

平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価用〕

◆記入に当たっては、「平成26年度科学研究費助成事業（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成26年4月25日現在

研究代表者 氏名	常深 博	所属研究機関・ 部局・職 (研究期間終了時)	大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究課題名	宇宙高温プラズマの観測的研究と偏光分光型超高精度X線CCD素子の開発研究		
課題番号	16002004		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 常深 博（大阪大学・大学院理学研究科・教授） 研究分担者 林田 清（大阪大学・大学院理学研究科・准教授） 研究分担者 宮田 恵美（大阪大学・大学院理学研究科・助教）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成16年度	69,600 千円
平成17年度	102,500 千円
平成18年度	58,500 千円
平成19年度	40,000 千円
平成20年度	40,000 千円
総計	310,600 千円

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)~(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

平成 16 年度から始まった特別推進計画は、順調に進み、さらに予定外ではあったものの、スーパーミラーと組み合わせた CCD 素子で、気球観測するまでになった。観測そのものは風任せのために気球制御の問題点から大西洋への落下となり、全損となり、詳細な観測データを得られなかった。当初は、気球回収の後、修理して再飛翔に備えていたが、平成 20 年度までに準備できなくなった。そこで、開発技術を発展させ、小型科学衛星を目指す方が効率的であると判断した。

名古屋大学で気球観測を目指して開発されてきたスーパーミラーは、10keV 以上の領域で集光できるもので、その後も順調に研究開発を進め、ASTRO-H 搭載の HXT へと発展している。我々は ASTRO-H とは目的が違うために、大きな有効面積の検出器が必要である。そのためには、透過型 CCD とシンチレータを組み合わせた SDCCD が最適である。気球実験では、CCD の上部にシンチレータを搭載したもので充分であったが、衛星搭載の場合には 10keV 以下でも十分カバーできるので、CCD の下部にシンチレータを取り付けたものが必要である。この素子を開発し、期待通りの性能を確認した(Tsunemi et al., 2011)。

平成 19 年度から小型科学衛星を念頭に置いて、NEC 殿の協力を得て、小型科学衛星による高エネルギー領域における宇宙進化の観測的研究を目指す FFAST 計画の基礎研究を開始した。宇宙研の目指す小型科学衛星計画では、小型科学衛星標準の衛星バスの使用を求められており、その担当メーカは NEC である。そこで、我々は NEC に衛星全体のデザインの検討を量的にお願いした。FFAST では小型衛星を二機編隊飛行させて、それぞれにスーパーミラーと SDCCD を搭載することを目指す。編隊飛行技術については、JAXA の工学部門と協力して進めることになった。

その後、我々は実際に小型科学衛星搭載を念頭に置いた CCD カメラシステムを作り上げることを目指し、平成 21 年度から二年間で超小型衛星のための搭載機器プロジェクトをスタートさせた。その期間内に、衛星の環境試験を満足するカメラシステムを開発し、衛星搭載に臨めるサブシステムを完成させた。超小型衛星は、実際に搭載するための適当な衛星本体が探せず、軌道投入には至っていない。このデザインにおいては、衛星メーカとして三菱重工のご協力をいただいた。

我々の開発した CCD 素子は、一部修正を加えて ASTRO-H 搭載の CCD カメラ SXI に搭載されることになった。この開発において、SXI と FFAST のシステムは類似点が多いために、共通で開発を進めることになった。ASTRO-H の求められる環境スペックは FFAST よりも厳しいために、ASTRO-H の開発結果をほぼそのまま FFAST に適用できる。FFAST では ASTRO-H では使用しないシンチレータを取り付けているので、温度環境などが異なる程度である。こうして、平成 23 年度から名古屋大学と共同で特別推進研究「高感度 X 線 CCD とスーパーミラーによる観測と宇宙進化の研究」をスタートさせていただいた。これは、ASTRO-H の開発を利用して FFAST の実現を目指すプロジェクトである。JAXA での小型科学衛星プロジェクトにはいろいろと変遷があったが、研究期間内に予定していた小型科学衛星 3 号機の公募があり、これに応募している状況である。

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

論文発表

H. Nakajima, D. Matsuura, N. Anabuki, E. Miyata, H. Tsunemi, J.P. Doty, et al.
 “Performance of an Analog ASIC Developed for X-ray CCD Camera Readout System Onboard Astronomical Satellite”
 IEEE Trans. Nucl. Sci, 56, (2009), 747-751

H. Nakajima, D. Matsuura, N. Anabuki, E. Miyata, H. Tsunemi, J.P. Doty, et al.
 “Development of X-ray CCD camera system with high readout rate using ASIC”
 Nucl. Instrum. and Meth., A610, (2009), 78-82

