

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2013

課題番号：21340052

研究課題名(和文) 超高エネルギー宇宙ガンマ線観測用モバイルテレスコープアレイ計画 R & D

研究課題名(英文) R & D of the Mobile Telescope Array Project for Very High Energy Cosmic Gamma-Ray Observations

研究代表者

吉越 貴紀 (Yoshikoshi, Takanori)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：30322366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000 円、(間接経費) 4,380,000 円

研究成果の概要(和文)：超高エネルギーガンマ線天文台の将来計画として、移設式解像型大気チェレンコフ望遠鏡を地上に多数配置した「モバイルテレスコープアレイ」計画を提案し、新技術である移設式望遠鏡の実現に向けて各種 R & Dを行った。移設を容易にするため電力線から独立した蓄電池稼働の望遠鏡を想定し、データ収集電子回路システムの低消費電力化、大容量蓄電池の調査を行った。また、望遠鏡移設後の姿勢再校正を効率化するため、GPSによる自動校正システムを試作し評価した。試験用の大気チェレンコフ望遠鏡を東京大学宇宙線研究所明野観測所に設置し、上記 R & D で利用すると共に、今後の将来計画 R & D の基盤として整備した。

研究成果の概要(英文)：The "Mobile Telescope Array" is a large-scale array of relocatable imaging atmospheric Cherenkov telescopes and proposed as a future Very High Energy (VHE) gamma-ray observatory. Various R & D have been carried out aiming to realize the relocatable telescope which is a new technology in this field. Such telescope should be independent of power cables for easier relocation and operated using only batteries. To this end, a low power consumption data acquisition system was developed and high capacity batteries were investigated. For calibrating telescope attitudes effectively after each relocation, an automatic calibration system utilizing GPS was also developed and estimated. An atmospheric Cherenkov telescope as a test bench for R & D has been located at the Akeno Observatory of the Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo, and will be maintained for various R & D of future VHE projects.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線(実験)

1. 研究開始当初の背景

(1) テラ電子ボルト ($\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) という極めて高エネルギーのガンマ線を放射する天体が解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) と呼ばれる地上ガンマ線望遠鏡によって発見されたのは、わずか 25 年前である。それ以来 IACT によるガンマ線観測技術は急速に発展し、本研究の開始時点では 100 個弱の TeV ガンマ線天体が同定されていた (図 1)。この飛躍は複数 (4 基程度) の IACT を地上に並べて観測する「ステレオ観測法」によってもたらされたが、この観測技術を利用してさらに観測感度を改善するため、研究開始当初は IACT 100 基規模の次期計画 (IACT アレイ) を推進する機運が高まっていた。

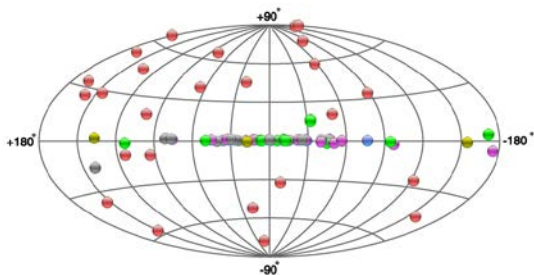


図 1: 研究開始時点 (平成 21 年 4 月) の TeV ガンマ線天体位置の銀河座標系天球図 (<http://tevcat.uchicago.edu/>)。

(2) 上記の TeV ガンマ線天体のうち 10 個程度は超新星残骸であり、その衝撃波は古くから銀河系内宇宙線の加速源として有力視されてきた。実際、それらの TeV ガンマ線を含む多波長の観測データには、宇宙線の主成分である高エネルギー陽子の介在を示唆するものが存在した。しかし、宇宙線のエネルギースペクトルにはペタ電子ボルト ($\text{PeV} = 10^{15} \text{ eV}$) 付近に「knee」と呼ばれる特徴的な折れ曲がりがあり、少なくともこのエネルギー以下では超新星残骸が宇宙線の起源であるという有力な仮説の証拠となるガンマ線信号は、宇宙線の発見から 100 年以上経った現在でも見つかっていない。銀河系内宇宙線の起源を解明するためには、knee を説明するのに不可欠であるが統計量が不足している 100 TeV 領域ガンマ線の観測感度を改善する必要があり、また、より高角分解能で超新星残骸を観測し、陽子起源ガンマ線の放射領域を特定する必要がある。

