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

近年、画像センシング技術の発展は目覚ましく、カーナビや自動運転はもちろん、医療分野でも手術ナビゲーションシステムの導入が進んでいる。一方で、医療診断では依然としてレントゲンや CT 撮影が主役であり、最近では深層学習（AI）を用いた画像解析が注目されつつある。より高次の画像提供が不可欠であるが、CT 撮影は 100-1000 Mcps/mm^2 もの膨大な X 線照射を必要とし、電流積分で画像は白黒となる。一つ一つの X 線を分離し CT 画像に「色（エネルギー）」を与えることができれば、物質同定やマルチ造影剤の同時撮影、さらには子供や妊婦も安心して使える低被ばく装置への展開が期待できる。さらに高エネルギーのガンマ線に目を向けると、骨シンチグラフィに用いられる SPECT(単一光子断層撮影)は ^{99m}Tc など 140keV 付近のガンマ線、がんの早期発見に用いられる PET(陽電子断層撮影)はβ+核種を用いた 511 キロ電子ボルトのガンマ線のみであり、それ以外は利用の検討すらされていない。ところが近年、先端医療の現場でガンマ線イメージングの要請が急激に高まりつつある。たとえば、がんの高精度陽子線治療、2016 年から臨床認可を受けたアルファ線内用療法は、いずれも「核ガンマ線イメージング」が高精度治療の鍵を握っている。さらに、治療中に体内で起きるのと同じ核反応が、宇宙の元素合成（ex. 超新星爆発）や環境ガンマ線（ex. 雷雲で生ずるガンマ線）の生成に大きな役割を担うことが分かってきた。本プロジェクトでは、高精度放射線イメージングを通じて新規素材（マテリアル）開発から高度医療・基礎物理・画像処理(AI 予想)を融合し、基礎から応用にわたる次世代放射線イメージングの潮流を確立する。

２．　主な研究成果

2.1 Photon Counting CT の開発

本年度は主に 16 チャンネルのアレイと各種造影剤を用いた K 吸収端イメージングを行い、得られた得た画像の定量評価を行った。シンチレータ・アレイは共同研究先である日立金属株式会社による提供で、時定数や発光量の異なる YGAG セラミック・シンチレータを複数用意した。測定対象は異なる濃度(5, 10, 15, 20mg/ml)を持つヨード造影剤をイメージングし、4 濃度[mg/ml]の推定精度を見積もった。次に、ヨードとガドリの同時イメージングに挑戦し、K 吸収端エネルギーの違いを利用して弁別が可能であることを実証し

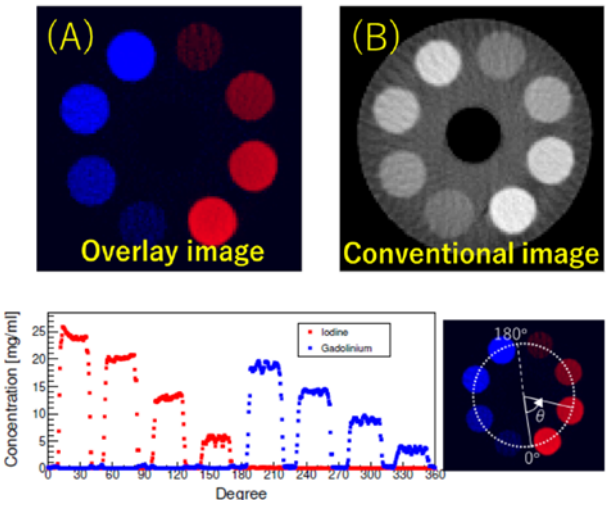

図 1: Photon Counting CT で撮影した、複数造影剤の画像。青はガドリニウム、赤はヨード。定量性についても 5%の精度で確認した (Maruhashi et al. 2018, NIM-A)

た。図 1 に結果を示す(Maruhashi et al. 2019)。複数造影剤を同時に投与することで、これまで複数回行っていた CT 撮影を一度に実施することが可能であり、さらなる低線量化が可能であることを示した。64ch のアナログ LSI については金沢大学の有元を中心に設計・製作を行い、現在チップ本体を性能評価中である。シンチレータアレイについては、YGAG（セラミック），YAP(単結晶)ともに準備が出来ており、LSI とのかみ合わせを待つ段階にある。

