体マウスに集積した各薬剤の 2 次元画像と 3 色合成画像 (右)マルチアングル撮影により取得した、3D マルチカラー画像

チウム ^{85}Sr (514 keV: 1MBq 半減期 65 日), 亜鉛 ^{65}Zn (1116 keV: 1MBq 半減期 244 日) を投与し、麻酔後にガンマ線での撮影を行った結果を示す。マウスまでの距離は約 4cm 固定とし、マウスを回転することで各アングル 10 分、 30° ステップごと 12 アングルでの測定を試みた。わずか 2 時間の測定で、高精度の 3D 画像が得られ、ヨウ素 (緑) は甲状腺に局所的に集積、ストロンチウム (青) は骨に、また亜鉛 (赤) は肝臓を中心に肺や心臓、膵臓などに広く取り込まれている様子がクリアに確認できる。さらに、12 角度からのイメージを 3 次的に再構成する手法を確立し、生体マウスとしては初めて多色かつ 3 次元でのガンマ線画像の取得に成功した。この成果については Nature Publish Group のオンライン科学雑誌『Scientific Reports』に掲載が決定されている。

その他、本研究テーマの一貫として、放射線医学総合研究所のサイクロトロン施設を用いて制動放射 X 線や即発ガンマ線(4.4MeV)を可視化する「陽子線オンラインモニタ」の開発、陽子線 CT の基礎開発、チェレンコフ光を用いた陽電子放出核種の精密断面積測定などを行っており、詳しくは同施設・利用報告書 (平成 28 年度) に譲る。

2.3 環境応用へむけて

これまで、当研究室は浜松ホトニクス社と共同で、軽量小型の環境計測用コンプトンカメラを開発してきた。このカメラは重量僅かに 2 キログラムで、いまだ除染が進まない福島県下の里山調査においても携帯性に優れている。一方で、より密集した林間部や森林の調査ではカメラ三脚すら携行困難な場合があり、より簡便に放射性核種の広域調査を行う手法が求められている。今回、ドローン(DJI 社製 S1000+: 4.4kg) にコンプトンカメラ(重量 1.9kg)とノート PC を搭載し、上空 15–20 メートルから直径 70–100 メートルの範囲を動画撮影する新たな手法を開発した。図 3 (右) は上空 20 メートルから 20 分間撮影した浪江高校グラウンドの線量マップで、(左) は地上を 30 点、事前にサーベイメータで測定した線量から内挿した推定マップとなっている。測定時間は約 180 分である。両者は極めてよく一致し、ド

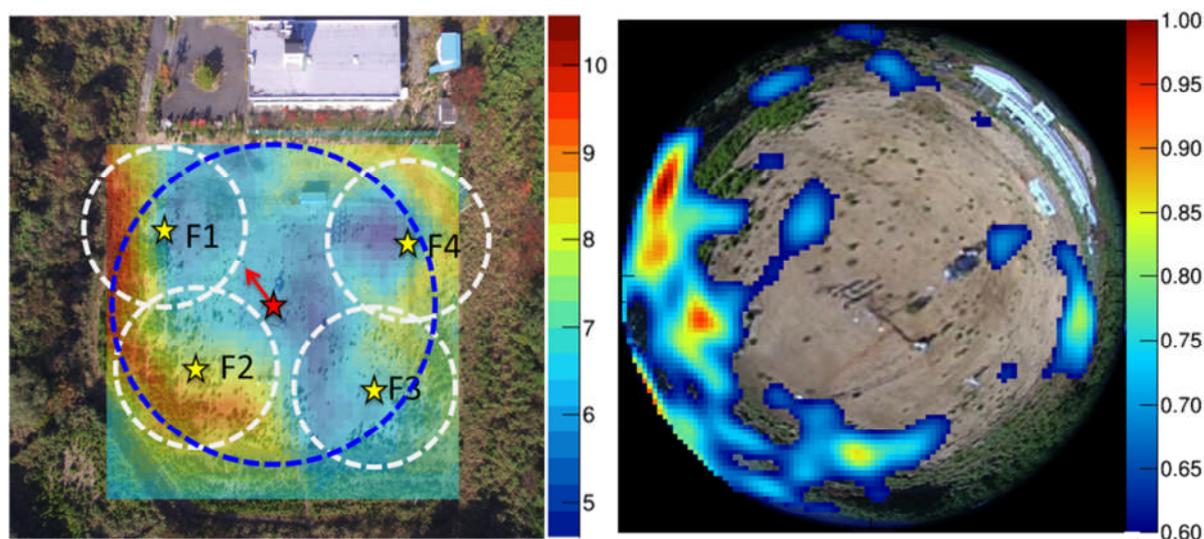


図 3: (左) 地上測定から求めた放射線量マップ (30 点のサーベイメータ値を内挿)。測定時間は 180 分。(右) 高度 20 メートルよりドローンで撮影した線量マップ。測定時間は 20 分。いずれも撮影地は福島・浪江高校のグラウンド

