

平成24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24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24年 4月29日現在

研究代表者 氏名	國枝 秀世	所属研究機関・ 部局・職	名古屋大学・大学院理学研究科・教授
研究課題名	硬X線撮像観測による非熱的宇宙の研究		
課題番号	15001002		
研究組織 (研究期間終了時)	研究代表者 國枝 秀世（名古屋大学・大学院理学研究科・教授） 研究分担者 山下 広順（名古屋大学・大学院理学研究科・名誉教授） 田原 謙（名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授） 小賀坂 康志（名古屋大学・大学院理学研究科・助手） 難波 義治（中部大学・工学部・教授） 前田 良知（宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助手）		

【補助金交付額】

年度	直接経費
平成15年度	103,400 千円
平成16年度	189,000 千円
平成17年度	71,400 千円
平成18年度	41,000 千円
総計	404,800 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。)

- ① **すざく衛星搭載 X 線望遠鏡による観測**：特別推進研究期間中 2005 年 7 月に打ち上げたすざく衛星には、本研究で開発し、特性測定を行った、X 線望遠鏡 5 台が搭載された。この地上特性測定データを元に、軌道上の観測結果を正しく解析する道筋を、我々が中心に確立することができた。研究代表者はすざく衛星の国際観測運営委員長として、観測運営をリードし、その初期成果を、チームの代表として国際学会発表を担当した。その他、多数の観測論文を国際協力で出版している。観測対象として、超新星残骸、我が銀河円盤、銀河団の撮像スペクトル観測は、この望遠鏡の特性を活かしたものと言える。特に、前置コリメータの設置で迷光を抑えたことで、我が銀河中心方向の観測で観測感度を大きく向上させた。
- ② **気球実験**：特別推進研究期間中に 3 回のフライトを実施した、日米共同気球実験 InFOCuS 計画は、その後、アメリカ側の予算獲得が難しく、フライトは延期されて来た。しかし、2012 年度から X-Galibar という名前で、あらたな提案（國枝は共同提案者）が米国で採用された。ここでは、偏光検出器を搭載することにしており、硬 X 線偏光観測と言う、新しい物理量獲得の可能性が出て来た。具体的には、2013 年にまず米国テキサス州で試験飛行を実施することになっている。この観測実施（組込み、打上運用）のため、科研費基盤研究 B「硬 X 線偏光気球観測による非熱的放射機構と構造の解明（研究代表者：國枝秀世）」を申請し、採択され、24 年度からこの飛翔実験の準備を開始した。
- ③ **ASTRO-H 衛星 (2014 年打上予定) 搭載硬 X 線望遠鏡の開発**：本特別推進研究の最大の成果は、硬 X 線望遠鏡による撮像観測の技術的可能性と天文学的可能性を実際に示したことである。これを受け、日本の X 線天文学コミュニティでは、次期 X 線天文衛星の主観測システムの一つとして、この硬 X 線望遠鏡を搭載する事に決めた。2007 年に宇宙研に提案 (NeXT) し、2008 年度から ASTRO-H ミッションとしてスタートした。気球からの変更は、焦点距離が 8m から 12m に伸びたことであり、入射角が小さく、より高エネルギー X 線を対象とできる様になった。本研究課題で確立した、多層膜スーパーミラーの設計法と、ガラスマンドレルを用いたレプリカ法が、ASTRO-H の硬 X 線反射鏡開発の基本方針となった。2011 年 1 月から名古屋大学の実験室で、ASTRO-H 搭載用の反射鏡 (1300 枚/望遠鏡) の製作を開始し、2012 年 4 月、2 台中の 1 台が完成する所まで来た。完成した望遠鏡は、これも本研究課題で確立した、放射光施設 SPring-8 における硬 X 線集光特性測定を行っている。以上の様に、本特別推進研究申請時のヒアリングにおける「この計画の次は、実際の衛星計画に進むのですね」と言う審査員からの指摘に、正しく応えるものとなった。
- ④ **XEUS/IXO/ATHENA 計画提案と開発研究**：2000-2007 にかけて日欧で XEUS, 2008-2010 にかけて日米欧で IXO, 2011-2012 にかけて日米欧で ATHENA と言う、大型国際 X 線天文台計画を検討し、提案して来た。國枝は日本側代表者として検討に加わって来た。中でも、大口径の望遠鏡の内、入射角の小さな内側の反射鏡に、本研究課題で確立した多層膜スーパーミラーを成膜し、高エネルギー X 線に対する感度を増強する案を提案した。現在は 2020 年代の打上を目指し、検討を続けている。
- ⑤ **FFAST 衛星搭載硬 X 線望遠鏡の開発**：宇宙科学研究所では、新たに 200kg 前後の小型衛星シリーズを始めることになった。その 3 号機に、硬 X 線望遠鏡を搭載した望遠鏡衛星と、検出器衛星の編隊飛行をする FFAST 計画を提案した。その開発は、昨年度採択された、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」(代表者：常深博：23-27 年度)で進める事になった。23 年度には、衛星本体の概念設計と基本設計を開始した。硬 X 線反射鏡は、ASTRO-H の設計思想を用い、FFAST の焦点距離 20m に対する最適設計を行っている。また ASTRO-H で確立された、製造ラインを活用することになっている。時間的には、2012 年中に ASTRO-H 搭載用反射鏡を完成させ、2013 年末までに FFAST 用の反射鏡製作を完了させる。これにより、最も早い打上機会、2015 年に間に合わせる事が可能だと考えている。
- ⑥ **硬 X 線用多層膜スーパーミラーの高性能化の研究**：
現在の多層膜スーパーミラーは ASTRO-H に特化されたデザインであり、改良の余地がある。特に、多層膜の層厚を 1 層毎に調整する事で、反射率のエネルギー依存性を滑らかにすることを目指している。これにより、観測システムの特性に妨げられることなく、天体の持つスペクトル構造を明らかにする。その設計法と製作法の研究開発を進めることで、かなりの高性能の反射鏡が作られ、現在、論文を投稿準備中である。これにより、望遠鏡以外、様々な X 線結像光学素子への応用の可能性を広げることとなる。

