宇宙線望遠鏡実験用大気透明度測定装置の開発*

富田孝幸** 本田 建*** 千川道幸† 福島正己†† 有働慈治†††

Development of atmospheric transparency measurement device for the Telescope Array experiment

TOMIDA Takayuki, HONDA Ken, CHIKAWA Michiyuki, FUKUSHIMA Masaki and UDO Shigeharu

The atmospheric transparency measurement for the Telescope Array (TA) experiment in Utah, USA is done by using LIDAR system and CLF system that use the pulse laser (355 nm). The LIDAR system observes the backscattering light of the laser, and the CLF system observes the side scattering light. The consistency of the time variation of an atmospheric transparency was confirmed into the observation method and the analysis in both systems.

Key words: telescope array, LIDAR, CLF, fluorescence, atmospheric transparency, remote sensing, laser

1. 序 論

宇宙線とは宇宙空間から地球に入射する放射線の総称である。高エネルギー宇宙線は大気中の原子核と次々に相互作用を起こして爆発的に二次粒子を作り、空気シャワーと呼ばれる現象を引き起こす。米国ユタ州の広大な荒野（標高 1400m）で行われている宇宙線望遠鏡 (Telescope Array: TA) 実験では、地上で二次粒子の荷電成分を直接観測する地表粒子検出器 (Surface Detector: SD) と、二次粒子が発する蛍光を観測する大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector: FD) の 2 種類の装置で 10^{18} eV 以上の超高エネルギー宇宙線の観測を行っている。図 1 の TA 実験の検出器の配置図で示されるように、SD は観測サイト全域に 507 台設置され、FD はそれを取り囲むように建設された 3 か所の拠点 (FD ステーションと呼ぶ) に設置されている。FD は口径 3m の望遠鏡と 256 本の PMT (浜松ホトニクス: R6234) を 16×16 に並べたカメラで構成される。FD ステーションでは空気シャワーの発達を詳細に捉えるため、上下視野用の FD を 1 対として、6 対並べて設置されており、方位角 108° 、仰角 $3 \sim 33^\circ$ の広大な観測域を確保している。

FD では空気シャワー中の二次宇宙線によって引き起こされる大気蛍光現象を観測するため、月の出ていない暗夜のみ観測を行う。発生した蛍光は FD までの伝搬過程で大気中の分子やエアロゾルによる散乱によって、その光量は減衰する。FD での宇宙線観測は FD で捉えた光子数を測定して二次粒子から発生した蛍光量を推定し、この蛍光量から算出した空気シャワーでの全エネルギー損失から宇宙線のエネルギーを決定する。このため伝搬過程の大気の透明度を理解する必要がある。特にエアロゾルは観測地の風や降雨などの影響で日々刻々とその存在量を変化させるため、その大気透明度への影響を測定し、FD での受光量を補正することが極めて重要となる。

TA 実験でも他にもれず日々刻々と変化する大気の透明度を測定する必要がある。TA 実験の大気透明度測定は LIDAR (Light Detection And Ranging) システムと CLF (Central Laser Facility)

Fig. 1 Overall view of TA site

システムの 2 種で行われ、両者ともそれぞれレーザーを大気中に放ち大気中の散乱光を観測することで大気透明度を測定するものである^{1)~3)}。LIDAR システムと CLF システムの設置位置も図 1 内に示される。LIDAR システムは実験サイト南東に建設された FD ステーションの敷地内に設置されており、同一の経緯台に設置されたレーザー装置と観測装置を用いてレーザーの後方散乱光を観測する。また、CLF システムは TA サイトを取り囲む 3 か所の FD ステーションから等距離 (20.8 km) の位置に設置されており、レーザーの側方散乱光を FD で観測する。本論文は TA 実験における 2 種類の大気透明度測定装置である LIDAR システムと CLF システムの開発、建造について述べると共に、LIDAR システムにより後方散乱光から測定される大気透明度と CLF システムにより側方散乱光から測定される大気透明度について相互に検証するものである。