(3) 通常物質より多くの未知の質量 (ダークマター) が宇宙を満たしていることが、宇宙背景マイクロ波放射の観測等から明らかになった。超対称性粒子ニュートラリーノがダークマターの有力候補であると考えられているが、その質量が TeV 付近にあると予想されるため、ニュートラリーノの対消滅に起因するガンマ線信号を IACT アレイで間接的に発見できる可能性がある。ニュートラリーノ起源のガンマ線スペクトルはラインガン

マ線等の特徴的な構造を有するため、これを検出するには従来よりも高いガンマ線観測感度と共に高エネルギー分解能を有する IACT アレイが必要である。

(4) 上記を含めた未解決の高エネルギー天体物理学を解明することを目的とし、研究開始当初は CTA、AGIS、TenTen といった次世代の大規模 IACT アレイが提案されていた。しかし、目指す物理に応じて必要なガンマ線観測のエネルギー領域、IACT アレイの性能は異なり、望遠鏡の基数を増やしたとしても上記全ての必要性能を一つの望遠鏡配置で最適化することは不可能である。ガンマ線検出過程のモンテカルロシミュレーションの結果、望遠鏡を 150 m 以上の間隔で配置することにより IACT アレイの有効検出面積を広げガンマ線観測感度を上げることができるが、高角分解能、高エネルギー分解能を実現するには望遠鏡を密に配置する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 現在の IACT は地上に固定して設置されるため、上記の様々な IACT アレイの性能を設置前に大規模なモンテカルロシミュレーションで調べて選択する必要がある、設計時の負担およびリスクが大きい。本研究では、容易に移設可能な IACT からなる「モバイルテレスコープアレイ」計画を提案し、望遠鏡配置を変更することで天体や物理に応じてガンマ線観測感度、角分解能、エネルギー分解能を選択的に最適化できる自由度の高い IACT アレイ (図 2) の実現を目指す。

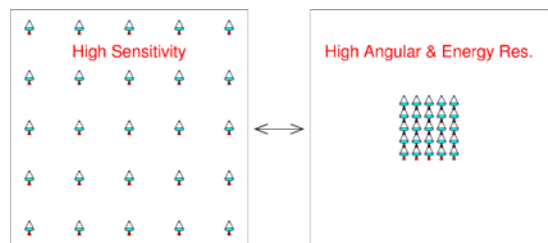


図 2: モバイルテレスコープアレイの概念図。

(2) IACT 100 基規模のモバイルテレスコープアレイに対し現在の技術をそのまま拡張すると、人里離れた砂漠地帯に大型発電施設が必要となる。また、望遠鏡を移設する際に電力線と共に移動するのでは大変作業効率が悪い。これらの問題を解消または軽減するために望遠鏡を電力線から独立させ、個々の望遠鏡の電力を太陽光発電パネルと大容量蓄電池で賄いたい。本研究では、このような IACT の自立システムを実現するために必要な各種 R & D の一部を行い、それらの性能を検証する。

3. 研究の方法

(1) IACT を蓄電池のみで稼働できるようにするため、IACT のデータ収集 (DAQ) 電子回路

システムの低消費電力化を行う。現在稼働中の IACT の DAQ 回路は、解像型カメラの 1 画素当たり 1 つのフラッシュ ADC (FADC) あるいはそれと同等の波形読み出し回路で大気チェレンコフ光量を記録する。FADC とその後段に置かれる信号遅延用の大容量バッファは大量の電力を消費し、この部分の消費電力が DAQ システム全体のそれに占める割合は大きい。一方、地上で観測される大気チェレンコフ光の閃光時間幅は 10 ns 程度と短く、現在用いられている高速 FADC (サンプリングレート 500 MHz 以上) でもサンプリングレンジの大部分は使用されない。

