

令和元年度 修士論文

TA 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卒業論文



提出者

信州大学 大学院 総合理工学系研究科 工学専攻 電子情報
システム工学分野

上濱 孝文

2020 年月日提出

序論

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う放射線であり、次々と地球に到来している。宇宙線は、1912年にオーストリアの物理学者 Victor F.Hess らによって、地上起源と考えられた放射線が上空から到来することを気球を用いた実験により証明し、この放射線が宇宙より飛来することを発見した。その後、宇宙線研究に対する興味は集まり、様々な実験が行われてきた。

これまで、 $10^8 \sim 10^{20}$ eV を超える広い範囲のエネルギーの宇宙線が観測されている。宇宙線の到来頻度はエネルギーの約 -3 乗に比例し、エネルギーが高くなるにつれて減少する。 10^{18} eV を超える、超高エネルギー宇宙線の起源は、極高エネルギー天体现象や、ビッグバンの痕跡素粒子などの様々な宇宙現象の解明につながると期待されており、宇宙物理学の大きな課題の一つとなっている。

Telescope Array 実験 (TA 実験) では、超高エネルギー宇宙線観測を目的として、主に 3 箇所の大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD) ステーションと多数の地表検出器の 2 種類の検出器を用いた大規模観測を行っている [1]。FD は空気シャワー中の荷電粒子が大気中を通過した際に生じる大気蛍光を光検出器 (Photo Multi Pulier:PMT) で撮像観測を行っている検出器である。観測地である米国ユタ州ミラード郡デルタは広大な砂漠を有しており、砂や塵等のエアロゾルが舞いやすい環境下にある。このことにより、大気蛍光現象による蛍光は発生点から FD までの伝播過程で大気中の大気分子やエアロゾルによって散乱・吸収され、減衰する。そのため、正確に宇宙線のエネルギーを推定するためには大気による蛍光の減衰量の理解が重要である。

現行の FD への大気校正として TA-LIDAR と呼ばれる、TA 実験サイトにおける一つの FD の横に配置されたモノスタティックライダーによる過去の大気透明度の測定平均値が用いられている。TA 実験の本意である宇宙線観測の邪魔にならないように、大気透明度の測定は FD による宇宙線観測の直前、直後に限定されている。冬季では最長 12 時間の FD 観測を行うこともあり、広大な砂漠において、風によって短時間で変動する大気をモニターすることが困難である。

そこで、TA 実験では 3 台の望遠鏡ステーションの中心に Central Laser Facility(CLF) を建設し、レーザーセンシングを用いて実験サイトの大気透明度を測定している。宇宙線の観測時間内に 30 分おきに垂直レーザーを射出して、大気中のエアロゾルによる散乱光を約 20km 離れた 3 箇所の望遠鏡で観測している。レーザーの散乱光の受光強度から、他日・他時間の測定と比較を行い、相対的に大気透明度を算出する。CLF では 30 分毎の大気透明度が得られるため、広大な砂漠地帯で時々刻々と変化する大気状況を高頻度で観察することが可能である。

天候状況や機器のメンテナンス等からデータの選定を行い、過去 3 年分、1853 の CLF 観測データを元に大気透明度を算出した。本研究では、高度 5km 地点における、エアロゾルによる消散係数の積分値を大気透明度として解析した。3 年分の大気透明度の分布の中央値と 1σ の分布幅は $0.037(-0.011)(+0.016)$ であった。TA 実験における他手法の装置の結果では $0.035(-0.013)(+0.019)$ であり、分布幅以内で中央値が一致した。また、時間的変動の点から大気透明度は夏に低く、冬に高い傾向が見られており、TA 実験サイト内で大気透明度の季節依存性があることが示唆された。別の望遠鏡ステーションで CLF を用いて測定された大気透明度と比較を行ったところ、差分平均は 0.001 であった。