2. LIDAR システム

LIDAR という観測法は、主に気象や自然環境の分野におけるエアロゾルの測定を目的として発達したもので、高エネルギー宇宙線実験ではあまり活用されてこなかった。しかし、TA 実験で

* 原稿受付 平成 23 年 8 月 30 日
 ** 学生会員 山梨大学大学院 (山梨県甲府市武田 4-4-37)
 *** 正会員 山梨大学
 † 近畿大学 (大阪府東大阪市小若江 3-4-1)
 †† 東京大学 宇宙線研究所 (千葉県柏市柏の葉 5-1-5)
 ††† 神奈川大学 (神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1)

Fig. 2 Photograph of LIDAR system
Left: LIDAR system Right: Dome for protection system

はこの LIDAR という観測法をいち早く取り入れ有効に活用している。図 2 に示すように、システム全体は FD ステーションの北東 100m に設置された天文観測ドームに格納されている。

LIDAR システムはレーザー射出部、経緯台、受光部とデータ取得部で構成される。レーザーは波長 355nm (3 倍高調波) の空冷式 Nd:YAG レーザー (New Wave Research: Orion) を使用している。大気蛍光の波長は 300 ~ 400nm であるので、中心波長である 355nm のレーザーを用いることにより大気蛍光が FD まで伝搬する過程での減衰をよく見積もることが可能である。レーザーはパルス幅 4 ~ 6ns, 1Hz で射出される。射出部は他にビームスプリッター CaF₂ ウィンド (シグマ光機: OPCFU-30C03-P), $\lambda/4$ 水晶波長板 (シグマ光機: WPQ-3550-4M), エナジープローブ (Coherent: J50LP-1A) から構成されている。射出されたレーザーは直線偏光しているので $\lambda/4$ 水晶波長板を通じ円偏光に変換し、ビームスプリッターを用いてビームの 8% を反射させる。この反射光をエナジープローブで捉え、レーザー出力を相対的に測定する。

経緯台および受光部は口径 30cm の自動導入型シュミットカセグレン式望遠鏡 (Meade: LX200GPS-30), 光検出には光電子増倍管 (浜松ホトニクス: R3479) を用いる。観測時には高圧電源 (松定プレジジョン: HJPM-2N1-SP) で -1700V を光電子増倍管 (PMT) に印加する。この望遠鏡の補正レンズは紫外光透過率 80% のアクリル板に換装しており、従来のものに比べ紫外光の集光に優れたものになっている。PMT は望遠鏡の接眼部に固定してあり受光する仕組みになっている。また PMT 表面には紫外線透過フィルター (SCHOTT: BG-3) を装着しており、夜光等のノイズ除去をすることで SN 比の向上がなされている。望遠鏡経緯台を改造してレーザー光学系を鏡筒傍に設置することで、射出光線方向と受光部が同期する造りになっている。PMT からの信号はデジタルオシロスコープにより 20ns の時間分解能で記録される。LIDAR システムの概略図を図 3 に示す。

1 回の LIDAR 観測はレーザー出力 ~ 4mJ での水平観測と、レーザー出力 ~ 4mJ と ~ 2mJ での垂直観測の 3 種の観測が行われる。水平射出観測と垂直観測はそれぞれ地上付近と上空の大気状態を理解するために行われており、精度よいデータを得るために 500 発のデータを取得している。これは、遠方から届く散乱光子数が指数関数的に減少するために光子検出の不確実性が増すため、統計量を増やすことによりこの点を回避するためである。LIDAR システムは FD 視野を明るくしてしまい、観測中にはノイズ源になってしまうので、FD 観測前後 2 回の大気透明度測定を行う。2007 年 9 月から現在に至るまで 3 年間観測が続けられている。

Fig. 3 Block diagram for LIDAR system

Fig. 4 CLF container and power generation system (top) and optics of CLF (bottom)

3. CLF システム

CLF システムは 3 カ所の FD ステーションの中心位置にコンテナを使用して建設されている。そして、FD 観測中に 30 分間隔で垂直に紫外線レーザーのパルスを射出し、FD でその大気による側方散乱光を観測することにより大気透明度を求める。CLF システムの外観を図 4(上) に示す。

