

## 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

(理工学術院総合研究所・先進理工学研究科 教授)

### 1. 研究課題

近年、APD (Avalanche Photodiode)やMPPC (Multi-pixel photon counter)と呼ばれる高性能・半導体光「増幅」素子の登場により、放射線計測も新たな局面を迎えている。従来の光電子増倍管(PMT)では実現困難であった小型・軽量・磁場耐性を生かし、宇宙・素粒子・原子核・医療など様々な方面への展開が可能となった。これに伴い、X線やガンマ線を可視化するシンチレータも優れた素材が続々と開発され、たとえばLaBr(Ce)などの無機シンチレータは半導体に匹敵する優れたエネルギー分解能(662keVで2% FWHM程度)を実現し、国内でもCe:GAGGなど高速かつ高光量シンチレータの開発が進んでいる。2011年の福島第一原発の事故以来、放射線計測の重要性は国内でも強く認識され、環境計測や除染活動の効率化は極めて重要な課題である。本研究では近年開発が目覚ましい計測技術を統合し、また上記の需要を鑑み、理工医の枠組みを超えた次世代放射線計測の開拓を目指す。具体的には [1] X線・ガンマ線天文衛星を用いた高エネルギー宇宙物理実験への展開 [2] 最先端の放射線センサーを用いた産業・医療・工学分野への応用の二つを掲げている。とくに [2] では JST 先端計測プログラム・放射線計測領域の一環として従来にない小型・軽量かつ高感度ガンマ線可視化装置の開発を急ピッチで進めており、以下では2013年度における研究進捗について詳説する。

### 2. 主な研究成果

#### 2.1 フェルミ衛星・すざく衛星を用いた宇宙観測

フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡(以下、フェルミ衛星)の打ち上げから5年を経た現在、100MeV以上のガンマ線で検出された天体は約3,000個にも達し、既知の活動銀河核やパルサーのほか、超新星残骸や星生成(スターバースト)銀河など、これまで知られていなかった多くの高エネルギー天体を発見した。しかしながら、今なお30%以上の天体が未知であり、その起源が不明である。我々の研究室ではフェルミ

衛星打ち上げ当初からこれら「未同定ガンマ線天体」の解明にむけ、X線天文衛星「すざく」やSwiftを用いた系統探査を主導してきた。一例として、新種の「毒蜘蛛」ガンマ線パルサー2FGL J2339.-0531を発見し、早

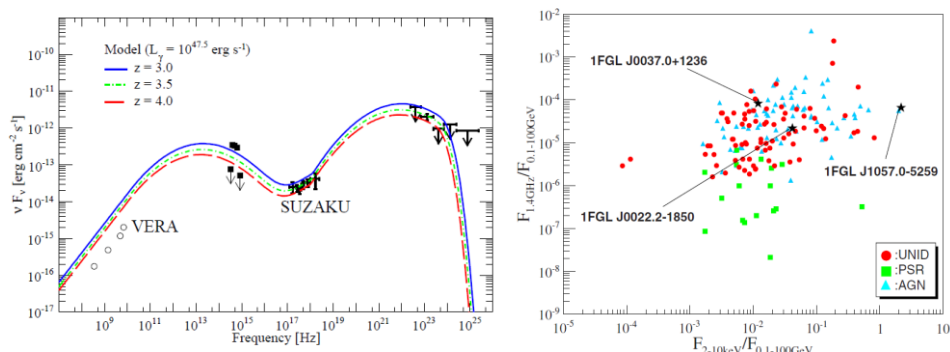


図1(左): フェルミ・未同定天体から発見した遠方クェーサー候補 [Takahashi et al. 2013, ApJ] (右): 未同定ガンマ線天体138個の解析 [Takeuchi et al. 2013, ApJ]

