

平成22年 5 月 7 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2009

課題番号：19204017

研究課題名（和文） 大学主導による高速駆動衛星の開発と突発天体の線偏光観測実証

研究課題名（英文） Development of high-speed attitude control system for the university satellite in measuring  $\gamma$ -ray polarization of transient sources

研究代表者

片岡 淳（KATAOKA JUN）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：90334507

研究成果の概要（和文）：小型衛星を用いた突発天体からのX線・ガンマ線偏光観測に向け、東工大で開発する50kg級小型衛星「つばめ」に搭載する観測装置（硬X線偏光検出器、バースト位置検出器）および高速姿勢制御装置の試作開発を行った。詳細なシミュレーションと実機（エンジニアリングモデル）による評価・試験から、目的とした観測性能をすべて達成できることを示した。大型衛星では困難な「小回りの良さ」と「最先端の観測機器」を駆使した小型衛星の新しいアプローチ、また小型衛星を用いた新しいサイエンスの方向性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：We developed an engineering system for a small satellite Tsubame, the 4<sup>th</sup> university satellite of 50 kg in mass, developed by the Tokyo Tech. The mission will be an important pathfinder for future space science using the small satellites. We constructed engineering test modules for the hard X-ray Compton polarimeter, wideband burst monitor as well as high-speed attitude control system based on the control momentum gyro. We showed that all the system works pretty well to achieve our science goals for detecting hard X-ray/gamma-ray polarization in various transient sources.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,500,000	3,450,000	14,950,000
2008年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2009年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
年度			
年度			
総計	35,200,000	10,560,000	45,760,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：X線 線天文学

## 1. 研究開始当初の背景

近年の宇宙開発は巨大化・高コスト化し、ひとつの衛星を完成するまでに数百億円におよぶ費用とマンパワー、10年にわたる長期

戦が定例となっている。構想時には最先端の技術も陳腐化し、先進技術をリードしてきたはずの宇宙工学が民間の後追いをする状況にまで陥っている。宇宙科学も同様で、研究

者のニーズに応えた新しいサイエンスの実現には、開発体制そのものの見直しが迫られる。近年、小型衛星開発の有意性が益々認識され、ピギーバックなどを利用した短期・低コストでの打ち上げ現実的となってきた。

大学主導の衛星開発は 99 年に米国で立案され、これを世界最速で実証したのが東工大チームである。2003 年には学生自らが設計・製作した世界最小衛星 CUTE-I (1 キログラム)の打ち上げに成功し、現在も順調に運用を続けている。2006 年 2 月には 2 号機 Cute-1.7+APD (3.5 キログラム)、2008 年 7 月には後継機をインドから打ち上げる。次のステップとして、最先端の宇宙物理に挑む、本格的な大学天文衛星の開発が切望される。本研究では 50kg 級衛星「つばめ」の開発を通じ、ガンマ線バーストや活動銀河核フレアなど、今まで観測が難しかった宇宙・突発現象の本質的理解を目指す。とくに、偏光 X 線・ガンマ線による観測は過去に殆ど成功例がなく、本衛星が宇宙開発のフロンティアを切り開くことは間違いない。

## 2. 研究の目的

本研究では、平成 19 年度 HII-A ロケット相乗り衛星候補として高い優先度を獲得した“東工大衛星(つばめ)”の理学検出器(偏光検出器・バースト検出器)および高速姿勢制御装置(Control Momentum Gyro: CMG)の試作開発を一貫して行う。大型衛星では難しい「小回りの良さ」と「最先端の観測機器」を実現し、次世代小型衛星の礎を築きたい。

偏光観測は「測光」「分光」「撮像」とは全く独立な観測手段であり、天体を取り囲むプラズマの磁場の向き、放射機構、さらにはブラックホール近傍の時空構造を探るうえで不可欠な手段である。ガンマ線バーストなど突発天体は、全天をくまなく長期間にわたって観測することが不可避であるが、本申請の「つばめ」は自ら突発天体を発見するだけでなく、その方向へ姿勢を向けて“偏光”を観測する、独創的かつ斬新な衛星である。空いている時間をパルサーやブラックホール天体、あるいは太陽フレアといった明るい天体の偏光観測に利用することも可能で、前人未踏のサイエンス(偏光 X 線天文学)で世界を大きくリードする鍵を担っている。

