

ERATO ライン X 線ガンマ線イメージング

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

本研究は、戦略的創造推進事業「ERATO 片岡ライン X 線ガンマ線イメージング」の学内拠点として展開している。2025 年 9 月には対面開催となる最初の全体会議を早稲田大学 55 号館で開催した。プロジェクトに参加するスタッフと学生 60 名以上が参加し、個々の進捗と今後について議論を行った。アウトリーチでは 2026 年 3 月に ERATO 主催の公開シンポジウム「X 線・ガンマ線で宇宙と人体を視る」を早稲田大学リサーチ・イノベーションセンターで開催し、中高生を中心に 30 名程度の参加者があり盛り上がった。多色スペクトラル CT グループでは、1024ch からなる 2 次元イメージングシステムを本格的に導入し、高度なイメージング実験が進行中である。マルチモダリティによる脂肪肝や腫瘍マウスのイメージング、超高速ダイナミック CT 撮影、積層シンチレータによる微量薬剤の高感度撮影などが進行した。核医学・粒子線治療グループでは、放射化金ナノ粒子の実験を急ピッチで実施した。At-211 をサブミリ解像度かつ広視野でイメージングする X 線カメラを開発し、2026 年 3 月の応用物理学会・春季年会の注目講演として選出された (約 3500 件の講演のうち僅か 15 件のみ)。また、Au-198 に特化した大視野カメラの開発に成功し、Au-198 をがんにも局所投与したマウスの高精細イメージングにも成功した。宇宙・大気物理グループでは、GRAPHIUM 衛星の開発が順調に進んでいる。特に、衛星本体のエンジニアリング・モデル(EM)の構造設計を完了し、2026 年 3 月には新規開発要素を含む全てを搭載した実機での振動試験を実施した。搭載センサである広帯域 X 線ガンマ線カメラ INSPIRE についてはフライト・モデル(FM)と等価な pFM 品を完成し、実機をもちいた各種性能試験および単体熱真空試験を実施した。

2. 主な研究成果

2.1 多色スペクトラル CT 関連

本年度は 64×16ch の PCCT システムを本格的に導入し、昨年度までの PCCT システム(64×1ch)を 10 倍から 100 倍に高速化することに成功した。これにより、薬物の動態をほぼリアルタイムで観察するダイナミック CT 撮影に挑戦した。また、様々な疾患マウス・ラットの PCCT 撮影に MRI や現行の DE-CT データを補完的に用いることで、代謝機

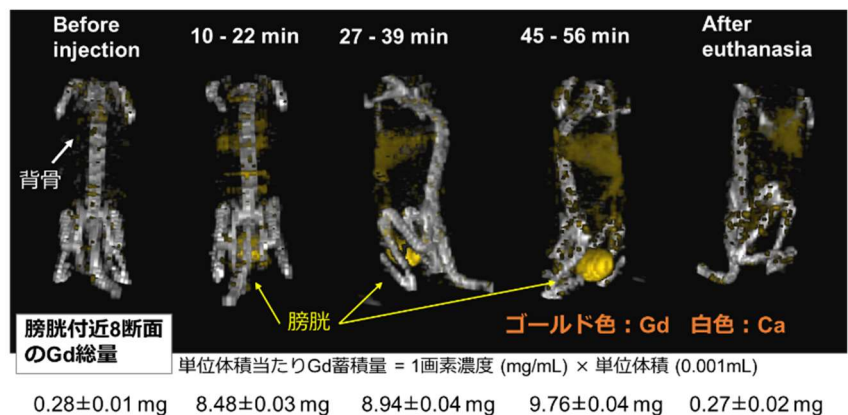


図 1: 1024ch PCCT システムを用いた Gd-EOB 薬剤の体内動態撮影 (Oshima et al. 2026, submitted)