稲田大学よりプレスリリースを行ったことは記憶に新しい(2011年度)。本年度は、さらに二つの未同定天体を追観測し、このうち一つが距離にして110~120億光年(赤方偏移  $z = 3 \sim 4$ )にある極めて遠方のクェーサー天体である可能性を示した(Takahashi et al. 2013, ApJ: 図1左)。これまで、フェルミ衛星で発見されている最遠方クェーサーは  $z = 3.0 \sim 3.2$  程度であり、我々の結果は「暗い」未同定天体のいくつかは極めて遠方の銀河であり、赤外背景放射の存在量や宇宙論的制限を与える重要な指標となることを初めて示した。さらに、フェルミ衛星で一年目に発見した134の未同定ガンマ線天体すべてを系統的に解析し、そのすべてについて電波からX線・ガンマ線にわたる多波長スペクトルを求めることに成功した(Takeuchi et al. 2013, ApJS: 図1右)。未同定天体に対しこのような系統的研究がすすめられたのは世界的にも初めてであり、中には全く類例を持たない特徴的なスペクトルを示す天体も散見される。これらは真に未知の天体である可能性が高く、さらなる追観測により起源に迫りたい。本論文は、今後も未同定天体の最初のカatalogとして、世界中の研究者に活用が多く期待される論文である。

続いて、本年度はフェルミ衛星が発見した銀河中心の巨大な泡構造“フェルミ・バブル”(天文学会誌解説:2012年9月号;片岡 淳ほか)のX線構造を解析し、最初の論文にまとめた(Kataoka et al. 2013, ApJ: 図2)。出版から3か月で250ダウンロード以上を記録し、世界的にも極めて注目度が高い。本論文の主要な成果は以下の通りである:(1)バブルの縁に沿った強いX線構造(North Polar Spur: NPS)はこれまで近傍の超新星残骸と考えられてきたが、吸収量の大きさから考えにくく、むしろ銀河中心にある構造と考えられる(2)NPSのスペクトルは銀河ハローと同じモデルでフィットされるが、温度が50%ほど高く、これは爆発時の衝撃波(速度 $\sim 300$  [km/s])で温められた結果と理解される(3)バブルの境界でプラズマの放射強度が5割ほどジャンプし、一方で温度は変化しない。これらも銀河中心方向で圧縮されたガスを投影していると考えて矛盾がない。これらの観測結果より、我々の銀河系が1,000万年前に巨大な爆発を起こし、 $10^{49}$  [J]もの膨大なエネルギーを解放した結果がフェルミ・バブルと理解される。この結果については、スタンフォード大学で開催されたワークショップ、CTA Link Meetingなどの国際会議、また多くのセミナー・招待講演で発表した(4.2章)。

## 2.2 Astro-H 衛星搭載 APD センサーおよび回路システムの開発

2015年に打ち上げ予定のAstro-H衛星には硬X線イメージャ(Hard X-ray Imager:HXI)、軟ガンマ線検出器(Soft Gamma-ray Detector:SGD)が搭載される。HXI,SGDともにSi,CdTe半導体検出器を用いて10keV以上でこれまでの衛星にない高感度を実現するが、軌道上で低バックグラウンドを実現するために鍵となるのがBGOを用いたアクティブ・シールドである。これまで、早稲田大学ではコンパクトで高性能な宇宙用APDの開発と軌道動作実証を行い、さらに[1]APDア

