

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24244021

研究課題名(和文)高精度ロケットを用いた太陽の硬X線撮像観測による相対論的現象の探査・解明

研究課題名(英文)Hard X-ray imaging and spectroscopy of the Sun with the FOXSI rocket experiment

研究代表者

高橋 忠幸 (Takahashi, Tadayuki)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：50183851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,900,000円

研究成果の概要(和文)：世界初の太陽高感度硬X線撮像分光観測を行うため、日米共同で観測ロケット実験(FOXSI)を行い、2回の太陽コロナの高感度観測に成功した。我々は焦点面検出器およびキャリアレーションや現地作業を担当した。FOXSI-1では、太陽外縁部で発生したマイクロフレアを観測し、RHESSI衛星と比べて極めて高い感度を発揮できていることを確認した。FOXSI-2では、CdTeセンサーを開発することでFOXSI-1よりも感度、有効面積が大きく向上した。本研究では硬X線望遠鏡システムを用いることで、従来の観測では極めて困難であった高ダイナミックレンジの太陽撮像観測に成功した。

研究成果の概要(英文)：FOXSI is a rocket experiment to perform high sensitivity HXR observations from 4-15 keV using the new technique of HXR focusing optics. The first FOXSI flight performed in 2012 produced the first focused image of the Sun above 5 keV: a partly occulted microflare. FOXSI's high dynamic range was successfully demonstrated compared to the observation of the same flare by RHESSI. In order to achieve higher sensitivity, we developed a CdTe double-sided detector with finer pitch than the FOXSI DSSD for the second flight (FOXSI-2). The strip pitch is as fine as 60  $\mu\text{m}$  with a 10  $\mu\text{m}$  gap between strips. 128 strips are placed on each of the top and bottom surfaces and the sensitive area is 7.67 mm  $\times$  7.67 mm. The FOXSI-2 payload was successfully launched on December 11, 2014. FOXSI-2 successfully imaged HXR emissions from multiple regions and the capability of the CdTe double-sided strip detector for solar HXR observations is successfully demonstrated.

研究分野：宇宙物理学実験

キーワード：X線天文学 宇宙線 太陽物理学 CdTe半導体センサー

## 1. 研究開始当初の背景

太陽は最も身近な恒星であり、その距離の近さのために精密な観測を行う事が可能である。太陽フレア中には非熱的な分布をとる加速された粒子の存在が知られており、その速度は電子で  $\sim$ MeV までと相対論的にまで達する (Ramaty et al. 1995) が、粒子加速の機構や全体像はいまだ十分に解明されていない。熱的プラズマが数 keV の X 線を放射するのに対し、 $\sim$ 10 keV 以上の硬 X 線では加速された電子からの非熱的制動放射が主要な成分となる。そのため、太陽の硬 X 線撮像観測は太陽フレアにおける粒子加速、ひいては恒星におこる加速現象を研究するのに非常に重要な実験手段である。

太陽全体を見た場合、6000Kの太陽光球表面に対し、太陽大気である希薄なコロナが100MKもの高温であるのは依然謎である。磁場のエネルギーがフレアにおいて磁気リコネクションで解放され、コロナ中の粒子の運動エネルギー、熱エネルギーに変換されるという説があるが、一般的なフレアからの非熱的放射に、最近、RHESSI 衛星によって非熱的放射が観測されたマイクロフレアをあわせてもコロナを加熱するのに必要なエネルギーを説明することができていない (Krucker 2002, Christe et al. 2008)。そのため、頻度が桁違いに高く、エネルギーの供給源として有望ではあるものの、感度の限界で観測できなかった静穏領域のナノフレアからの非熱的成分の存在を探る事が極めて重要である。

高い角度分解能を持つ硬X線望遠鏡と硬X線イメージャーとによる撮像分光観測は、数秒角という精度で放射領域を特定できるという点で従来の観測手段に比べて圧倒的に優れており、さらに、望遠鏡の有効面積に対して検出器を小さくできるためバックグラウンドを抑え、2桁も感度の高い観測が可能である。しかし、これまで、X線天文においても、太陽観測においても実現していない。

