

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03605

研究課題名(和文)次世代大気蛍光望遠鏡による極高エネルギー宇宙線事象再構成手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of event reconstruction technique for fluorescence telescope in future huge cosmic ray observatory

研究代表者

池田 大輔 (Ikeda, Daisuke)

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：60584258

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：将来の大規模極高エネルギー宇宙線観測実験を見据え、簡素化した大気蛍光望遠鏡単独での事象再構成手法を開発すること、焦点面検出器を最適化することの2つにより、安価かつ必要な精度を満たす次世代大気蛍光望遠鏡を開発した。

本観測手法の特性を活かし、波形そのものを用いた事象再構成手法を開発した。また焦点面検出器を最適化し、視野角 $24^\circ \times 18^\circ$ の広角望遠鏡を新たに開発した。本再構成手法を用いると、この広角望遠鏡による到来方向分解能は $2.3^\circ$ となり、質量組成測定の実験要求を満たしていることを確認した。これを米国のテレスコープアレイ(TA)実験サイトに構築し、TA実験との宇宙線同時観測により実機での性能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した事象再構成手法や、広角化したことで少数台の検出器で広い面積を安価にカバーする次世代大気蛍光望遠鏡、評価された性能は、将来の大規模極高エネルギー宇宙線観測実験を担う観測手法を選択する際に必要不可欠な情報である。

このような大規模実験が実現されれば、これまで明らかにされていない極高エネルギー宇宙線の起源や加速機構、地球までの伝播過程、宇宙空間の磁場に対する新たな知見を得ることが可能であり、本研究成果はそれを強く推進するものである。

研究成果の概要(英文)：For future large-scale ultra-high energy cosmic ray observation, we have developed a next-generation fluorescence telescope that is cost-effective and satisfies the required resolution through both of a development of an event reconstruction method that can be used with the telescope alone and an optimization of the focal plane of the telescope.

We developed an event reconstruction method using observed waveforms itself. We also optimized the focal plane of the telescope and developed a new wide-angle telescope with a field of view of  $24 \times 18$  degrees. By applying the developed reconstruction method, the wide-angle telescope has a resolution of 2.3 degrees for the arrival direction, which satisfies a requirement for mass composition measurements. The new telescope was actually constructed at the site of Telescope Array (TA) experiment in the U.S., and its performance is evaluated by simultaneous observations of cosmic rays with the TA experiment.

研究分野：極高エネルギー宇宙線、宇宙線の地球科学への応用

キーワード：極高エネルギー宇宙線 大気蛍光望遠鏡 事象再構成 フレネルレンズ 光学シミュレーション 米国  
ユタ州 焦点面検出器

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球上の粒子加速器で到達できるエネルギーの1千万倍に相当する、 $10^{20}$ eV を超えるエネルギーを持つ極高エネルギー宇宙線が観測されているが、その起源や加速機構は解明されておらず、宇宙線分野における解明すべき課題である。

極高エネルギー宇宙線は、北半球で Telescope Array (TA) (有効検出面積  $700\text{km}^2$ ) [1,2]、南半球で Auger (有効検出面積  $3000\text{km}^2$ ) [3,4] による観測が継続されており、それぞれ拡張計画である TAx4 [5]、AugerPrime [6] の建設が進められている。極高エネルギー宇宙線は宇宙磁場による偏向が小さく、宇宙背景放射との相互作用により伝搬距離が制限されるため、宇宙線の到来方向から起源天体を特定できる可能性がある。一方、これまでの研究から本手法に関しては、重い組成への遷移 [7]、伝搬過程だけでなく起源天体での加速限界も考慮する必要があるエネルギースペクトルの折れ曲がりの解釈 [8]、宇宙磁場のフィラメント構造の影響 [9] などの多くの課題があることが分かっている。この状況においては、軽い組成のみを分離した到来方向分布や、組成の情報を加えた到来方向ごとのエネルギースペクトルを得ることが有用である。そのため、極高エネルギー宇宙線の将来計画として、TAx4/AugerPrime の10倍を超える有効検出面積を持ち、化学組成に感度のある実験が期待されている。