CLF システムの概略図を図 5 に示す。CLF システムの主要部は電力供給部、レーザー射出部と光学系、制御部で構成されている。

レーザーは 3 倍高調波の水冷式 Nd:YAG レーザー (Big Sky Laser Technologies: Ultra CFR) を使用しており、波長は 355nm である。LIDAR システムと同様にレーザー波長を 355nm とすることで、擬似的な大気蛍光として FD でその側方散乱を捉えることが可能となる。

レーザー光は多くの光学系を介した後に大気中に射出される。光学系の外観を図 4(下) に示す。はじめにレーザー光を 2 種のハーモニクセパレーター (CVI laser: BSR-31-1025, BSR-35-1025) に通して基本波、2 倍高調波を取り除くことでレーザー出力の計測精度を高めている。3 倍高調波のみになったレーザーの 10% をビームスプリッター (CVI laser: WG4105-0A) で反射させて、レーザー出力測定プローブ (LASER PROBE inc.: RjP-734, rm3700) を用いレーザー出力を相対的に測定する。その後、ビー

Fig. 5 Block diagram of devices for CLF

ムエキスパンダー (CVI laser:BXUV-4.0-3X) によりビーム径を3倍にした後、脱偏光板 (SIGMA KOKI: DEQ-2S) によってビーム断面上でランダムな偏光にする。ランダムな偏光状態にすることによって、散乱光が光軸に対して 360° 一律な散乱強度を持つようになる。これにより3ヶ所のFDステーションに向かって散乱する光量は等しくなり、標準光源として大気を含めたFD検出器の較正に使用することが可能となる。最後に反射鏡 (CVI laser: EH-353/633-1037-45UNP) で垂直に跳ね上げられCLF射出口より射出される。1回の測定では10Hz、300発のレーザーを射出し、測定終了後には垂直の光軸上にレーザー出力絶対値測定用のプローブを導入し、絶対出力と相対出力の同時測定により両者の相関を測定している。この相関とCLF観測時に測定される相対出力から射出出力を見積もることが可能である。

レーザー射出等の制御はCLFのコンテナ内に設置されたシングルボードコンピュータ (Technologic systems: TS-5500) で行われる。また、CLFのレーザーによる観測はFD観測中に行われるため空気シャワーによるイベントとの簡単な分別のために、レーザー射出タイミングはGPSモジュールによって制御されている。

CLFシステムは実験サイト中心に設置されているため、周囲は砂漠に囲まれている。そのため独自に太陽光発電システムとLPガス発電機 (Cummins/Onan: RS12000) を設置し、稼働電力を供給している。通常時は制御系と環境モニターのみが稼働しており、運用コストの面からその電力は太陽光発電システムによって賄われる。しかし、レーザーを使用する観測時とコンテナ内の保温用ヒーター使用時は数kWの電力を必要とするためLPガスによる発電機を起動し電力を供給している。

レーザーは水冷式のレーザーを使用しているので、冬期におけるコンテナ内の温度低下は即レーザー冷媒の凍結による故障につながる。そこで、CLFシステムでは安定な自動温度管理および発電機の遠隔制御が必要とされる。そのために電力供給部、環境モニターなどを含む環境管理部、通信用の長距離通信用アンテナも組み込まれている。温度管理のために、CLFコンテナ内部の温度は1分刻みで測定され、シングルボードコンピュータに記録されている。この情報は5分毎にTA実験のローカルネットワークを通じて、観測員の活動拠点であるコズミック・レイ・センター (CRC) 内の発電機制御用パソコンに送信される。CLFコンテナ内部の温度が低下した場合、制御用パソコンは発電機を遠隔起動し保温用ヒーターを動作させる。CLFコンテナ内部の温度が十分に高くなると同様のプロセスでヒーターと発電機は自動停止する。また、FD観測期間中は観測時間の1時間程前に発電機が自動起動され、観測終了後に自動停止する。CLFシス

