

機関番号：24402

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20340057

研究課題名（和文） 可搬 UV レーザーを用いた TA 実験大気蛍光望遠鏡の較正

研究課題名（英文） Calibrations of atmospheric fluorescence detectors of the Telescope Array experiment using a portable UV laser

研究代表者

荻尾 彰一（OGIO SHOICHI）

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20242258

研究成果の概要（和文）：宇宙から飛来する極限的高エネルギーを持った素粒子を検出し、その到来方向・エネルギー・粒子種を求め、活動銀河、銀河の衝突など宇宙における極限的高エネルギー現象を解明するための観測装置が、日米韓露の国際共同研究として、2008年から米国ユタ州で稼働し続けている。本研究では、この観測装置のエネルギー較正のための「標準光源」として、射出方向可変で、持ち運び可能な紫外線レーザー光源を製作し、その性能を評価し、較正装置として十分な性能を有していることを確認した。本格的な較正装置としての運用は2011年度から開始される。

研究成果の概要（英文）：In order to study extremely high energy phenomena in the Universe, such as AGN jets, colliding galaxies and internal shocks in galaxy clusters, we developed a huge air shower detector to measure extremely high energy cosmic rays and determined their arrival directions, energies and species in Utah, USA, and we operate this detector from 2008 with a collaboration of research activities from Japan, USA, South Korea and Russia. In this research, we developed a “standard candle” for the air shower detector’s energy calibrations, which is a portable UV laser on a steering mount. This UV laser light source was completed and confirmed to have enough systematic accuracies. The full-scale operations will be started in step with a linear accelerator in the experimental site.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	8,700,000	2,610,000	11,310,000

研究分野：宇宙線物理学、高エネルギー天文学

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：極高エネルギー宇宙線、空気シャワー、大気蛍光、レーザーレーダー

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 東大宇宙線研究所明野観測所において2004年まで稼働した100km<sup>2</sup>の空気シャワーアレイ「AGASA」によって10<sup>20</sup>eVを超えるエネルギーの宇宙線が11例観測された。AGASAの提起した「宇宙背景放射と宇宙線の

相互作用」、「宇宙線源の性質と空間分布」の問題を解決するため、日米共同のTA実験と欧州・北中南米諸国によるAuger実験の2つが、北米・南米で現在稼働している。

(2) これまでに発表された最高エネルギー宇

宙線のエネルギースペクトル、化学組成推定は、互いに異なり、AGASA の提起した問題は全く解決していない。この原因は、統計精度によるものではなく、それらのエネルギースケール・化学組成推定における系統誤差にある。そのため問題解決には高精度な測定が不可欠である。

(3)TA は米国ユタ州の砂漠地帯の約 700km<sup>2</sup>の範囲内に配置された 507 台の地表検出器と、このアレイを囲む 1 辺約 35km の三角形の頂点に配置された大気蛍光望遠鏡(各頂点に 12-14 台設置)からなる「ハイブリッド宇宙線検出器」である。これによって宇宙線空気シャワー粒子を地表検出器で捉えるのと同時に、それらの粒子が励起した大気蛍光を望遠鏡で撮像する。これによって、宇宙線のエネルギーとシャワー発達を同時に高精度で決定する。つまり、TA は 1 兆トンもの膨大な大気を用いた北半球最大の「宇宙線カロリメーター」である。

(4)このカロリメーターのための較正装置を多数開発したが、特筆すべき物は、40MeV 電子線形加速器で、大気蛍光発光効率から望遠鏡の反射率など全ての装置定数を一括して較正することが可能である。TA 実験は世界で初めて粒子線加速器を空気シャワー観測装置に導入し、高精度較正を実現する。

## 2. 研究の目的

(1)大気蛍光発光効率と全ての装置定数は電子線形加速器で一括して較正できる。しかし、加速器は 40 フィートコンテナ 2 台分に相当する大きさ重量のため、移動不可能である。さらに射出方向は鉛直に限られるため、電子線形加速器で較正できるのはカロリメーターの一部に限られる。

(2)これを補うことのできる可能性のある装置として、中心紫外レーザー (CLF) が地表検出器アレイのほぼ中心、全ての望遠鏡からほぼ等距離(約 20km 離れている)に設置されている。CLF は射出方向可変であるが、各望遠鏡から約 20km 離れているため、望遠鏡に入射する光量は大気の状態の影響を受けてしまっており、望遠鏡から 100m の地点にある電子線形加速器との相互補正はできない。