我々は、RHESSI 衛星を用いて太陽における非熱的現象の解明を進めると共に、世界ではじめての太陽ナノフレアの硬 X 線集光撮像観測を目的として、カリフォルニア大学バークレー校やNASA/MSFC の研究者と、太陽観測ロケット実験 FOXSI-1 を 2007 年に NASA に提案、認められた。特に、NASA/MSFC の硬 X 線集光鏡と我々の硬 X 線撮像検出器の技術がこの提案の鍵を握った。我々は、自ら発案したテルル化カドミウム半導体ダイオードとそれを用いた硬 X 線撮像検出器の開発において、他の追随を許さない。その後、我々のアプローチは高く評価され、より高い効率をめざした FOXSI-2 の提案が、同じ研究グループから行われ、2010 年、高い競争率の中、「Excellent」という評価で認められた。

## 2. 研究の目的

本研究室が本質的な貢献を行う NASA ロケット実験を通じて、太陽ナノフレアに伴う粒子加速が、どのようなスペクトルおよび空間構造で起こっているかを明らかにし、太陽活動全体に対する寄与を見積もるとともに、その粒子加速現象が磁場活動とどのように結びついているかを調べ、粒子加速の起源を明らかにすることを目的とする。

これを達成するため、本研究においては、高精度ロケット実験 FOXSI-1 および FOXSI-2 を用いて、2段階の研究を行う。ナノフレアはタイムスケールが短く発生頻度が高いため、ロケット実験の最高到達高度  $\sim$ 300 km、観測時間 5-10 分の中で観測時間内に 10-数100個のナノフレアの観測が期待される。ナノフレアの硬 X 線観測から、フレアの継続時間、時間変化、スペクトルの形およびフラックス、放射エネルギーの総量などを調べ、加速粒子がどのぐらいのエネルギー、どのようなスペクトルで、空間的にどのように分布しているかを明らかにすることをめざす。また、フレアを起こしていない場所の高感度観測により、太陽コロナに高温プラズマが定常的に存在しているかどうかを探る。

2回めの打ち上げであるFOXSI-2は、本研究室が世界に先駆けて開発している60-70 $\mu$ mの位置分解能を持つCdTeイメージング分光素子を搭載し、高効率化をはかる。並行して、将来の太陽観測ロケットや衛星をめざした高計数率の広帯域イメージング検出器の研究を行なう。

## 3. 研究の方法

2012年に行われたFOXSI-1 実験により得られる観測データに基づく研究と、2回めの打ち上げである FOXSI-2実験の準備、実施、データ解析、さらに全体を通じた成果(論文)創出作業からなる。我々は、両実験において、硬X線撮像検出器、特に、半導体撮像素子と読み出しのための回路系を担当する。データ解析と並行して、FOXSI-2実験で新たに必要となるテルル化カドミウム (CdTe) 半導体撮像素子の開発を開始する。テルル化カドミウム半導体撮像素子のロケット搭載品、スペア製作を行う。打ち上げ後は、FOXSI-2のデータ解析、およびサイエンス成果のとりまとめを行う。また、FOXSI-1, FOXSI-2 実験に続く将来計画に向けた次世代検出器の試作をおこなう。

## 4. 研究成果

我々は、世界初の太陽高感度硬X線撮像分光観測を行うため、米国カリフォルニア大学バークレー校、NASA他と共同で観測ロケット実験 Focusing Optics Solar X-ray Imager



図1. FOXSI-2実験のロケットペイロード

(FOXSI) を行った (図1, 2)。打ち上げは2012年11月2日と2014年12月11日の2回行い(それぞれ FOXSI-1、FOXSI-2)、2回の打ち上げともに太陽コロナの高感度観測に成功した。宇宙科学研究所のグループは焦点面検出器およびキャリブレーションや現地作業を担当した。

FOXSI には、硬X線望遠鏡と焦点面検出器の組が7組搭載されており、7組はそれぞれ独立の光学系として観測を行う。望遠鏡は Wolter-I 型の斜入射望遠鏡であり、 $\sim 20$  keVまで集光する能力を持つ。焦点距離はロケットのサイズにより決定された2 m である。望遠鏡は有効面積を高めるために、複数の望遠鏡シェルを同心円状に複数重ねた構成となっている。FOXSI-1では7つの望遠鏡は全てそれぞれ7つのシェルを重ねたものであり、FOXSI-2 では2つの望遠鏡



