

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：34412

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K17710

研究課題名(和文)単素子蛍光望遠鏡の自立稼働システムによる超高エネルギー宇宙線観測

研究課題名(英文)Ultrahigh-energy cosmic ray observation by the automatic system with a single pixel fluorescence telescope

研究代表者

多米田 裕一郎 (TAMEDA, Yuichiro)

大阪電気通信大学・工学部・講師

研究者番号：90467019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年の観測から、最高エネルギー宇宙線の到来方向に頻度の高い領域が報告されている。最高エネルギー宇宙線は宇宙空間中の磁場中でも直進することができるため、高統計で到来方向を測定することで起源天体の同定が期待されているが、到来頻度が極めて低いため観測装置の大規模化が必須である。このような大規模観測装置の実現を目的に、低コスト検出器として単素子大気蛍光望遠鏡を開発した。本研究では、この低コスト検出器を用いて宇宙線の試験観測を行い、期待されている感度を持つことを確認し、最高エネルギー領域の宇宙線の観測に成功した。自立稼働システムの構築も進んでおり、2018年秋より本システムによる定常観測を予定している。

研究成果の概要(英文)：Recent observations have reported a cluster of events called as the hotspot in the arrival directions of ultrahigh-energy cosmic rays (UHECRs). Since the UHECRs can propagate straight even in the galactic or extragalactic magnetic field, it is expected to clarify the origin of them by measuring the arrival directions with high statistics. However, it requires the huge scale observatory due to the quite low flux of UHECRs. For the purpose of realizing such a huge scale observatory, we have developed a fluorescence telescope with a single pixel as a low cost cosmic ray detector. In this research, we tested the performance of the low cost detector and confirmed that the detector has the expected sensitivity. We also succeeded to observe air showers of UHECR. Construction of an automatic observation system is progressing, and the examination is partially finished. From autumn of 2018, we will start regular operation.

研究分野：超高エネルギー宇宙線物理学

キーワード：超高エネルギー宇宙線 宇宙線空気シャワー 大気蛍光望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

宇宙線は、宇宙空間から到来する陽子や原子核といった高エネルギー粒子である。これまで観測された宇宙線のエネルギーは 10^9 - 10^{20} 電子ボルトと広い領域にわたる。最も高い宇宙線のエネルギーは、 10^{20} 電子ボルト程度で、世界最大の粒子加速器で実現可能なエネルギーより7桁も高い。このような超高エネルギー宇宙線(UHECR)の起源は、活動銀河核や線バーストなど激しい天体現象が考えられるが、いまだその起源天体や加速機構は解明されていない。

UHECR の起源解明には、「エネルギースペクトル」「質量組成」「到来方向分布」を明らかにすることが重要である。現在、日米を中心とした Telescope Array(TA)実験や、Pierre Auger Observatory(Auger 実験)といった国際共同実験が、UHECR を観測している。これらの実験により、超高エネルギー領域における高精度かつ高統計の測定が可能となり、エネルギースペクトルにおいては GZK 限界に矛盾しない到来頻度のカットオフが確定的となった。さらに TA 実験の結果より、超銀河面のこぐま座付近に UHECR の到来頻度が優位に高いホットスポットと呼ばれる領域の存在が示唆されている。UHECR は荷電粒子であるが、そのエネルギーの高さから銀河磁場中を直進する性質がある。よって、さらなる定常観測により高統計で観測することで今後起源天体の同定が期待されている。一方で、UHECR の直進性は、宇宙線粒子種を陽子と仮定しており、質量組成の解明も重要である。

UHECR の起源解明には、到来方向分布と質量組成を高い統計で測定することが重要である。そのためには観測装置の大規模化が必要である。到来方向分布と質量組成の両方を測定するためには大気蛍光望遠鏡(FD)を用いる必要があるが、現状のFDの製作は高コストであり、大規模化を難しくしている。よって、将来の UHECR 観測装置の大規模化を実現するため、様々な検出器の研究開発が進んでいる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、申請者がこれまで開発・試験を行ってきた従来のFDの1/10のコストで製作可能なフレネルレンズを用いた単素子蛍光望遠鏡を4台設置し、電力供給と自動データ収集系の自立稼働を達成し、UHECR を観測することである。