以上の通り、本論文では、CLF を用いた大気透明度の測定について報告する。

目次

| | | |
|-------|---------------|----|
| 第 1 章 | 超高エネルギー宇宙線 | 1 |
| 1.1 | 宇宙線 | 1 |
| 1.2 | GZK カットオフ | 1 |
| 1.3 | 空気シャワー現象 | 3 |
| 1.3.1 | 縦方向発達 | 4 |
| 1.3.2 | 横方向分布 | 4 |
| 1.4 | 超高エネルギー宇宙線観測 | 4 |
| 第 2 章 | 宇宙線望遠鏡実験 | 6 |
| 2.1 | 地表検出器 | 6 |
| 2.2 | 大気蛍光望遠鏡 | 7 |
| 2.2.1 | 光学系 | 8 |
| 2.2.2 | PMT カメラ | 8 |
| 2.2.3 | データ収集システム | 8 |
| 2.3 | 雲モニター | 11 |
| 2.3.1 | IR カメラ | 11 |
| 2.3.2 | CCD カメラ | 12 |
| 2.4 | 大気モニター | 13 |
| 2.4.1 | TA-LIDAR システム | 16 |
| 2.4.2 | CLF システム | 16 |
| 第 3 章 | 大気散乱 | 19 |
| 3.1 | レイリー散乱 | 20 |
| 3.2 | エアロゾル散乱 | 21 |
| 3.3 | VAOD | 22 |

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| 第 4 章 | CLF システム | 23 |
| 4.1 | 背景・目的 | 25 |
| 4.2 | CLF システム構成 | 27 |
| 4.2.1 | 電力供給部 | 27 |
| 4.2.2 | レーザー部と光学系 | 29 |
| 4.2.3 | 制御部と環境管理部 | 32 |
| 4.3 | CLF システムオペレーション | 36 |
| 4.4 | リニアリティ測定 | 37 |
| 第 5 章 | CLF を用いた VAOD の算出 | 39 |
| 5.1 | VAOD 導出概念 | 39 |
| 5.1.1 | レーザーの射出エネルギー (E) | 42 |
| 5.1.2 | FD の受光量 (N_{plast}) | 43 |
| 5.1.3 | 大気のきれいな日の選定 | 45 |
| 5.1.4 | VAOD の算出 | 49 |
| 第 6 章 | 大気透明度の評価 | 56 |
| 6.1 | 別手法の大気透明度測定結果との比較 | 56 |
| 6.2 | 前身実験 HiRes の大気透明度測定結果との比較 | 57 |
| 6.3 | 別ステーションで測定された VAOD との比較 | 58 |
| 第 7 章 | 結論 | 62 |
| 7.1 | 結論 | 62 |
| 付録 A | 参考文献 | 64 |
| 謝辞 | | 65 |

第 1 章

超高エネルギー宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線は、宇宙空間に存在する高エネルギー放射線のことを指す。1912 年にオーストリアの物理学者 V.F.Hess によって、初めて発見された。79% が陽子、15% が α 粒子、残りの 6% が重い原子核や電子、光子で構成されている。宇宙線のエネルギースペクトルと到来頻度の関係を図 1.1 に示す。これまでに観測された宇宙エネルギーは $10^8 \sim 10^{20}$ eV のエネルギー域を持ち、その到来頻度はエネルギーの約 -3 乗に比例して変化する。図から $10^{15} \sim 10^{16}$ eV と 10^{19} eV 近辺に折れ曲がりの構造が見られ、それぞれ knee、ankle と呼ばれる。宇宙線強度は $f(E) = k \times E^n$ と表わせ、knee までの領域は $n \sim -2.7$ であり、knee から ankle まで領域では $n \sim -3.0$ である。宇宙線は大きく一次宇宙線と二次宇宙線に分けられる。一次宇宙線は、宇宙空間で飛び交う宇宙線を指し、二次宇宙線は一次宇宙線が大気に衝突した後の二次粒子のことを指す。

