

# 高精度 3D カラー放射線イメージング

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

本研究では、元素固有のライン X 線・ガンマ線に着目し、体内における薬物動態から宇宙における元素合成・伝播の理解に至るまで、放射線イメージングの融合と横断的刷新をはかる。元素固有の X 線吸収特性を用いた多色 CT イメージングにより、現行 CT の約 1/100 の低線量で抗がん剤や造影剤の伝達を可視化する。さらに原子核から放出されるガンマ線を陽子線や核医学治療のプロープとして利用し、体内核反応や薬物動態を可視化する。ライン X 線・ガンマ線イメージングは宇宙プラズマの放射機構の解明にも有効であるが、未だ技術が確立されず、観測も 30 年以上にわたり停滞している。本研究では小型衛星搭載用ガンマ線カメラの開発や雷ガンマ線の観測も実施し、身近な大気現象と宇宙・人体の高エネルギー現象の統合的な理解をはかる。とくに本年度は JST の戦略的創造推進事業 ERATO に採択され、今後より一層の加速が期待される。本研究プロジェクト自体は本年度で 2 期目が終了するが、来年度以降は「ERATO ライン X 線ガンマ線イメージング」として新たなプロジェクト研究を立ち上げる。

## 2. 主な研究成果

### 2.1 多色スペクトラル CT への応用

本年度は、現行 Dual Energy CT 装置との定量比較、さらには植物や生体マウスを用いたより複雑かつ臨床に近い条件で、造影剤・ナノ粒子等の薬物動態イメージングに挑戦した。さらに、64ch システムを縦置きで撮影する第一世代セットアップのほか、横置きにする第三世代セットアップを試行することで、撮影時間の大幅な短縮を試みた。植物のイメージングに関して、ニン

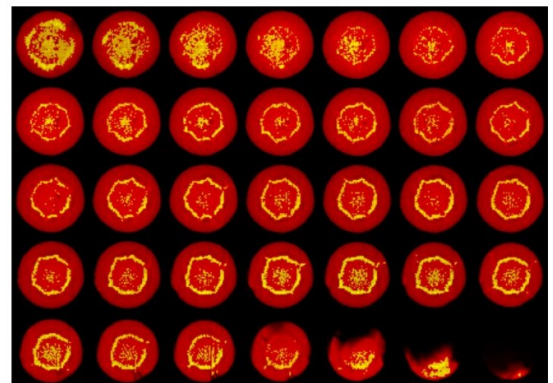
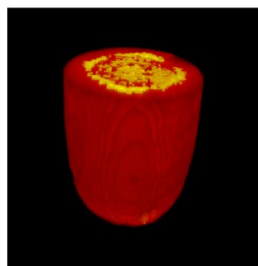


図 1: 多色スペクトラル CT で取得した、ニンジンの 3D 画像。黄色は K 吸収端イメージングでヨードを強調したもので、維管束が明確に確認できる。

ジンに着色したヨードとガドリニウムの造影剤を吸収させて K 吸収端イメージングを行い、維管束の部分が正しく抽出できることを確認した(図 1)。さらに、機械学習を用いて統計の不足した CT 画像の鮮鋭化に挑戦し、大幅な画質の向上に成功した。具体的には、U-net および Noise2Noise の二

つのアプローチを試み、画像のS/Nを5倍程度改善することに成功した。臨床装置との比較の第一歩として、金沢大学（医薬保健学域）が所有するDual Energy CT装置（Revolution CT Apex Edition:GE healthcare）と様々な濃度のヨード造影剤を用いた比較を行い、現状のスペクトル多