将来の大規模極高エネルギー宇宙線観測実験の観測手法として、これまでに実績のある大気蛍光望遠鏡を簡素化した次世代大気蛍光望遠鏡の開発が進んでいる。大気蛍光望遠鏡は、化学組成に感度がある空気シャワーの縦方向発達を直接測定する点に利点があり、現行の TA, Auger において成果をあげている。このような望遠鏡を20~30km 間隔でアレイ状に配置することで、大面積をカバーし、かつ化学組成に感度のある観測が可能となる。大規模実験を構築するには検出器の費用を大きく削減する必要があり、本手法は主に(a)多数の撮像素子によるイメージングから少数の撮像素子による時間情報解析への遷移(b)高エネルギー事象に特化する事による光学系の小型化の2点で解決する。このような次世代大気蛍光望遠鏡の開発は現在 FAST [10] 及び CRAFT [11] により進められている。両実験共に試作機による宇宙線観測に成功し、FAST は TA, Auger 間の相互較正に着手し、CRAFT はフレネルレンズの採用、望遠鏡建屋の排除等により検出器費用は既存の大気蛍光望遠鏡の1/10に到達した。しかし現在、このような検出器単独で宇宙線事象を再構成する手法は確立されておらず、宇宙線のエネルギー、化学組成、到来方向の測定精度がどこまで到達できるのか不鮮明である。これは本観測手法を推進する上で解決しなければならない課題である。

### 2. 研究の目的

(1) 簡素化された次世代大気蛍光望遠鏡単独での宇宙線再構成手法を確立する。次世代大気蛍光望遠鏡では、光学素子の数を減らしたことで、イメージングから時間情報へと情報が遷移しているため、時間情報を活用した手法を開発する。

(2) (1)の解析を行うことを前提として、望遠鏡の焦点面検出器を最適化する。焦点面検出器を構成する各光学素子からの信号波形を用いるため、その素子の数や大きさ、形状を変更し、安価かつ必要な再構成精度を満たす次世代大気蛍光望遠鏡を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 検出器シミュレーションを用いて再構成手法を開発する。これまでの大気蛍光望遠鏡における事象再構成では、信号到来時間と信号積分値を使うに留まり、時間情報である信号波形の形状そのものを用いた再構成は行われていなかったため、波形情報を活用する。

(2) 焦点面検出器の最適化を行う際に用いる検出器の光学シミュレーションが、実データを良く再現していることを確認する。実機でLEDを用いて焦点面上でのスポット形状を取得し、光学シミュレーションで得られた形状と比較する。

(3) 焦点面検出器を構成する光学素子の数、大きさ、形状を最適化する。検出器シミュレーション上に任意の光学素子群を設定し、(1)の手法を用いて再構成精度を求め、その値と費用の両者から最適な形状を探索する。

(4) 最適化された焦点面検出器を持つ新たな望遠鏡を実際に構築し、宇宙線空気シャワーを観測することで、実機を用いた性能評価を行う。本研究では米国ユタ州の TA 実験サイトに設置し、TA 実験との宇宙線同時観測を実施することで、検出器感度や再構成精度を検証する。

#### 4. 研究成果

(1) 波形を用いた事象再構成手法を開発した。シミュレーション上で宇宙線空気シャワーの到来方向、到来位置、エネルギー、最大発達深さなどを与えて疑似データを生成し、それを観測したデータと比較することで、データを最も良く再現する空気シャワーパラメータを探索する。ここで、比較する際には波形そのものを直接比較している。図1に、本研究で最終的に得られた検出器デザイン（研究成果(3)参照）における、単一事象における $\chi^2$ 平面の例と、5000事象の再構成結果から得た到来方向、到来位置の分布を示す。本手法を用いて見積もった分解能は、到来方向で $2.3^\circ$ 、到来位置で160mである。これは化学組成を推定する際に、陽子とヘリウムを分離するために必要な到来方向分解能 $3^\circ$ を満たしている。

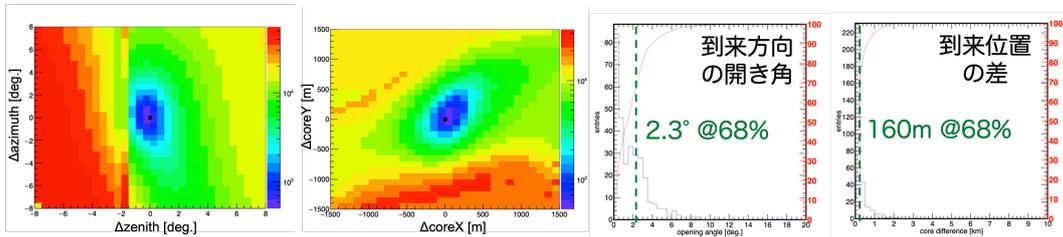


図1 シミュレーションデータで得られた、エネルギー $10^{19.5}$ eVの空気シャワーに対する単一事象における到来方向（左）、到来位置（中央左）の $\chi^2$ 平面の例と、5000事象の再構成結果における真の値との到来方向開き角（中央右）と到来位置（右）の分布