図2. FOXSI-1実験のロケット打ち上げ

ぞれ、 $75 \mu\text{m}$  および  $60 \mu\text{m}$  で、それぞれ2mの焦点距離において8秒角、6秒角の空間分解能に相当し、望遠鏡の分解能から要求される空間サンプリングを実現している。エネルギー分解能はFWHMで0.5 keV (Si) 1 keV (CdTe) であり、ともに4 keVまでの低エネルギーの観測を可能にする低ノイズを達成している。

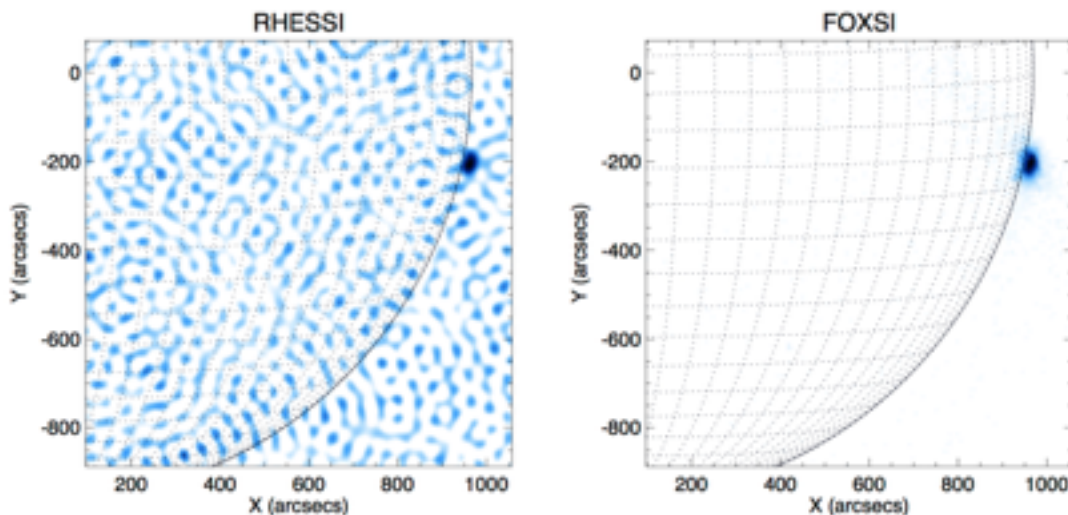


図3. 同時観測によるRHESSI衛星とFOXSI-1実験のイメージの比較 (Krucker et al. 2014)

について内側のシェルを追加し10シェルの構成として特に高エネルギーでの有効面積を向上させている。望遠鏡の空間分解能は5-6秒角 (FWHM) という優れた性能を達成している。FOXSIのフライト焦点面検出器は我々が開発したSiおよびCdTe半導体イメージャで、多チャンネル低雑音アナログASICによる高速読み出しにより硬X線撮像分光観測を可能にする。位置分解能はそれ

FOXSI-1では、太陽外縁部で発生したマイクロフレアを観測し、RHESSI衛星と比べて極めて高い感度を発揮できていることを確認した(Krucker et al. 2014) (図3)。数百万K以上の高温プラズマからの放射について、イメージングの技術的困難を克服し、硬X線として、はじめての非常に鮮明なイメージを得ることができた (Glesener et al., in prep.)。FOXSI-1の視野には、マイクロフレア以外に



も、比較的活動度の低い活動領域や、静穏領域が含まれていたが、これらの領域から硬X線は有意には検出されなかった。マイクロフレアの観測により、観測機器の性能が発揮されていることは確認されているため、これらの領域では予想されていたよりもはるかに硬X線放射が少なかったことがわかった。特に、活動度の低い静穏領域では、ひので衛星の軟X線や極端紫外光の観測から、ある程度の硬X線放射が検出されることが期待されていた。FOXSIで硬X線が検出されなかった事実は、800万K以上のプラズマが主たる温度成分と比べてエミッションメジャーにして6桁以上少ない、すなわちエネルギーの寄与が無視できるほどわずかしか存在しないことを示す。この事実は、太陽活動領域におけるコロナを数百万Kまで加熱する機構が微小フレアの集合であるとする説(太陽コロナのナノフレア加熱説)を否定する重要な成果である(Ishikawa et al. 2014)。