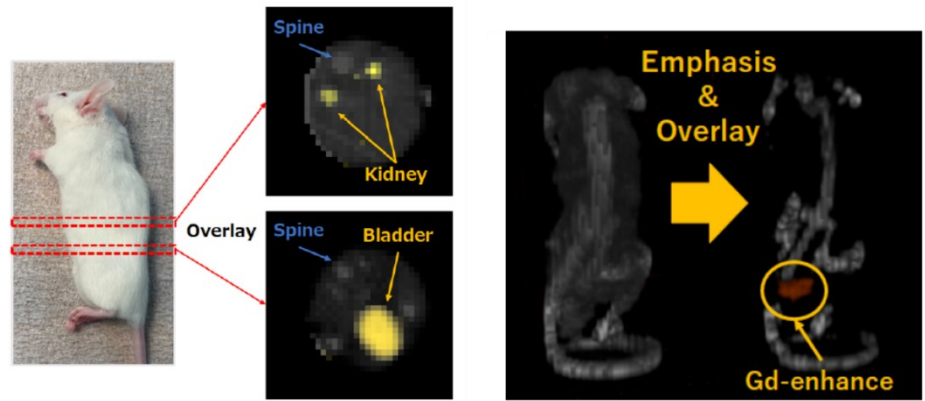


図 2: 生体マウスの3次元スペクトラルCT画像。黄色はヨード造影剤が腎臓と膀胱に集積している様子。赤はガドリニウム造影剤の強調画像。

色CTでも、物質同定能力で臨床装置と匹敵する能力を有することを実証した。最後に、金沢大学（理工研究域・医薬保健学域）と早稲田大において、初めて生体マウスの多色CTイメージングに挑戦した。3次元で全体骨格をイメージングするほか、上記造影剤を静脈注射し、各造影剤によって腎臓や膀胱を強調して撮影することに成功した（図2）。さらに、抗がん剤キャリアである金ナノ粒子を用いたイメージングや、第三世代のセットアップでの3次元画像取得も行った。

## 2.2 核医学治療・粒子線治療への応用

核医学治療と粒子線治療に関する2大テーマで研究を進めた。まず、大阪大学と合同でマウスの体内におけるアスタチンの3次元動態イメージングを行った。投与直後から5分おき、約2時間にわたり、4台のHybrid CCでアスタチンから生ずる79keVのX線撮影を行った。図3に示

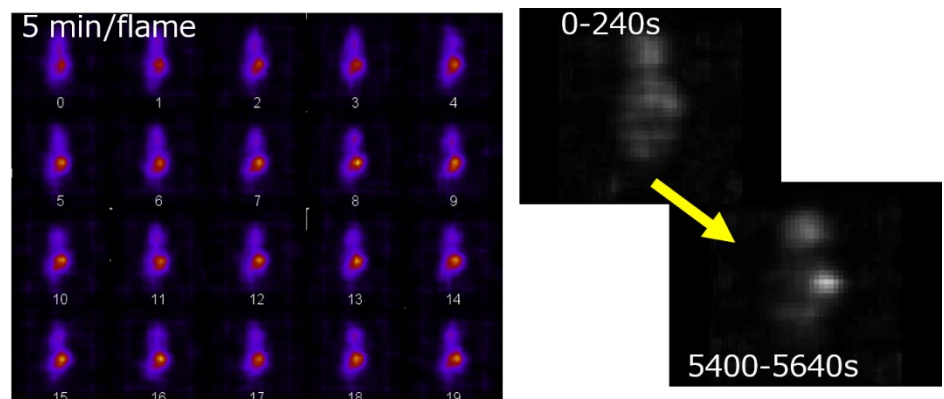


図 3:  $\alpha$ 線治療薬  $^{211}\text{At-NaAt}$  を投与したマウスのX線(79keV)ライブ画像。投与直後から時間をかけて、薬剤が甲状腺と胃に収束していく様子が良く分かる