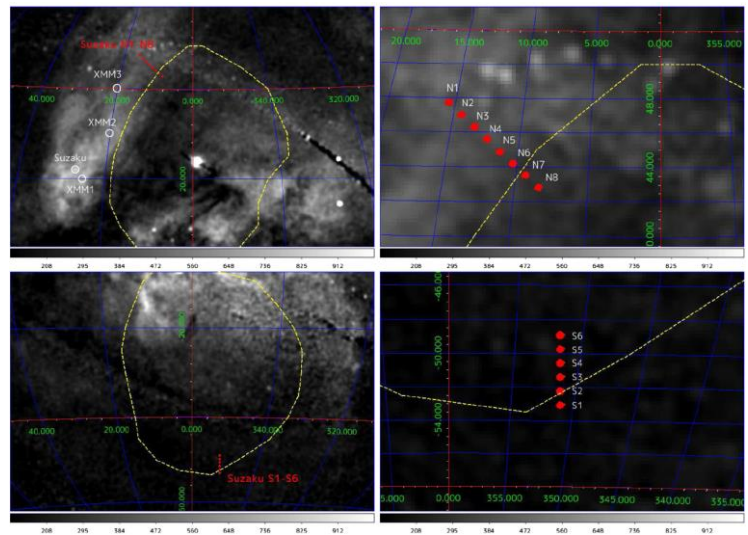


図2: 「すざく」衛星によるフェルミ・バブルの観測 [Kataoka et al. 2013, ApJ]

センブリの接着問題の解決と最適化 [2] フライトモデル APD-BGO シンチレータの組み合わせ決定 [3]アナログ処理部 フライトモデル開発を主導してきた(Saito et al. 2013, NIM-A)。本 APD は軌道上での荷電粒子数モニタ、また、弱い線源と組み合わせることで HXI 検出器のエネルギー・キャリブレーション用としても利用される。本年度は担当学生の不在から Astro-H 衛星のシールド検出器関連で大きな進展はなかったが、宇宙科学研究所で進めている APD-アナログ処理回路・試作モデルの特性評価や上記キャリブレーション用 APD の性能評価などに協力・参加した (図 3 左・右)。

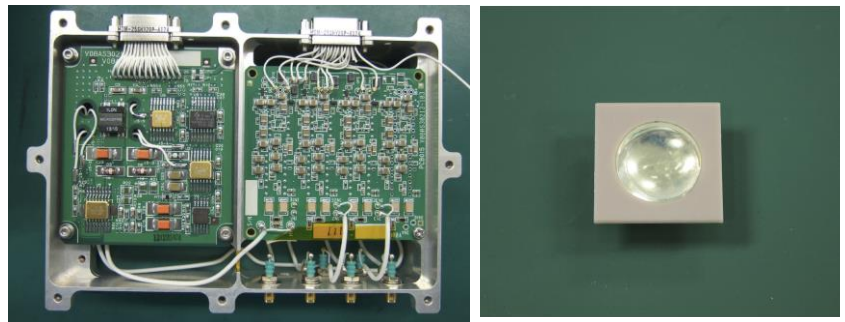


図 3(左) : Astro-H 衛星 APD-BGO シールド処理用アナログデータ処理部試作回路 (右) : キャリブレーション APD と接合するプラスチックシンチレータ (宇宙科学研究所 : 佐藤理江氏提供)

### 2.3 次世代 PET 技術開発 (MPPC-PET)

科学研究費補助金・基盤研究(S)の支援のもと、APD よりさらにゲインが高くコンパクトな光素子 MPPC を用いて、次世代 PET 装置の開発を進めている。PET は癌がブドウ糖を過剰に摂取することを利用した分子イメージング法で、癌の早期発見の有力な手段となるが、一方で装置が大型でコストが高いこと、また解像度が 5mm 程度と悪いことが広い普及を妨げている。当研究室では小動物用の MPPC-PET ガントリを開発し、2012 年度にマウスを用いて初めての臨床実験を行った (図 4)。PET として究極の解像度 1mm (FWHM)を実現するほか、MRI と PET の併用に向けた初期開発を進めてきた (Kurei et al. 2014, NIM-A, in press)。本年度は、8 チャンネルからなる MPPC-PET ガントリをバリアン社製 4.7T 小動物用 MRI と併用することで MRI-PET 間での干渉を調べるほか、新規 DOI-PET 技術に向けたセンサー一部開発を行った。さらに、対消滅ガンマ線の到来時間差を用いた TOF-PET 装置の実現に向け、16ch のアナログ ASIC を新たに開発し、2 次元 MPPC array と組み合わせた評価を行った。結果、16ch の MPPC-array 同士で 489 ps (FWHM)が得られ、PMT を用いた市販で最高性能の TOF-PET 装置と比べても遜色のない性能が