そこで、FADC サンプリングレンジを複数の画素で再利用し、その総数を減らすことで消費電力を抑える (図 3)。まず、画素毎に一定時間ずつ信号を相対的に遅延させ、これらを後段のスイッチング回路に入力する。スイッチング回路では各画素信号を上記遅延時間毎に切替えた一つの信号にまとめ、その出力を単一の FADC で記録する。入力信号数を N とすると、必要な FADC の総数は $1/N$ に減り、総消費電力も同程度に低減する。10 ns 程度の速い信号をマイクロ秒のオーダーで遅延させる必要があり、信号波形の歪みを防ぐため、遅延回路では光ファイバーケーブルを使用する。

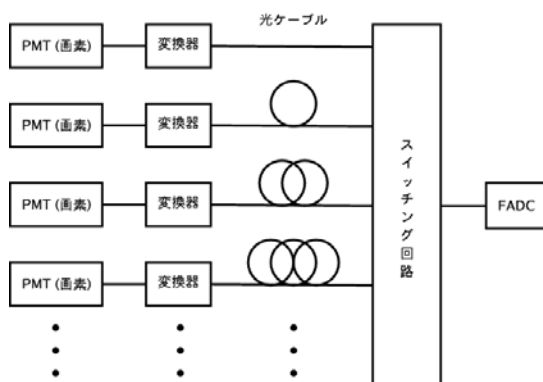


図 3 : FADC 再利用回路の概念図。

(2) IACT の自立システムに不可欠な大容量蓄電池の調査を行う。電気自動車で使用される車載用蓄電池を選定して購入し、その性能を調べる。本研究開始当初の一例として、三菱自動車工業の電気自動車 i-MiEV に搭載されていたリチウムイオン電池は総電力量が 16 kWh であるが、当時稼働していた IACT アレイ CANGAROO の望遠鏡一基の電子回路システムが 2 kVA 以下で運用されていたことを考慮すると、車載用蓄電池で一晩継続して観測することは非現実的ではない。上記の低消費電力 DAQ システムを大容量蓄電池で試稼働し、モバイル望遠鏡アレイに必要な蓄電池の仕様を検討する。

(3) モバイル望遠鏡アレイでは望遠鏡が多数である上それらを移設するため、望

遠鏡の姿勢校正 (経緯台回転軸の校正) を行う回数が飛躍的に増える。この作業を効率化するため、GPS を利用した望遠鏡姿勢の自動校正システムを開発する。GPS アンテナ 2 個で GPS コンパス (図 4) を作り、それを望遠鏡の光軸と並行に設置して干渉測位方式で測定を行うことにより、原理的に 0.1° 程度の精度で光軸の方向が決まる。ある程度時間をかけて測定の統計量を増やすことにより方向測定の精度はさらに改善されるため、IACT に必要な 0.01° の精度を簡単な校正システムで達成できる可能性がある。試作した校正システムを CANGAROO 望遠鏡に取り付けて試稼働し、その性能を調べる。

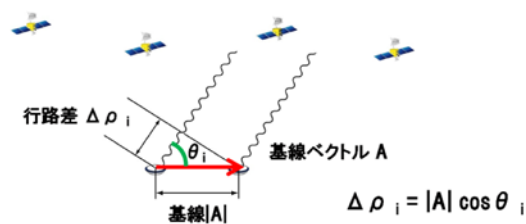


図 4 : GPS コンパスによる干渉測位。

(4) 開発した低消費電力 DAQ システムの性能を大気チェレンコフ光の試験観測によって確認するため、試験用の IACT を東京大学宇宙線研究所明野観測所に設置し、整備する。甲南大学で使用されていた中古の 3 m 口径 IACT を譲り受け、大気チェレンコフ光観測で使用できる状態まで再生する。試験観測用に 32 画素 (光電子増倍管) の解像型カメラ、パターントリガー回路、データ収集用オンラインプログラム等を準備し、それらを低消費電力 DAQ 回路と共に試験用望遠鏡に導入する。このシステムで宇宙線空気シャワーの大気チェレンコフ光像を観測し、システムが IACT として稼働することを実証すると共に、観測中の消費電力をモニターして低消費電力システムとしての性能を評価する。また、このシステムで TeV ガンマ線領域の標準光源であるかに星雲からのガンマ線の検出を試みる。