3. 研究の方法

本研究では、フレネルレンズとUV透過フィルター、そして1本の光電子増倍管からなる単素子大気蛍光望遠鏡(Cosmic Ray Fluorescence Fresnel-lens Telescope, CRAFFT)を用いる。従来のFDは、大口径の反射鏡を必要とするため頑強な構造が必要であり、また多数の光電子増倍管を用いる

ため、高コストであった。CRAFFT 望遠鏡は、フレネルレンズを用いることで構造を簡素化し、光電子増倍管も大口径のものを1本とすることで、大幅な低コスト化を実現する(図1.)。光電子増倍管が1本になることで、空間分解能がなくなるが、データ取得回路にFADCを用いることで信号の到来時間情報が得られ、複数箇所に設置された望遠鏡により観測をすることで、この欠点を補う。

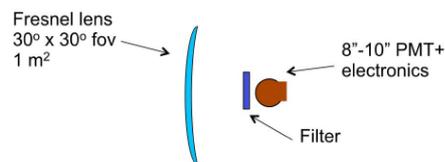


図 1. 低コスト望遠鏡の概念図。
[P.Privitera, et. al. UHECR(2012)]

CRAFFT 望遠鏡による UHECR の観測では、望遠鏡は広大な領域に渡って、野外に設置されることが想定される。そのため、野外に設置することが可能な構造であり、遠隔で作業ができ、自立稼働することが求められる。よって、すべての機器はネットワークを介して制御可能となるよう観測システムを設計する。また電力も自給とする必要があるため、太陽光発電パネルとバッテリーによる電力自給システムを構築する。

すでに開発が進んでいる、CRAFFT 望遠鏡の試作機を用いて、米国ユタ州の TA 実験サイトにて試験観測を行い、基礎的なデータを収集した後、望遠鏡の再設計を行う。再設計した望遠鏡を4台製作し、TA 実験サイトに宇宙線観測を実際に実施する。

4. 研究成果

(1) レーザーを用いた望遠鏡感度試験

CRAFFT 望遠鏡の試作機を用いて、2016年9月と11月に米国ユタ州の TA 実験サイトにて試験観測を行った。試験観測の目的は、望遠鏡の感度の確認、及び電源設備の無い野外での動作確認である。

試験観測では、宇宙線空気シャワーの頻度が非常に低いことから、空気シャワーより発せられる蛍光と同じ波長の紫外線レーザーを擬似宇宙線空気シャワーとして用いた。紫外線レーザーは、TA 実験で大気透明度の測定に用いられる CLF (Central Laser Facility) を用いた。

図2のように、望遠鏡試作機をピックアップトラックの荷台に積み、CLF より 2, 5, 10km と移動させながら、レーザーの観測を行った。CLF レーザーは GPS の PPS 信号と同期しているため、本試験観測では波形収集のタイミングに GPS からの PPS 信号を用いた。図3が、本試験観測で得られた実際のレーザーの波形データである。2, 5, 10km とともに CLF レーザーの検出に成功した。



図 2. (左)CRAFFT 望遠鏡試作機による試験観測の様子。(右) 試験観測地点 A、B、C と、TA 実験の望遠鏡サイト(BR) 及び CLF の配置図。

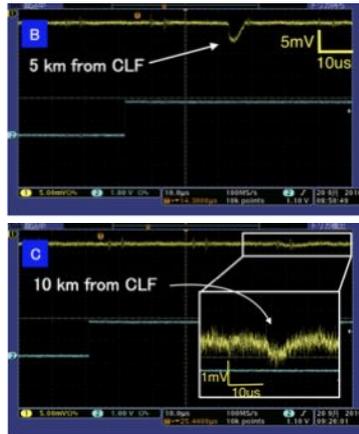


図 3. 2016 年 9 月の試験観測で、試験観測地点 B、C で得られた CLF レーザーの波形データ。

望遠鏡の構成を考慮して、シミュレーションにより望遠鏡の感度を見積もった。様々な距離からレーザーを観測したときの CRAFFT 望遠鏡で得られる光電子数と、実際のデータとの比較を図 4. に示した。望遠鏡の構成部品である光電子増倍管のゲインや、感面の感度不均一性、フレネルレンズや UV フィルターの透過率には典型地を使っているため、多少の誤差が認められるが、シミュレーションによる感度の見積もりと実際のデータでほぼ一致した。