H. Nakajima, D. Matsuura, T. Idehara, N. Anabuki, H. Tsunemi, John P. Doty, et al.
 “Development of the analog ASIC for multi-channel readout X-ray CCD camera”
 Nucl. Instrum. and Meth., A632, (2011), 128-132

H. Tsunemi, S. Ueda, K. Shigeyama, K. Mori, S. Aoyama, S. Takagi
 “Performance of a newly developed SDCCD for X-ray use”
 Nucl. Instrum. and Meth., A652, (2011), 508-511

国際会議等における発表

H. Tsunemi
 “ High-energy sky observation by two small satellites using formation flight (FFAST) ”
 The Energetic Cosmos:from Suzaku to Astro-H, 2009/6/29-7/2, Otaru, Hokkaido, Japan

“ High Energy X-Ray Sky Observation by the Formation Flight All Sky Telescope ”
 The 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009/7/6-9, Tsukuba, Japan

“ Performance of a newly developed SDCCD for X-ray use ”
 2010 Symposium on Radiation Measurements and Applications (SORMA), 2010/5/24-29, Michigan USA

“ Soft x-ray imager (SXI) onboard ASTRO-H ”
 SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation 2010, 2010/6/27-7/2, California USA

“ Formation Flight Astronomical Survey Telescope ”
 Suzaku 2011 Exploring the X-ray Universe: Suzaku and Beyond, 2011/7/19-24, SLAC USA

“ Formation Flight All Sky Telescope ”
 “Observation by the Solid State Camera (SSC) on-board MAXI/ISS ”
 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting, 2011/7/25-30, Chiang Mai Thailand

“ X-ray Astronomy in Japan, at Osaka ”
 SEMINAR in Institute for nuclear science and technology Hanoi, 2011/9/25-27, Hanoi Vietnam

“ X-ray detectors developed in Japan, focusing on the CCD ”
 Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Science, 2011/10/14, Beijing China

“ High energy astrophysical missions in Japan ”
 Galileo-XU Meeting, 2011/10/15, Beijing China

“ Formation Flight Astronomical Survey Telescope (FFAST) ”
 First eROSITA International Conference, 2011/10/18-22, Garmisch-Partenkirche Germany

1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

【科学研究費助成事業】

◎【研究種目】基盤研究 A

【研究課題名】CsIシンチレータとCCDとを組み合わせた硬X線CCDカメラの基礎研究

【研究期間】平成23年度（下記、特別推進研究が採択されたため、途中で終了）

【配分額】14,000千円

◎【研究種目】特別推進研究

【研究課題名】高感度X線CCDとスーパーミラーによる観測と宇宙進化の研究

【研究期間】平成23年度～平成27年度

【配分額】424,800千円

【その他の研究費】

◎文部科学省 平成21年度超小型衛星研究開発事業

【研究課題名】放射線耐性の高い裏面照射型CCDとTDI動作を組み合わせた超小型高感度地表観測センサーシステムの開発研究

【研究期間】平成21年12月24日～平成23年3月31日

【配分額】189,060千円

(4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

浜松ホトニクスとともにX線に高い感度を持つCCDの開発を進め、国際宇宙ステーションにX線CCDカメラを搭載することができた。CCDに低エネルギー陽子を照射すると性能が急激に劣化する現象が見つかり、その対策として電荷注入法を実用化し、これを利用している。広い視野の観測を通じて、白鳥座領域にハイパーノバの痕跡を発見している。

10keVを越える領域での集光や撮像検出技術の有効性はいろいろなところで認められている。また、我々の開発したX線CCD素子やその技術情報は、はやぶさやかぐやに搭載されたX線スペクトロメーターに使われている。また、素子そのものに修正を加えてASTRO-H搭載のCCDカメラSXIに利用されている。開発技術は衛星搭載品として十分に応用できることを示した。

高エネルギー側の観測に関して、集光鏡とそれに対応する撮像検出器の組み合わせの重要性は広く認められている。アメリカでも類似の気球実験から高エネルギーX線を集光撮像する小型衛星NuSTARが打ち上げられた。ASTRO-Hにおいても、高エネルギー領域において点源の詳細観測を目指す。また我々の目指すFFASTは高エネルギー領域における広い天空の走査観測を目指している。

X線CCDで高性能のスペクトル観測をするには、低雑音動作が必要である。我々は、低雑音で小型、低消費電力を目指して、デルタシグマADCを使ったアナログASICの開発を始めた。その結果、専用のASICを作ることができ、その後さらに低雑音化を実現している。この素子とその系列は、ASTRO-H搭載のCCDカメラに採用するほか、FFASTやアメリカの科学衛星で搭載を検討している。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