(3)従って、電子線形加速器による較正を全ての望遠鏡に反映させ、高頻度で較正するためには、移動が容易で任意の場所での設置・運用が可能で、その射出方向も可変であるような「スタンダードキャンドル」が必要である。そこで、本研究によって、可搬・方向可変の紫外レーザー光源を製作する。これによって、TA 実験の全ての望遠鏡に対して電子線

形加速器による較正を「持ち運び」、エネルギースケールの系統誤差 15%以下を達成する。

## 3. 研究の方法

(1)以下の要素からなる可搬 UV レーザー装置を製作する。

- Nd:YAG レーザー (出力 5mJ、幅 5ns)
- エナジーメーター
- GPS 搭載自動導入制御経緯台
- ガイド望遠鏡 (屈折式、10.2cm φ)
- 光軸調整用 He-Ne レーザー

TA 実験では、大気モニターのためのライダー装置 (レーザーレーダー) を運用しているが、本研究での紫外レーザー装置と既に運用されているライダー装置とでレーザー、エナジーメーター、架台の仕様を共通化する事によって、開発にかかる時間的費用とリスクを大幅に削減する。

(2)レーザーおよび架台の制御ソフトウェアを製作する。その後、レーザーの射出方向の調整法を確立し、射出方向の制御精度 0.1 度を達成しそれを確認する。射出方向の調整は蛍光板へのレーザー照射スポットをガイド望遠鏡で観測することで行い、方向制御精度は、GPS を利用した自動導入とガイド望遠鏡による天体観測からのフィードバック補正で達成される。

(3)本レーザー装置は屋外に設置・運用されるため、装置の温度は常に変化する。そのため、レーザー出力とそれを監視するエネジーメーターの応答の温度特性をあらかじめ測定しておき、実際の運用時には常時測定される装置温度から応答を補正する必要がある。この温度特性の測定を大阪市立大学内の恒温槽を利用して行う。

(4)レーザー光の偏光面の調整、エナジーメーターの応答直線性の測定を行う。これらの測定は、そのための装備が整っている TA 実験中央レーザー施設 (CLF サイト) で行われた (図 1、2)。

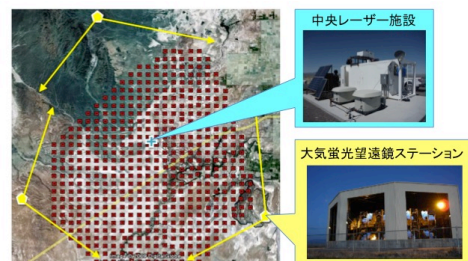


図1 TA実験の装置配置の外観。■は1.2km間隔で設置されている507台の地表検出器、黄色五角形は大気蛍光望遠鏡ステーション(外観写真:右下)、青十字は中央レーザー施設(外観写真:右上)、それぞれの設置点を表している。地表検出器の設置範囲全体の面積は約700km<sup>2</sup>で、これは琵琶湖の面積に匹敵し、北半球最大、史上第2位の広さである。

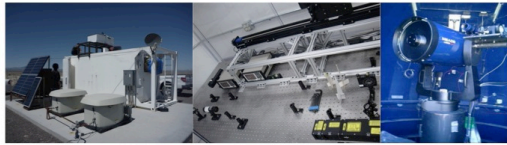


図2 中央レーザー施設(CLF)の外観(左)と内部の光学系(中央)、および南西のステーションに隣接して設置されているライダー装置の光学系(右)

(5) 電子線形加速器サイト、および CLF サイトでのレーザー光射出とその散乱光の大気蛍光望遠鏡による試験的観測とそのデータ解析。電子線形加速器(図3、4)の較正を全ての望遠鏡に反映させる、という最終的な目標に向けた運用試験とそのデータ解析プログラムの製作・解析実施をおこなう。また、CLF サイトで運用することによって、CLF レーザーとの相互較正が可能である。

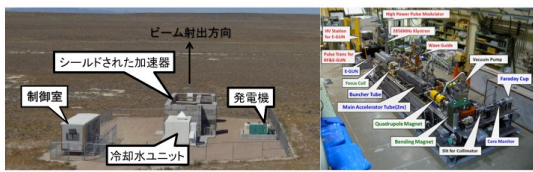


図3 電子線形加速器施設の外観(左)と加速器の構造(右)