Fig. 6 Detected intensity (Top) and the back scattered intensity of LIDAR (Bottom)

テムは安定な自動観測を2008年12月からこれまで2年以上に渡って続けている。

4. 大気透明度解析

本章ではLIDARシステムとCLFシステムから得られる受光データの解析方法について記す。

4.1 LIDAR データの解析

LIDARシステムによって受光強度の時間分布 $W(t)$ が得られ、 $W(t)$ から大気透明度 $T(x)$ の関数である消散係数 $\alpha(x)$ を求める。消散係数 $\alpha(x)$ は減衰長の逆数として定義され、伝搬距離 x とするとレーザーの伝搬経路における大気透明度 $T(x)$ は式 (1) で表される。

$$T(x) = \exp \left[- \int_0^x \alpha(x') dx' \right]. \quad (1)$$

散乱光の光量は観測装置との距離の二乗に反比例するので、望遠鏡で観測される光量と散乱点での後方散乱強度の関係は $F(x) = W(t)x^2, (x = Ct)$ となる。受光強度の時間分布 $W(t)$ を図6上図に、後方散乱強度 $F(x)$ の空間分布を図6下図に示す。

LIDARからの距離 x における消散係数 $\alpha(x)$ はLIDAR方程式 (2) によって与えられる。

$$\frac{1}{F(x)} \frac{dF(x)}{dx} = \frac{1}{\beta(x)} \frac{d\beta(x)}{dx} - 2\alpha(x). \quad (2)$$

ここで、 $\beta(x)$ は後方散乱係数である。消散係数 $\alpha(x)$ と後方散乱係数 $\beta(x)$ の関係を仮定するLIDAR方程式の解法は様々である。水平方向の観測の場合、大気状態は大気分子とエアロゾルの散乱への寄与が一定と仮定し slope 法⁷⁸⁾を適用する。slope法では $d\beta/dx = 0$ とすることでLIDAR方程式の解式 (3) を得る。

$$\alpha = - \frac{1}{2} \frac{dF(x)}{dx} \quad (3)$$

 Fig. 7 Height distribution of α measured by LIDAR

垂直方向の大気状態は大気分子とエアロゾルの散乱への寄与が一定でないで Klett's 法⁹⁾¹⁰⁾を適用し上空の消散係数の高度分布を求める。Klett's 法では消散係数と後方散乱係数の関係を $\beta \propto \alpha^\kappa$ として、LIDAR 方程式の解である式 (4) を得る。

$$\alpha = \frac{F(x)^{\frac{1}{\kappa}}}{\frac{F(x_c)^{\frac{1}{\kappa}}}{\alpha(x_c)} + \frac{2}{\kappa} \int_x^{x_c} F(x')^{\frac{1}{\kappa}} dx'} \quad (4)$$

この解法は境界条件として既知の消散係数 $\alpha(x_c)$ を必要とするので、エアロゾルの散乱への寄与が極めて少ない高空の散乱を大気分子のみによるレイリー散乱と仮定して境界条件として利用する。

LIDAR システムによる水平観測と垂直観測とこのような解法を利用することで、地上からの高度 h における大気中の分子およびエアロゾルの混合状態の消散係数 $\alpha(h) \text{ km}^{-1}$ が得られる。また、大気分子によって引き起こされるレイリー散乱の消散係数 $\alpha_M(h)$ は実験と計算値が 1% で一致するので、実験サイトの近くで定期的に行われているラジオゾンデ観測による気圧、気温の高度分布を利用し算出される⁴⁾⁵⁾⁶⁾。式 (5) で示されるようにエアロゾル散乱による消散係数 $\alpha_A(h)$ は観測で得られる消散係数 $\alpha(h)$ からレイリー散乱の消散係数 (計算値) $\alpha_M(h)$ を差し引くことで得られる。

$$\alpha_A(h) = \alpha(h) - \alpha_M(h) \quad (5)$$

図 7 に LIDAR 観測から得られる消散係数の高度分布の例を示す。水平観測による測定値は黒丸、垂直観測による測定値は十字点、レイリー散乱の消散係数 (計算値) 実線、測定値からレイリー散乱分の消散係数を差し引いたエアロゾルの消散係数は四角点で示される。LIDAR システムの垂直観測では、受光強度が強くなる装置近傍の測定ができないため、地表から高度 500m までのデータは得られていない。