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。）

①すざく衛星搭載 X 線望遠鏡関連の報告

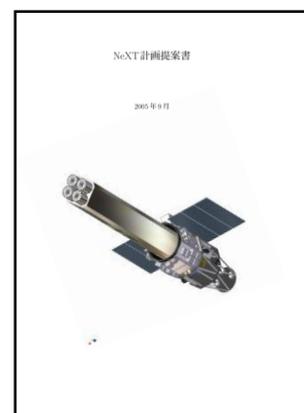
- 【研究期間中に発表した論文】5 番目の論文で得られた、すざく衛星搭載 X 線望遠鏡の性能を用い、2005 年 7 月の打上後、観測データ解析に必要なデータを一般観測者に提示した。【研究期間終了後に発表した論文】2 番目の論文
- 米国天文学会 (2006 年 1 月, Wasihngton) に、すざく衛星チームを代表して衛星概要を報告した。
“Mission overview of Suzaku & topics of observations”
- SPIE 望遠鏡部門シンポジウム (2006 年 5 月) に、すざく衛星チームを代表して衛星初期成果を報告した。
“Current status of Suzaku and its early results” 同シンポジウムでは座長も務めた

②気球望遠鏡開発／観測の報告

- JaJAP.47.5743-5754(2008) 【研究期間終了後に発表した論文】3 番目の論文
“Characterization of a Hard X-ray Telescope at Synchrotron Facility SPring-8”
- SPIE 望遠鏡部門シンポジウム (2007 年 8 月) に、InFOCuS 気球チームを代表して硬 X 線望遠鏡の開発成果を報告した。
“Thin-foil multilayer-supermirror hard x-ray telescopes for InFOCuS/SUMIT balloon experiments and NeXT satellite program”

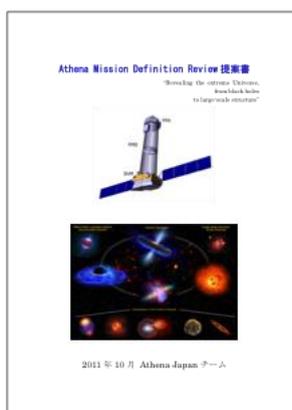
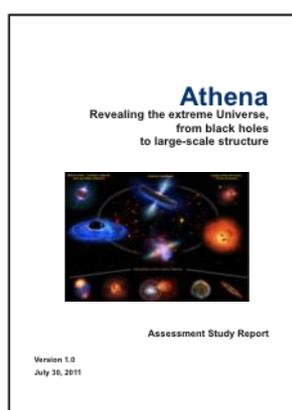
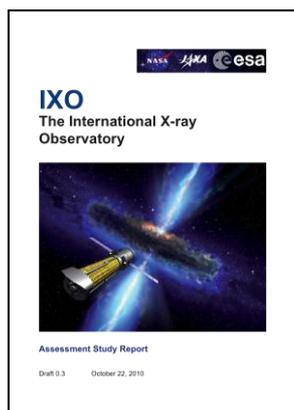
③NeXT (ASTRO-H) 搭載望遠鏡開発の報告

