

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26247039

研究課題名(和文) 気球搭載型エマルションガンマ線望遠鏡による宇宙線加速天体の精密観測

研究課題名(英文) Precise observation of cosmic-ray accelerating object by balloon-borne emulsion gamma-ray telescope

研究代表者

青木 茂樹 (Shigeki, Aoki)

神戸大学・人間発達環境学研究科・教授

研究者番号：80211689

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,300,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙から飛来するガンマ線を、高い角度分解能と偏光感度を有して観測できるエマルション(原子核乾板)望遠鏡を開発し、オーストラリア・アリススプリングスでのJAXA国際気球実験において観測を行った。これにより、海外のサイトで時間にして日オーダーの観測・回収ができる体制を整え、エマルション望遠鏡中に蓄積されたガンマ線による電子陽電子対生成事象の大量処理手法を確立した。100-200MeVの帯域での観測中の実データから、バックグラウンド事象として捉えられている外部の気球システム構造体や望遠鏡内部で宇宙線により二次的に生成されたガンマ線を用いて所期の角度分解能が実現できていることを確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed emulsion telescope in order to observe cosmic gamma-ray with high angular resolution and polarization sensitivity, which has been launched by JAXA international balloon experiment campaign at Alice Springs, Australia. We have established collaboration system to perform day-order duration observation and recovery of the emulsion telescope. We also established the method to analyze massive data of electron-positron pair accumulated by gamma-ray in the emulsion telescope. From real data of 100-200 MeV region during flight, we confirmed the realization of expected angular resolution using back-ground gamma-rays accidentally produced internally in the emulsion telescope itself or external structure of balloon system.

研究分野：素粒子物理学・宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 X線 線天文学 原子核乾板 エマルション 宇宙線加速源

1. 研究開始当初の背景

宇宙線は、発見から 100 年を過ぎた現在でもそのエネルギー源の正体は謎のままである。最有力候補とされる超新星残骸 (SNR) のガンマ線による観測が、近年急速な進展を見せている。Fermi-LAT、AGILE は W44、IC443 等の明るい SNR の詳細なスペクトル測定を行い、 p (加速陽子) + p (付随する原子ガス/分子雲) $\rightarrow \pi^0$ を経由したガンマ線の生成過程を示唆している。SNR のガンマ線と他波長 (星間ガスをトレースする電波や赤外線) との空間分布の強い相関が確認されれば、そこで陽子が加速されていることにより強い証拠となり得る。

2. 研究の目的

気球搭載型エマルジョン望遠鏡により宇宙ガンマ線を観測する GRAINE (Gamma Ray Astro Imager with Nuclear Emulsion) 計画を推進するため、現在の GeV/sub-GeV 帯域のガンマ線観測で他波長域に比べて不足している角度分解能・偏光感度を飛躍的に高めることができるエマルジョン望遠鏡を開発し、科学観測気球に搭載し天体からのガンマ線を捉え、次世代のガンマ線望遠鏡としての性能を実証することを目指す。

3. 研究の方法

空間分解能に優れた原子核乾板 (エマルジョン) を用い、ガンマ線により対生成した電子陽電子の飛跡を高精度に測定することで、検出器に対する親ガンマ線の到来方向を精緻に決定することができる。新たに開発したエマルジョンフィルム多段シフターにより、観測中に検出器内を通過するすべての飛跡に対して、秒/ミリ秒の精度で通過時刻を決定する。これらの情報と観測中の望遠鏡の姿勢をモニターする屋間スターカメラの情報を組み合わせることで、ガンマ線の到来方向を天球上に高精度でマッピングする。

JAXA 大気球実験室がオーストラリアにおいて立ち上げている国際気球実験の第 1 号として 2015 年 5 月に高度 35km 以上の上空で気球観測実験を行い、GeV/sub-GeV 帯域でもっとも明るい Vela パルサーからのガンマ線検出を行い、望遠鏡としての総合的な性能実証を行う。