(2) 検出器の光学シミュレーションを検証するため、実機とシミュレーションでスポットサイズを比較した。実機の焦点面にスキャナーを設置し、レンズから49m離れた位置に光源を置いた場合のスポットを取得し、シミュレーションで得られた結果と比較した。図2に実機で得られたスポット形状、シミュレーションで得られた形状、両者の水平方向分布を比較した結果を示す。スポットの大きさは両者共に約40mmと良く一致していることが分かり、本シミュレーションを用いて検出器デザインの最適化をすることに問題はないことが分かった。ただし詳細に見ると違いが見えており、その原因については今後調査する予定である。

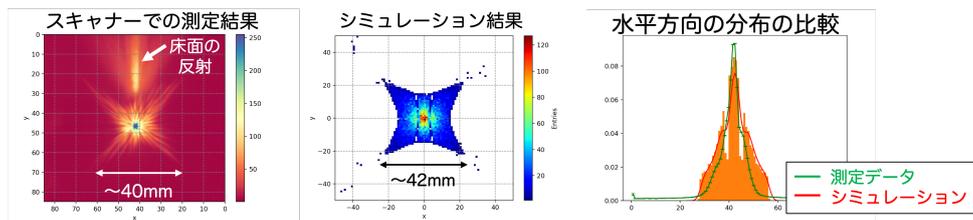


図2 実機（左）とシミュレーション（中央）で得られたスポット形状と、両者の水平方向分布を比較した結果（右）

(3) 焦点面検出器を構成する光学素子の数、大きさ、形状を最適化した。様々な大きさや形状の光学素子を配置した焦点面検出器をシミュレーターに実装し、空気シャワーの観測シミュレーションを行い、事象再構成精度の変化を調べた。研究開始当初、空気シャワーパラメータの違いが波形に現れやすい三角形形状の光学素子が有力であると想定していたが、実際には円形形状の物と大きな違いは見られなかった。これは本検出手法ではスポットサイズが大きい上、S/Nが悪いため、三角形形状特有の波形の違いが顕著に現れないためであると考えられる。これらの調査の結果、本研究では5インチPMTを採用することにした。試作機で用いた8インチPMTと比較すると、形状が小さくなったことでS/Nが向上し、感度面が平面となったことで系統誤差が改善される。これを既存の試作機の望遠鏡の筐体内に12素子設置することで、望遠鏡1台の視野を試作機の $8^\circ \times 8^\circ$ から、 $24^\circ \times 16^\circ$ へと大幅に広げた広角望遠鏡をデザインした（図3左）。

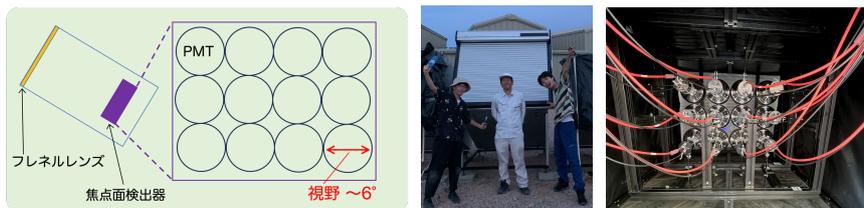


図3 最終的にデザインされた焦点面検出器の模式図（左）と、米国ユタ州のTA実験サイトに構築した広角望遠鏡の外観（中央）、背面から撮影した望遠鏡内部（右）

(4) 再設計された焦点面検出器を搭載した次世代大気蛍光望遠鏡を実際に構築し、実機での性能評価に必要なデータを取得した。米国ユタ州の TA 実験サイトにおいて、(3)で示した新型の焦点面検出器を構築し、既存の試作機の焦点面検出器を入れ替える形で実装した。また 2024 年 8 月に、TA 実験との宇宙線同時観測を実施した。TA 実験の大気蛍光望遠鏡で生成した宇宙線トリガーを本広角望遠鏡に入力し、TA 実験と同一事象を観測することで、検出器感度や再構成精度の検証が可能である。図 4 に本試験観測で得られた、複数の PMT で同時に信号を捉えた事象例を示す。今後、取得したデータを用いて性能評価を進める予定である。

同時観測を行った 8 月は、制作の遅れや天候から、観測はわずか 3 日間となり、海外出張費の高騰から追加の観測も行うことができなかった。そのため期待される宇宙線事象観測数は 3 事象程度である。これは実機を用いた検出器の感度の確認には十分であるが、空気シャワーの再構成精度を検証するには不十分である。TA 実験サイトに構築した新型広角望遠鏡はいつでも稼働できる状況としてあり、次年度以降に追加観測を行い、再構成精度の検証まで行う予定である。