す通り、アスタチンが時間とともに甲状腺と胃に集積していく様子が確認できた。さらに、Hybrid CCの広帯域特性と高感度を活かし、79keVのX線に比べ1/1000以下の放出率しかない微弱な570keVガンマ線のイメージングにも成功した。放射化イメージングについては、理化学研究所RANS-IIを用いた予備実験から、各種ナノ薬剤や造影剤の放射化に必要な熱中性子量および生成核種、そこから生ずるX線・ガンマ線の量を定量的に見積もった。これをもとに、京都大学の原子炉で金ナノ粒子、造影剤のガドリドール、白金ナノ粒子、シスプラチンをそれぞれ1分程度照射し、いずれも15-30分の測定でX線・ガンマ線イメージングに成功した。

粒子線治療への応用に関して、まず次世代陽子線治療として提案される陽子ホウ素捕獲反応(pBCT)を、物理学および生物学的見地から系統的に検証した。本研究ではまず、これまで実験データがない10MeV以上の領域に未知の $\alpha$ 線生成反応が無いかを探索した。結果、これらが起こす線

量付与は上記  $3\alpha$  反応に比べても無視できることが分かった (図 4 左)。そこで、物理線量に現れない生物過程が寄与している可能性を考え、前立腺がん細胞 DU145 およびヒト膀胱癌細胞株 MIA PaCa-2 を用いて pBCT を模擬した照射実験を行った。結果として、pBCT による致死率向上は確認できず (図 4 右)、恐らく先行研究が観測した増感作用は 2 次中性子とホウ素が偶然起こすホウ素中性子捕獲 (BNCT) 反応を、誤った解釈のもと pBCT として報告したものと推論した。

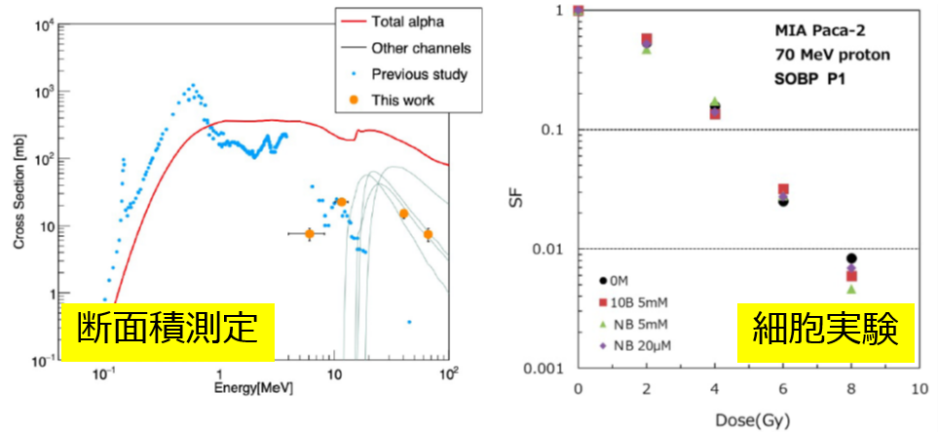


図 4: (左) pBCT における、アルファ線生成反応断面積の測定。10MeV 以上の実測データを初めて測定 (右) pBCT 反応における、ヒト膀胱癌細胞株 MIA PaCa-2 の細胞致死率測定。顕著な効果は確認できない。

## 2.3 雷ガンマ線・宇宙観測への応用

雷観測については、2021 年度冬季に新潟県十日町市の観測サイトでロング・バーストを 2 例、金沢市内においてショート・バーストを 1 例検出した。とくにロング・バーストにおいては、継続時間が約 3 分程度と長く、100keV から 5MeV の広帯域でガンマ線スペクトルの測定に成功した (図 5)。さらに、ロング・

