

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03895

研究課題名(和文) 大気蛍光望遠鏡による宇宙線空気シャワー観測のための雲距離測定

研究課題名(英文) Cloud distance measurement for cosmic ray air shower observation with atmospheric fluorescence telescope

研究代表者

奥田 剛司 (Okuda, Takeshi)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：00610263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000 円

研究成果の概要(和文)：テレスコープアレイ実験は超高エネルギー宇宙線によって引き起こされる空気シャワーと呼ばれる現象を観測する実験である。大気蛍光望遠鏡(FD)は月のない夜間に望遠鏡から離れた地点に入射した宇宙線空気シャワーを観測する。曇天の夜には観測されないが、雲の状態の変化は速く、しばしば孤立雲も見られる。空気シャワーの解析において雲の効果は望遠鏡から見てその雲が空気シャワーに対して手前にあるか奥にあるかに依存し、孤立雲が存在する場合の露出量を算出することは困難である。したがって、露出量を補正するための情報となる、雲までの距離を観測する手法を試験検証する装置を導入し、雲までの距離を評価するための情報を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

雲の高度は最高でも海拔16kmであり、50km程度の距離内で広角に位置が時間変化する雲の距離を光学的に連続測定している例は見当たらない。気象や大気観測用にはレーダーやレーザーを用いたものはあるがレーザーは大気蛍光観測の障害となり、且つ視野も非常に狭い。また、FDステーションには商用電源がないため、且つ設置コストの問題もありレーダーは運用不可能である。したがってこれらの高価で能動的なシステムではなく安価で受動的なシステムを用いて雲までの距離を広視野で測定するシステムが実現可能かどうかを検証することが今後の大気蛍光望遠鏡観測の高精度化にとって重要である。

研究成果の概要(英文)：The Telescope Array experiment detects airshowers induced by ultra high energy cosmic rays. The atmospheric Fluorescence telescopic Detector(FD) observes cosmic ray airshower, which is incident very far from the telescope. The observation does not take place in overcast night. However, the cloud status changes quickly and sometimes there are some isolated clouds. For airshower reconstruction, the effect of cloud depends on whether the cloud is foreground or background to airshower. The estimation of exposure with isolated clouds is difficult. And it should be affected more at higher energy event with relatively further from the telescope, which is lower statistics and more important for the ultra high energy cosmic ray physics. Therefore, to test the method for evaluating the correction of exposure, stereo cloud cameras were installed near one of FD sites, and observed the difference of stereo image to measure the distance to cloud.

研究分野：宇宙線

キーワード：宇宙線 空気シャワー 雲 大気蛍光望遠鏡

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。

1. 研究開始当初の背景

10^{19}eV を超える最高エネルギー宇宙線の観測は宇宙線が大気との相互作用で引き起こす空気シャワーと呼ばれる現象を利用して行われており、主に二種類の方法がある。放射線検出器を地表に多数並べて空気シャワー中の放射線を抽出観測する地表粒子検出器(SD)と呼ばれる方法と、空気シャワー中の放射線が大気を発光させる現象を望遠鏡で観測する大気蛍光望遠鏡(FD)と呼ばれる方法である。FD を用いる方法は大気の透明度や雲の有無によって同じ空気シャワーを観測しても見え方が異なるという特徴がある。

10^{19}eV を超えるエネルギーの宇宙線は 1km^2 に 1 年に 1 個程度しか到来しないのでこのエネルギー領域を観測する宇宙線観測施設は限られており、現在大気蛍光望遠鏡を用いて観測が行われている大規模施設は米国の Telescope Array 実験(TA 実験)とアルゼンチンの Pierre Auger 実験である。TA 実験は主に日米で建設運営されており、3 か所の FD ステーションと 507 台の SD が稼働中である(図1)。図1の南側の二つの FD ステーションと中央にある垂直レーザー施設(CLF)には魚眼レンズを取り付けた CCD カメラが設置されているが北側の FD ステーションには設置されていない。この