能障害関連脂肪性肝疾患 (MASLD)に伴う炎症反応の判定など、ユニークかつ新しいテーマの創出にも取り組んだ。

まず、金沢大学(理工研究域)では従来のデータ処理システムを 64ch から 1024ch に拡張し、生体マウスの「高速」薬物動態

イメージングに挑戦した。図 1 は造影剤である Gd-EOB をマウスに投与後から 1 時間まで撮影したもので、時間とともに肝臓と膀胱に薬剤が集積する状況が、数分でクリアに描出されている。Gd-EOB は投与 10 分後から蓄積をはじめ、最終的に投与量の 84%が膀胱に蓄積していることが分かった。早稲田大学では浜松ホトニクス社と協力し、2次元 PCCT に特化した新規データ処理システムを開発した。本システムは計数率特性を 12Mcps/mm² (従来システムの 2 倍以上) にまで向上し、かつエネルギー分解能を 3 割改善、またエネルギー閾値のばらつきを数パーセントレベルにまで調整することに成功している。また、エッジフィルターを用いることで被写体以外の線量を軽減し、レート耐性を上げることで、文字通りリアルタイムの超高速 CT 撮影が可能となった。図 2 はシリコンチューブに 2 種類の造影剤 (ヨード・ガドリニウム) を定速注入した様子で、数秒毎の高速イメージングが実証されている。

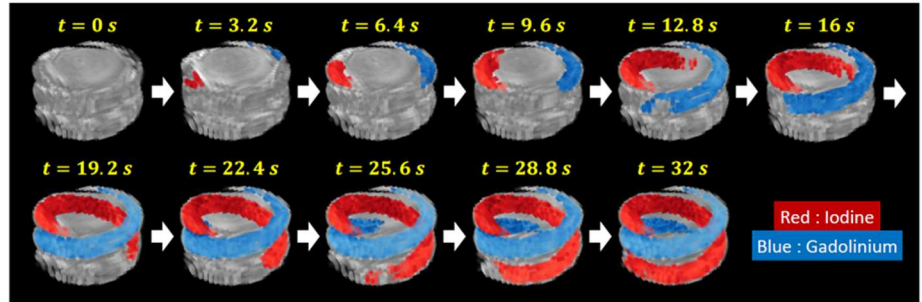


図 2: 1024ch PCCT システムを用いた超高速複数造影剤イメージング (Ro et al. 2026, submitted)

疾患マウスに関しては、金沢大学(医薬保健学域)が育成した様々ながんマウスや脂肪肝ラットを用いたイメージング実験を金沢大学(理工研究域)と早稲田大学が協力して行った。一例として、図 3(a)は 2 週齢ないしは 4 週齢の脂肪肝ラットに Gd-EOB を投与して健康ラットと比較したもので、脂肪肝ラットでは造影剤が取り込まれない様子が見られる。

PCCT を用いれば MRI や病理検査と同レベルの精度で、手軽かつ簡単に脂肪率の測定ができることが分かった。さらに、MRI の脂肪率データと PCCT データを相補的に組み合わせることで、軟部組織と水の割合を推定することに成功した (図 3(b))。一般的に、MASLD は脂肪肝が炎症を起こすことでがんや肝硬変に変化する。水分量は炎症の有無を判断する重要なパラメータであり、脂肪肝において炎症が進行している様子を PCCT で描出した最初の結果である。そのほか、早稲田大学において銅や鉛フィルターを