2.2 MeV ガンマ線用コンプトンカメラの開発

1-10MeV のエネルギー帯は原子核反応で生ずる核ガンマ線の宝庫であり、宇宙・医療・環境など幅広い分野で応用が期待されている。たとえば天文学においては星内部の元素合成や星間物質の空間分布、さらには宇宙線のエネルギー分布を「その場で」探る新しいプローブとしても期待される。同様に、粒子線治療中に生ずる即発ガンマ線、とくに ^{12}C や ^{16}O からの 4.4MeV ガンマ線は陽子線の飛程や線量を直接反映するため、高精度治療オンラインモニタへの応用が切望されている。しかしながら、1-10MeV のガンマ線は検出器内部で多重コンプトン散乱やエスケープ事象を起こし、正確な画像化は困難を極める。宇宙観測では約 30 年前に米国 CGRO 衛星が観測に挑戦して以降は開発が停滞しており、「宇宙物理に残された最後の窓」とも比喩される。本研究では将来の宇宙観測や医療応用に向け、1-10MeV のガンマ線イメージングに特化した専用コンプトンカメラ試作機を開発し、実機による性能評価を行った。実機イメージング評価はニュースバル放射光施設において 1.73MeV, 3.87MeV の準単色ガンマ線ビームを用いて実施した。図 2 に示すように，1.73MeV のガンマ線に対して角度分解能で 約 3° (FWHM)，3.87MeV に対して約 4° (FWHM) を達成した。

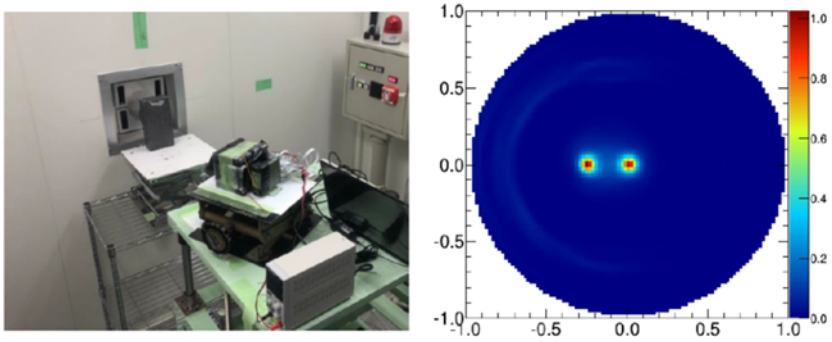

図 2: (左) Spring8 内 NewSubaru 実験施設での実験の様子 (右) 真正面 0° および 20° から 1.73MeV 準単色ガンマ線を打ち込んだ場合のイメージ再構成結果 (Hosokoshi et al. 2019, in prep)

３． 共同研究者

有元 誠　（金沢大学・助教） ※ 2019.4 月より客員主任研究員

４． 研究業績

4.1 学術論論文

[1] Fujieda,K.; Kataoka,J.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Sato,S.; Tanaka,R.; Matsunaga,K.; Kamiya,T.; Watabe,T.; Shimosegawa,E.; Prof.; Hatazawa,J. First demonstration of portable Compton camera to visualize 223-Ra concentration for radionuclide therapy, NIM-A, (2019) submitted

[2] Maruhashi,T.; Kiji,H.; Kataoka,J.; Arimoto,M.; Terazawa,S.; Shiota,S.; Ikeda,H. Demonstrative imaging of multiple contrast agents for next generation color X-ray CT, NIM-A, (2019), submitted

