

# Telescope Array 実験における バイスタティックライダーを用いた大気透明度測定

上濱 孝文<sup>1</sup>, 富田 孝幸<sup>2</sup>, 山崎 勝也<sup>3</sup> 齊藤 保典<sup>2</sup>

<sup>1</sup>信州大学工学部 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

<sup>2</sup>信州大学学術研究員工学系 (〒380-8553 長野県長野市若里 4-17-1)

<sup>3</sup>神奈川大学工学部 (〒221-8686 〒380-8553 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

## Measure atmospheric transparency using bistatic Lidar in Telescope Array experiment

Takafumi UEHAMA<sup>1</sup>, Takayuki TOMIDA<sup>2</sup>, Katsuya YAMAZAKI<sup>3</sup>, and Yasunori SAITOH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

<sup>2</sup>Institute of Engineering, Academic Assembly, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano, Nagano 380-8553

<sup>3</sup>Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawaku, Yokohama, Kanagawa 221-8686

Abstract : TA (Telescope Array) is international joint experiment observing ultra-high energy cosmic rays. TA employs fluorescence detection technique to observe cosmic rays. In this technology it is important to understand atmospheric attenuation. we analyze VAOD (Vertical Aerosol Optical Depth), which is the atmospheric transparency of aerosol, using the CLF (Central Laser Facility) system which is a bistatic lidar. It is expected to improve the determination accuracy of ultra high energy cosmic ray. In this presentation, we analyze and evaluate VAOD.

**Key Words:** Bistatic Lidar, Atmosphere,

### 1. はじめに

TA (Telescope Array) 実験では、 $10^{18}\text{eV}$  を超える超高エネルギー宇宙線の起源解明のために大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector:FD) を用いた宇宙線観測を行っている。FD は宇宙線中の荷電粒子が大気中を通過し、窒素分子を励起することによって生じる大気蛍光を捉え、間接的に宇宙線観測を行う検出器である。FD で正確に超高エネルギー宇宙線を決定するための補正の一つとして、蛍光の大気散乱量の理解が重要である。CLF (Central Laser Facility) システムは宇宙線観測時に 30 分ごとレーザを垂直方向に射出し、大気中のエアロゾルによる側方散乱光を FD で観測している。これにより、エアロゾルの大気透明度を示す VAOD (Vertical Aerosol Optical Depth) を 30 分ごと算出可能とし、宇宙線解析における大気補正システムとして期待される。本講演では CLF システムにおける VAOD の算出、評価を行う

### 2. CLF システム

#### 2.1 CLF

TA 実験サイトにおいて CLF は三台の FD ステーションの中心に配置されている (Fig.1)。レーザ装置を保有しており、宇宙線観測時に 30 分に一度、水冷式の Nd:YAG レーザから垂直方向に 10Hz で 300shots 射出している。2 枚のハーモニックセパレータによって波長 355nm のレーザ光を抽出し、偏光解消板を通して脱偏光状態にすることによって、 $360^\circ$  様な散乱光量を作り出せる (Fig.2)。

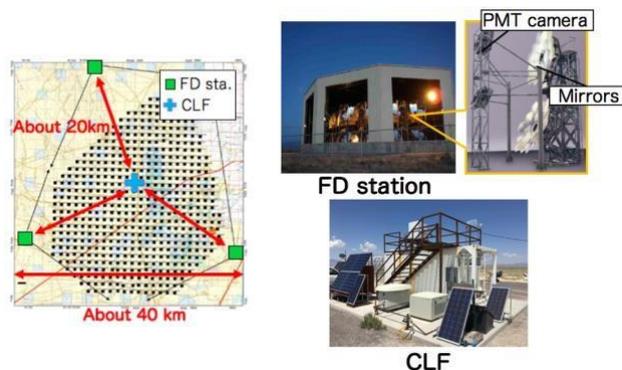


Fig.1 TA experiment  
(Left :TA sight , Right :CLF system detectors)

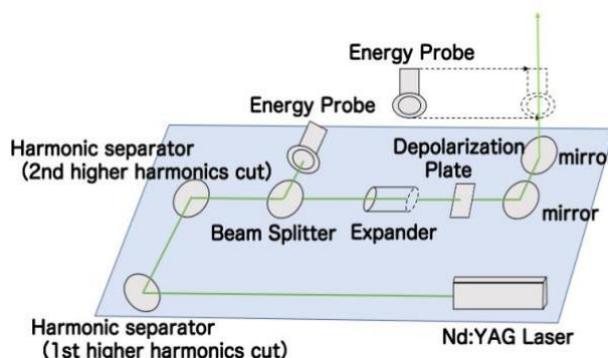


Fig.2 CLF optical path diagram

## 2.2 大気蛍光望遠鏡 (FD)

FDは口径3mの望遠鏡であり、六角形の複合球面鏡と256本(16×16本)のPMTをアレイ状に組み合わせたPMTカメラで構成されている(Fig1.Right)。上下2台配置することによって高さ方向の観測領域を確保している。CLFレーザー光におけるFDの撮像観測例をFig.3に示す。下視野から上視野にかけて光子が移動しており、散乱点から伝搬される側方散乱光を観測していることが光量波形からわかる。このCLFレーザーによるFD光量データからVAOD解析を行う。