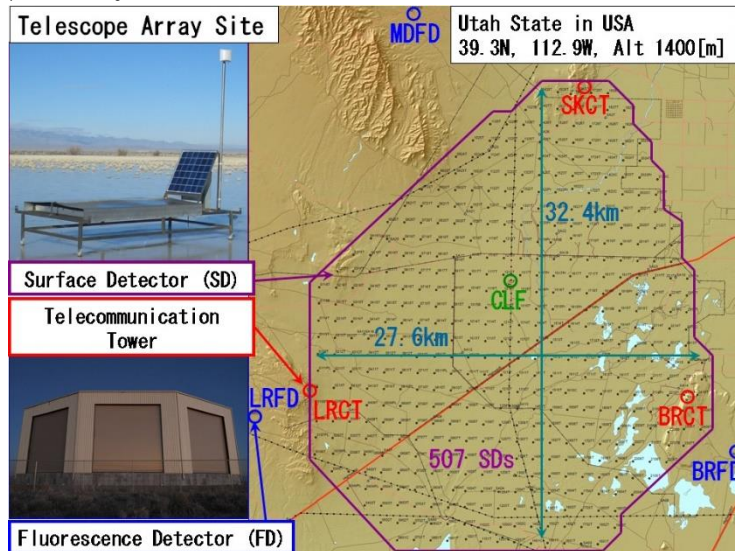


図 1

このカメラによって各施設から見た雲の有無や方向はわかるが距離はわからない。雲の大きさは小さいもので数百メートル程度であり、且つこの三つのカメラは距離が 20km 以上も離れているため、まったく異なる空の像を映している。したがって図2のような二種類の雲の状況を判別することができない。この状況で空気シャワーを観測したとき、その手前に雲があるのか奥に雲があるのかを現行の CCD カメラシステムでは判別できず、また宇宙線の Flux を算出するとき使用する露出量(～有効面積×時間)を評価する現行シミュレーションにもこれらの雲の効果は入っていない。全天が雲に覆われている場合は FD 観測が行われないので露出量に影響はないが、晴れていて FD 観測を行っていても図2の様な孤立雲が広い範囲にわたって移動する状況は頻繁に見られている。TA 実験は拡張計画の建設が進んでおり、新たに建設運用される FD ステーションに合わせて図2の二種類の状況を判別可能なシステムを導入し、最高エネルギー領域の宇宙線観測の高精度化を行う。

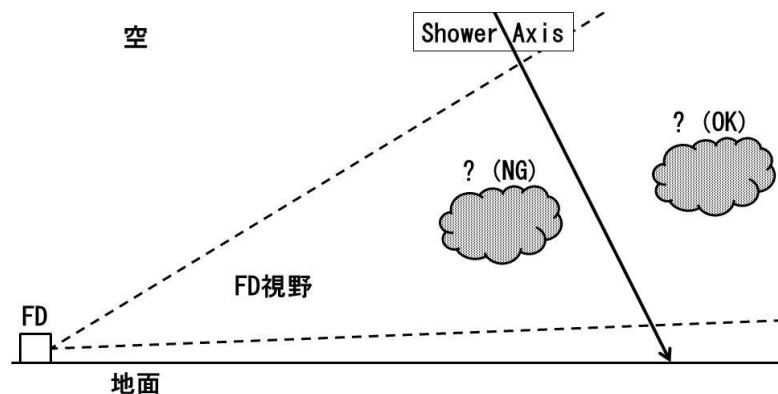


図 2

2. 研究の目的

本研究目的は大気蛍光望遠鏡(FD)視野中の雲の位置(FD に対する方角と距離)を観測する方法を試験し、宇宙線観測に反映するためのデータを得られるかを検証することが目的である。雲の位置を測定する装置として、気象や大気観測用にはレーダーやレーザーを用いたものがあるがレーザーは大気蛍光観測の障害となり、且つ視野も非常に狭い。また、FD ステーションには商用電源がないため、且つ設置コストの問題もありレーダーは運用不可能である。したがってこれらの高価で能動的なシステムではなく安価で受動的なシステムを用いて雲までの距離を広視野で測定するということが目的である。

3. 研究の方法

基本的な研究方法はFD 視野内の空を広角レンズを取り付けた複数台の CCD カメラで連続的に撮像することである。複数台カメラでの空の見え方の違いによって雲までの距離を算出し、時刻と方向を与えればFD からの距離として使用可能な範囲が得られる様にするのである。都市部の雲と異なり観測地での夜間の雲は空より暗くなる。したがって背景にある各星の可視性の差から雲までの距離を算出する。