- SPIE 望遠鏡部門シンポジウム (2004 年 8 月) に NeXT 計画を代表者として報告。
“New X-ray Telescope Mission NeXT”
- NeXT 衛星計画提案 (2005 年、2007 年) 提案書 (右図参照)
- 米国高エネルギー天文学部門シンポジウム (2006 年 10 月, San Francisco) に
- SPIE 望遠鏡部門シンポジウム (2009 年 5 月) に、ASTRO-H HXT チームを代表してその開発状況を報告した。
“Hard X-ray telescope to be onboard ASTRO-H”
- 国際シンポジウム “Frontiers of Optical Coatings” (2009 年 10 月、西安) 招待講演
“Multilayers for X-ray astronomy”



④XEUS, IXO 計画への硬 X 線撮像系の提案

- ESA への IXO 提案書提出 (2010 年 10 月)
- ESA への ATHENA 提案書提出 (2011 年 9 月)
- 宇宙科学研究所への ATHENA 提案書の提出 (2011 年 10 月) 代表者：國枝秀世



⑤すざく衛星観測関係論文（査読付きのみ）

- 2006 年 5 編
- 2007 年 2 編（上記観測機器概要論文 2 編を除く）
- 2008 年 6 編
- 2009 年 2 編
- 2010 年 2 編

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）

- ① 科学研究費基盤研究 (S) 「硬 X 線撮像気球実験による活動銀河・銀河団の研究 (研究代表者: 國枝秀世)」
(平成 19-23 年度) 研究経費 (直接) : 81,500 千円
- ② (参考) 科学研究費特別推進研究 「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 (研究代表者: 常深博 (阪大))」 (平成 23-27 年度) 研究経費 (直接) : 425,000 千円。(分担者: 國枝秀世: 分担金 23 年度 3000 万円、24 年度 4000 万円)
- ③ 科学研究費基盤研究 (B) 硬 X 線偏光気球観測による非熱的放射機構と構造の解明 (研究代表者: 國枝秀世) (平成 24-27 年度) 研究経費 (直接) : 1390 万円。

(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

- ① **すざく衛星を用いた非熱的世界の解明** : すざく衛星では、高いエネルギーの X 線に対する感度が向上した。高エネルギー領域では、非熱的成分が、熱的成分を凌駕するため、様々な非熱的成分が明確になって来た。これまで高温プラズマの塊と認識されていた超新星残骸では、物質密度が低く、磁場密度が高い領域で、多量の非熱的成分の X 線が主役となっていることが明確になってきた。これが、高エネルギー電子/陽子の加速源であることが一般に信じられるようになって来た。
- ② **多層膜スーパーミラー反射鏡の実用性実証** : 本研究課題では、多層膜の周期長を徐々に変化させ、広い波長域で高い反射率が得られるスーパーミラーの可能性を示した。その後、異なる口径、焦点距離に対応して、より高いエネルギー X 線を目指す設計法の開発が進められた。特に、最近の研究で、求める反射特性を忠実に実現するスーパーミラーの設計/製作が可能になりつつある。反射鏡の製作では、ガラス母型を用いたレプリカ法が確立され、広く、衛星搭載望遠鏡のスタンダードとなりつつある。更に、ガラス板を金属円錐に巻き付けることで、入射角の大きな光学系のためのレプリカ法に発展している。
- ③ **衛星搭載用硬 X 線望遠鏡製作実証** : 本研究課題では、気球搭載用硬 X 線望遠鏡で数百枚の多層膜レプリカ反射鏡の製作に必要な手順、量産への技術的課題が解決された。これを元に、ASTRO-H 搭載用の 1300 枚 x 2 台の反射鏡をほぼ 2 年間で完成させるための計画が立てられ、これまで順調に製作が進められている。予算的にもスケジュール的にも、本研究計画の実証結果がベースになっている。その他にも、小型衛星に提案される、FFAST 衛星計画、分光観測計画 DIOS、偏光観測計画 POLARIS で、我々の X 線望遠鏡搭載が想定されている。