FOXSI-2では、観測機器の温度維持のためのサーマルブランケットの取り付け位置の見直し、望遠鏡のアップデート、新規開発したCdTe検出器の搭載を行い(図4)、FOXSI-1よりも感度、有効面積が大きく向上した。その結果、複数の活動領域を観測時間中に捉えることに成功し、同一視に複数の硬X線源をイメージングするという、従来の観測では極めて困難であった高ダイナミックレンジの観測に成功した(図5)。その結果、FOXSI-1では達成できなかったフレア発生時以外の太陽活動領域からの有意な硬X線放射に成功した。この放射のうち7 keV以上の成分は、1000万K以上のプラズマから発せられたものであると考えられる。FOXSI-1と同様、この活動領域でも1000万度以上の成分はごくわずかであるが、FOXSI-2で初めて、1000万度以上のプラズマが太陽フレア発生時以外でも存在する示唆が得られた(Ishikawa et al., in prep.)。これは、コロナを加熱する物理機構を議論する際に基礎的なデータとなる、重要な観測である。また、FOXSI-2の観測ターゲットには太陽静穏領域も含まれていたが、有意な硬X線放射は検出されなかった。FOXSI-2の高感度化により、太陽静穏領域の硬X線放射について、これまでになく低い上限値を設定することができた。これは、太陽静穏領域の定常的なエネルギー解放現象のモデルに制限を与える重要な結果である。

我々は、FOXSI-1で使用した両面シリコンストリップ検出器を発展させ、硬X線に十分な感度を持つ検出器としては極めて小さい65  $\mu\text{m}$  という優れた位置分解能を持つテルル化カドミウム半導体撮像分光検出器を開発した(図4)。65  $\mu\text{m}$ はFOXSIロケットの2 mの焦点距離で6秒角に相当し、太陽コロナの空間構造の撮像観測を可能にする。素子の有効検出面の大きさは7.7 cm  $\times$  7.7 cmであり、FOXSIにおいて太陽の6分の面積をカバーして

複数の領域を同時観測することができる。素子の厚さは500  $\mu\text{m}$ であり、FOXSIの観測エネルギー帯域である20 keV以下の領域でほぼ100%の検出効率を誇り、望遠鏡で集光された硬X線光子を逃さず捉えることができる。我々のグループの経験に基づき、検出器デザインや読み出し回路の設計を行い、優れた位置分解能かつ低ノイズの検出器を完成させた。この検出器のエネルギー分解能は1keV (FWHM)を達成し、FOXSIロケットの要求を満たすことができた。この検出器はFOXSI-2に搭載され、実際のフライトに置いても高い位置分解能と低いノイズを同時に達成し、高感度・高分解能の太陽硬X線撮像分光観測を実現することができた (Ishikawa et al. 2016, submitted)。

FOXSI-1, FOXSI-2の成果をもとに、NASAに新たなロケット実験FOXSI-3を提案し、

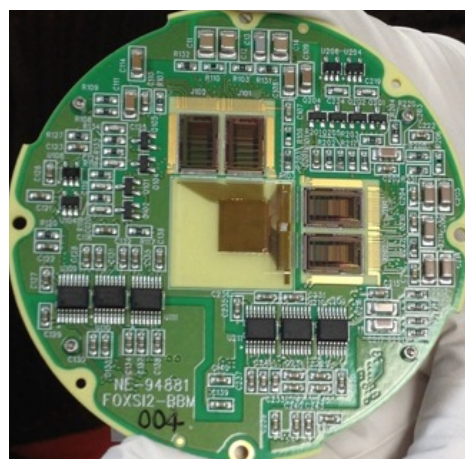


図4. FOXSI-2実験のために開発された焦点面検出器 (Ishikawa et al., 2016)