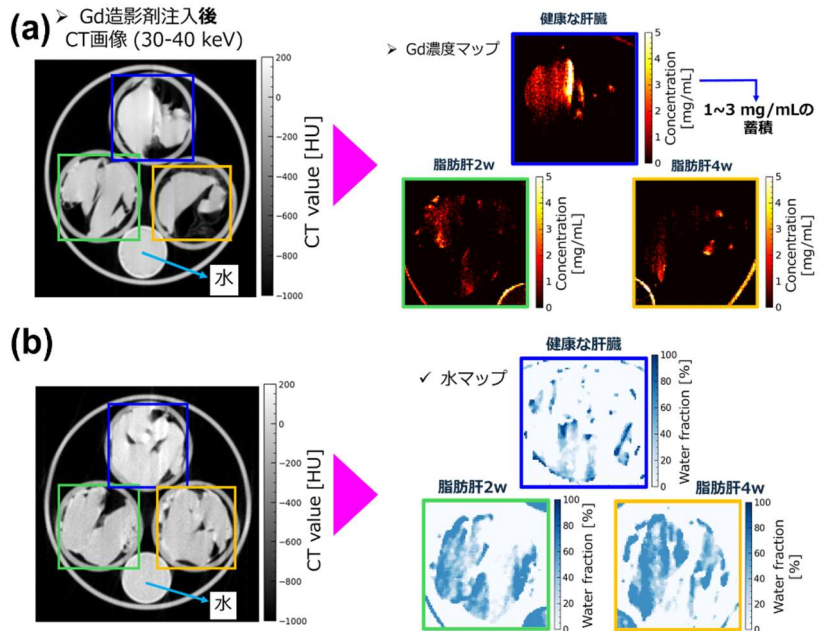


図 3: (a) 脂肪肝の進行度合いによる Gd-EOB の取り込み量の違い (b) 上記 PCCT データと MRI を組み合わせた水分量 (炎症の進行具合) の推定 (Furuta et al. 2026)

用いた X 線管スペクトルの変調とセラミックシンチレータの積層により、1mg/mL 程度の超低濃度 AuNP 溶液の撮影に成功している。

2.2 核医学治療・粒子線治療関連

2025 年度は大阪大学（放射線科学基盤研究機構）と共同で、AuNP と金錯体の中性子放射実験を重点的に行った。特に At-211 の合成日程と調整することで [Au-198/At-211]AuNP-S-mPEG を用いたマウス実験を 2 回も実施することができた。また、At-211 単体、または Au-198 単体での実験も各 2 回ずつ実施している。これと並行して、早稲田大学では直径 10cm でマウス全体を一度に撮影できる、X 線ガンマ線撮影用高解像度カメラを 2 種類、新たに開発した。まず At-211 に関しては、 α 崩壊と同時に放出される特性 X 線(79 keV)をターゲットに、ピッチが 0.5mm のタングステン・コリメータ (5mm 厚) とダイシング加工した Ce:GAGG アレイ(2mm 厚)を組みあわせることで、高解像度 X 線カメラを構築した(図 4(a))。大阪大学で舌がん SAS 細胞をマウスの下腹部皮下に移植し、粒径 5nm の [At-211]AuNP-S-mPEG を腫瘍内局所注射した場合の撮影例を図 4(b)に示す。超解像技術の一種であるピクセルシフトを組みあわせることで、0.5mm 程度の解像度を実現した。

本結果は従来の SPECT の解像度を 10 倍程度向上するもので、2026 年春季応用物理学会の注目講演に選出された。Au-198 に関しては、

崩壊に伴う 412keV ガンマ線をターゲットとしてピッチが 1.1mm で砂時計型のタングステンコリメータ (20mm 厚) と Ce:GAGG アレイ(5mm 厚)を組み合わせたガンマ線カメラを製作した。マウス実験は、大阪大学で SAS 細胞を移植して行った。画像の 1 例を図 5(a)に示す。Au-198 は半減期が 2.7 日と長いいため、投与約 2 日目まで動態を追うことに成功した。さらに、At-211, Au-198 それぞれの動態を個別に追うことができるため、大阪大学で薬物乖離の様子を粒径 5nm/2nm および時間ごとに追跡した。静脈投与 4 時間後の一例を図 5(b)