CMG は角運動量保存則に従い姿勢制御を行う Momentum Exchange Device(MED)の一種であり、リアクションホイールと対比して最大角運動量が大きく、最大出力トルクが大きいという特長がある。僅か 8 秒で姿勢を 90 度回転し、あらゆる突発天体にも素早く対応することが可能で将来さまざまな応用が期待されるが、未だ確立された技術といえない。

本研究ではじめて、実用レベルの試作機を開発し、詳細な試験を進める。

## 3. 研究の方法

小型衛星に搭載する検出器は動作環境が真空であること、軽量・小型・省電力でなければならないこと、また高エネルギー荷電粒子による放射線損傷を考慮して高い信頼性を保たなければならない。本研究では宇宙仕様であることを第一に考慮し(1)打ち上げ時の振動に耐える小型光センサー、および(2)低電力 LSI を用いた多チャンネル読み出しシステムを開発する。これらを融合し(3)バースト位置検出器・偏光検出器を試作し、実機により性能を評価する。さらに(4)ガンマ線バーストを想定した高速姿勢変更の要求(図 1)から、CMG に最適なパラメータを算出する(5)CMG 形状の小型・省システム化と、それに対応した制御則に関する実証実験(6) CMG の試作モデルを製作する。開発は研究代表者(片岡)、研究分担者(松永)、連携研究者(河合)の 3 名で協力して行う(図 2)。平成 20~21 年度には理工学合同で放射線耐性試験、温度試験、偏光ビーム試験など各種統合試験を実施し、エンジニアリングモデルの完成を目指す。

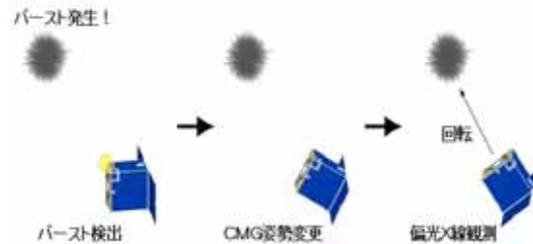


図 1:「つばめ」衛星の観測フロー。突発天体が発生すると、バースト位置検出器がその方向を決め、CMG により衛星全体が高速(10 秒程度以内)に姿勢を変更する。その後、高感度の硬 X 線偏光計を用いた観測を開始する。



図 2: 東工大衛星「つばめ」の開発体制

#### 4. 研究成果

##### (1)H19年度

理学系では電磁シミュレータ(Geant4)を用いた最適化と、偏光計の詳細な構成やサイズ・シンチレータの配置を決定した。続いて散乱体シンチレータを読み出すための高感度光検出器の開発をすすめ、従来型に比して5割程度の感度向上を確認した。さらにHII-Aロケット打ち上げを想定して本タイプの光検出器を初めて耐振化することに成功した(図3)。吸収体シンチレータを新規開発し、散乱体と合わせた信号処理系(フロントエンドカードやCPUボード)の開発を並行して行った。1ユニット・プロトタイプ偏光計を製作し、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の放射光施設(PF)に於いて偏光ビーム試験を行った。検出器の回転に対し約50%程度の計数率モジュレーションが得られたが、500Hz以上の高係数率に耐えられないこと、配線等の引き回しノイズに弱いことなどの問題点が明らかになり、次年度以降に改修を目指す。

工学系では、理学系のミッション要求を達成するための機能配分を行い、各サブシステムに必要な仕様、とくにCMGの検討を詳細に行った。まず、本衛星に最適なコンフィギュレーションとサイジングを重量、電力、制御性能の点で考察し、最適制御の観点に基づいた迅速姿勢変更制御則を提案した。さらに、CMGハードウェアを試作して、実機を用いた動作確認を行った。

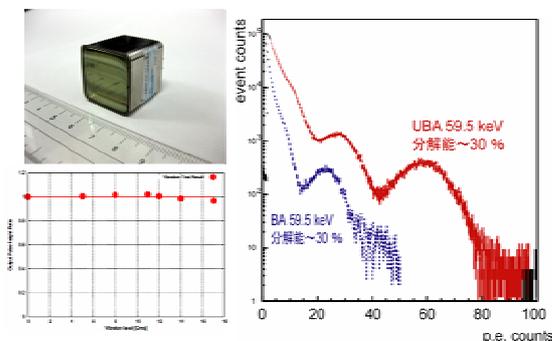


図3: (左上): 新規に開発した耐振型16chマルチアノードPMT(R8900-200-M16MOD-UBA)。マルチアノード型では初めて、50%程度の高い量子効率を達成した(左下)振動試験によるゲイン変化。17Gまで安定。(右)青: 従来型、赤: 本開発センサーによる60keVガンマ線スペクトルの比較。