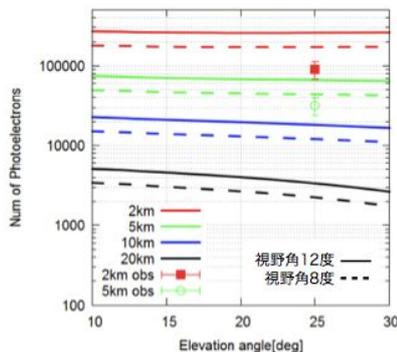


図 4. シミュレーションで見積もった、各距離で射出したレーザーを観測したときの光電子数と、2016 年 11 月の試験で得られたデータ。

CRAFFT 望遠鏡は、広大な土地に多数配置することが想定されている。よって、電源設備が無い場所で自立稼働できることが求められる。本試験では、ポータブルの小型発電機を用い、野外でのデータ収集に問題が無いことを確認できた。

(2) TA 実験望遠鏡サイトでの試験観測

2016 年 12 月に、TA 実験のブラックロック(BR)にある望遠鏡(FD)サイトにて、CRAFFT 試作機の CLF 試験観測を行った。CLF レーザーの光量は、TA 実験 FD BRM サイトから観測される 10^{20} 電子ボルトの宇宙線空気シャワーに相当する。図 5. が、TA FD BRM サイトで観測された CLF レーザーの波形データである。試験観測日、天候が悪く、レーザーの雲による散乱が強く観測されてしまっているが、散乱前の CLF レーザーによる信号が確認できた。これにより、CRAFFT 望遠鏡による最高エネルギー宇宙線の空気シャワー検出能力が実証できた。

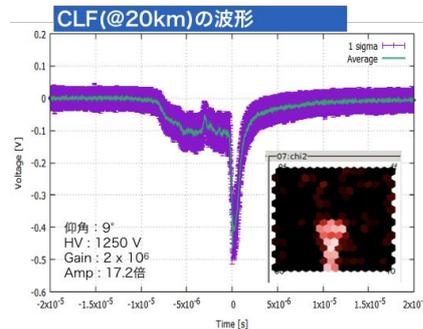


図 5. TA FD BRM サイトで CRAFFT 望遠鏡により観測された CLF レーザー。紫が 1 事象で、緑は平均をとったもの。波形中央の鋭いピークはレーザーが、右下の TA FD のイベントディスプレイからもわかるように、雲により散乱されたもの。

(3) 複数台の望遠鏡による宇宙線観測

2017 年 9-11 月に TA 実験 FD BRM サイトにて、4 台の CRAFFT 望遠鏡の設置、及び宇宙線空気シャワー観測実験を行った。

試作機による試験観測の結果、本望遠鏡により宇宙線空気シャワーの検出能力が実証された。試作機の構成を基本に、新たに設計し直し 4 台の望遠鏡を製作した。望遠鏡の感度の向上を目的に、開口部のフレネルレンズ大きさを 1 m^2 から 1.4 m^2 に拡大した。また、光電子増倍管の感面が球面であることから感度不均一性の影響を減らすため、視野調整フィルターを用いて、視野を絞った。また、野外にそのまま設置できるように、レンズの内側には日中の太陽光を遮光するためのロールカーテンを設置し、外装には耐久性が高く軽いガルバリウム鋼板を用いた。現地に設置した様子を図 6. に示した。

宇宙線観測は、2017 年 11 月に 10 日間行った。観測は、TA 実験が望遠鏡を可動して



図 6. TA FD BRM サイトにて、CRAFFT 望遠鏡 4 台を設置した様子。

いる時期に行った。データ取得には、TA FD より出力されているトリガータイミング信号を用いて、TA FD と同期観測した。TA FD との同期観測で得られたデータから、2 台以上の CRAFFT 望遠鏡で同時に信号を検出することができた事象数は 10 事象であった。4 台の望遠鏡による 10 日間の観測で得られる宇宙線空気シャワー事象の期待数は、 10^{17} 電子ボルト以上で 8 事象であり、観測結果と無矛盾である。図 7. に、CRAFFT 望遠鏡で得られた宇宙線空気シャワー事象の例を示した。