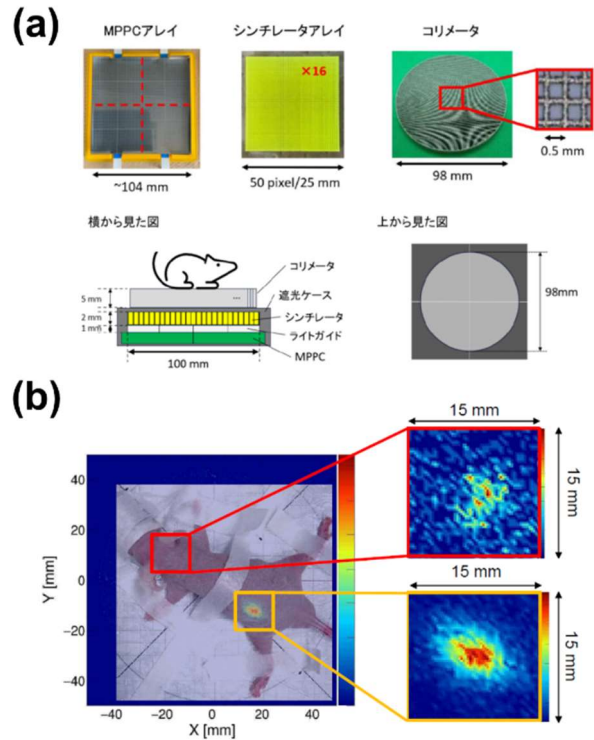


図 4: (a) 小動物イメージング用高解像度 X 線カメラの構成 (b) At-211 投与したマウスの撮影例 (Kikuchi et al. 2026, submitted)

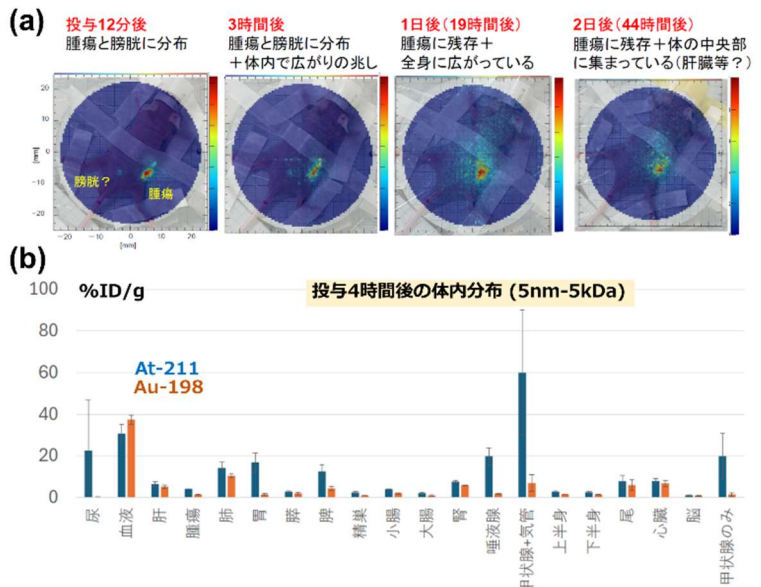


図 5: (a) ガンマ線カメラでのマウス撮影例 (Koshikawa et al. 2026, submitted) (b) アスタチンの AuNP からの剥離調査

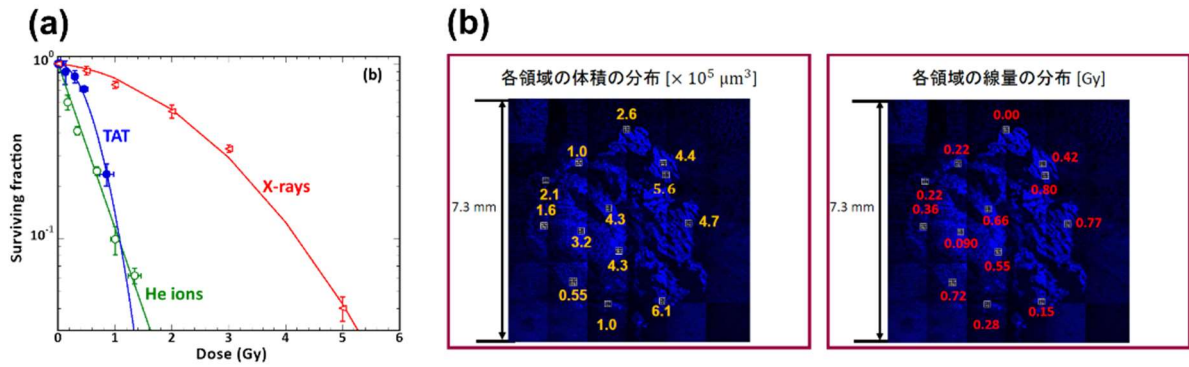


図 6: (a)標的アイソトープ治療と X 線、外照射による細胞生存率曲線の違い (Kusumoto et al. 2026, submitted) (b) 腫瘍切片を用いた各領域の線量分布の可視化 (Uno et al. 2026)