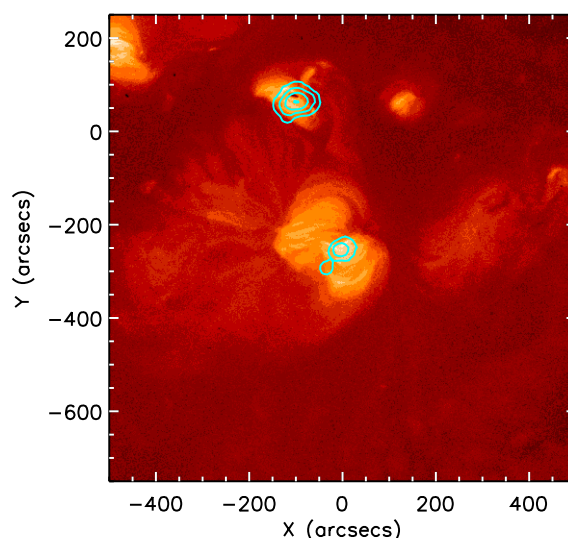


図5. FOXSI-2実験で得られた画像 (等高線)

2015年12月に採択された。2018年の打ち上げを予定している(FOXSI-3)。FOXSIの望遠鏡は本来2回反射したX線を集光しているが、FOXSI-1およびFOXSI-2では1回のみ反射したX線が感度を制限していることがわかっている。FOXSI-3では、望遠鏡にファインコリメータを取り付けることで意図しない入射角から望遠鏡に入ってくるX線を取り除き、更なる感度の向上を実現する。また、多層シェル構造の望遠鏡のシェル数を増やすとともに、7つの検出器のうち5つに用いていたシリコン検出器をCdTe検出器に置き換え、特に高エネルギーにおける有効面積を向上させる。これらの感度向上と有効面積向上により、これまで検出されていなかった静穏領域からの硬X線放射の発見、ないしFOXSI-2を超える精度での硬X線放射の上限值の評価を行う。

#### <引用文献>

- ① Ramaty et al. *Astrophysical Journal Letters* v. 455, p.L193, 1995
- ② Krucker, S. *Advances in Space Research*, Volume 30, Issue 3, p. 493-493, 2002
- ③ Christe et al. *The Astrophysical Journal*, Volume 677, Issue 2, article id. 1385-1394, pp. ,2008

#### 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4件)

- ① Ishikawa et. al., "Fine-pitch CdTe detector for the hard X-ray imaging and spectroscopy of the Sun with the FOXSI rocket experimnt submitted (2016)
- ② S. Christe, L. Glesener, C. Buitrago-Casas, S. Ishikawa, B. Ramsey, M. Gubarev, K. Kilaru, J. Kolodziejczak, T. Takahashi, H. Tajima, P. Turin, V. Shourt, N. Foster and S. Krucker, "FOXSI-2: Upgrades of the Focusing Optics X-ray Solar Imager for its Second Flight.," *Journal of Astronomical Instrumentation*, 05, 1640005, 2016 DOI: 10.1142/S2251171716400055
- ③ S. Ishikawa, L. Glesener, S. Christe, K. Ishibashi, D. H. Brooks, D. R. Williams, M. Shimojo, N. Sako and S. Krucker, "Constraining Hot Plasma in a Non-flaring Solar Active Region with FOXSI Hard X-ray Observations," *Publ. Astron. Soc. Japan*, 66, S15, 2014, DOI: 10.1093/pasj/psu09
- ④ S. Krucker, S. Christe, L. Glesener, S. Ishikawa, B. Ramsey, T. Takahashi, S. Watanabe, S. Saito, M. Gubarev, K. Kilaru, H. Tajima, T. Tanaka, P. Turin, S. McBride, D. Glaser, J. Fermin, S. White, and R. P. Lin, "First Images from the Focusing

Optics X-ray Solar Imager," *Astrophys. J Letters*, 793, L32, 2014, DOI: 10.1088/2041-8205/793/2/L32