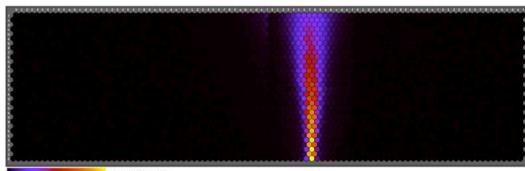


図4 世界で初めて大気蛍光望遠鏡によって撮像された電子線形加速器による「人工空気シャワー」

#### 4. 研究成果

(1) 図5に示す可搬 UV レーザー装置を製作し完成した。ガイド望遠鏡と光軸調整用 He-Ne レーザー以外の構成要素はライダー装置と共通化されており、緊急時には交換して使用することが可能となっている。実際にライダー装置のレーザーが故障した際、修理から戻るまでの期間本装置のレーザーをライダー装置に用いて大気状態の観測を継続することができた。

(2) 可搬レーザーの架台およびレーザーの制御ソフトウェアはライダー装置のものを基礎に開発され、完成した。ガイド望遠鏡とレーザーの光軸は図5中央の写真にあるように遠方に置いた反射板に投影したレーザースポットを望遠鏡で測定することで、 $\pm 0.03^\circ$ 程度の精度で調整される。可搬レーザーの位



図5 完成した可搬紫外レーザー装置。左は射出光学系とガイド望遠鏡。中央はガイド望遠鏡とレーザーの光軸調整の様子。反射板に光軸調整用 He-Ne レーザーによるスポットが見える。右は装置全体の外観。ほぼ垂直方向に向けられた状態である。

置と方向は、可搬レーザーが発射点に設置・固定されるたびに、架台に搭載された GPS を用いた測量とガイド鏡を用いた基準星の眼視観測から決められる。その精度を測定した結果が図6である。調整の最後に用いた基準星からの角距離が  $10^\circ$  以内ならば、 $0.1^\circ$  の方向精度が達成されていることが確かめられた。

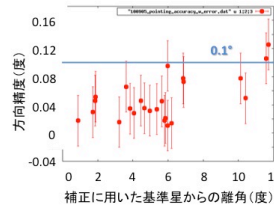


図6 可搬レーザー装置の方向精度の測定結果。架台の位置と方向を決定する際に最後に用いた基準星との離角が10度以内ならば、0.1度の方向精度が達成されていることが確かめられた。

(3) 図7左はレーザー出力とエネルギーメーターの応答の温度特性を測定した実験のセットアップである。 $0.5^\circ\text{C}$ 程度の範囲で一定に保たれた室内でレーザー出力をモニターしつつ、それに対する恒温槽内のエネルギーメーターの応答を、槽内温度を変えながら測定した。 $25^\circ\text{C}$ の時の応答を1とする、エネルギーメーター相対的な増幅率の測定結果が図7右に示されている。このフィッティング結果を実際の可搬レーザーの運用時に利用している。

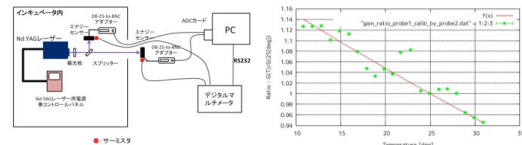


図7 エネルギーメーターの応答の温度特性測定の測定装置のブロック図(左)と応答の温度依存性(右)。 $25^\circ\text{C}$ の時を1とする相対値となっている。

(4) レーザー出力を比1:10のビームスプリッターで2系統に分割し、それら2つのビームを2つのエネルギーメーターで測定する事によって、測られるエネルギーの比の変化を求めた。2つのエネルギーメーターのうちの1つは完全に直線的であると仮定している。この仮定は3%の精度で正しいという事が製造会社の製造時試験によって確かめられている。図8は結果として求められた直線性からのずれである。実験での仮定を上回る有意な非直線性は検出されなかった。

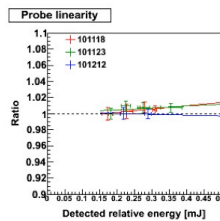


図8 エネルギーメーターの直線性の測定結果。測定エネルギー範囲内で非直線性は1%以下であることがわかる。

(5) 可搬レーザーを CLF サイトに設置してレーザーを発射し、その散乱光を南東の大気蛍

光望遠鏡で観測した1例を図9に示した。観測された波形を全ての光電子増倍管について足し合わせたものをシミュレーションと比較すると、概ね一致しているようである。しかし、完全に一致しているとはいえ、その不一致度合いの定量的な評価と原因の追及をまきに行っているところである。

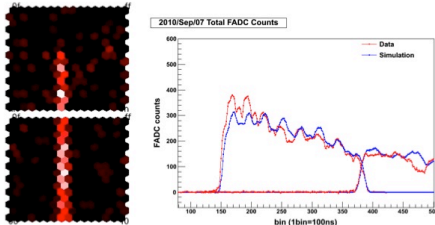


図9 可搬レーザーをCLFサイトに設置してレーザーの射出とその散乱光の検出試験を行った。南東のステーションの2台の望遠鏡で捉えられた散乱レーザー光の画像(左)とその波形(右)。波形は全ての画素の重ね合わせとなっており、赤線が実データ、青線は画像から推定されたレーザー出力エネルギーを仮定した場合のモンテカルロシミュレーションによる波形である。