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

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）

- ① **すざく衛星計画**：我々が製作した X 線望遠鏡を搭載したすざく衛星を用いた、観測論文(査読付)が 500 編を越えている。(参照 <http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/bibliography/journals/index.html.ja>)
- ② **ASTRO-H 衛星計画**：硬 X 線撮像望遠鏡の技術的実用性、硬 X 線撮像観測の科学的重要性が、本研究課題で確立された。それを基盤として、次期 X 線天文衛星計画の主検出装置として宇宙科学研究所が採用を決めた。実際の搭載望遠鏡の開発は、宇宙科学研究所から経費が名古屋大学へ提供され、現在実施されている。
- ③ **NuStar 衛星計画**：本研究課題により確立された、硬 X 線多層膜望遠鏡を、米国の小型衛星ミッション NuStar として提案が行われた。その結果、採択され、2012 年に打上られることになった。そのチームが実際に、以下の論文で、我々の InFOCuS 実験の成果を引用している。
 “Development of precision hard x-ray multilayer optics with sub-arcminute performance”
 Koglin et al. Proc. of the SPIE, Volume 4851, pp. 673-683 (2003)
- ④ **IXO/ATHENA 衛星計画**：日米欧が協力し、2020 年代初頭に打上を目指して、国際 X 線天文台 IXO を提案して来た。その中で、入射角の小さな反射鏡に、多層膜スーパーミラーを成膜し、30-40keV まで観測感度を持たせる提案がオプションとして取り入れられた。そのベースは本研究課題による多層膜硬 X 線望遠鏡の成果に基づいている。
- ⑤ **FFAST 衛星計画**：宇宙科学研究所の小型衛星を目指し、硬 X 線望遠鏡による、広い天空の領域を走査する提案 FFAST 衛星が提案された（代表者：常深博）。その提案の中では、ASTRO-H 硬 X 線望遠鏡開発で用いている、実験装置と多層膜設計ノウハウをそのまま流用することが書き込まれている。この他にも、偏光観測衛星 POLARIS 計画（代表者：林田清）にも、この多層膜硬 X 線望遠鏡が書き込まれている。

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	“Characterization of the Supermirror Hard X-Ray Telescope for the InFOC μ S Balloon Experiment” Takashi Okajima et al. App. Opt., Vol. 41, No. 25, 5417-5426(2003).	日米共同気球観測実験 InFOCuS 搭載用硬 X 線望遠鏡の特性測定を、実験室とシンクロトロン放射光を用いて実施した。この段階で 2.4 分角の空間分解能を確認した。	6
2	“Production and Performance of the InFOC uS 20 -40-keV Graded Multilayer Mirror” F. Berendse, et al. App. Opt. vol. 42, pp.1856-1866(2003)	日米共同気球観測実験 InFOCuS 搭載用硬 X 線望遠鏡を完成し、その集光特性測定を行った。20 と 40keV で 78 と 22 cm ² の有効面積、結像性能 3 分角が確認された。	1
3	“New x-ray telescope mission (NeXT)” Kunieda et al. Proc. of SPIE, Vol. 5488, pp. 187-196 (2004)	2010 年代前半の打上を目指し、硬 X 線 (10-60keV) 撮像観測を柱として、次期 X 線観測衛星計画 NeXT を提案した。	5
4	“First light of a hard-x-ray imaging experiment: the InFOCuS balloon flight” Ogasaka et al. Proc. of the SPIE, Vol. 5900, pp. 217-224 (2005)	2001 年から開始した InFOCuS 気球実験では 2004 年の観測で、世界で最初の硬 X 線撮像観測に成功した。	4
5	“X-ray telescope onboard Astro-E. III. Guidelines to performance improvements and optimization of the ray-tracing simulator” Misaki et al. App. Opt. Vol. 44, pp.916-940(2005)	2000 年代初頭の打上を目指した ASTRO-E 衛星搭載 X 線望遠鏡の地上特性試験の結果を解析し、その性能を再現する光線追跡プログラムを構築した。これにより、性能向上策を示した。	4
6			
7			
8			
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 X-ray Observatory Suzaku” Mitsuda et al. Publ. Astron. Soc. Japan 59, S1-S7(2007)	2005年に打ち上げたすざく衛星の概要をまとめている。観測論文に必要な、X線望遠鏡、焦点面検出器（CCDカメラ、高分解能分光器）、ガンマ線検出器が記述された。	407
2	“The X-Ray Telescope onboard Suzaku” Serlemitsos et al. Publ. Astron. Soc. Japan 59, S9-S21(2007)	すざく衛星に搭載されたX線望遠鏡について、有効面積、視野、結像性能が、地上特性測定実験、軌道上の較正観測に基づき与えられた。	203
3	“Characterization of a Hard X-ray Telescope at Synchrotron Facility SPring-8” Ogasaka et al. JaJAP..47.5743-5754(2008)	放射光施設 SPring-8 では、高い平行度と強度が得られる。これを用い、80keVまでの硬X線望遠鏡の集光特性を、計測した。	1
4	“Doppler-Broadened Iron X-Ray Lines From Tycho's Supernova Remnant” Ap. J. Letters, Vol. 693, pp. L61-L65(2009)	すざく衛星を用い、Tycho 超新星残骸の撮像スペクトル観測を行った。シェル状に広がる高速運動の Doppler 効果による、輝線の広がりを検出した。	6
5	“The NeXT Mission” Takahashi et al. Proc. of SPIE, Vol. 7011, pp. 701100-701100-14 (2008)	次期 X 線天文衛星 NeXT (ASTRO-H) の概要をまとめ、報告した。この中に我々の硬 X 線望遠鏡の性能が書き込まれている。	18
6	“High-energy sky observation by two small satellites using formation flight (FFAST)” Tsunemi et al. Proc. SPIE, Vol. 7011, pp. 70112D-70112D-8 (2008)	宇宙科学研究所の小型衛星シリーズへ提案している、硬 X 線走天観測計画 FFAST の概要がまとめられている。本研究課題で確立した手法により、硬 X 線望遠鏡を設計している。	1
7	“Broad-Band Temporal and Spectral Variation of 36 Active Galactic Nuclei Observed with Suzaku” Miyazawa et al. PASJ Vol.61, No.6, pp.1331-1354(2009)	すざく衛星を用い、36個の活動的銀河核を観測した。硬X線-軟X線のスペクトル変動を統一的に解析し、異なる成分の変動を分離する事に成功した。	4
8	“Expansion Velocity of Ejecta in Tycho's Supernova Remnant Measured by Doppler Broadened X-ray Line Emission” Hayato et al. Ap. J. Vol. 725, 894(2010)	前述 # 4 論文の第二論文。鉄輝線以外の核種の速度の違いを求め、その比較から、超新星爆発時の核種合成の歴史をたどった。	13
9	“Hard x-ray telescope to be onboard ASTRO-H” Kunieda et al. Proc. SPIE, Vol. 7732, pp. 773214-773214-12 (2010)	次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載用硬 X 線望遠鏡の設計と、開発の現状、試作反射鏡の特性測定の結果を報告した。	4
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。）