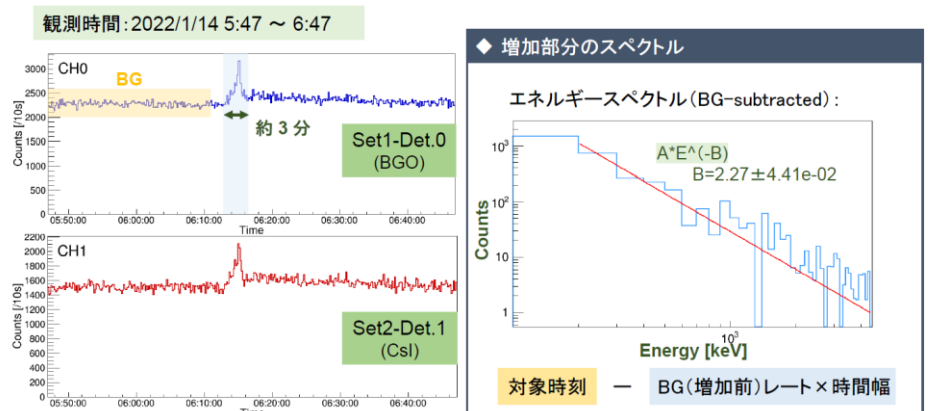


図 5: (左) 2022 年 1 月 14 日に、新潟県のサイトで観測された雷ガンマ線の時間変化。約 3 分間のロング・バースト。異なるシンチレータで同様な増加を観測。(右) 同じバーストで取得された、ガンマ線のエネルギースペクトル

バーストそれぞれにおいてピーク付近の 50 秒程度でイメージングを試みると、いずれのバーストでも雷雲に有意なガンマ線イベントの集積が見られた。現在、バックグラウンドの差し引き等も含め解析結果を詳細に検証中であるが、真の検出であれば世界初の極めて重要な成果である。早急に論文にまとめてプレスリリースなどを行いたい。金沢市内で検出したショート・バーストについては、ガンマ線のイベント数が少ないこともありイメージの作成には至らなかった。小型衛星搭載のカメラ仕様については、早稲田大学においてシミュレーションをベースに検討を進めた。衛星バスからの要求を加味し、センサーサイズは  $19 \times 19 \times 20 \text{ cm}^3$  以下、重量 10kg 以内、電力 10W 以下を目標に、コンプトンカメラとして最適なコンフィギュレーションを検討した。また、バックグラウンド除去能力を高め、カメラを突き抜けるエスケープ事象を排除する目的で、コンプトンカメラの筐体を BGO に変更した衛星搭載モデルのカメラ (BBM) を作成した。

### 3. 共同研究者

ERATO 片岡ライン X 線・ガンマ線イメージングに所属する全メンバー

(大阪大学、金沢大学、東京工業大学、理化学研究所、量研機構、岡山大学、帝京大学)

[https://www.jst.go.jp/erato/research\\_area/ongoing/jpmjer2102.html](https://www.jst.go.jp/erato/research_area/ongoing/jpmjer2102.html)