に示す。胃・唾液腺・甲状腺で分布に明確な差が確認され、At が剥がれている様子がわかる。

QST 放医研では、蛍光飛跡検出器 FNTD により α 線飛跡を 3 次的に求め、標的アイソトープ治療の (TAT) 生存率曲線の取得を目指した。細胞実験においては At-211 標識したハーセプチンを投与して、加速器 (放医研 HIMAC) で生成した He イオン照射の場合と飛跡数や生存率を比較した。外照射と比較して、TAT では低線量領域において肩を持つ傾向があり、生物学的効果比(RBE)としては外照射と同程度か、やや劣ることが分かった (図 6(a))。さらに、大阪大学、早稲田大学と協力して、腫瘍内部における TAT の線量評価も進行中である。共焦点顕微鏡を用いて At-211 薬剤を投与したマウス舌癌腫瘍切片および薬剤から放出された α 線飛跡の共可視化に成功し、薬剤が腫瘍切片全体に分布していることを確認した (図 6(b))。

2.3 宇宙観測関連

2025 年度は、GRAHIUM 衛星の開発を急ピッチで進めた。とくに東京科学大学 (工学院) を中心に EM (エンジニアリング) モデルが完成し、2026 年 3 月初旬には IMV 株式会社上野原サイトで、1 週間にわたる振動試験を実施した (図 7)。現在、ロケットメーカーと密にインターフェースを調整中であり、振動レベルは X 軸/Y 軸/Z 軸それぞれに対してイプシロンロケット (強化型) の QT レベルとし、衛星全体が振動に耐えうる構造であることを確認した。一方で、空力パドルの支持構造等、一部改修が必要な箇所も明らかになった。

早稲田大学では GRAPHIUM に搭載する広帯域 X 線ガンマ線検出器を開発し、本年度はフルスペックとなる pFM (プロトフライトモデル) の製作を完了した (図 8)。現在キャリブレーションの途中

ではあるが、解像度、感度ともにほぼシミュレーション通りの性能が得られている。また、INSPIRE の大きな売りとなる「全天の 1/4 を一度に観測する広い視野」についても、実機により検証することができた。これを受け、軌道上で実際

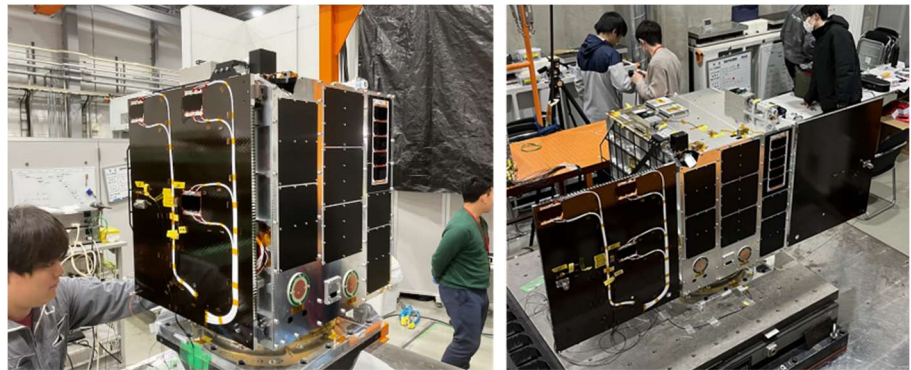


図 7: GRAHIUM 衛星 (EM) の振動試験の様子。右は太陽バドル展開時 (於: IMV 株式会社上野原サイト 2026 年 3/9~13)