ローンによる広域調査の有効性を示すことができた。この結果については本学ホームページに掲載以降、メディアからの問い合わせが相次ぎ、日経産業新聞(9/26 朝刊)等にも掲載された。

3. 共同研究者（学内）

有元 誠（研究院講師・次席研究員）

4. 研究業績

4.1 学術論文

- A.Kishimoto, J.Kataoka, T.Taya et al., “First demonstration of multi-color 3-D in vivo imaging using ultra-compact Compton camera”, *Scientific Reports*, in press (2017)
- H.Morita, T.Oshima, J.Kataoka et al., “Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.857, pp.58-65, (2017)
- A.Kishimoto, J.Kataoka, A.Koide et al., “Development of a compact scintillator-based high-resolution Compton camera for molecular imaging”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.845, pp.656-659, (2017)
- F.Aharonian, H.Akamatsu, F.Akimoto et al., “Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster”, *The Astrophysical Journal Letter*, vol.837, pp.15-23, (2017)
- M.Arimoto, K.Asano, M.Ohno et al., “High-Energy Non-Thermal and Thermal Emission from GRB141207A detected by Fermi”, *The Astrophysical Journal*, vol.833, pp.139-151, (2016)
- Hitomi Collaboration., “The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster”, *Nature*, vol.535, pp.117-121, (2016)
- J.Kataoka & L.Stawarz, “Inverse Compton X-ray Emission from TeV Blazar Mrk421 during a Historical Low State Observed with NuSTAR”, *The Astrophysical Journal*, vol.827, pp.55-60, (2016)
- Y.Sofue & J.Kataoka, “CO-to-H₂ conversion factor of molecular clouds using X-ray shadows”, *Publications of the Astronomical Society of Japan Letter*, vol.68, pp.8-13, (2016)
- Y.Sofue, A.Habe, J.Kataoka et al., “Galactic Centre hypershell model for the North Polar Spurs”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol.459, pp.108-120, (2016)
- M.Takabe, A.Kishimoto, J.Katoaka et al., “Performance evaluation of newly developed SrI₂(Eu) scintillator”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.831, pp.260-264, (2016)
- T.Taya, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “First demonstration of real-time gamma imaging by using a handheld Compton camera for particle therapy”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.831, pp.355-361, (2016)
- S.Yamamoto, J.Kataoka, T.Oshima et al., “Development of a high resolution gamma camera system using finely grooved GAGG scintillator”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.826, pp.28-33, (2016)

4.2 総説・著書

- 片岡淳, 武田伸一郎, 高橋忠幸 「放射性物質を可視化するコンプトンカメラ」, 日本光学会誌「光学」, 第 45 巻, pp289-299, (2016)

4.3 招待講演

- Jun KATAOKA, “MPPC-based scintillation detectors for innovative X-ray and gamma-ray imaging”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- Jun KATAOKA, “Si-PM-based scintillation detectors for next generation radiology imaging”, EMN meeting on photodetectors 2016, 2016 年 6 月 6 日～6 月 9 日, Cancun, Mexico