<https://www.waseda.jp/top/news/75378>

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文

- [1] Yamamoto,S.; Kataoka,J.; Sofue,Y.; Discovery of non-equilibrium ionization plasma associated with the North Polar Spur and Loop I, MNRAS (2022), in press
- [2] Omata, A.; Masubuchi, M.; Koshikawa,N.; Kataoka,J.; Kato,H.; Toyoshima,A.; Teramoto,T.; Ooe,K.; Liu,Y.; Matsunaga,K.; Kamiya,T.; Watabe,T.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J, Multi-modal 3D imaging of radionuclides using multiple hybrid Compton cameras, Scientific Reports (2022), vol.12, 2546
- [3] 片岡 淳, 小俣 陽久, 増渕 美穂, 越川 七星, コンプトンカメラを用いたアクティブ動態イメージング, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY (2021), vol.39, 5, p.223
- [4] Sofue,Y.; Kataoka,J.; Interaction of the galactic-centre super bubbles with the gaseous disc, MNRAS (2021), vol.506, p.2170, DOI: 10.1093/mnras/stab1857
- [5] Ito,S.; Inoue,Y.; Kataoka,J.; Spatial Variations of Magnetic Field along Active Galactic Nuclei Jets on Sub-parsec to Megaparsec Scales, ApJ (2021), vol.916, 25. DOI: 10.3847/1538-4357/ac0827
- [6] Tanaka,R.; Kataoka,J.; Nishi,F.; Yokokawa,H.; Inaniwa,T.; Development of a neutron camera system to visualize the dose distribution by secondary neutrons for safer proton therapy, Jinst (2021), vol.16, P06004, DOI: 10.1088/1748-0221/16/06/P06004
- [7] Sato,S.; Kataoka,J.; Kotoku,J.; Taki,M.; Oyama,A.; Toyoda,T.; Nakamura,Y.; Yamamoto,M.; Machine-learning Application to Fermi-LAT Data: Sharpening All-sky Map and Emphasizing Variable Sources, ApJ (2021), vol.913, 83, DOI: 10.3847/1538-4357/abf48f
- [8] Toyoda,T.; Sato, S.; Kiji,H.; Kataoka,J.; Kotoku,J.; Taki,M.; Application of machine-learning models to improve the image quality of photon-counting CT images, Jinst (2021), vol.16, P05021, DOI: 10.1088/1748-0221/16/05/P05021
- [9] Kiji,H.; Toyoda,T.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Terazawa,S.; Shiota,S.; Ikeda, H.; Spectral Photon-Counting CT System Based on Si-PM Coupled with Novel Ceramic Scintillators, Radiation Detection Systems, CRC press (2021), ISBN 9781003218364

#### 4.2 受賞・表彰

- [1] 早稲田大学先進理工学研究科・物理学及応物専攻  
2021 年度 優秀修士論文賞 (宮部賞)  
「次世代医療応用を目指した広帯域 X 線ガンマ線カメラの研究」  
(小俣陽久・先進理工学研究科・片岡研究室・修士 2 年)
- [2] 第 82 回応用物理学会秋季年会・放射線分科会優秀講演賞  
「広帯域 X 線ガンマ線による新規イメージング手法の開発と実証」

(増渕美穂・先進理工学研究科・片岡研究室・修士1年)

[3] 第68回応用物理学会春季年会・放射線分科会優秀講演賞

「ハイブリッド・コンプトンカメラを用いた核医学治療に向けた3次元イメージングの実証」

(小俣陽久・先進理工学研究科・片岡研究室・修士2年)

#### 4.3 国際学会発表

[1] Toyoda, T. et al. Performance demonstration of a novel Photon-counting CT for clinical application, VCI2022, Feb, 2022, online [Oral/video]

[2] Omata, A. et al. Performance demonstration of multi-modal imaging using hybrid Compton cameras, VCI2022, Feb, 2022, online [Oral/video]

[3] Hosobuchi, M. et al. Demonstration of simultaneous imaging of phantoms as anticancer agents using a novel photon counting CT for drug delivery systems, FLASH RADIOTHERAPY AND PARTICLE THERAPY CONFERENCE, Dec., 2021, online [Poster]

[4] Masubuchi, M. et al. Double-photon simultaneous imaging using a hybrid X-ray and gamma-ray camera, IEEE MIC/NSS, Oct., 2021, online [Oral]

[5] Omata, A. et al. Performance demonstration of multi-modal imaging using hybrid Compton cameras, IEEE MIC/NSS, Oct., 2021, online [Oral]

[6] Toyoda, T. et al. Pre-Experiments using photon-counting CT with machine learning models for drug delivery system monitoring, IEEE MIC/NSS, Oct., 2021, online [Oral]

#### 4.4 国内学会発表

[1] 横川 広歩、細淵 真那、佐藤 将吾、片岡 淳

「散乱陽子線を用いた「その場」線量可視化システムの提案」

第69回応用物理学会春季年会 2022年3月

[2] 増渕 美穂、小俣 陽久、越川 七星、片岡 淳、加藤 弘樹、豊嶋 厚史、大江 一弘、片山 大輔、寺本 高啓、松永 恵子、神谷 貴史、渡部 直史、下瀬川 恵久、畑澤 順