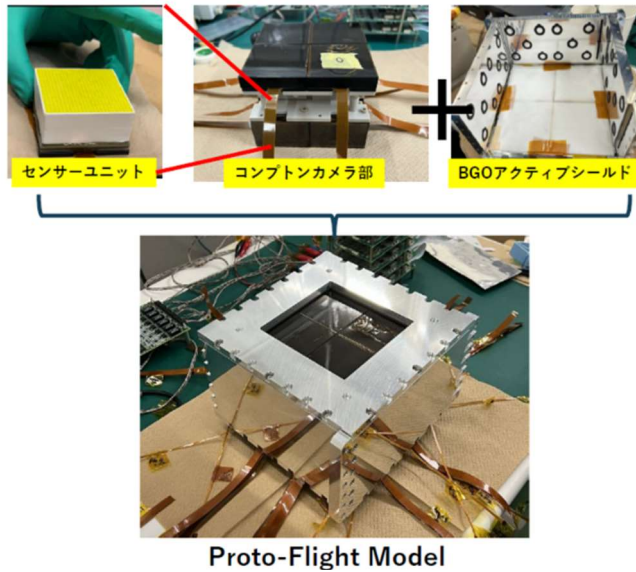


図8: 広帯域X線ガンマ線カメラINSPIREのプロトフライトモデルの外観

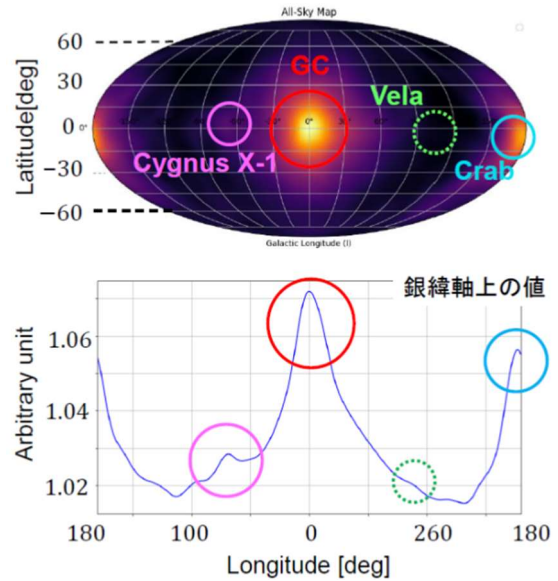


図9: INSPIREの全天観測シミュレーション。1Msec(～半年)で様々な天体を観測可能

に行う観測のシミュレーションについても詳細な検討を行った。GRAPHIUMは太陽同期軌道を想定し、軌道面と銀河面が交差する方向を視野中心とし、毎日少しずつ視野を変えながら、1年かけて広く銀河面をサーベイ観測する。そのため、各方向の観測時間は、コンプトンモードで1.5 Msec (1.5×10^6 秒)から4 Msecと見積もられた。典型的に、1Msecの観測を行った場合の全天マップのシミュレーション結果を図9に示す。カニ星雲(Crab)や白鳥座X-1、銀河中心など定常天体についても容易に検出できることが分かった。pFM実機については、2025年12月に帝京大学において熱真空試験を行った。当初、INSPIREの内部の断熱性が高く熱的に制御困難であることが問題となっていたが、熱伝導素材としてグラファイトを散乱体・吸収体間・管体に適切に挟むことで、全てのセンサ温度を $\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲で一致させることにも成功した。また、実機センサを用いた電磁干渉試験なども実施した。

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、京都大学、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.waseda.jp/top/news/75378>

4. 研究業績

4.1 学術論論文 (一部のみ抜粋)

- [1] N. Koshikawa, Y. Kikuchi, S. Uno, K.S. Tanaka, M. Murakami, Y. Kadonaga, A. Toyoshima, K. Takamiya and J. Kataoka “Proposal and demonstration of a novel SPECT for high-precision gamma-ray imaging”, 2025, Jnl. of. Inst., 20, C07057
- [2] Y. Kikuchi, N. Koshikawa, K.S. Tanaka and J. Kataoka, “Development and evaluation of high-resolution gamma camera for animal imaging”, 2025, Jnl. of. Inst., 20, C07059
- [3] R. Minagawa, T. Ro, J. Kataoka, M. Arimoto, H. Kawashima, S. Kobayashi, K. Okumura, T. Tomoda,