(1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

高エネルギーX線を集光して撮像する技術により新たな宇宙観測を目指す必要性はいろいろな点で認識されてきている。従来までの10keV以下の領域での集光では、従来のX線CCDの構造が適合していた。10keVを超える場合には、多層膜反射鏡と高精度撮像検出器が必要である。我々は、この組み合わせとして、スーパーミラーとSDCCDを使って最初の観測を目指した。気球観測は、残念ながら、全損になり、有効な観測もできなかった。その後、気球を使った試みは、計画されていないが、その代わりにASTRO-HやFFASTなど衛星計画に進展している。

気球実験での各種電子回路は個別部品で組み上げる従来型であった。しかし、将来的には、読出しチャンネルの増加などから、小型、軽量、低消費電力を目指すカスタムICが必要になる。そこで、デルタシグマADCを利用したアナログASICの作り、実用化の目途を立てた。これをさらに発展させたものが、ASTRO-H搭載のCCDカメラに使用されるし、FFASTでも使用することになっている。また、アメリカの小型衛星への応用も打診が来ている。我々の技術は、周辺のアナログASIC製造とも密接に関連しており、情報交換から相互に開発を速めている。

X線CCDを使用した宇宙観測は現在の標準的なものになっている。宇宙空間での使用状況は、地上のそれとは大きく異なるので、高性能を達成することや性能維持には各種の技術やノウハウが必要である。例えば、低エネルギー陽子によるCCD損傷を防ぐために、電荷注入などは今では一般的な方法になってきた。国際宇宙ステーション搭載のCCDやすざく衛星、ASTRO-H搭載のCCDなどに応用されている。また、電荷分割、電荷取りこぼしなどのCCDの特性を考慮した観測データの解析などに使われている。

2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“Detection of Highly-Ionized Carbon and Nitrogen Emission Lines from the Cygnus Loop Supernova Remnant with the Suzaku Observatory ” E. Miyata, S. Katsuda, H. Tsunemi, et al. Pub. Astr. Soc. Japan, 59, S163-S170, 2007	すざく衛星に搭載した CCD カメラで超新星残骸白鳥座ループを観測して、高階電離した炭素や窒素の輝線を初めて検出した。	35
2	“Suzaku Observations of Tycho’s Supernova Remnant ” Tamagawa T., Hayato A., et al. Pub. Astr. Soc. Japan, 61, S167-S174, 2009	すざく衛星に搭載した CCD カメラでティコの超新星残骸を観測して、Mn や Cr などの元素からの輝線を検出し、爆発の仕組みを調べた。	34
3	“Spatially resolved spectral analysis of Vela Shrapnel D ” S. Katsuda, H. Tsunemi, et al. Pub. Astr. Soc. Japan, 57, 621-628, 2005	ニュートン衛星に搭載した CCD カメラでベラ超新星爆発の破片 D を観測し、噴出物と星間物質との衝突の様子を調べた。	18
4	“Spatially Resolved X-Ray Spectroscopy of Vela Shrapnel A ” S. Katsuda, H. Tsunemi, et al. Astrophysical Journal, 642, 917-922, 2006	ニュートン衛星に搭載した CCD カメラでベラ超新星爆発の破片 A を観測し、その組成を求め、元の星の構造を推定した。	17
5	“Energy-Scale Calibration of the Suzaku X-Ray Imaging Spectrometer Using the Checker Flag Charge-Injection Technique in Orbit ” M. Ozawa, H. Uchiyama, et al. Pub. Astr. Soc. Japan, 61, S1-S7, 2009	すざく衛星搭載の CCD カメラの素子の軌道上での正確な校正を実施し、正確な装置のパラメータを決めた。	17
6	“High resolution X-ray photon-counting detector with scintillator-deposited charge-coupled device ” Miyata E., Tawa N., et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 53, 576-583, 2006	SDCCD の構成を説明し、そのスペクトル検出性能を実験的に示した。	15
7	“Chandra Observations of the Northeastern Rim of the Cygnus Loop ” Katsuda Satoru, Tsunemi Hiroshi, et al. Astrophysical Journal, 680, 1198-1205, 2008	チャンドラ衛星に搭載した CCD カメラで超新星残骸白鳥座ループの北東端を観測し、高温プラズマの衝突非平衡状態を決めた	13
8	“Performance of back supportless CCDs for the NeXT mission ” Shin-ichiro Takagi, Takeshi Go Tsuru, et al. Nucl. Instrum. and Meth., A541, 385-391, 2005	NeXT 衛星(のちの ASTRO-H 衛星に発展)のための CCD 素子の原型の動作を報告し、衛星搭載品のもとになった。	11
9			
10			