4. 研究成果

2015 年気球実験では、観測装置に用いる原子核乾板に新開発の高感度原子核乾板を全面的に導入した。旧来品と比べて S/N 比が大きく向上し、超高速全自動飛跡読取装置による飛跡の認識効率が上がることによりガンマ線事象の検出効率および信頼性を大きく高めることができた。名古屋大学の乳剤製造装置や塗布設備を使用し、実験グループメンバーの手でのべ 11 ヶ月を投じて 195kg の乳剤製造を行い、のべ 6 ヶ月を投じて 66.8m² のフィルムの塗布製造を完遂した。

タイムスタンパーである多段シフターは、2011 年北海道大樹町での気球実験で使用したプロトタイプ望遠鏡用の多段シフター 1 号機の約 30 倍の面積拡大を図り、口径面積を 0.38m² にすることに成功した。また、低温低圧の気球フライト環境でも高速動作 (500um/秒) を実現する改良に成功し、パルサーの位相分解を可能とする数ミリ秒の時間分解能を実現する見通しを得た。

コンバーター部、タイムスタンプ部、カロリメーター部はそれぞれに真空パックすることとした。これにより観測期間中のフィルム相互の位置関係を堅持し平面性の向上をはかるとともに、フェーディング抑制のための低湿度状態の保持、遮光・防水も確実にできることになった。他方で、この真空パックの効果は約 5hPa となるレベルフライト高度でも保持するため、与圧容器を導入した。観測器上方の与圧容器材料による一次宇宙ガンマ線の吸収や宇宙線相互作用による二次ガンマ線の発生を極力抑えるため、ATIC 気球実験の薄シェル付風船式与圧容器を参考に設計・製作し、観測器上方の物質量を約 0.1g/cm² に抑えつつ外気との差圧 300hPa を保持できるようにした。

観測直前のフィルムの前処理と真空パック、さらに回収後のフィルムの現像処理をオーストラリア国内で行うために、シドニー大学グループからスペース、光熱・水道および排水処理に関する協力を得て、日本から運んだ資材でこれらの処理を行う施設を立ち上げた。

以上のような準備に基づき、5月12日に Vela パルサーが視野を横切る時間帯約 6 時間をほぼカバーする 11.5 時間の観測が実現でき、迅速な回収にも成功し、現像処理も予定通りに行うことができた。回収、現像後のフィルムは、名古屋大学で開発した超高速飛跡読取装置 HTS を用いて、記録された飛跡のデジタルデータ化を行った。HTS による本格的な連続データ取得は、本実験が初めてであったが、主検出器であるコンバーター部とタイムスタンプ部を構成するフィルム約 41m² の読取は順調に進行し、約 3 ヶ月で完了した。

2015 年気球実験に搭載したエマルジョン望遠鏡の構造を図 1 に示す。コンバーター部は、高感度エマルジョンフィルム (1 枚のフィルムは 180 μ m 厚ポリスチレンフィルムとその表裏に塗布された 70 μ m 厚の乳剤層を持つ) 100 枚からなり、厚みは 32 mm で全放射長は 0.53 X₀ であった。貫通するガンマ線の約 34% が $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応を起こし、飛跡対が乳剤層中に記録される。原子核乾板のサイズは 37.8cm \times 25cm であり、ゴンドラには同構造のユニットを 4 つ並べて搭載した。各ユニットの最上流にはフラットなアルミハニカムパネルと一緒に真空パックした原子核乾板 (アライメントフィルム) を設置しており、コンバーター部を構成する 100 枚のフィルムそれぞれの歪みを貫通する高運動量飛跡を利用して補

正する。タイムスタンプ部は計3段のステージがあり、上流側の1段目に3枚、2段目に2枚、3段目に3枚のフィルムを実装した。カロリメーター部はフィルム16枚とステンレス板15枚の積層構造からなり、厚みは19.3 mmで全放射長は0.90 X₀であった。また、望遠鏡の天球に対する姿勢をモニターするため、デイトイムスターカメラを3台搭載した。