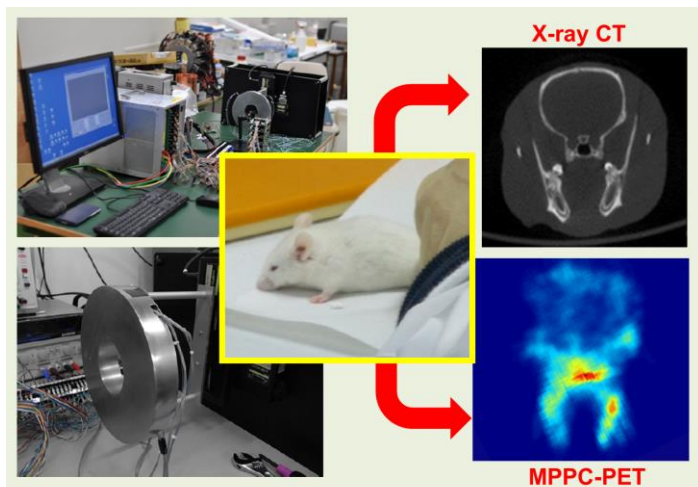


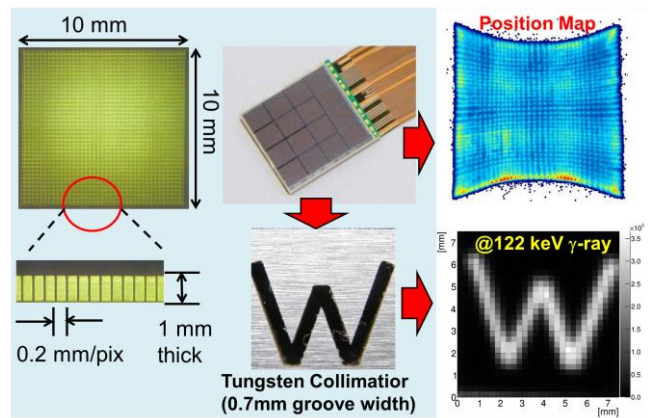
図 4: 試作した小動物用 MPPC-PET ガントリと、これで得られたマウス頭部 PET 画像、X 線 CT 画像の比較 (Kataoka et al. 2014 in prep)

得られた (Ambe et al. 2014, NIM-A, in press)。今後は Time-back 方式と名付ける新たな計測形式を応用し、また新規に特性の優れたシンチレータ、MPPC を用いることでさらなる時間精度の向上を目指す。

さらに、本年度は 2mm 厚までの薄板 Ce:GAGG シンチレータにブレードダイシングの微細加工を施すことで、250 $\mu$ m ピッチの「超微細」シンチレータアレーを製作することに成功した (図 4: Fujita et al. 2013 NIM-A in press)。原理的には、この薄板をスタックすることでも

DOI 検出器が容易に制作でき、また一枚一枚を  
 精細なガンマカメラとして次世代「マルチカラ  
 ー」フラット・パネル検出器(FPD) や Spectral  
 CT に応用することが期待できる。これら技術  
 については様々な可能性を孕む新しいテーマで  
 あり、2014 年度に改めて報告したい。

図 4 : 250 $\mu$ m ピッチの微細シンチレータアレー。MPPC  
 との併用で精細なイメージングが可能 [Fujita et al.  
 2013, NIM-A]