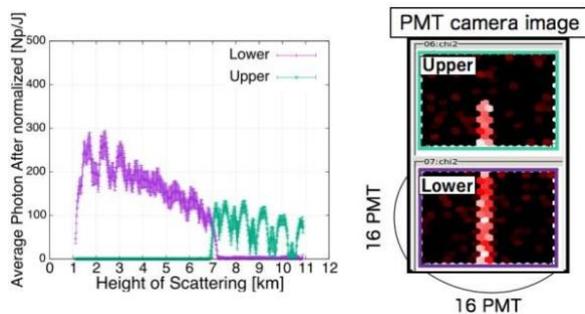


Fig3. FD observation of CLF laser (Left :photon data , Right :PMT camera image)

## 3. VAOD 解析

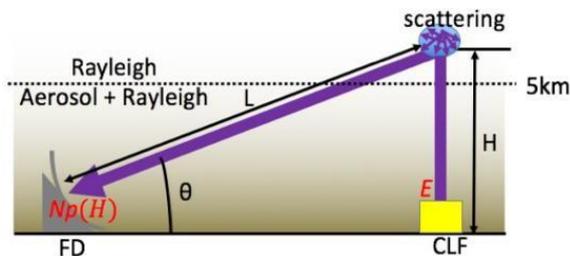


Fig.4 CLF observation concept

$$N_p(H) = E T_{AS}(H) T_{Ray}(H) (S_{AS} + S_{Ray}) T_{AS}(L) T_{Ray}(L) \quad (1)$$

$$N_{pideal}(H) = E T_{Ray}(H) S_{Ray} T_{Ray}(L) \quad (2)$$

$$\tau_{AS}(H) = -\frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \log \left( \frac{N_p(H)/E}{N_{pideal}(H)/E} \right) \quad (3)$$

E:レーザーエネルギー Np:FD 受光量  
S:微分散乱係数 T:大気透明度  
H:散乱点の高さ L:散乱点からFDまでの距離  
 $\tau_{AS}$ :VAOD

### 3.1 VAOD 解析手法

CLFシステムの観測概念図をFig.4に示す射出時エネルギー光量Eはエアロゾルと大気分子によって散乱後、減衰し、FDで受光する( $N_p$ ) (式(1))。エアロゾルの分布が非常に少ないときのCLFレーザーのFD受光量を $N_{pideal}$ とすると、エアロゾルによる散乱がないと考えることができ、式(2)が成立する。観測サイトにおいて、<sup>1)</sup>高度5km以上で大気分子の分布が支配的であることから、VAOD解析高度を5km以上とすること、水平方向に対して大気状態が一定であ

ることを仮定し、式(2)を基準に式(1)を比較することで、エアロゾルによる影響度をVAODとして算出する(式(3))。つまり、CLFレーザーによるFD受光量データの中から解析期間で基準となる大気を選定し、他のCLFレーザーによるFD光量データを比較することでVAODの算出を行う。

## 3.2 VAOD 解析結果

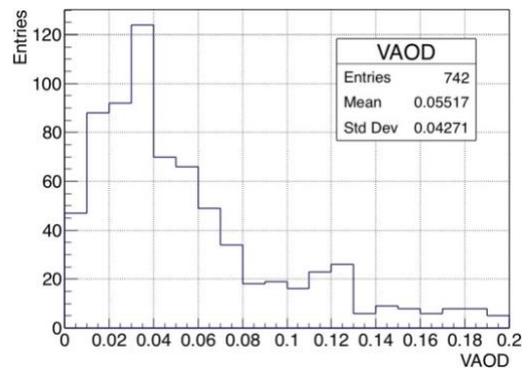


Fig5. VAOD distribution of CLF (2015/06~2016/06)

2015年6月~2016年6月の1年間の742イベントのCLF光量データに対して基準となる大気を選定し、高度5kmにおけるVAODの算出を行った。このVAOD分布のヒストグラムの最頻値は0.040であり、最頻値からなだらかに山なりの分布を形成している(Fig.5)。CLFシステムによって算出されたVAODの中央値と分布の幅が $0.041 \pm 0.020$ であった。この結果は、別実験ではあるが、過去に同じロケーションでミーライダーによって測定された結果と酷似している。現在、FDでの宇宙線解析に大気補正として用いられているミーライダーの結果と同量程度のVAODが得られ、CLFシステムは宇宙線解析における大気補正システムとして有用性が高いことを示した。

## 4. まとめ・今後の展望

超高エネルギー宇宙線解析の決定精度向上のため、CLFシステムにおけるVAOD解析を行った。CLFシステムにおいて算出されたVAODは、別実験のミーライダーのVAOD分布の結果に相関が得られ、大気透明度として機能とする値であることを示した。

CLFシステムはFDでの宇宙線解析の大気補正に用いられているライダー装置に代わる新しい大気透明度算出システムとして提案する。今後CLFにおけるVAODの算出誤差を±20~30%にし、大気影響による宇宙線解析の系統誤差を10%程度に抑えることが期待される。

### 参考文献

- 1) T. Tomida, "宇宙線望遠鏡計画における大気透明度の研究", PhD thesis, University of Yamanashi, 43-45(2012).