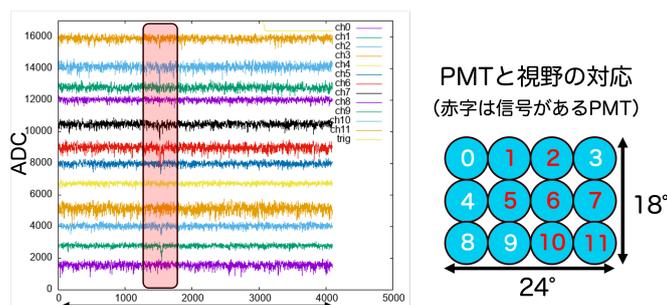


図 4 TA 実験サイトにおいて実機で観測した、複数の PMT で同時に信号を捉えた事象例

<引用文献>

- [1] T. Abu-Zayyad et al., Nucl. Instrum. Meth. A 689, 87 (2013)
- [2] H. Tokuno et al., Nucl. Instrum. Meth. A 676, 54 (2012)
- [3] Pierre Auger Collab., Nucl. Instrum. Meth. A 523, 50 (2004)
- [4] Pierre Auger Collab., Nucl. Instrum. Meth. A 798, 172 (2015)
- [5] Telescope Array Collab., Nucl. Instrum. Meth. A 1019, 165726 (2021)
- [6] Pierre Auger Collab., arXiv:1604.03637
- [7] A. Aab et al., Phys.Rev.D. 90, 122005 (2014)
- [8] R. A. Batista et al., Front. Astron. Space Sci. 6, 23 (2019)
- [9] J. H. Kim et al., Sci. Adv. 5 (2019)
- [10] T.Fujii et al., Astropart. Phys. 74, 64-72 (2016)
- [11] Y. Tameda et al., PTEP 043F01 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ikeda Daisuke, Tameda Yuichiro, Tomida Takayuki, Yamazaki Katsuya, Kagitani Takashi, Shibata Norimichi, Nishio Eiji, Iwakura Hirokazu, Nakamura Yuya, Kubota Yuto, Saito Ryosuke	4. 巻 2156
2. 論文標題 Status and prospects of the CRAFTT project for the next generation UHECR observation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012084 ~ 012084
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/2156/1/012084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Yuichiro Tameda
2. 発表標題 Detector optimization and observation plan of the CRAFTT project for the next generation UHECR observation
3. 学会等名 38th International Cosmic Ray Conference（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田大輔
2. 発表標題 CRAFTT実験14：新型広角望遠鏡による観測と今後の計画
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 齊藤亮介
2. 発表標題 次世代の超高エネルギー宇宙線観測へ向けたXmax異方性探索の検討
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Tameda
2. 発表標題 Progress and future prospect of the CRAFT project for the next generation UHECR observatory
3. 学会等名 6th International Symposium on Ultra High Energy Cosmic Rays (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Saito
2. 発表標題 Examination of Xmax anisotropy for the next generation Ultra-high energy cosmic rays observation
3. 学会等名 6th International Symposium on Ultra High Energy Cosmic Rays (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西尾瑛司
2. 発表標題 CRAFT望遠鏡のための波形フィットによる宇宙線空気シャワー再構成手法の開発
3. 学会等名 第7回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上実哉斗
2. 発表標題 次世代宇宙線検出器CRAFT望遠鏡の検出器較正
3. 学会等名 第7回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 多米田裕一郎
2. 発表標題 CRAFF実験13:今後の観測計画
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齊藤亮介
2. 発表標題 超高エネルギー宇宙線の質量組成異方性探索に必要な統計量の見積もり
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Tameda
2. 発表標題 Progress and future prospect of the CRAFFT project for the next generation UHECR observation
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kubota
2. 発表標題 Progress in optimizing the detection surface structure of CRAFFT
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Tomida
2. 発表標題 Development of autonomous observation system for next-generation cosmic ray telescope
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D. Ikeda
2. 発表標題 Status and prospects of the CRAFT project for the next generation UHECR observation
3. 学会等名 17th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田規迪
2. 発表標題 次世代型極高エネルギー宇宙線観測用望遠鏡 CRAFTに用いる光電子増倍管の感度較正
3. 学会等名 第39回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西尾瑛司
2. 発表標題 CRAFT実験11：波形フィットによる宇宙線空気シャワー再構成手法の開発
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 多米田裕一郎
2. 発表標題 CRAFTT実験12：観測計画と準備状況
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	多米田 裕一郎  (Tameda Yuichiro)		
研究協力者	富田 孝幸  (Tomida Takayuki)		
研究協力者	山崎 勝也  (Yamazaki Katsuya)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------