4.2 CLF データの解析

CLF システムのレーザーの側方散乱光を FD で観測することで得られるのは LIDAR システムと同様に受光強度の時間分布である。PMT 1 本毎の受光量は図 8 で示されている。図中の六角形の格子で個々の PMT を表し、その濃淡で受光強度を表す。最上部の PMT で受光信号が途切れている原因は、FD による空気シャワー用の観測システムを利用しているため記録できる時間幅を超えているためである。1 対の FD の受光量の時間変化を示した図 9 では、PMT 端の境界効果でシグナルに小さな谷の様な構造が現れる。下視野のカメラは白四角、上視野のカメラは

Fig. 8 Image of side scattered CLF light observed by FD

Fig. 9 Time evolution of side-scattered CLF light observed by FD

黒丸で示され、FD の上下カメラの境界にはより目立った谷の構造が見られる。

ここで地表から散乱点高度 h までの光学的厚さを $\tau(h)$ (Vertical Aerosol Optical Depth: VAOD), FD から見た散乱点の仰角を θ とすると、CLF から散乱点までの大気透明度 $T(h)$ と散乱点から FD までの距離 L の間の大気透明度 $T(L)$ はそれぞれ、

$$T(h) = \exp[\tau(h)] \quad (6)$$

$$T(L) = \exp\left[\frac{1}{\sin(\theta)} \tau(h)\right] \quad (7)$$

となる。FD で得られる受光量を I_O 、射出光子数を N_0 、大気分子およびエアロゾルそれぞれの大気透明度を $T_M(h)$ 、 $T_A(h)$ 、散乱の角度依存性を $S_M(h, \theta)$ 、 $S_A(h, \theta)$ 、FD の測定効率を C とすると、

$$I_O = C N_0 T_M(h) T_A(h) \{S_M(h, \theta) + S_A(h, \theta)\} T_M(L) T_A(L) \quad (8)$$

となる。さらにエアロゾルの存在しない理想的な観測状態を仮定すると、 $S_A(h, \theta) = 0$ 、 $T_M(h) = 0$ 、 $T_A(h) = 0$ であるので、受光量 I_I は

$$I_I = C N_0 T_M(h) \{S_M(h, \theta)\} T_M(L) \quad (9)$$

となる。ここで、散乱点が低高度である場合は散乱の角度依存性にエアロゾルによる寄与が大きいため、エアロゾルの組成、粒径および存在量によって $S_M(h, \theta)$ は大きく変化する。そこで解析対象をそれらの影響が極めて少ない高高度のみ (7km 程度) とする

Fig. 10 Height distribution of the VAOD obtained by CLF

ことで、 $S_A(h, \theta) \approx 0$ とおけるので、式 (8) と式 (9) から

$$\frac{I_0}{I_1} = T_A(h)T_A(L) = \exp\left[-\frac{1 + \sin(\theta)}{\sin(\theta)}\tau_A(h)\right] \quad (10)$$

となり、エアロゾル散乱の地上から高度 h までの VAOD ($\tau_A(h)$) が得られる。図 10 に測定された τ_A の例を示す。データ点は図 10 に対応しており、さらに低視野の解析に関しては本解析の対象ではないため斜を掛けて示してある。