[3] Mochizuki,S.; Kataoka,J.; Koide,A.; Fujieda,K.; Maruhashi,T.; Kurihara,K.; Sueoka,K.; Tagawa,L.; Yoneyama,M.; Inaniwa,T. High-precision Compton imaging of 4.4 MeV prompt gamma-ray toward an on-line monitor for proton therapy, NIM-A, (2019), in press
[4] Tagawa,L.; Kataoka,J.; Sueoka,K.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Mochizuki,S.; Maruhashi,T.; Toshito,T.; Kimura,M.; Inaniwa,T., Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, NIM-A, (2019), in press
[5] Maruhashi.T.; Morita,H.; Arimoto,M.; Kataoka,J; Fujieda,K.; Nitta,H.; Ikeda,H.; Kiji,H.; Evaluation of a novel photon-counting CT system using a 16-channel MPPC array for multicolor 3-D imaging, NIM-A, (2019) in press
[6] Yamamoto,S.; Kataoka,J.; Kamada,K.; Yoshikawa,A. An ultrahigh spatial resolution radiation-imaging detector using 0.1 mm × 0.1 mm pixelated GAGG plate combined with 1 mm channel size Si-PM array, NIM-A, (2019), vol.919, pp.125-133
[7] Arimoto,M.; Morita,H.; Fujieda,K; Maruhashi,T; Kataoka,J.; Nitta,H.; Ikeda,H. Development of LSI for a new kind of photon-counting computed tomography using multipixel photon counters, NIM-A, (2018), vol.912, pp.186-190
[8] Koide,A.; Kataoka,J.; Taya,T.; Iwamoto,Y.; Sueoka,K.; Mochizuki,S.; Arimoto,M.; Inaniwa,T. Spatially resolved measurement of wideband prompt gamma-ray emission toward on-line monitor for the future proton therapy, NIM-A, (2018), vol.912, pp.24-28
[9] Sueoka,K.; Kataoka,J.; Takabe,M.; Iwamoto,Y.;Arimoto,M.; Yoneyama,M.; Yoda,I.; Torii,T; Sato,Y.; Kaburagi,M.; Terasaka,Y. Development of a new pinhole camera for imaging in high dose-rate Environments, NIM-A, (2018), vol.912, pp.115-118
[10] Kataoka,J.; Kishimoto,A.; Taya,T.; Mochizuki,S.; Tagawa,L.; Koide,A.; Sueoka,K.; Morita,H.; Maruhashi,T.; Fujieda,K.; Kurihara,T.; Arimoto,M.; Okochi,H.; Katsumi,N.; Kinno,S.; Matsunaga,K.; Ikeda,H.; Shimosegawa,E.; Hatazawa,J.; Ohsuka,S.; Toshito,T.; Kimura,M.; Nagao,Y.; Yamaguchi,M.; Kurita,K.; Kawachi,N. Ultracompact Compton camera for innovative gamma-ray imaging, NIM-A, (2018), vol.912, pp.1-5
[11] Koide,A.; Kataoka,J.; Masuda,T.; Mochizuki,S.; Taya,T.; Sueoka,K.;, Tagawa,L.; Fujieda, K.;, Maruhashi,T.; Kurihara, T.;, Inaniwa,T. Precision imaging of 4.4 MeV gamma rays using a 3-D position sensitive Compton camera, Nature Scientific Reports, vol.8, No.8116
[12] Yamamoto,S.; Kataoka,J.; Fukuchi,T.; Kamada,K.; Yoshikawa,A. Development of ultrahigh resolution radiation imaging detector using 1 mm channel size Si-PM array combined with 0.2 mm × 0.2 mm pixelated GAGG plate, Jinst, (2018), vol.13, P05028

4.2 招待講演

[1] 片岡　淳

アイソトープ協会・放射線基礎セミナー：2018 年 7 月 6 日＠東大工学部

「核医学や高精度陽子線治療にむけたイメージング装置の開発」

4.3 受賞・表彰

[1] 第 8 回測定器開発優秀修士論文賞（KEK 測定器開発室）

「MPPC を用いた低被曝かつ三次元カラーＸ線ＣＴシステムの開発」
（早稲田大学片岡研究室：森田隼人）
http://rd.kek.jp/ronbun/award2018.html

4.4 国際学会発表

[1] Fujieda,K. et al. First demonstration of portable Compton camera to visualize 223-Ra concentration for radionuclide therapy, VCI 2019, Feb 18-22,2019, Wien, Austlia [Poster]
[2] Maruhashi,T.et al. Demonstrative imaging of multiple contrast agents for next generation color X-ray CT, VCI 2019, Feb 18-22,2019, Wien, Austlia [Oral]
[3] Fujieda,K. et al. First demonstration of portable Compton camera to visualize 223-Ra concentration for radionuclide therapy, PD18, Nov 27-29,2018, Tokyo, Japan [Oral]
[4] Maruhashi, T. et al. Evaluation of a novel photon-counting CT system using 16-ch MPPC array for multicolor 3D imaging, PD18, Nov 27-29,2018, Tokyo, Japan [Oral]
[5] Kurithara,T. et al. First precision spectroscopy of cesium-137 from the ground to 150m above in Fukushima, PD18, Nov 27-29,2018, Tokyo, Japan [Oral]
[6] Mochizuki,S. et al. High-precision Compton imaging of 4.4MeV prompt gamma-ray toward on-line monitor for proton therapy, IEEE MIC/NSS, Nov.10-17, 2018, Sydney, Australia [Oral]
[7] Tagawa,L. et al. Development of novel neutron camera to estimate secondary particle dose for safe proton therapy, IEEE MIC/NSS, Nov.10-17, 2018, Sydney, Australia [Poster]
[8] Kataoka,J. et al. Precision imaging of 4.4MeV gamma rays using 3-D position sensitive Compton camera, SORMA XVII, June.12-15, 2018, Michigan, USA [Oral]
[9] Maruhashi,T. et al. Evaluation of a novel photon-counting CT system using 16-ch MPPC array for multicolor 3D imaging, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Oral]
[10] Tagawa, L. et al. Development of new compact neutron camera for safe proton therapy, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Poster][11] Mochizuki,S. et al. Development of high-resolution Compton camera for prompt gamma-ray imaging during proton therapy, 14th PISA meeting, May 27-June 2, Elva, Italy [Poster]