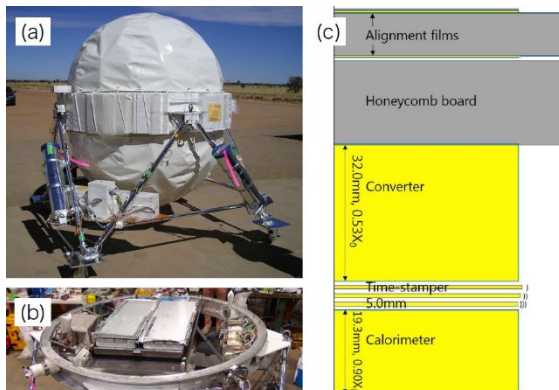


図1：(a) エマルジョン望遠鏡 Gondola と圧容器 (b) 圧容器内部の望遠鏡本体（真空パックしたコンバーター4ブロックが確認できる） (c) 望遠鏡本体の断面

(1) コンバーター部のフライトデータ解析

取得した飛跡データを解析し、ガンマ線反応($\gamma \rightarrow e^+ + e^-$)の選出を行った。コンバーター部13cm × 8cm × 100枚のデータについて選出処理を行った結果を図2に示す。1枚の原子核乾板には、 $\sim 3 \times 10^6$ 本の飛跡が記録されている。(水色)隣接フィルム8枚の体積中を貫通する荷電粒子飛跡を除去した後、(緑)上流から4枚目のフィルムから始まり、8枚目まで貫通する飛跡のみを抽出する。さらに、(橙)近傍に独立した飛跡が並走する特徴を要求することで、 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応のコンバージョン点を選び出した。ここまでの処理で飛跡数は約2000分の1にまで濃縮される。さらに、(赤)反応点からの電子・陽電子飛跡を下流へと順に追いつき、最下流フィルムにまで到達したものがタイムスタンプ部へ接続可能となる有効イベントとなる。sub-GeV領域のガンマ線のエネルギーは、コンバーター部で測定することができる。複数のフィルムを貫通していく電子(陽

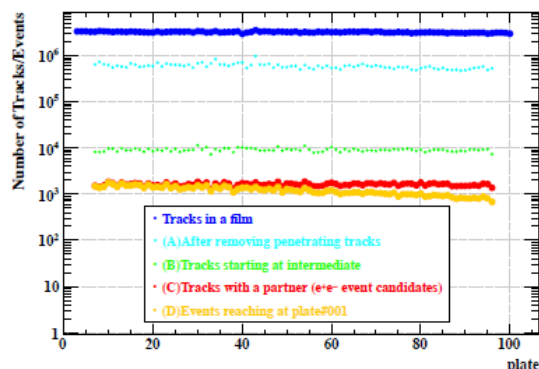


図2：コンバーター中プレート毎の飛跡数

電子)が受ける多重電磁散乱をフィルム間での角度ずれとして検出し、運動量へ変換する。

モンテカルロデータ (geant4.10.01を使用) に対して、検出器の応答(フィルムあたりの飛跡自動読取効率、フィルム間飛跡接続精度)を反映させ、前述と同じ条件を満たす事象を選び出し、フライトデータとの比較を行った。 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 反応における電子、陽電子がなす開き角、再構成運動量、エネルギー比、不変質量の分布を図3に示す。シミュレーションの分布はデータをよく再現しており、選び出し、エネルギー測定処理が正常に行えていることが確認できた。モンテカルロシミュレーションから見積もられるコンバーター部での選び出し効率は100MeVのガンマ線に対して65%、200MeVのガンマ線に対して83%と評価された。