4.4 学会発表（口頭発表のみ）

- T.Masuda, J.Kataoka, M.Arimoto et al., ” Time-resolved analysis of Cherenkov light from positron emitter as a new probe to high-precision measurement of nuclear reaction cross section”, 第 113 回医学物理学会学術大会, 2017 年 4 月 13 日～4 月 16 日, パシフィコ横浜
- T.Oshima, H.Morita, J.Kataoka et al., “Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter (2)”, 第 113 回医学物理学会学術大会, 2017 年 4 月 13 日～4 月 16 日, パシフィコ横浜
- T.Oshima, H.Morita, J.Kataoka et al., “Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- M.Yoneyama, J.Kataoka, M.Arimoto et al., “Evaluation of Ce:GAGG scintillator for future use in space environment”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- M.Arimoto, H.Morita, T.Oshima et al., “Novel photon-counting low-dose computed tomography using a multi-pixel photon counter”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- Y.Iwamoto, J.Kataoka, L.Tagawa et al., “Proposal and demonstration of short time and wide area gamma ray imaging using drone”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- M.Takabe, J.Kataoka, M.Arimoto et al. , “Development of proton CT system towards a high precision proton therapy”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- K.Sueoka, J.Kataoka, M.Takabe et al., “Development of a new pinhole camera for imaging in high dose rate environment”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- A.Kishimoto, J.Kataoka, L.Tagawa et al., “3-D small animal imaging based on the medical Compton camera”, 第 64 回応用物理学会春季講演会, 2017 年 3 月 14 日～3 月 17 日, パシフィコ横浜
- T.Taya, J.Kataoka, A.Kishimoto et al., “Optimization and verification of image reconstruction of a Compton camera toward on-line monitor for the future particle therapy”, 第 64 回応用

物理学会春季講演会, 2017年3月14日~3月17日, パシフィコ横浜

- A.Kishimoto, J.Kataoka, L.Tagawa et al., "Demonstration of Multi - Color 3D imaging of Gamma Rays Based on Ultra - Compact Compton Camera", IEEE Medical Imaging Conference 2016, ストラスブール (フランス)
- M.Takabe, J.Kataoka, M.Arimoto et al., "Development of proton CT system towards a high precision proton therapy", 第113回医学物理学学会学術大会, 2016年9月8日~9月10日, 沖縄コンベンションセンター

4.5 受賞・表彰

- 2016年度 早稲田大学・小野梓賞 (学術賞)
岸本 彩 "Study of ultra-compact Compton camera based on 3-D position sensitive scintillator for environmental and medical gamma-ray imaging"
「環境及び医療応用を目指した3次元シンチレータ式小型コンプトンカメラの研究」

4.6 プレスリリース・広報活動等

- Waseda University Research Activities (早稲田大学 研究活動)
早稲田大学 研究推進部
- 早稲田理工 AERA 2017 目に見えない「光」を3Dカラー撮影 —次世代ガンマ線イメージングへの挑戦 —
- 日経産業新聞 9/26 朝刊
「セシウムの分布可視化—早大、ドローン使い空撮」
- 【早稲田大学ホームページ】重量 1/10「手のひらサイズ」コンプトンカメラで生体内 3D カラー放射線イメージングに成功
<https://www.waseda.jp/top/news/46024>
- 【早稲田大学ホームページ】ドローンを用いた上空からのガンマ線撮影に成功 飛散した放射性核種の分布を短時間で画像化
<https://www.waseda.jp/top/news/44716>
- 【早稲田大学ホームページ】「特集 Feature」 Vol.13-3 見えないものを見る！放射線イメージングの未来 (環境編)
<https://www.waseda.jp/top/news/48224>
- 【早稲田大学ホームページ】「特集 Feature」 Vol.13-2 見えないものを見る！放射線イメージングの未来 (医療編)
<https://www.waseda.jp/top/news/48223>
- 【早稲田大学ホームページ】「特集 Feature」 Vol.13-1 見えないものを見る！放射線イメージングの未来 (宇宙編)
<https://www.waseda.jp/top/news/48214>

5. 研究活動の課題と展望

本研究室は2016年度より早稲田大学・次代の中核研究者に採用され、来期で2年目を迎える。4章でリストしたとおり、僅か一年で論文・学会発表、webリリースに至るまで多岐にわたる成果が得られており、さらに一件、プレスリリースを予定している。宇宙分野におい

では、不幸にして「ひとみ」衛星を失ったが、2017年度からは JAXA 宇宙機応用工学研究系の客員教授に着任し、Flash LIDAR の開発に参加予定である。また、医療分野においては大阪大学医学部、東京女子医大、名古屋大学、名古屋陽子線治療センター、量子科学研究開発機構(QST)、東京工業大学との共同研究をはじめ、環境分野においては本学創造理工学部・大河内研究室や日本原子力研究開発機構とも協力した調査を開始している。2017年度も引き続き、本学研究分野の主力として宇宙・医療・環境分野の発展に尽くしていきたい。