## 2.4 革新的ガンマカメラの開発

福島第一原発により飛散した大量の放射線核種(おもに  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ )は現在も深刻な社会的問題であり、除染作業の加速化が望まれている。通常、汚染の調査にはサーベイメータが使われるがガンマ線到来方向の同定が難しく、またバックグラウンドの影響を受けやすい。線量の源を知るために現場をくまなく走査する必要があり、観測中での被爆や作業の非効率性が指摘される。これに対し、ガンマカメラは遠方からガンマ線の画像を取得する新しい技術であり、東芝・日立など国内各社からピン・ホール型カメラの製品化がすすめられているほか、JAXA/MHI からも Si/CdTe 半導体検出器を用いた超広角ガンマカメラが提案されている。当研究室は浜松ホトニクス社と共同で、JST 先端計測プロジェクト支援のもと「携帯可能かつ高感度な革新的ガンマカメラ」の開発を進めており、本年度は9月に最初の共同プレスリリースを行った(浜松ホトニクス, 早稲田大学, JST; 図5)。このガンマカメラは15cm角程度の小型かつ1-2 kg と非常に軽量であるが、感度は極めて高く、福島浪江町における実地試験でも主なホットスポットをわずか3分程度で撮像することに成功した。さらに、市街地のみならず森林部など周囲からくまなくガンマ線がバックグラウンドとして入射する環境でも問題なく動作することを確認した。一方で、森林部のように木々が折り重なった環境では、放射線が手前の木から出ているのか、それとも裏にある木々からでているのかわかりづらい状況が多々あることも分かった。そこで、複数個所でのステレオ撮影からイメージの「奥行方向」の縮退を解き、10メートル先の線源までの距離を約2メートルの精度で決定する新しい計測技術を開発した (Takeuchi et al. 2013, NIM-A in press: 図6)。今後は、当初の目標である「3次元」シンチレータを採用することでガンマ線の解像度を7-8° (FWHM) @662keV まで大幅に向上し、また、新た

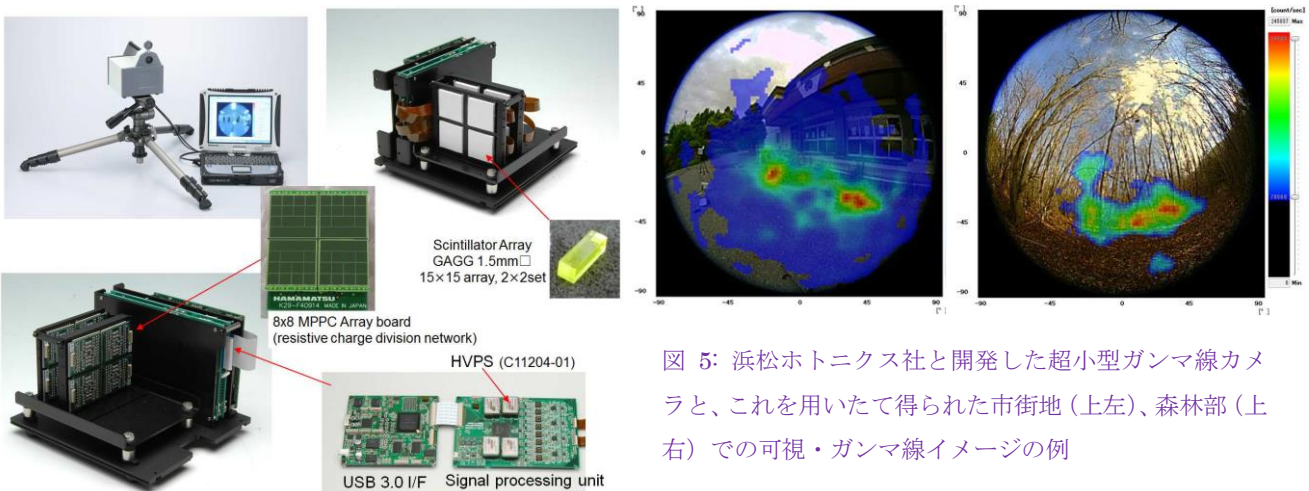
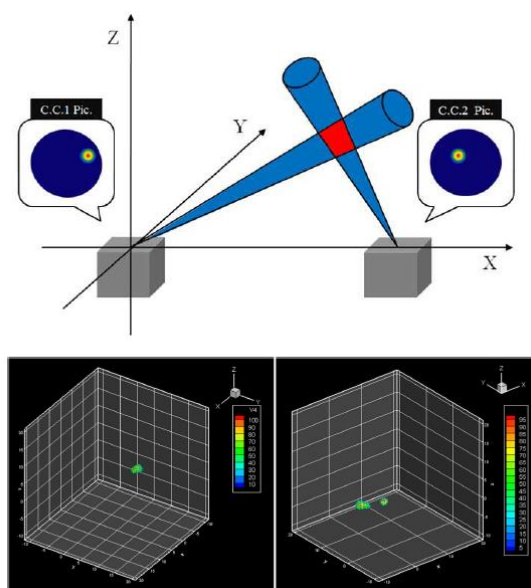