##### (2)H20年度

理学系ではガンマ線偏光検出器の各種パラメータの検討・検出器のハードウェア製作を中心に開発を行った。昨年度に引き続き電磁シミュレータを用いた検出器ユニットの最適化(図4)と宇宙用高感度光検出器の開発を進め、都立産業試験場で詳細な耐振特性評価を行った。HII-Aロケットで予測される振

動条件の2倍以上(17G)でもゲインは10%以内で変化がなく、宇宙用検出器として極めて優れた特性が得られた(図3)。結果はNIM-A誌に査読論文として掲載されたほか(Toizumi et al. 2009)Glasgowにおける国際会議(8<sup>th</sup> International Conference on Position Sensitive Detectors)において口頭発表をおこなった。さらに、ガンマ線バーストの検出論理を前端的に見直し、シミュレーションから判定時間や閾値レベルの最適化設計を行った。これらの論理をハードウェアに反映し、VMEベースの「ガンマ線バースト判定回路」を実機で製作し、実機評価を行った。これと併せてAPD系・PMT系の信号処理系(フロントエンドカードやCPUボード)の開発を行った。

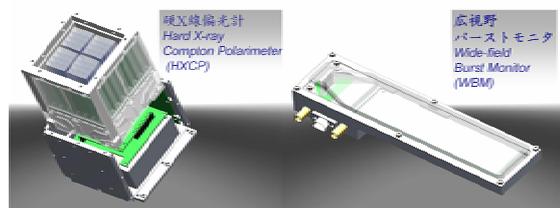


図4: CADと電磁シミュレータGeant-4を用いた、(左)硬X線偏光計(HXCP)、(右)広視野バーストモニター(WBM)の最適化

工学系ではCMGを搭載した小型衛星の高速姿勢制御システムの構築を目指して、最適経路計画法のひとつである勾配法を用い人工衛星の高速姿勢変更のためのCMG駆動則を提案した。同時に、新しい姿勢表現であるWZパラメータを用いたフィードバック制御則の有効性を検討した。また小型衛星実搭載を想定し多摩川精機で共同研究開発を行っている小型CMG(図5)について、駆動回路システムを実装して性能評価試験を行い、良好な結果を得た。

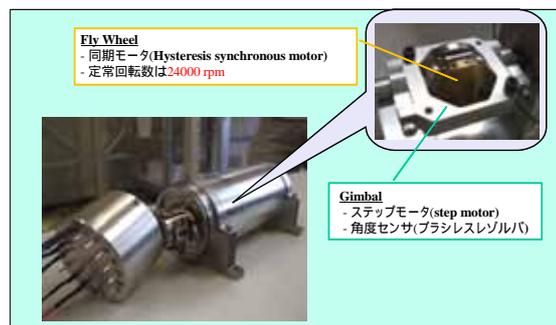


図5: 「つばめ」衛星搭載を目的として工学部で開発した小型CMG(エンジニアリング・モデル)。右の写真は、内蔵のFly wheelとGimbalの拡大

##### (3)H21年度

理学系は前年度までの基礎設計に基づき、偏光検出器の実機(エンジニアリングモデル: 図6)試作を行った。新たに人工衛星に適

した低消費電力・高性能の 32 素子同時読み出し VLSI を採用し、トリガー生成・波形整形・AD 変換までをオンボードで行う信号処理システムを構築した。また、処理回路や検出器群の複雑な 3 次元配置を実現するために専用筐体を開発し、電源を供給するだけで単体動作する検出器ユニットのプロトタイプを完成させた。H21 年 12 月には、高エネルギー加速器研究機構においてこの検出器ユニットの偏光ビーム試験を実施した。計 4 日間のビームタイムを用いて、光軸中心・オフアキシス・斜め方向照射などの様々な条件での偏光検出性能を調べた。特に、光軸中心に X 線ビーム (82.5 keV・偏光度 90%) を照射したときのモジュレーションファクターは  $72.3 \pm 1.8\%$  とシミュレーションによる予想 ( $67.2 \pm 0.5\%$ ) と良く一致しており、本検出器が想定した性能を発揮することを実証できた (図 7)。さらに、広視野バーストモニター検出器 (WBM) についてもエンジニアリングモデルの試作を行い (図 8) シミュレーションと実測から、その位置決定精度を評価した (図 9)。典型的なガンマ線バーストに対し、位置決定精度は 10 度程度であり、硬 X 線偏光計 (HXCP) の視野  $\pm 15$  度に、十分導けることを示した。