(5) 本研究のメンバーが所属する CANGAROO チームは、オーストラリアの砂漠地帯における TeV ガンマ線天体の観測研究において、現地アデレード大学の研究者と強固な協力体制を維持してきた。本研究代表者、分担者とアデレード大学グループは、10 TeV 以上におけるガンマ線天体の高感度観測を目指して TenTen 計画およびそのパスファインダーである PeV Explorer 計画を推進しており、これらの将来計画は本研究と目的の一部を共有する。従って、上記の研究は PeV Explorer 計画の R & D を兼ねる形で実施される。

4. 研究成果

(1) IACT の DAQ システムの低消費電力化において当初は FADC を利用する予定であったが、

同等の性能を持ちながら消費電力をさらに低減できるアナログメモリーセル (AMC) に開発対象を変更した。AMC 回路はキャパシターとサンプリングスイッチのペアの並列回路であり、各キャパシターはスイッチが OFF になった時点の入力電圧をアナログ値で保持する。サンプリングスイッチは遅延回路によって制御され一定時間間隔で順次 OFF となり、入力信号の電圧波形を記憶する。記憶された波形は後に ADC で読み出され、デジタル値に変換される。

KEK を中心とするオープンソースコンソーシアム (Open-It) と協力して AMC の開発を進めることにした。既に雛型が出来上がっていた 1 GHz サンプリング AMC ASIC の設計を回路シミュレーションの結果に基づいて改良し、ASIC チップの試作を 2 回行った。1 回目の試作チップについて基本的な性能を調査し、アナログ帯域については遮断周波数が 200 MHz 以上であることを確認した。この値は目標値より低いものの、R & D 用途では十分なレベルである。また、消費電力は 1 チャンネル (画素) 分の 64 セル当り外部 ADC を含めて約 180 mW となり、十分低いレベルに抑えることができた。2 回目の試作においてはウィルキンソン ADC を ASIC 中に実装し、さらに回路全体の消費電力を低減することに成功した。2 回目の試作チップを使用して試験観測用の AMC ボードを製作することに決め、一つの AMC ASIC を 8 チャンネルで再利用する回路を設計し、これを 4 枚製作した (図 5)。全ボードで 32 チャンネル分に対応し、1 チャンネルのサンプリング深さは 64 ns に相当する。1 枚の AMC ボードに 64 ns の相対遅延を加えながら 10 ns 幅のテストパルスを入力して読み出した結果を図 6 に示す。



図 5 : 8 チャンネル入力 AMC ボード。

上記 AMC ボードに適切に信号を入力するための光ファイバー遅延モジュールおよび E/O、O/E 変換器を 32 チャンネル分別途作成した。必要な遅延時間は最長 $64 \times 7 = 448$ ns であり、これは光ファイバー約 90 m に相当する。遅延モジュールを小型化するため、光ファイバーの芯線のみを巻き取り、容器に収納した。

また、この処理による自己干渉ノイズが無視できることを確認した。

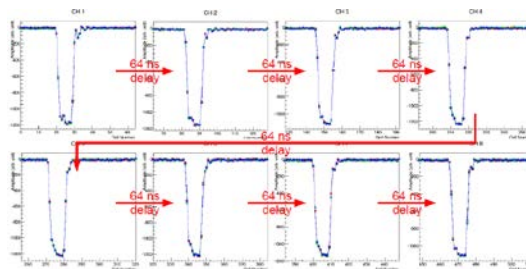


図 6 : AMC ボードで記録した 8 入力チャンネルのテストパルス波形。

(2) 大容量蓄電池の調査として、まず鉛蓄電池と太陽光発電パネルを購入し、屋外で太陽光を照射しながら出力電圧安定性等の長時間測定 (数日から一週間) を行った。その結果、鉛蓄電池では出力電圧が大きな温度依存性を持つことが判明し、電圧を安定化する処置が必要となることがわかった。その後車載用リチウムイオン電池を購入し、鉛蓄電池との比較を開始したが、上記 DAQ システムの開発が遅れたため、蓄電池による IACT システムの試稼動は本研究期間中に実施されず、今後の課題となった。