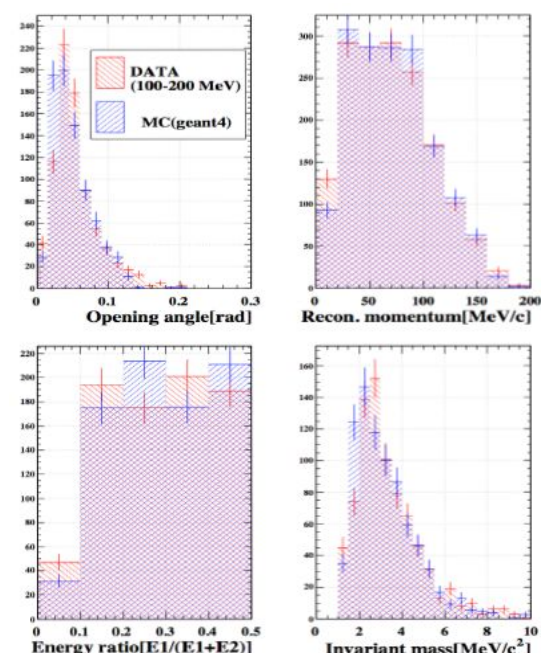


図3：ガンマ線反応から得られた運動学的パラメーターのシミュレーションとの比較

- (左上) 電子・陽電子がなす開き角分布
- (右上) 電子・陽電子の運動量分布
- (左下) 電子・陽電子のエネルギー比分布
- (右下) 不変質量分布

(2) 多段シフターのフライトデータ解析

コンバーター最下流の飛跡を1段目ステージに繋ぐことで得られる飛跡の位置ずれdx分布及び本フライトにおける気球高度の時間変化を図4に示す。放球からVelaパルサー観測前の7.2時間の飛跡集団と、Vela観測中の1スポット18.8分の飛跡集団(計20スポット)に時間分解した。さらに2段目、3段目フィルムへと飛跡を繋いでいくことで、より細かな時間情報を付与することができる。3段目の位置ずれ情報を用い、打ち上げからレベルフライトにおける2秒ごとの宇宙線カウントレートを得た結果が図5である。気球高度の上昇に伴いカウントレートの増加が見られ、高度20 km付近でpfitzer maximumを再現する結果が得ら

れた。また、20 km以降は残留大気量に応じてカウントレートが徐々に減少していき、レベル高度(36 km)に到達するとカウントレートは安定した。カウントレートにアクセスが見られるbinに入射した飛跡について、位置、角度情報を元に上流方向に外挿すると一点に収束する描像が得られた。カウントレートの解析により、コンバーター内で発生したハドロン反応に伴う粒子の多重発生イベントを検出することに成功した。

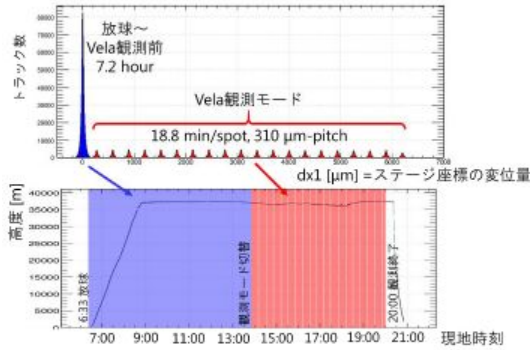


図4：1 段目ステージの解析により得られた位置ずれ dx 分布及び気球高度の時間変化

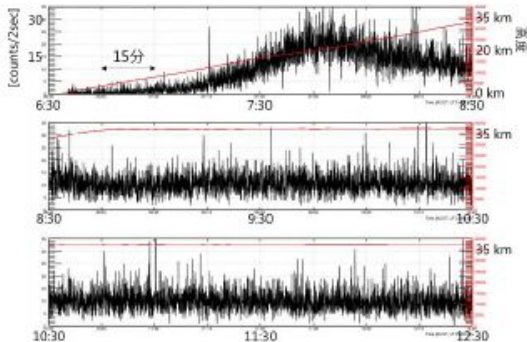


図5：多段シフターの解析により得られた宇宙線カウントレート

多段シフターの時間分解能 σ_t は、飛跡のつなぎ精度 σ_{dx} と3段目のステージ駆動速度 $v(500 \mu\text{m}/\text{sec})$ から、 $\sigma_t = \sigma_{dx}/v$ により与えられる。同時性が保証されると共に複数の位置ずれ dx が得られる多重発生イベントを利用して、時間分解能を評価した。上空で捉えた多重発生イベントを用いて位置ずれ dx 分布の幅 $\sigma_{dx} = 4.9 \mu\text{m}$ が得られた。これにより多段シフターの時間分解能は0.0098秒が期待される。これは2011年気球実験での多段シフター1号機の時間分解能の実績を一桁更新する結果である。

コンバーター部で検出した $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ 事象を多段シフターへつなぎ、ガンマ線イベントに対して系統的に時刻情報を付与した。レベルフライト中においてガンマ線イベントレートが安定していることを確認するとともにVelaパルサー観測時間帯(高度36-37.4km)における大気ガンマ線フラックスを導出した。図6に100MeV - 200MeV領域での測定結果を過去の測定結果とともに示す。