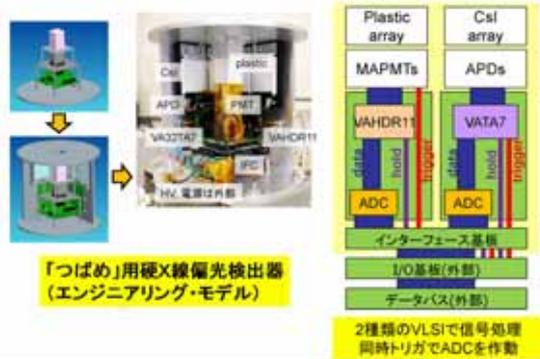


図 6: 本研究で開発した硬 X 線偏光計 (HXCP) のエンジニアリングモデルと、データ処理システム

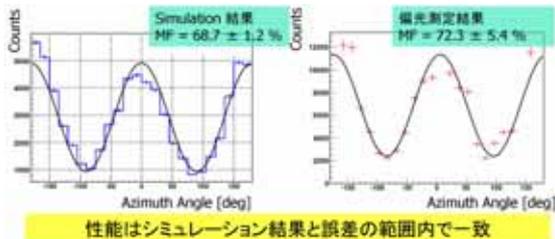


図 7: HXCP エンジニアリングモデルで取得した偏光データ (実験) とシミュレーションの比較

工学系について、今年度は CMG の実用的な迅速姿勢制御法の構築を目指し、CMG ジンバルの同期操作を考慮しつつ、オイラーの固有回転定理を基礎とした簡易誘導法と、モデル誤差と擾乱に対するロバスト性を確保する非線形フィードバック制御法を組み合わせた方法を提案し、詳細力学モデルを用いた数

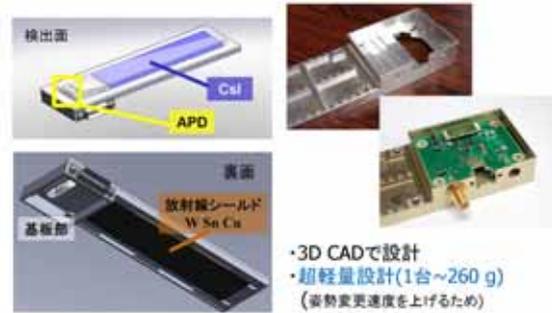


図 8: WBM エンジニアリングモデルの概観

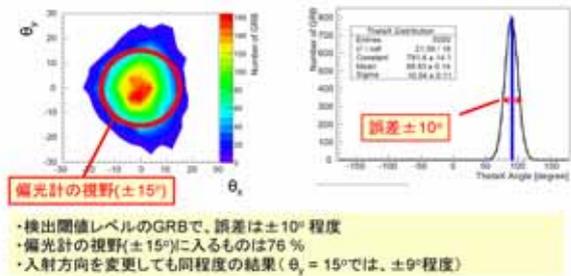


図 9: WBM による、突発天体の位置決定精度 (シミュレーション) WBM で決めた突発天体のほとんどすべてが HXCP の視野に入る

値シミュレーションにより、本方法がロバスト性を有しながら迅速大角度変更できることを示した。また、小型衛星実搭載を目指して研究開発している小型 CMG について、宇宙仕様にするための検討を詳細に行い、ロータ・ジンバル・エンコーダなどの機構部分や駆動計測制御回路の設計を見直し、耐真空性やロータ寿命延長の工夫を行なった。

本研究を総括して、3 年間の開発期間に予定通り硬 X 線偏光計、バースト位置検出器、高速姿勢制御装置 CMG のエンジニアリング・モデルを開発・製作し、実機とシミュレーションの双方による性能評価から、衛星搭載向け確信を得ることができた。今後は開発したシステム全体をスケールアップし、打ち上げ機会を積極的に獲得、フライトモデルの開発を行うことで迅速なサイエンスのフィードバックを目指す。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

[1] J.Kataoka, N.Kawai (9 番/20 人), S.Matsunaga (17 番/20 人) et al. "In-orbit Performance of Avalanche Photodiode as Radiation Detector onboard a Pico-satellite Cute-1.7+APD II", Journal of Geophysical Research、査読有、2010、出版中 (9 pages)