## 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6件)

- ① H. Tokuno, M. Chikawa(他135名中,15番目), M. Fukushima(他135名中,25番目), S. Ogio(他135名中,80番目) et al., The Telescope Array Experiment: Status and Prospects AIP Conf. Proc., 査読無, Vol.1238, 2010, pp.365-368
- ② H. Tokuno, S. Ogio(他19名中,8番目), M. Fukushima(他19名中,9番目) et al., On site calibration for new fluorescence detectors of the Telescope Array experiment, Nucl. Inst. and Meth. A, 査読有, Vol.601, 2009, pp.364-371
- ③ Y. Tameda, M. Fukushima(他19名中,5番目), S. Ogio(他19名中,11番目) et al., Trigger and data acquisition electronics of the Telescope Array fluorescence detectors, Nucl. Inst. and Meth. A, 査読有, Vol.609, 2009, pp.227-234
- ④ H. Tokuno, S. Ogio(他5名中,2番目) et al., Performance of the Fluorescence Detector of the Telescope Array experiment, Proc. of 31<sup>st</sup> ICRC, 査読無, Vol.0942, 2009, pp.1-4
- ⑤ H. Tokuno, M. Chikawa(他111名中,14番目), M. Fukushima(他111名中,23番目), S. Ogio(他111名中,61番目), et al., The Telescope Array experiment: status and prospects, J. of Phys.: Conference Series, 査読無, Vol.120,

2008, pp.062027:1-3

- ⑥ H. Tokuno, S. Ogio(他27名中,3番目) et al., The cosmic ray primary composition at the knee region from lateral distributions of atmospheric Cerenkov photons in extensive air showers, Astropart. Phys., 査読有, Vol.29, 2008, pp.453-460

[学会発表] (計7件)

- ① 芝田 達伸、「大気蛍光望遠鏡キャリブレーションのための小型線形加速器の開発」、日本物理学会、平成21年3月28日、立教大学
- ② 荻尾 彰一、「テレスコープアレイ実験による北天極高エネルギー宇宙線観測の現状と最新結果」、日本物理学会(招待講演)、平成21年9月12日、甲南大学
- ③ 芝田 達伸、「An Electron Linear Accelerator for end-to-end absolute energy calibration of atmospheric fluorescence telescopes of the Telescope Array experiment」、31<sup>st</sup> International Cosmic Ray Conference、平成21年7月13日、Lodz (Poland)
- ④ 荻尾 彰一、「可搬UVレーザーによる大気蛍光望遠鏡の較正」、日本物理学会、平成22年9月11日、九州工業大学
- ⑤ 荻尾 彰一、「テレスコープアレイ実験の将来計画」、宇宙線研究者会議将来計画シンポジウム(招待講演)、平成22年9月17日、東京大学柏キャンパス
- ⑥ 荻尾 彰一、「Future Plans of Telescope Array」、International Symposium on the Recent Progress of Ultra-high Energy Cosmic Ray Observation(招待講演)、平成22年12月12日、名古屋国際会議場

[その他]

ホームページ等

<http://www.telescopearray.org>

[http://alpha.sci.osaka-cu.ac.jp/ocu\\_ta](http://alpha.sci.osaka-cu.ac.jp/ocu_ta)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荻尾 彰一 (OGIO SHOICHI)

大阪市立大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20242258

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

千川 道幸 (CHIKAWA MICHIIYUKI)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：50179941  
福島 正己 (FUKUSHIMA MASAKI)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号：30241227

(4) 研究協力者

有働 慈治 (UDO SHIGEHARU)  
神奈川大学・工学部・助手  
奥 大介 (OKU DAISUKE)  
山梨大学・大学院医学工学総合教育部・  
修士課程2年  
芝田 達伸 (SHIBATA TATSUNOBU)  
東京大学・宇宙線研究所・特任助教  
富田 孝幸 (TOMITA TAKAYUKI)  
山梨大学・大学院医学工学総合教育部・  
博士課程4年  
松山 利夫 (MATSUYAMA TOSHIO)  
大阪市立大学・研究支援課・技術職員  
山崎 勝也 (YAMAZAKI KATSUYA)  
大阪市立大学・大学院理学研究科・  
前期博士課程2年