1.2 GZK カットオフ

1960 年代後半、Greisen、Zatsepin、Kuz7min は 10^{20} eV 以上の超高エネルギー宇宙線はビッグバンの名残といわれ、宇宙空間に存在する 2.7K の宇宙背景放射 [2] との相互作用によりエネルギーを失うため、約 100Mpc 以遠からは到達しないことを予言した [3][4]。この予言の考え方を唱説者 3 人の頭文字をとって、GZK カットオフと呼ばれている。

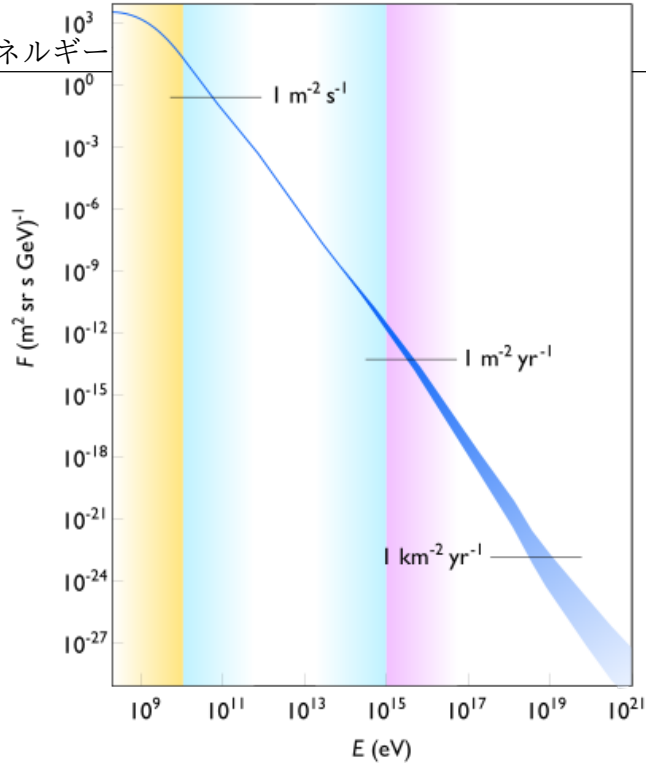


図 1.1 宇宙線のエネルギースペクトルと到来頻度

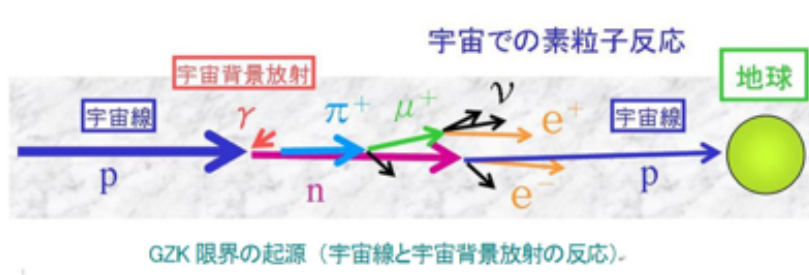


図 1.2 GZK 限界の起源 (宇宙線と宇宙背景放射の反応)