[2] T.Toizumi, J.Kataoka (4 番/10 人),

N.Kawai(8番/10人), et al. "Performance of a multi-anode photomultiplier employing an ultra bi-alkali photo-cathode and rugged dynodes", Nucl. Inst. Meth. -A, 査読有、vol.604, 2009, pp.168-173

[3] T.Toizumi, J.Kataoka(3番/11人), N.Kawai(8番/11人), S.Matsunaga(11番/11人) et al. "TSUBAME: toward the frontier of X-ray/Gamma-ray polarimetry in astronomy", Trans, JSASS, Space Tech, 査読有、vol.7, 2009, pp.31-35

[4] J.Kataoka, "High Energy Observations of AGN Jets and their Implications" Astrophysics and Technologies ASP Conf Series, 査読無、vol.402, 2009, pp.293-297

[5] T.Toizumi, J.Kataoka(2番/11人), N.Kawai(8番/11人) et al. "Development of the X-ray polarimetry small satellite 'TSUBAME'", AIP conf. Proc, 査読無、vol.1133, 2009, pp.85-87

[6] T.Toizumi, J.Kataoka(3番/11人), N.Kawai(8番/11人), S.Matsunaga(11番/11人) et al. "X-ray polarimetry small satellite TSUBAME, Proc. of RIKEN Sympo., 査読無、2009, pp.398-400

[7] K.Kurita, J.Kataoka(4番/26人), N.Kawai(5番/26人) et al. "Recent development status of PoGO Lite", Proc. of RIKEN Sympo, 査読無、2009, pp.386-388

[8] G.Madejski, J.Kataoka, M.Sikora, "MAXI and GLAST studies of jets in active galaxies", Proc. of RIKEN Sympo, 査読無、2009, pp.180-184

[9] K.Akiyama, S.Matsunaga et al, "High Speed Attitude Control System for Small Satellite with Micro-CMGs", 27th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), 査読無、2009, vol2009-d-23(CD rom), pp.6-10

[10] 秋山恭平、松永三郎ほか "東京工業大学 小型衛星開発プログラム 2009", Proc. University Space Engineering Consortium Workshop (UNISEC-WS 2009)、査読無、2009、vol.UNISEC09-07 (CD rom), pp.6-9

[11] 秋山恭平、松永三郎ほか "地球・天体観測技術実証衛星"TSUBAME"の衛星バスシステム設計と開発について", 第18回スペース・エンジニアリング・コンファレンス SEC 09 講演論文集、査読無、2009、No.09-96, B1, pp.29-33

[12] M.Arimoto, J.Kataoka(7番/21人), N.Kawai(8番/21人) et al., "X-ray polarimetry small satellite TSUBAME", Proc. of Gamma-ray burst 2007, AIP conf. ser, 査読無、2008, vol.1000, pp.607-610

[13] T.Kamae, J.Kataoka(17番/37人), N.Kawai(18番/37人) et al. "PoGOLite; A

high sensitivity balloon-borne soft gamma-ray polarimeter", The Astroparticle Physics, 査読有、2008, vol.30, pp.72-84

[14] M.Kiss, J.Kataoka(13番/30人), N.Kawai(14番/30人) et al. "The PoGOLite balloon-borne soft gamma-ray polarimeter", The Varying Faces of Accreting Compact Objects. AIP conf.ser, 査読無、2008, vol.1054, pp.225-232

[15] M.Fujihashi, S.Matsunaga ほか "Polarized gamma-ray burst observation satellite "TSUBAME" and its attitude control system using micro CMGs", Proc. of 2008 ISAS 18<sup>th</sup> workshop on Astrodynamics and Flight mechanics, 査読無、2008, vol. A18, pp.91-96

[16] K.Omagari, S.Matsunaga ほか "CMG Configuration and Control for Rapid Attitude Maneuver of Small Spacecraft", 9<sup>th</sup> International Symposium on Artificial Intelligence, Robotic and Automation in Space, 査読有、2月号、2008、in CD rom

[17] J.Nishida, S.Matsunaga ほか "Tokyo Tech s Technology Demonstration Satellite Tsubame", Proceedings of Small Satellite Conference Student Competition、査読有、21<sup>st</sup> annual meeting, 2007, in CD rom

[18] J.Kataoka et al., "Probing the Disk-jet Connection of the Radio Galaxy 3C120 observed with Suzaku", Pub.of Astron. Soc. Japan, 査読有、vol. 59、2007, pp. 279-297