本観測で、CRAFFT 望遠鏡を用いた宇宙線空気シャワー事象の観測に成功した。

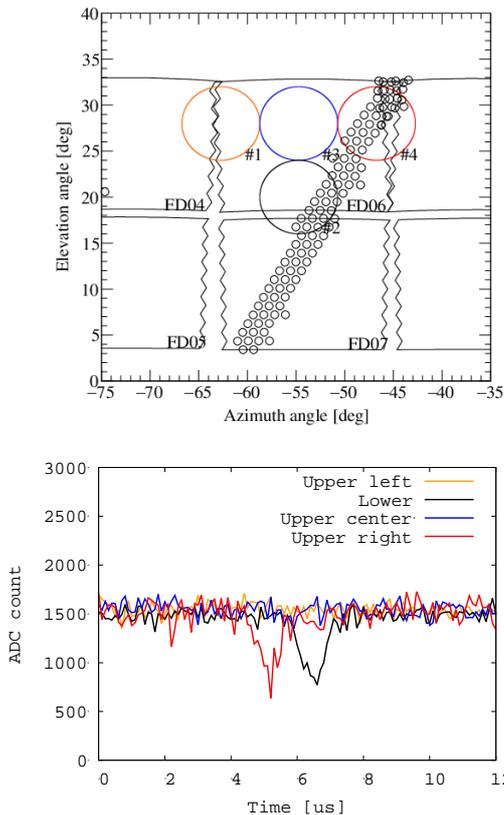


図 7. (上) CRAFFT 望遠鏡の視野(#1, 2, 3, 4) と TA FD の視野を横切る宇宙線空気シャワー事象。(下) CRAFFT 望遠鏡(#2, 4) で測定された空気シャワーの波形。

(4) 自動観測システムの構築

本研究期間では、宇宙線空気シャワーの観測の成功を最優先としたため、自立稼働システムによる観測は実施できなかった

電力自給システムは、太陽光発電パネル、チャージコントローラ、及びバッテリーを用いて、太陽光による充電で夜間電力がまかなえるか試験した。夜間の試験では、同程度の消費電力を想定して、CCD カメラによる夜天の観測を行った。試験結果から、本システムにより電力自給が可能であることが確認できたため、2018 年秋季に自立稼働システムを導入し、定常観測を開始する予定である。

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 Y. Tameda, T. Tomida, M. Hayashi, M. Yamamoto, D. Ikeda, T. Fujii, "Development of the Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope for a Next Generation UHECR Observatory", JPS Conference Proceedings, 査読有, 19, (2018), 011037, <https://doi.org/10.7566/JPSCP.19.011037>

2 M. Yamamoto, Y. Tameda, T. Fujii, D. Ikeda, T. Tomida, K. Yamazaki, H. Iwakura, "The Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope (CRAFFT) for the next generation UHECR observatory", Proceedings of Science, 査読無, ICRC2017, (2017), 433, <https://pos.sissa.it/301/433/pdf>

〔学会発表〕(計 6 件)

1 多米田裕一郎, "CRAFFT 実験 4 : 複数台のフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡による宇宙線観測報告", 日本物理学会第 73 回年次大会 (2018)

2 山本真周, "CRAFFT 実験 3 : フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の宇宙線試験観測報告", 日本物理学会 2017 年秋季大会, (2017)

3 Y. Tameda, "The Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope (CRAFFT) for the next generation UHECR observatory", 35th International Cosmic Ray Conference, (2017)

4 多米田裕一郎, "CRAFFT 実験 2 : フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の試験観測と性能評価", 日本物理学会第 72 回年次大会, (2017)

5 Y. Tameda, "Development of the Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope for a next generation UHECR observatory"
, International Conference on Ultra-High-Energy Cosmic Rays, (2016)

6 多米田裕一郎, "超高エネルギー宇宙線観測のためのフレネルレンズ型単眼大気蛍光望遠鏡の開発", 日本物理学会秋季大会、(2016)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://tame.n.kanagawa-u.ac.jp/tameda/wiki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

多米田 裕一郎 (TAMEDA, Yuichiro)
大阪電気通信大学・工学部・講師
研究者番号: 90467019

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

富田 孝幸 (TOMIDA, Takayuki)
信州大学・学術研究院工学系・助教
研究者番号: 70632975

池田 大輔 (IKEDA, Daisuke)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号: 60584258

(4) 研究協力者

山崎 勝也 (YAMAZAKI, Tatsuya)
神奈川大学・工学部・特別助教

藤井 俊博 (FUJII, Toshihiro)

東京大学・宇宙線研究所・特別研究員

山本 真周 (YAMAMOTO, Mashu)

信州大学・工学部・修士課程1年

岩倉 広和 (IWAKURA, Hirokazu)

信州大学・工学部・学士課程4年