図 5: 浜松ホトニクス社と開発した超小型ガンマ線カメラと、これを用いた得られた市街地(上左)、森林部(上右)での可視・ガンマ線イメージの例

に国際特許出願をした背面シールド板を導入することで、後方散乱を軽減、画像のS/Nを大幅に改善することを目指す。これに伴い、福島を中心とした高線量・低線量領域での実地試験を繰り返し、より使いやすく、解像度・感度がともに優れたガンマカメラの製品化を目指す。さらに将来的には、この技術を応用して環境調査のみならず、医療用にも最適な新しいガンマカメラを構築する所存である。

図 6: 複数個所、ないしは複数台のコンプトンカメラを用いたステレオ撮影による、3次元ガンマ線イメージングの原理 [Takeuchi et al. 2013, NIM-A]



### 3. 共同研究者

中森 健之 (山形大学・准教授)      渡辺 伸 (JAXA 宇宙科学研究所・客員研究員)  
佐藤 悟朗 (JAXA/理化学研究所・研究員)

### 4. 研究業績

#### 4.1 学術論文 (主要なもの)

- J.Kataoka, M.Tahara, T.Totani et al., “Suzaku Observations of the Diffuse X-Ray Emission across the Fermi Bubbles' Edges” , The Astrophysical Journal, vol.779, 57, (2013)
- J.Kataoka, A.Kishimoto, T.Nishiyama et al., “Handy Compton camera using 3D position-sensitive scintillators”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol.732, 403, (2013)
- Y.Takeuchi, J.Kataoka, K.Maeda et al., “Multiband Diagnostics of Unidentified 1FGL Sources with Suzaku and Swift X-Ray Observations”, The Astrophysical Journal Supplement Series, vol.208, 25, (2013)
- Y.Takahashi, J.Kataoka, K.Niinuma et al., “X-Ray and Radio Follow-up Observations of High-redshift Blazar Candidates in the Fermi-LAT Unassociated Source Population”, The Astrophysical Journal, vol.773, 36, (2013)
- T.Kato,, J.Kataoka, T.Nakaomori et al., “High resolution phoswich gamma-ray imager utilizing monolithic MPPC arrays with submillimeter pixelized crystals”, Journal of Instrumentation, 8. P05022, (2013)
- T.Kato,, J.Kataoka, T.Nakaomori et al., “A novel gamma-ray detector with submillimeter resolutions using a monolithic MPPC array with pixelized Ce:LYSO and Ce:GGAG crystals”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol.699, 235, (2013)
- A.Kishimoto, J.Kataoka, T.Kato et al., “Development of a Dual-Sided Readout DOI-PET Module Using Large-Area Monolithic MPPC-Arrays”, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 60, NO. 1, 38, (2013)
- 片岡 淳, “大面積 MPPC-array を用いた放射線検出器の最前線”, 日本応用物理学会・放射線

分科会, 「放射線」 vol.39, No.3, (2013)