TA 実験の拡張計画は図 1 の北側と南東側の二か所にそれぞれ拡張するもので、北側に建設された FD ステーションは TA 実験の北側の FD ステーションに隣接しており、Middle Drum と呼ばれる場所（図 1 の MDFD）にある。図 3 は北側領域の拡張計画配置図である。北側にはこの FD ステーションの視野下におよそ 240 台の SD も展開予定で、既に 130 台が展開されている。この FD の視野をカバーするように本研究にて設置する CCD カメラシステムの視野は 100 度を予定しており、50km 以内の雲の距離を測定できれば良いということになる（図 3）。

FD 視野に対してかなり大きな視野である 100 度を設定する理由はほとんど動かない北極星と、火力発電所の上空をカバーするためであり、共に本研究装置の較正のためである。カメラの設置や調整の日時、作業時間はあらかじめ決められないので動かない北極星を基準にカメラの視野中心方向を決定する。またこの火力発電所からは断続的に煙が上がっており、この煙までの距離がわかっていることからこれを用いて距離推定の手法や精度を評価検証することができる。

1 台目のカメラは MDFD ステーションに設置した。設置した CCD カメラは横方向に 1024 ピクセルなので視野 100 度となるレンズと組み合わせるとおよそ 1 ピクセル 0.1 度となる。CCD 上の星像を評価し 2 台のカメラで十分有意な雲の方向差を得ようとする 5 ピクセル程度は必要なので、結果として距離 50km を評価するためには 2 台のカメラを見たい方向と垂直な方向に最低 440m 以上離して配置する必要がある。しかし、空より暗い雲の光学的な見え方の違いを測定する方法を検証することが目的であるため、方向差がより見える様にこの倍の 900m 程度の位置に 2 台目のカメラを設置した。この構成で 50km 先の雲の方向差は 10 ピクセル程度となる。

2 台目の設置場所は MDFD へ向かう道路沿いのため設置が容易である。この道路はちょうど CCD 視野中心方向と垂直に走っており、また MDFD から 950m までの距離内は設置申請するだけで置ける場所となっており、許認可を待つ必要がない。各カメラシステムはソーラーバッテリーにより自立稼働し、長距離無線 LAN によって通信する。これらの装置を用いて様々な方向の雲を観測した。

4. 研究成果

採択年度の 2019 年 09 月より観測を開始し、2023 年 03 月で観測を終了した。設置した CCD カメラシステムは CCD カメラ、DC アイリス制御の広角レンズ、データ取得用 PC、GPS、温湿度計、結露計などで構成されており、ソーラーバッテリーシステムで稼働、無線 LAN でデータ転送を行った。この期間、落雷の影響を除き観測が停止することではなく、停止時もリモートから復帰を行うことができるため、ハードウェアとしてはメンテナンスフリーであった。図 4 は視野に対して右側の CCD カメラシステムで、奥が MDFD である。

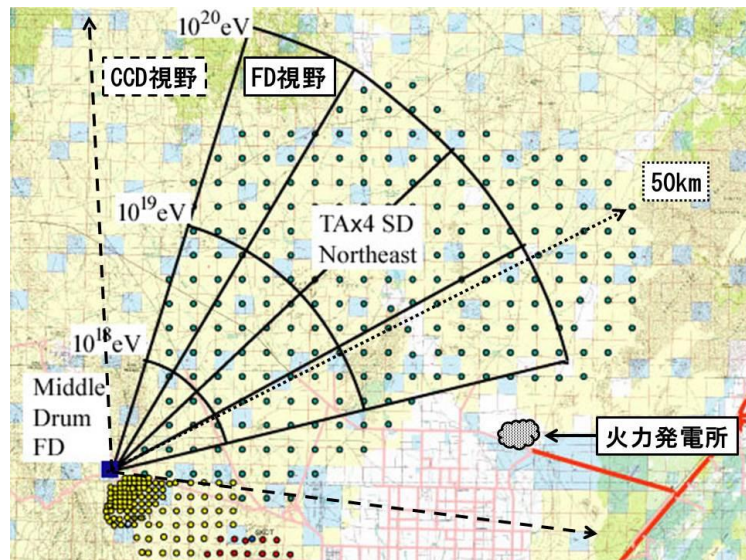


図 3



図 4

ターゲットとなる孤立雲も頻繁に観測された。図5は例として左右二台のカメラで同時に撮像された画像である。視野中の左下と中央右に孤立雲がある。図6は簡易に(高い閾値で)星検出を行ったものである(赤)。目視用にいくつかの、左右で同じ星を黄色で示す。緑で示した雲の見え方が、背景の星の可視性の差として、異なることが確認できる。したがって、背景の星の可視性の差から雲の見え方の方向差を検出できており、雲までの距離推定が可能となることが確認できた。