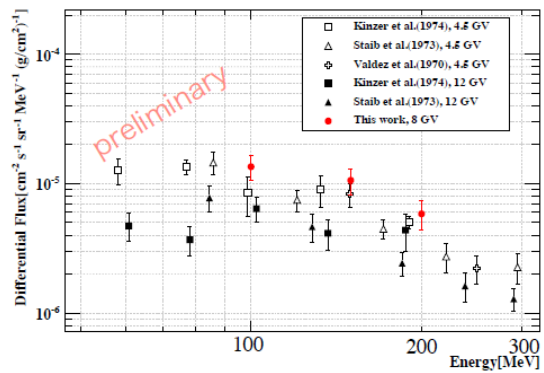
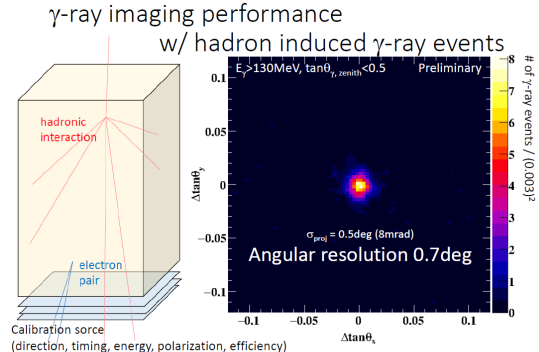


図6：Vela パルサー観測時間帯(高度36-37.4 km)における大気ガンマ線フラックスの測定結果

コンバーター内に蓄積されている上空でのハドロン反応とガンマ線イベントについて、多段シフターから得られるタイムスタンプ情報により同時刻に発生したと判定される組み合わせについて、電子陽電子の飛跡が測定から得られるガンマ線到来方向とガンマ線反応点に対するハドロン反応点の方向の分布を図7(右)に示す。一様なバックグラウンドの中に、ハドロン反応からのガンマ線に起因すると考えられる顕著なピークが確認できる。この実データに基づくピークの広がりから、ガンマ線到来方向の決定精度を確認することができ、所期の角度分解能が実現できていることが確認できた。



High γ -ray imaging performance was being obtained.

図7：(左)宇宙線陽子反応とそれに起因する e-pair 事象 (右)e-pair 測定で求めたガンマ線到来方向とハドロン反応点の方向とのズレの分布

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

Keita Ozaki, Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, Keiki Kamada, Taichi Kaneyama, Ryo Nakagawa, Hiroki Rokujo
Demonstration of polarization sensitivity of emulsion-based pair conversion telescope for cosmic gamma-ray polarimetry
Nucl. Instr. & Methods in Phys. Research A, 査読有, Vol.833 (2016), pp.165-168
doi: 10.1016/j.nima.2016.07.033

S. Takahashi(1 番目), S. Aoki(2 番目), T. Nakano(19 番目) et al. (全 34 名)
GRAINE 2015, a balloon-borne emulsion γ -ray telescope experiment in Australia
Prog. Theor. Exp. Phys. 査読有, Vol.2016 (2016), 073F01, pp.1-12
doi: 10.1093/ptep/ptw089

K. Ozaki, S. Aoki, K. Kamada, T. Kosaka, F. Mizutani, E. Shibayama, S. Takahashi, Y. Tateishi, S. Tawa, K. Yamada, H. Kawahara, N. Otsuka and H. Rokujo
Development of new-type nuclear emulsion for a balloon-borne emulsion gamma-ray telescope experiment.
JINST, 査読有, Vol.10 (2015), P12018, pp.1-10
doi: 10.1088/1748-0221/10/12/P12018

高橋 覚、青木 茂樹、他 GRAINE collaboration
原子核乾板ガンマ線望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE
日本写真学会誌, 査読有, 第 78 巻 (2015), 第 4 号, pp.228-234
doi: 10.11454/photogrst.78.228

Satoru Takahashi, Shigeki Aoki, Keiki Kamada, Saki Mizutani, Ryo Nakagawa, Keita Ozaki and Hiroki Rokujo
GRAINE project: The first balloon-borne, emulsion gamma-ray telescope experiment
Prog. Theor. Exp. Phys., 査読有, Vol.2015 (2015), 043H01, pp.1-28
doi: 10.1093/ptep/ptv046