- 片岡 淳, 西山徹, 藤田卓也ほか “高感度かつ携帯可能なガンマ線カメラの開発”, 電気学会原子力研究会収録 (2013)  
ほか共著論文 13 編

#### 4.2 招待講演・口頭講演 (国際学会)・セミナー

- J.Kataoka, “X-ray observations of the bubble edges”, The Fermi Bubbles: Theory and Observations, 4/11-12, Stanford Linear Accelerator Center, USA (2013)
- J.Kataoka, “X-ray Observations of the Diffuse X-ray Emission across the Fermi Bubbles' Edges”, 66th Fujiwara seminar: X-raying the Gamma-ray universe – CTA X-ray Link Meeting --, 11/4-6, Hakone-Yumoto, (2013)
- 片岡 淳, “High Energy Emission from Galactic Center and Fermi Bubble”, ALMA Galactic Center Workshop 2013, 11/26-27, 慶應大学日吉キャンパス (2013)
- 片岡 淳, “X線で見たフェルミバブル”, ICRP 高エネルギー天体グループ臨時セミナー, 5/20, 東大宇宙線研究所 (2013)
- 片岡 淳, “高感度かつ携帯可能なガンマ線カメラの開発 (II)”, 第8回環境監視技術調査専門委員会 (電気学会), 3/26, 自然科学研究機構 (2014)
- 片岡 淳, “ガンマ線カメラの開発と最近の動向について”, 臨時セミナー, 12/18, 名古屋大学・医学部 (2013)
- 片岡 淳, “高感度かつ携帯可能なガンマ線カメラの開発”, 電気学会・原子力研究会, 9/2, 東京電機大学 (2013)

#### 4.3 特許の申請

- 特願 2013-212844 「コンプトンカメラ」片岡 淳、西山 徹 (早稲田大学)、大須賀 慎二、平柳 通人、足立 俊介、内山 徹也 (浜松ホトニクス) 日・米・欧 国際特許として申請
- 特願 2014-38739 「放射線検出用素子および放射線検出装置」中森 健之、武部 瑞希 (山形大学) 片岡 淳 (早稲田大学)、佐藤 浩樹、伊藤 繁記、吉野 将生 (古河機械金属)

#### 4.4 報道発表・プレスリリース

- 2013年9月10日

放射性物質の除染作業を効率化するガンマ線撮像用コンプトンカメラを製品化  
～高感度コンプトンカメラとして、従来よりも大幅な小型・軽量化と低価格化を実現～

JST ページ: <http://www.jst.go.jp/pr/announce/20130910/>

早稲田大学ニュース: [http://www.waseda.jp/jp/news13/130911\\_camera.html](http://www.waseda.jp/jp/news13/130911_camera.html)

【日本経済新聞(全国版・朝刊) 朝日新聞(全国版・朝刊) 日経産業新聞(全国版) 日刊工業新聞(全国版) 中日新聞 静岡新聞等に掲載】

#### 4.5 受賞

- 第18回 日本天文学会欧文研究報告論文賞 (共著論文)

“MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images”, M. Matsuoka et al., 2009, PASJ, vol.61., pp.999-1010

## 5. 研究活動の課題と展望

来る 2014 年度は Astro-H 衛星打ち上げに向けカウントダウンが始まる。フライトモデルの開発・試験に積極的に参加すると同時に、Science Working Group (Galactic Center group) のサブ・リーダーとして全体を良く統括し、Astro-H のサイエンスを最大限に引き出すべく努力したい。データ解析については、フェルミ衛星が 5 年間の観測で初めて発見した電波銀河の系統解析、また Swift 衛星のアーカイブデータを用いたフェルミ・バブル周辺のプラズマ構造の詳細な解析を行う。さらには東工大と協力して、ハワイの「すばる」望遠鏡を用いた毒蜘蛛パルサーの観測などを予定している。医療放射線検出器の開発においては、科研費・基盤研究(S) の最終年度にあたり、DOI 検出器 8 ユニットからなる PET-ガントリを構築し、これを MRI 中で動作させ、また時間情報まで取得可能な「DOI, MRI, TOF 統一型」次世代 PET 構築を目指したい。ガンマカメラに関しては、浜松ホトニクス社と協力して早期に DOI 構造を盛り込んだ「改良版」携帯ガンマカメラを制作し、福島第一周辺での実地調査を開始する。一方で、微細シンチレータ加工技術を確立し、これをカラーCT 検出器として応用する、新たな挑戦を始めていく。