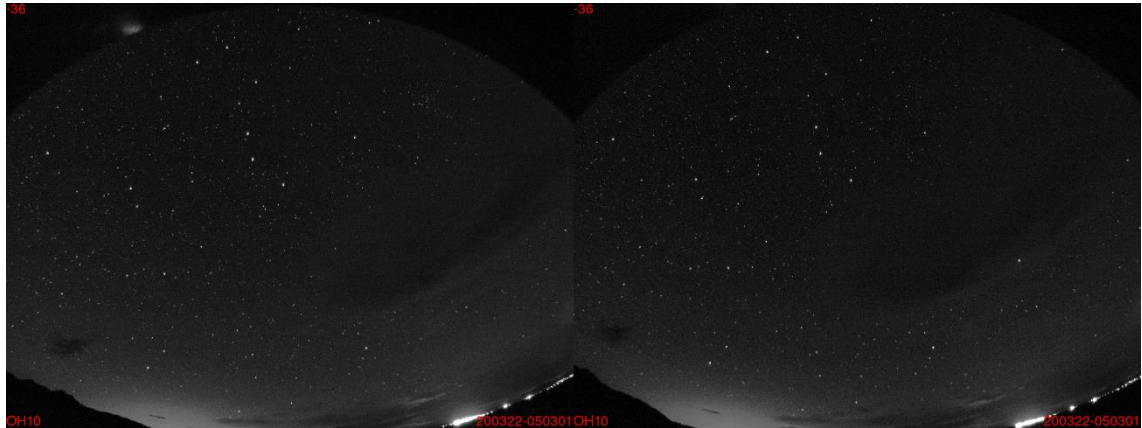


図5

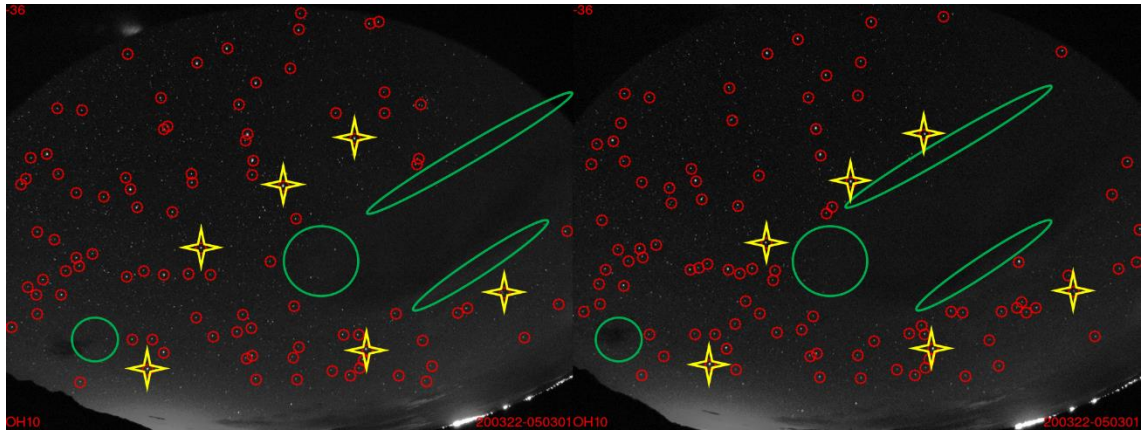


図6

また、本研究の副産物として、このシステムで観測された撮像イメージは常時、(リモートを含む)観測者に提供されており、コロナ禍での大気蛍光望遠鏡観測を支援してきた。

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 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okuda Takeshi、Telescope Array collaboration	4. 巻 395-192
2. 論文標題 Telescope Array Cloud Ranging Test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of Sci, ICRC2021	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.395.0192	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 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Takeshi Okuda
2. 発表標題 Telescope Array Cloud Ranging Test
3. 学会等名 37th International Cosmic Ray Conference (ICRC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Okuda
2. 発表標題 Passive measurement of distance to cloud
3. 学会等名 ATmospheric MOnitoring for High Energy Astroparticle Detectors 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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		
米国	ユタ大学			