【学会発表】(計17件)

[1] 榎本雄太、河合誠之、片岡淳 ほか "硬 X線偏光観測用超小型衛星 TSUBAME に搭載する偏光計の開発"、日本天文学会、2010年3月25日、広島大学

[2] 谷津陽一、河合誠之、片岡淳 ほか "超小型偏光観測衛星 Tsubame に搭載する広視野バーストモニターの開発"、日本天文学会、2010年3月25日、広島大学

[3] 戸泉貴裕、河合誠之、片岡淳 ほか "超小型衛星 TSUBAME 搭載用の硬 X線偏光計の性能評価"、日本物理学会、2010年3月21日、岡山大学

[4] 戸泉貴裕、片岡淳、河合誠之 ほか "超小型衛星 TSUBAME の開発現状"、高エネルギー宇宙物理学の最新成果と将来計画、2010年3月10日、宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA)

[5] 片岡淳 "活動銀河ジェット観測の新展開"、日本物理学会、2009年9月12日、甲南大学 (招待講演)

[6] 片岡淳 "Suzaku/Fermi Challenges to Relativistic Jets in Active Galaxy", The Energetic Cosmos: from Suzaku to Astro-H、

2009年7月2日、ホテルグランドパーク小樽  
(招待講演)

[7]戸泉貴裕、河合誠之、片岡淳 ほか “硬X線偏光観測衛星TSUBAMEの偏光計の開発”、日本天文学会、2009年9月15日、山口大学

[8]戸泉貴裕、片岡淳、河合誠之 ほか “X-ray Polarimetry Small Satellite Tsubame”, International Workshop "The Energetic Cosmos: from Suzaku to ASTRO-H",

2009年7月2日、ホテルグランドパーク小樽

[9]戸泉貴裕、河合誠之、片岡淳 ほか “硬X線偏光観測衛星"TSUBAME"の偏光計の開発”、 「ガンマ線バーストで読み解く太古の宇宙」シンポジウム、2009年9月24日、下呂温泉

[10]K.Fujihashi, S.Matsunaga ほか “Science and Technology Demonstration Satellite TSUBAME and its Attitude Control System Using Micro CMGs”, 26th International Symposium on Space Technology and Science, 2008年6月1日、浜松 Act City

[11]藤橋幸太、松永三郎ほか “CMG 搭載偏光線バースト観測衛星'燕'の開発現状と今後の方針”、日本機械学会、2008年8月4日、横浜国立大学

[12]藤橋幸太、松永三郎ほか “超小型衛星用CMGの試作・基本性能試験および高速姿勢変更制御について”、第52回宇宙科学技術連合講演会、2008年11月5日、淡路島

[13]片岡淳、河合誠之、松永三郎ほか “超小型衛星 Cute1.7+APD II の軌道動作実証報告”、日本物理学会、2008年9月22日、山形大学

[14] T.Toizumi, J.Kataoka, N.Kawai, et al. “Performance of a multi-anode photomultiplier employing a ultra bi-alkali photo cathode and ragged dynodes”, 8<sup>th</sup> International Conference on Position Sensitive Detectors, 2008年9月3日、Glasgow, UK

[15] 戸泉貴裕、片岡淳、河合誠之、松永三郎ほか “小型衛星 Cute1.7 における軌道上APD動作実証”、日本天文学会、2008年9月12日、岡山理科大学

[16] 戸泉貴裕、片岡淳、河合誠之、松永三郎ほか “ガンマ線バースト硬X線偏光観測衛星「つばめ」の開発現状”、日本天文学会、2008年3月26日、国立オリンピック記念青少年総合センター

[17]西田淳一、松永三郎ほか “東工大松永研究室における小型衛星開発の取り組みと今後の方針”、第51回宇宙科学技術連合講演会、2007年10月30日、札幌コンベンションセンター

〔その他〕

ホームページ等

東京工業大学・小型衛星プロジェクト(松永研究室)

[#SatelliteProject](http://lss.mes.titech.ac.jp/index_j.htm)

東京工業大学・「つばめ(TSUBAME)」(河合研究室)

<http://www.hp.phys.titech.ac.jp/info/index.html>

東京工業大学・「Cute1.7+APDII」

<http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/index.php>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

片岡 淳 (KATAOKA JUN)

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：90334507

### (2)研究分担者

松永 三郎 (MATSUNAGA SABURO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00222307

### (3)連携研究者

河合 誠之 (KAWAI NOBUYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80195031