(3) GPS コンパスの OEM ボードと GPS アンテナ 2 個を購入し、GPS の干渉測位方式を利用した望遠鏡姿勢の自動校正システムを試作した。本校正システムで GPS 信号を受信しながら長時間 (24 時間) 測定を実施したところ、条件の良い測定環境下では約 100 分の連続測定で IACT に要求される 0.01° 以下の方向測定精度が得られることがわかった。その後、本校正システムを CANGAROO 望遠鏡に取り付け、望遠鏡を様々な方向に向けながら方向測定を行った。その結果、おそらく望遠鏡鏡面による GPS 信号の反射波の影響 (マルチパス) で測定が不安定になることが判明した。GPS コンパスを IACT に設置して使用する場合は、GPS アンテナの取り付け位置と方向に工夫の余地があり、実用化のためには今後さらなる調査を行う必要がある。

(4) 3 m 口径の中古 IACT を甲南大学から譲り受け、2010 年 11 月に東京大学宇宙線研究所明野観測所へ移設した。本 IACT は 1998 年製であり老朽化が進んでいたため、以下を行って運用可能な状態まで再生した。

- ① 移設前に屋外に設置されていたため、駆動モーターに雨水が入り故障していた。また、筐体が鉄製であるため錆付きが進んでいた。移設前に駆動モーターを修理すると共に、筐体の再塗装を行った。
- ② 本 IACT の光学系は Davies-Cotton 光学系と呼ばれ、小型球面鏡 18 枚の複合鏡である。小型鏡はガラス製で、表面のアルミ

ニウム蒸着膜はかなり劣化していた。これらを安価に再蒸着するため、国立天文台岡山天体物理観測所の真空蒸着装置を借用した。全 18 枚の再蒸着を 2012 年までに完了し、鏡面反射率は大気チェレンコフ光の有効波長域（～400 nm）で 90 % 以上に回復した。これらを望遠鏡に再設置した後、2013 年に角度の再調整を終了した（図 7）。



図 7：光学系の再構築後の明野 IACT。

- ③ 本 IACT の駆動制御装置は移設前には一部のみが残されている状態だったため、デジタル I/O ボード、駆動制御用 PC 等を補って駆動制御システムを再構築した。エンコーダーの読み出しプログラム、駆動モーターを制御するための位置決めコントローラーの制御プログラムを製作し、これらを組み合わせて駆動制御 PC 上で制御ループプログラムを構築した。このシステムで駆動制御試験を行い、指向精度が IACT に要求される 0.01° 以下になっていることを確認した（図 8）。

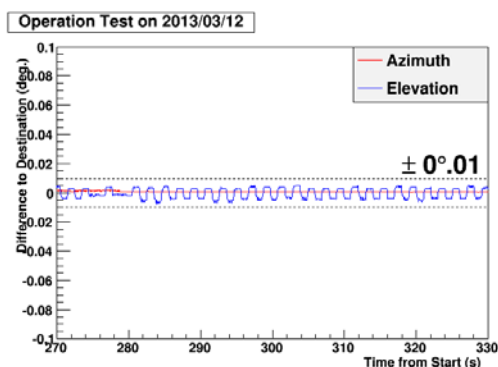


図 8：明野 IACT 駆動制御試験時の指向誤差。

本 IACT で試験観測を行うため、別途 32 画素（スーパーバイアルカリ光電子増倍管）解像型カメラ、FPGA を利用したパターントリガー回路、光電子増倍管に供給する高電圧の配電盤を製作し、低消費電力 DAQ システムと共に本 IACT へ導入した。DAQ システムの開発に予想以上の時間を要したため、2014 年 6 月時点では上記装置の調整を行っており、試験観測

は 2014 年夏以降に実施される。本 IACT は現在国内で唯一の IACT であり、CTA を含めた IACT アレイ将来計画の様々な R & D、共同利用研究で利用される予定である。