##### [学会発表] (計12件)

- ① Camilo, B.C., J.; Glesener, L.; Christe, S.; Krucker, S.; Ishikawa, S.; Takahashi, T.; Ramsey, B.; Han, R., "The FOXSI sounding rocket: Latest analysis and results", AAS, SPD, 05/2016
- ② S. Ishikawa, S. Krucker, L. Glesener, S. Christe, J. C. Buitrago-Casas and N. Narukage "Active region temperature diagnostics with Hinode/XRT and FOXSI-2 hard X-ray observations," *Hinode 9 International Science Meeting*, September 14-18, 2015
- ③ 石川真之介, L. Glesener, S. Krucker, S. Christe, 成影典之, ほか FOXSI チーム 「高感度硬 X 線観測ロケット FOXSI-2 とひので X 線望遠鏡による太陽活動領域の温度解析」, 日本天文学会2015年秋季年会, 2015年9月9-11日
- ④ S. Ishikawa, S. Watanabe, Y. Uchida, S. Takeda, T. Takahashi, S. Saito, L. Glesener, J. C. Buitrago-Casas, S. Krucker and S. Christe "Fine-pitch CdTe detector for the hard X-ray imaging and spectroscopy of the Sun with the FOXSI rocket experiemnt," *Measurement Techniques in Solar and Space Physics*, April 20-24, 2015
- ⑤ 石川真之介, 渡辺伸, 内田悠介, 武田伸一郎, 高橋忠幸, 斉藤新也, S. Krucker, L. Glesener (UC Berkeley), S. Christe, B. Ramsey 「ロケット実験 FOXSI-2 による太陽硬 X 線の高感度撮像分光観測」, 日本天文学会2015年春季年会, 2015年03月20日
- ⑥ S. Ishikawa, S. Krucker, L. Glesener, L. Christe, S. Saito, T. Takahashi, S. Watanabe, B. Ramsey, T. Tajima, T. Tanaka, "High-sensitivity hard X-ray solar observation with the FOXSI rocket," *The Seventh Hinode Science Meeting*, November 14, 2013
- ⑦ 石川真之介, 斉藤新也, 高橋忠幸, 渡辺伸, 田島宏康, 田中孝明, S. Krucker, L. Glesener, S. Christe, B. Ramsey 「ロケット実験FOXSIによる太陽硬 X 線の高感度撮像分光観測(2)」日本天文学会2013年秋季年会, 2013年9月16日
- ⑧ L. Glesener, L. Christe, S. Ishikawa, B. Ramsey, T. Takahashi, S. Saito, S. Watanabe, S. Lin, ; FOXSI team "Results from the first flight of the Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) sounding rocket," AAS, SPD Meeting, July 7-11, 2013, Montana USA
- ⑨ L. Glesener, L. Christe, S. Ishikawa, B. Ramsey, T. Takahashi, S. Saito, S. Watanabe, S.

Lin, ; FOXSI team "The Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI): Instrument and First Flight," AAS, HEAD Meeting, April 7-11, 2013, Monterey Ca

- ⑩ 齊藤新也, 石川真之介, 高橋忠幸, 渡辺伸, 田島宏康, 田中孝明, S. Krucker, L. Glesener, S. Christe, B. Ramsey 「ロケット実験 FOXSI による太陽硬 X 線の高感度撮像分光観測 (1)」日本天文学会 2013年春季年会, 2013年3月22日
- ⑪ A.Togo, S. Watanabe, S. Takeda, G. Sato, H. Odaka, T. Fukuyama, K. Hagino, Y. Uchida, T. Takahashi, "Development of Very Compact Soft Gamma-ray Cameras Using Fine Coded Apertures," 2013 IEEE Nucle Science Symposium, Medical Imaging Conference & Workshop on Room Temperature Semiconductor X-ray and Gamma-ray Detectors (Invited) Oct. 27-Nov. 2, 2013. Seoull, Korea
- ⑫ S.Ishikawa, S. Krucker, L. Glesener, L. Christe, S. Saito, T. Takahashi, S. Watanabe, B. Ramsey, T. Tajima, T. Tanaka, "High sensitivity hard X-ray imaging and spectroscopy with the Focusing Optics X-ray Solar Imager (FOXSI) sounding rocket," JpGU meeting, May 21, 2013

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.astro.isas.jaxa.jp/~takahashi/Missions/FOXSI/FOXSI.html>

NASA RHG Exceptional Achievement for Science Team Award (FOXSI ロケットチームのメンバーとして。2015年4月。高橋忠幸、渡辺伸、石川真之介、他FOXSI チーム)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

高橋 忠幸 (TAKAHASHI, Tadayuki)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：50183851

### (2)研究分担者

渡辺 伸 (WATANABE, Shin)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：60446599

石川真之介 (ISHIKAWA, Shin-nosuke)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：10724685

(3)連携研究者

(4)研究協力者