高橋 覚、青木 茂樹、尾崎 圭太、小坂 哲矢、柴山 恵美、立石 友里恵、田輪 周一、水谷 深志、山田 恭平、大塚 直登、河原 宏晃、六條 宏紀
原子核乾板望遠鏡による宇宙ガンマ線観測計画 GRAINE のための時間分解多段シフターの開発
応用物理学会放射線分科会誌「放射線」, 査読有, Vol.40 (2015), No.3, pp.127-131

〔学会発表〕(計 71 件)

Shigeki Aoki (for GRAINE collaboration),
GRAINE project: Cosmic Gamma-ray Observation by Balloon-Borne Telescope with Nuclear Emulsion,
KMI2017 (The 3rd KMI International Symposium on "Quest for the Origin of Particles and the Universe"), 2017.1.5-7, Nagoya University (Japan)

Hiroki Rokujo (for GRAINE collaboration),
GRAINE balloon experiment in 2015
Precise observation of cosmic gamma rays by high-resolution emulsion telescope,
19th International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction,
2016.8.22-27, Moscow (Russia)

S. Takahashi (for GRAINE collaboration),
GRAINE project: An overview and status of the 2015 balloon-borne experiment with emulsion gamma-ray telescope,
34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 2015.7.30-8.6, Hague, (NL)

K. Ozaki (for GRAINE collaboration),
GRAINE project: Flight data analysis of balloon-borne experiment in 2015 with emulsion gamma-ray telescope,
34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 2015.7.30-8.6, Hague, (NL)

H. Rokujo (for GRAINE collaboration),
Development of a balloon-style pressure vessel for GRAINE balloon-borne experiment in 2015,
34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 2015.7.30-8.6, Hague, (NL)

H. Rokujo (for GRAINE collaboration),
Latest emulsion detector for cosmic ray observation: high sensitive emulsion film and high speed readout system,
34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 2015.7.30-8.6, Hague, (NL)

S. Takahashi (for GRAINE collaboration),
GRAINE project, high resolution imaging and polarization sensitive gamma-ray observation with balloon-borne large aperture emulsion telescope,
5th International Fermi Symposium,
2014.10.20-24, Nagoya University (Japan)

Shigeki Aoki (for GRAINE collaboration),
GRAINE project: Gamma-ray Astro Imager with Nuclear Emulsion,
26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids, 2014.9.15-19, Kobe University (Japan)

〔その他〕

ホームページ等

<http://newweb.h.kobe-u.ac.jp/labo/aoki/>

<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/appli/graine/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 茂樹 (AOKI, Shigeki)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究所・教授

研究者番号：8 0 2 1 1 6 8 9

(2) 研究分担者

中野 敏行 (NAKANO, Toshiyuki)

名古屋大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号：5 0 3 4 5 8 4 9

長縄 直崇 (NAGANAWA, Naotaka)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・研究員

研究者番号：6 0 4 0 2 4 3 4

(3) 連携研究者

中村 光廣 (NAKAMURA, Mitsuhiro)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：9 0 1 8 3 8 8 9

佐藤 修 (SATO, Osamu)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

研究者番号：2 0 3 7 7 9 6 4

六條 宏紀 (ROKUJO, Hiroki)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・研究員

研究者番号：0 0 7 2 5 8 1 4

吉田 哲也 (YOSHIDA, Tetsuya)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：5 0 2 2 2 3 9 4

濱田 要 (HAMADA, Kaname)

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：2 0 5 6 6 7 9 9

原 俊雄 (HARA, Toshio)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：5 0 1 5 6 4 8 6

鈴木 州 (SUZUKI, Atsumu)

神戸大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：5 0 1 5 6 4 8 6

高橋 覚 (TAKAHASHI, Satoru)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究所・研究員

研究者番号：4 0 4 0 2 4 3 2

(4) 研究協力者

尾崎 圭太 (OZAKI, Keita)

神戸大学・大学院人間発達環境学研究所・研究員

研究者番号：9 0 7 7 8 4 4 0