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 2 件）

- ① M. Ohishi, T. Abe, R. W. Clay, B. R. Dawson, Y. Matsubara, M. Mori, T. Naito, T. Okuda, A. Oshima, G. P. Rowell, D. Yahashi, T. Yoshikoshi, “Status of R & D Studies of Very High Energy Gamma-Ray Astrophysics at Energies Greater than 10 TeV in Akeno”, Proceedings of the 33rd International Cosmic Ray Conference (Rio de Janeiro), 査読無, in press (2014)
- ② T. Yoshikoshi, R. W. Clay, B. R. Dawson, Y. Matsubara, M. Mori, T. Naito, K. Nishijima, M. Ohishi, G. P. Rowell, T. Toyama, “R & D Studies for Very High Energy Gamma-Ray Astrophysics at Energies Greater than 10 TeV”, Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference (Beijing), 査読無, 9, 231-234 (2011), DOI: 10.7529/ICRC2011/V09/1260

〔学会発表〕（計 16 件）

- ① M. Ohishi, “Status of R & D Studies for Very High Energy Gamma-Ray Astrophysics at Energies Greater than 10 TeV in Akeno”, 33rd International Cosmic Ray Conference, July 2-9, 2013, Rio de Janeiro
- ② 吉越貴紀、「PeV Explorer 計画 R & D(7)」、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学
- ③ 吉越貴紀、「PeV Explorer 計画 R & D(6)」、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 13 日、京都産業大学
- ④ 大石理子、「明野大気チェレンコフ望遠鏡光学系の再構築 (2)」、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012 年 9 月 13 日、京都産業大学
- ⑤ 吉越貴紀、「PeV Explorer 計画 R & D(5)」、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学
- ⑥ 大石理子、「明野大気チェレンコフ望遠鏡光学系の再構築」、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 24 日、関西学院大学
- ⑦ 吉越貴紀、「PeV Explorer 計画 R & D(4)」、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 19 日、弘前大学
- ⑧ T. Yoshikoshi, “R & D Studies for Very High Energy Gamma-Ray Astrophysics at

Energies Greater than 10 TeV” , 32nd
International Cosmic Ray Conference,
August 11-18, 2011, Beijing

- ⑨ M. Ohishi, “R & D Studies for Very High Energy Gamma-Ray Astrophysics at Energies Greater than 10 TeV” , Annual Scientific Meeting 2011, Astronomical Society of Australia, July 4-8, 2011, University of Adelaide
- ⑩ 吉越貴紀、「PeV Explorer 計画 R & D(3)」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 14 日、九州工業大学
- ⑪ 遠山健、「大気チェレンコフ望遠鏡用高速サンプリング ASIC アナログメモリーセルの開発 (2)」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 14 日、九州工業大学
- ⑫ 吉越貴紀、「TenTen 計画 R & D (2)」、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学
- ⑬ 中山幸一、「GPS を利用した望遠鏡姿勢の自動較正 (2)」、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学
- ⑭ 遠山健、「大気チェレンコフ望遠鏡用高速サンプリング ASIC アナログメモリーセルの開発」、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 20 日、岡山大学
- ⑮ 吉越貴紀、「TenTen 計画 R & D (全体構想)」、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 11 日、甲南大学
- ⑯ 中山幸一、「GPS を利用した望遠鏡姿勢の自動較正」、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 11 日、甲南大学

[その他]

ホームページ等

http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~tyoshiko/pev_explorer/index-j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉越 貴紀 (YOSHIKOSHI, Takanori)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

研究者番号：30322366

(2) 研究分担者

森 正樹 (MORI, Masaki)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：80210136

大石 理子 (OHISHI, Michiko)

東京大学・宇宙線研究所・助教

研究者番号：10420233

(3) 連携研究者

門叶 冬樹 (TOKANAI, Fuyuki)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：80323161

梶野 文義 (KAJINO, Fumiyoshi)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：50204392

内藤 統也 (NAITO, Tsuguya)

山梨学院大学・経営情報学部・教授

研究者番号：50319084