【研究期間終了後に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“The MAXI Mission on the ISS: Science and Instruments for Monitoring All-Sky X-Ray Images ” Matsuoka Masaru, Kawasaki Kazuyoshi, et al. Pub. Astr. Soc. Japan, 61, 999-1010, 2009	国際宇宙ステーションに搭載した全天観測装置 MAXI の報告。ここにはガス検出器 (GSC) と X 線 CCD (SSC) を搭載した。	138
2	“X-ray Measured Dynamics of Tycho’s Supernova Remnant ” Katsuda Satoru, Petre Robert, et al. Astrophysical Journal, 709, 1387-1395, 2010	すざく衛星に搭載した CCD カメラでティコの超新星残骸を観測して、その鉄輝線の広がり測定し、ドップラー運動を検出した。	41
3	“The Wide Field Imager of the International X-ray Observatory ” A. Stefanescu, M.W. Bautz, et al. Nucl. Instrum. and Meth., A624, 533-539, 2010	将来の X 線観測衛星 IXO を目指した撮像型 X 線検出器の開発を報告した。	21
4	“Steady X-ray Synchrotron Emission in the Northeastern Limb of SN 1006 ” Katsuda Satoru, Petre Robert, et al. Astrophysical Journal, 723, 383-392, 2010	チャンドラ衛星に搭載した CCD カメラにより、超新星残骸 SN1006 の北東端を観測し、そこでの X 線発生メカニズムを調べた。	18
5	“In Orbit Performance of the MAXI/SSC onboard the ISS ” Hiroshi Tsunemi, Hiroshi Tomida, et al. Pub. Astr. Soc. Japan, 62, 1371-1379, 2010	国際宇宙ステーションに搭載した CCD カメラ (SSC) の軌道上での性能を調べ報告した。	16
6	“Development of X-ray CCD camera system with high readout rate using ASIC ” Nakajima Hiroshi, Matsuura Daisuke, et al. Nucl. Instrum. and Meth., A610, 78-82, 2009	X 線 CCD のための低雑音、小型、低消費電力のアナログ ASIC を開発し、その性能を報告した。	10
7	“Performance of an Analog ASIC Developed for X-ray CCD Camera Readout System Onboard Astronomical Satellite ” Nakajima Hiroshi, Matsuura Daisuke, et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 56, 747-751, 2009	衛星搭載を目指して開発したアナログ ASIC を低雑音動作させる方法をその性能を報告した。	7
8			
9			
10			

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

(1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

X線検出を目指した CCD 素子では、完全空乏化した素子を定常的に供給することが可能になった。完全空乏化した素子で、空乏層の薄いもの、例えば $20\mu\text{m}$ 以下であれば、試験的に作ることは可能であったが、実際には薄くなりすぎ、たわみなどが発生してしまう。これに対して、 $70\mu\text{m}$ 程度になれば、十分に扱えるようになる。この厚さの素子は国際宇宙ステーションに搭載した X 線 CCD カメラや、はやぶさやかぐやに搭載した X 線 CCD カメラに採用されている。さらに、空乏層を厚くして $200\mu\text{m}$ を達成した素子は、X 線に対する検出感度も高く、かつハンドリングが容易なので、完全空乏化した素子にも応用できる。現在は ASTRO-H 搭載の CCD に進化している。

X 線 CCD で観測したデータ解析手法については、CCD の特性を正確に知ることが求められる。低エネルギー陽子による放射線損傷の進み具合、電荷注入法による劣化の防止、電荷転送における取りこぼしなどに対する対策が確立してきている。素子の製造に関しては、劣化を低減するためにはノッチと呼ばれる手法の有効性が指摘されてきたが、それを実験的に証明することができた。そのために、X 線 CCD 素子においてノッチは不可欠の要素となっている。

これらを踏まえて、X 線 CCD による観測データの解析を進めた。その結果、チャンドラによる土星の衛星タイタンの大気の大さの測定、白鳥座ループにおける電荷交換反応の可能性の指摘などがなされている。

3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

(2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助教やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

阪大の助教として参加した1名は、2009年に家電メーカーに転出した。

2004年から特任助教として参加した1名は、2007年に電機メーカーに転出した。

2004年からPDとして参加した1名は、2008年にX線メーカーに転出した。

2005年からPDとして参加した1名は、現在も阪大のPDとしてASTRO-H計画に参画している。

2007年からPDとして参加した1名は、現在は阪大の助教としてASTRO-H計画に参画している。

2005年からPDとして参加した1名は、2007年にベンチャー企業に転出した。