「広帯域X線ガンマ線撮像による生体マウス薬物動態 (At-211) イメージングの実証」

第69回応用物理学会春季年会 2022年3月

[3] 匂坂 真結、豊田 貴也、片岡 淳、有元 誠、川嶋 広貴、小林 聡、村上 和弘、佐藤 大地、吉浦 宏大龍、水野 睦也、相賀 耕、寺澤 慎祐、塩田 諭

「次世代型カラーX線CTを用いた生体内イメージング(1)」

第69回応用物理学会春季年会 2022年3月

[4] 佐藤 大地、有元 誠、吉浦 宏大龍、水野 睦也、相賀 耕、川嶋 広貴、小林 聡、村上 和弘、片岡 淳、豊田 貴也、匂坂 真結、池田 博一、寺澤 慎祐、塩田 諭

「次世代型カラーX線CTを用いた生体内イメージング(2)」

第69回応用物理学会春季年会 2022年3月

[5] 越川 七星、小俣 陽久、増渕 美穂、岡崎 優、片岡 淳、松永 恵子、加藤 弘樹

「広帯域X線ガンマ線による革新的放射化イメージング手法の提案1」

第82回応用物理学会秋季年会 2021年9月

[6] 小俣 陽久、増渕 美穂、越川 七星、岡崎 優、片岡 淳、松永 恵子、加藤 弘樹

「広帯域X線ガンマ線による革新的放射化イメージング手法の提案2」

第 82 回応用物理学会秋季年会 2021 年 9 月

[7] 吉浦 宏大龍、有元 誠、佐藤 大地、水野 睦也、川嶋 広貴、小林 聡、片岡 淳、豊田 貴也、Sonia Dima、池田 博一、寺澤 慎祐、塩田 諭

「次世代 MPPC 型フォトンカウンティング CT の造影剤イメージングと臨床 CT との定量比較」

第 82 回応用物理学会秋季年会 2021 年 9 月

[8] 増渕 美穂、小俣 陽久、越川 七星、片岡 淳、加藤 弘樹、豊嶋 厚史、寺本 高啓、松永 恵子、神谷 貴史、渡部 直史、下瀬川 恵久、畑澤 順、上ノ町 水紀

「広帯域 X 線ガンマ線による新規イメージング手法の開発と実証」

第 82 回応用物理学会秋季年会 2021 年 9 月

[9] 豊田 貴也、Sonia Dima、匂坂 真結、片岡 淳、有元 誠、川嶋 広貴、小林 聡、佐藤 大地、吉浦 宏大龍、寺澤 慎祐、塩田 諭、池田 博一

「次世代型カラー X 線 CT における新システムの構築及びリングアーチファクト除去」

第 82 回応用物理学会秋季年会 2021 年 9 月

#### 4.5 プレスリリース

[1] 2021 年 10 月 4 日

「ERATO 採択 元素固有の色を可視化」

早大・東工大

<https://www.waseda.jp/top/news/75378>

[2] 2021 年 10 月 1 日

「戦略的創造研究推進事業における令和 3 年度新規研究総括および研究領域の決定について」

JST 科学技術振興機構

<https://www.jst.go.jp/pr/info/info1526/index.html>

#### 5. 研究活動の課題と展望

2021 年度は現在進行中の科研費・基盤研究 (A)、挑戦的研究 (萌芽) のほか、JST の戦略的創造推進事業 ERATO の採択が決まり、その立ち上げに追われた 1 年となった。ERATO は早大理工では初の採択、本学全体でも 28 年前に人間科学部で一例が報告されているのみの、狭き門である。これに連動し、理工総研プロジェクトとして新たに「ERATO ライン X 線ガンマ線イメージング」を立ち上げ、さらに大規模かつ広範な研究の展開を狙う。