4.5 国内学会発表

[1] 木地 浩章、丸橋 拓也、片岡 淳、有元 誠、寺澤 慎祐、塩田 諭、池田 博一
「次世代カラーX 線 CT に向けた複数造影剤イメージングの実証」
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日
[2] 藤枝 和也、片岡 淳、望月 早駆、田川 怜央、佐藤 将吾、田中 稜、松永 恵子、神谷 貴史、渡部 直史、下瀬川 恵久、畑澤 順、大須賀 慎二
「RI 内用療法に向けたコンプトンカメラによる 223-Ra イメージングの実証」
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日
[3] 田中 稜、片岡 淳、望月 早駆、田川 怜央、藤枝 和也、佐藤 将吾、吉野 将生、鎌田 圭、吉川 彰
「RI 内用療法に向けた大面積コンプトンカメラの最適化検証」
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日

[4] 吉野 将生、金 敬鎭、鎌田 圭、横田 有為、黒澤 俊介、山路 晃広、大橋 雄二、佐藤 浩樹、藤枝 和也、田中 稜、片岡 淳、吉川 彰
「CeBr3 を用いた高エネルギー分解能 1mm ピクセルアレイの開発」
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日
[5] 栗原 拓也、片岡 淳、棚田 和玖、望月 早駆、田川 怜央、丸橋 拓也、細越 裕希、大河内博、後藤 友里絵
「福島県浪江におけるガンマ線スペクトルの高度変化測定」
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日
[6] 細越 裕希、片岡 淳、望月 早駆、米山 昌樹、棚田 和玖、藤枝 和也、伊藤 颯一郎、木地浩章、西 郁也、宮本 修治
「MeV ガンマ線コンプトンカメラの最適化および性能評価[7]
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日
[7] 米山 昌樹、片岡 淳、望月 早駆、伊藤 颯一郎、木地 浩章、西 郁也、細越 裕希、
宮本 修治
「チェレンコフ光検出型 MeV ガンマ線偏光計の提案と実証」
第 66 回応用物理学会　東京工業大学　2019 年 3 月 9 日~12 日

4.6 プレスリリース
[1] 2018 年 5 月 26 日
世界初！4.4 MeV ガンマ線 の高精度イメージングに成功 ― 先端医療と宇宙をつなぐ、 新しい 架け橋へ
早大・量研機構
https://www.waseda.jp/top/news/59259

4.7 メディア掲載
[1] 2018 年 6 月 6 日
ガンマ線検出のカメラ～陽子線治療など応用
日経産業新聞
https://twitter.com/nikkei_bizdaily
[2] 2018 年 6 月 1 日
4.4MeV のガンマ線可視化
科学新聞
https://sci-news.co.jp/

５． 研究活動の課題と展望

2019 年度は早々に 64ch LSI と製作済みシンチレータアレイを組み合わせたイメージング評価を行う。とくに、LSI 自身の性能向上が画質に及ぼす影響、また YGAG セラミック・シンチレータと単結晶 YAP シンチレータの蛍光時定数・発光量の違いが画像に及ぼす影響を精査する。MeV ガンマ線イメージングに関しては、10×10cm 角サイズの大判シンチレータ・アレイの開発を行い、散乱角異方性を用いた偏光測定についても実験を行う。また、小型衛星に搭載する場合の軌道シミュレーションを始め、より現実的な感度評価に反映する。