① 一般講演会

- 日本表面科学会一般講演会（2007年3月4日）「激動する宇宙から来る X 線をとらえる」
- 星の会講演会（2007年6月24日）「超新星爆発のめぐみ-高温ガスとブラックホール」
- 日本天文学会理事長として日本天文学会百年記念巡回展を実施（2009年5月-2010年12月）
- 「名大の授業」IN河合塾（2009年8月8日）「ブラックホールを見る：X線天文学の挑戦」
- 精密工学会一般講演会（2010年9月28日）「X線望遠鏡で見る宇宙：ブラックホール・宇宙の起源を探る」
- サイエンスカフェ（2011年2月13日）「宇宙から見えない宇宙を見る」
- 公開セミナー（2011年8月20日）「名古屋大学の天文学この20年：X線天文学グループの歩みとこれから」
- 朝日カルチャーセンター（2012年1月29日）「ブラックホールと X 線」

② 高校出前授業等

- 東海高校サタデープログラム（2007年2月27日）「ブラックホールに迫る：X線天文学の挑戦」
- SSH 講義（2009年8月3日）「X線で探る宇宙」
- 旭丘高校（2010年6月29日）「宇宙を探る様々な目ー電波から X 線ガンマ線までー」
- 愛知県公立高校校長会講演（2010年5月19日）「大学から高等学校へのメッセージ：何を教えるべきか、何を学ぶべきか」
- 愛知教育大学附属中学校講義（2011年3月7日）
- 名古屋西高校出前授業（2011年10月28日）
- 瑞陵高校出前授業（2011年11月11日）「宇宙を探る様々な目：電波から X 線ガンマ線まで」

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。）

- 田村啓輔 研究者-->宇宙科学研究所プロジェクト 研究者(2007年)
- 柴田亮 研究者-->ニコン（株）(2007年)
- 小賀坂康志 理学研究科助教-->科学技術振興機構プログラムオフィサー(2008年)
- 古澤彰浩 エコトピア研究所助教-->教養教育院講師(2010年)