- F. Lucyana, M. Oshima, Y. Furuta, D. Sato, S., “Extracting high performance of energy information in photon-counting computed tomography”, 2025, Jnl. of Inst., 20, C08024
- [4] R. Mori, J. Kataoka, K. Tanaka, T. Suga, S. Ogasawara, K. Yamamoto et al., “Development of a wide-band gamma-ray camera onboard a 50 kg-Class small satellite GRAPHIUM”, 2025, Jnl. of Inst., 20, C09005
- [5] J. Kataoka, S. Ogasawara, R. Mori, K. Yamamoto, A.R. Joshi, S. Kojima, K. Sato, K.S. Tanaka, K. Watanabe, M. et al., “Revisiting the ARM cut in Compton gamma-ray imaging and its application to the INSPIRE detector”, 2025, Jnl. of Inst., 20, P10009
- [7] Tao Moeri, Tanaka Takaaki, Sano Hidetoshi, Alsaveri Rami Z.E., Kataoka Jun, “Turbulent Magnetic Fields and Molecular Cloud Interactions in the Supernova Remnant G1.9+0.3”, ApJ, 992, 204
- [8] Yu Furuta, Makoto Arimoto, Takahiro Tomoda, Fitri Lucyana, Minori Oshima, Satoshi Kobayashi, Kenichiro Okumura, Hiroki Kawashima, Jun Kataoka, et al., “X-ray imaging of anticancer drugs and a Platinum-Iodine mixture encapsulated in liposomes using SiPM-based photon-counting CT”, IEEE TNS, DOI 10.1109/TNS.2026.3662738
- [9] Shogo Sato, Kazuo Tanaka, Shojun Ogasawara, Kazuki Yamamoto, Kazuhiko Murasaki, Ryuichi Tanida, and Jun Kataoka, “ComptonUNet: A Deep Learning Model for Gamma-Ray Burst Localization with Compton Cameras under Noisy and Low-statistic Conditions”, 2026, ApJ, 999, 231

4.2 受賞・表彰

- [1] 令和7年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰（理解度増進部門）
「中高生を対象とした素粒子探究活動の普及啓発」
（田中 香津生）
- [2] 応用物理学会 2025 春季学術講演会・放射線分科会・学生講演最優秀賞
「フォトンカウンティング CT での金ナノ粒子イメージングに向けたフィルターの最適化と実証」
（皆川遼太郎・先進理工学研究科・片岡研究室・修士2年）
- [3] Excellent Student Oral Presentation Award, APSORC2025
“Neutron activation of gold nanoparticles for imaging of pharmacokinetics”
（越川七星・先進理工学研究科・片岡研究室・博士2年）
- [4] 2025 年度・早稲田大学リサーチアワード（独創的研究推進）
「高エネルギー宇宙医学応用研究」
（片岡 淳）
- [5] 2025 年度・小野梓記念賞（学術賞）
“Activation imaging of gold nanoparticles for versatile drug visualization: an in vivo demonstration”
（越川七星・先進理工学研究科・片岡研究室・博士2年）

4.3 国際学会発表

- [1] Ogasawara, S. et al. “INSPIRE: a wide-band X-ray and gamma-ray camera onboard the 65 kg small satellite GRAPHIUM”, SPIE Optics + Photonics 2025, Vancouver
- [2] Yamamoto, K. et al. “Evaluation of activation characteristics and sensitivity of a broadband X-ray, gamma-ray camera onboard a small satellite”, SPIE Optics + Photonics 2025, Vancouver