4.3 LIDAR と CLF から得られた大気透明度の比較

LIDAR システムと CLF システムは、それぞれ別のレーザーを用いて後方散乱光と側方散乱光を測定しており、その解析方法も異なる。このため、両者を比較することで有用性の評価が可能になる。LIDAR システムでは高度毎の消散係数が得られるのに対し、CLF システムは地上から高度 h における VAOD が得られる。このため、LIDAR システムで得られたエアロゾルによる消散係数 α_A を高さ方向に積分し VAOD を求め比較する。LIDAR では低高度の未測定領域は、地上の測定値および比較的地上に近い上空の測定値から指数関数で推定する。推定方法は 2 種類あり、それぞれの推定値は図 7 の破線で示される。一つは地上値と最低高度の上空値を指数関数で内挿したものである (図中の A)。また、もう一つは上空値の最低高度 h_{min} から $h_{min} + 1\text{km}$ の $\alpha_A(h)$ を指数関数でフィッティングし、関数を地上まで延長したものである (図中の B)。

図 11 に LIDAR システムと CLF システムから得られた VAOD の時間変化を示す。図中の四角点が LIDAR による測定値であり、三角点が CLF による測定値である。LIDAR による観測は FD の観測中に行うことができないが、この時間的空白を CLF でよく補間でき FD 観測時間中の時間変化を十分に捉えられていることが分かった。これにより後方散乱光と側方散乱光それぞれの観測による大気透明度の相補的な測定が可能であることが実証された。また同時に両装置ともに大気透明度測定装置として十分な観測機能が期待される。

5. 結 論

FD 観測による一次宇宙線のエネルギー決定には大気透明度による較正が不可欠である。TA 実験では LIDAR システムと CLF システムを用いて大気透明度を測定している。LIDAR システムでは消散係数の測定によって大気透明度の詳細な高度分布が得られる。また、CLF システムによって VAOD の時間変化が得られる。

Fig. 11 Time variation of VAOD at 8km above the ground

レーザー光の後方散乱光を測定する LIDAR システムと側方散乱光を測定する CLF システムから得られた VAOD の時間変動は一致しており、両装置の有用性が認められた。このことから LIDAR システムによる詳細な高度別測定と CLF システムによる詳細な時間変化の測定は相補的に利用可能である。

謝 辞

大気透明度観測システムが Telescope Array 実験の一部として建設され、長期間に渡って稼働されていることを、TA 実験の共同研究者全員に感謝します。Telescope Array 実験は日本、米国、韓国とロシアの共同研究であり各国から研究支援を受けて遂行されています。日本からは日本学術振興会科学研究費補助金の特別推進研究 (21000002)「最高エネルギーで探る宇宙極高現象」、科学研究費補助金の基盤研究 18204020(A), 18403004(B) と 20340057(B) の研究支援を受けており、米国からは米国全米科学財団の PHY-0307098, PHY-0601915, PHY-0703893, PHY-0758342, さらに、PHY-0848320 (ユタ), PHY-0649681 (ラトガーズ) の研究費補助金を受けています。ユタ州当局は経済発展局を通して、またユタ大学は研究担当副学長を通してこのプロジェクトを支援して頂いたことに感謝します。実験サイトの使用については、ユタの School and Institutional Trust Lands Administration (SITLA), 土地管理局, アメリカ合衆国空軍の協力を通して可能になりました。また、実験サイトがあるユタ州ミラード郡の人々と郡当局の適切かつ暖かな支援に感謝します。我々は、テクニカル・スタッフの貢献およびユタ大学高性能コンピュータセンター (CHPC) の貢献に感謝します。

参 考 文 献

- 1) T. Tomida et al., *Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference in Lodz*, (2009).
- 2) S. Udo et al., *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference in Merida*, **5** (2007) 1021.
- 3) M. Chikawa et al., *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference in Merida*, **5** (2007) 1025.
- 4) A. Bucholtz, *Appl. Opt.* **34** (1995) 2765.
- 5) H. Naus and W. Ubachs, *Optics Lett.* **25** (2000) 347.
- 6) M. Sneep and W. Ubachs, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **92** (2005) 293.
- 7) R.T.H. Collis, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **92** (1966) 220.
- 8) W. Viezee, E.E. Uthe and R.T.H. Collis, *J. App. Meteorol.*, **8** (1969) 274.
- 9) J.D. Klett, *Appl. Opt.*, **20** (1981) 211.
- 10) J.D. Klett, *Appl. Opt.*, **24** (1985) 1638.