- [3] Koshikawa, N. et al. “Neutron activation of gold nanoparticles for imaging of pharmacokinetics”, 7th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry 2025 (APSORC 25), Shimane
- [4] Uno, S., et al. “3D tracking of alpha particles using FNTD technology: towards dosimetry for Targeted Radionuclide Therapy”, JRRS/ACRR 2025, Hiroshima
- [5] Ogasawara, S. et al., “Wide-band X-ray and Gamma-ray camera, INSPIRE, onboard the 65 kg small satellite GRAPHIUM”, IEEE NSS/MIC 2025, Yokohama
- [6] Minagawa, R. et al., “Leveraging energy-resolved information in photon-counting CT via deep learning for enhanced image quality”, IEEE NSS/MIC 2025, Yokohama
- [7] Koshikawa, N. et al., “Development of a high-contrast SPECT for small-animal imaging with high-energy gamma rays”, HSTD14, 2025, Taipei
- [8] Ro, T. et al., “Development of 2D SiPM-based Photon Counting CT using newly designed high-performance ASIC aimed at preclinical applications”, HSTD14, 2025, Taipei
- [9] Kikuchi, Y. et al., “Whole-body imaging of mice administered At-211 using a high-resolution X-ray and gamma-ray camera for small animals”, HSTD14, 2025, Taipei
- [10] Ogasawara, S. et al., “Development and Performance Evaluation of INSPIRE: A Wide-Field Hybrid Compton Camera for Small Satellite GRAPHIUM”, HSTD14, 2025, Taipei
- [11] Minagawa, R. et al., “Dual-Layer Scintillator-Based Detector for Photon-counting Computed Tomography with Improved Spectral and Spatial Performance”, HSTD14, 2025, Taipei
- [12] Yamamoto, K. et al., “Activation and Sensitivity Study of a Broadband X-ray Gamma-ray Detector INSPIRE for Small Satellite GRAPHIUM”, HSTD14, 2025, Taipei
- [13] Kanda, T. et al., “High precision spectroscopic observation of gamma rays from thundercloud”, HSTD14, 2025, Taipei
- [14] Oshima, M. et al., “An initial study of in vivo imaging using two-dimensional SiPM-based photon-counting CT system”, HSTD14, 2025, Taipei

4.4 国内学会発表（招待講演のみ）

[1] 片岡 淳

「放射線検出器の最新動向と医用応用」

第44回 日本医用画像工学大会(JAMIT 2025)、2025年8月

[2] Makoto Arimoto and Jun Kataoka

“Development of YGAG scintillator and SiPM-based PC-CT system: Demonstration of phantom to in vivo imaging”, IEEE NSS/MIC 2025, PCCT workshop

4.5 プレスリリース

[1] 2025年4月8日

令和7年度科学技術分野の文部科学大臣表彰受賞者の決定等について

https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/mext_01503.html

田中 香津生

[2] 2026年3月11日

2026年第73回 応用物理学会 春季学術講演会 15件の注目講演プレスリリース

<https://www.jsap.or.jp/docs/pressrelease/JSAP-pr20260311.pdf>

「生体マウス撮影用大面積高解像度 X線カメラによる At-211 投与マウスの全身イメージング」
菊池 優花（早大理工）

4.6 アウトリーチ活動ほか

2025年9月1日に、初めて対面となる ERATO 全体会議を早稲田大学において開催した。会議は午後13時から17時の4時間にわたり開催した。研究に参加する学38名、スタッフ23名が参加し、それぞれ研究進捗の発表を行った。会議後には懇親会を開催し、意見交換を行った（図10）。

2026年3月28日に、121号館コマツホールにおいて以下のシンポジウムを開催した（図11）。午前中は、協賛の加速キッチンが主体で中高生を対象とした体験学習（ μ 粒子検出器の組み立てと測定）、午後は ERATO プロジェクトのシンポジウムで、チームから3名の若手研究者が講演を行った。午前も午後も、30名程度の参加があり、盛況であった。



図10: 2025年9月1日に開催した ERATO 第4回全体会議の様子



図11: 2026年3月28日に121号館（コマツホール）で開催した、ERATO シンポジウムの様子

5. 研究活動の課題と展望

本年度も戦略的創造推進事業 ERATO のサポートにより、実り多い一年となった。来年度もさらに多くの成果を挙げるべく尽力する。