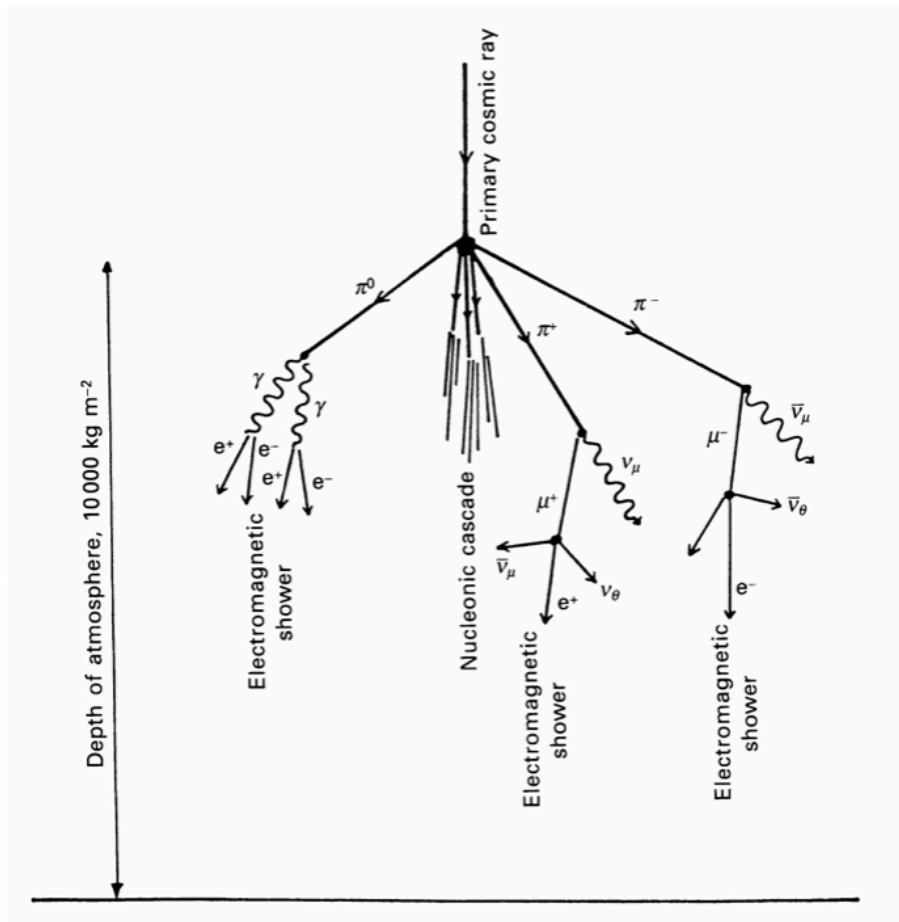


図 1.3 空気シャワー現象

1.3 空気シャワー現象

一次宇宙線が大気に突入する際、一次宇宙線は大気中の原子核と相互作用を引き起こし、陽子、中性子、ハドロンを増殖し、ハドロンシャワー等の二次粒子を形成する。この時、宇宙線のエネルギーは二次粒子に移行し、二次粒子は更に大気と相互作用を引き起こす。この事象を繰り返すことにより、大量の二次粒子がシャワー状に地表へ降り注ぐ現象を空気シャワー現象という。空気シャワー現象を模式的に図示したものを図 1.3 に示す。高エネルギー宇宙線による空気シャワー現象では二次粒子は相互作用や崩壊を繰り返し、最終的には大部分が電子と陽電子に変わる。

1.3.1 縦方向発達

宇宙線二次粒子が、大気を進むにつれて空気シャワーは発達し、シャワー中の粒子数が増加する。それとともに1粒子あたりのエネルギーは低くなり、やがてエネルギーの低くなった粒子は新たに粒子を生成できなくなり空気シャワーは減衰する。このような空気シャワーの通過した物理量に対する粒子数の変化は縦方向発達 (longitudinal development) と呼ばれる。

二次宇宙線は、 N_{max} (最大発達時) の観点において一次宇宙線とは異なる。また、 X_{max} においても異なり、重い原子核ほど X_{max} の値が小さくなる傾向がある [5]。これは、重い原子核ほど大気との相互作用断面積が大きく、より上空で発達が始まること、光子あたりのエネルギーが小さくエネルギー細分化が早く進むことに起因する。

1.3.2 横方向分布

電磁シャワーは電荷を持った粒子が大量に発生するため、シャワー粒子はシャワー軸から離れ広がっていく。このことから、シャワー軸と垂直な方向の粒子密度分布は横方向分布 (lateral distribution) と呼ばれる。横方向分布は一次宇宙線のエネルギーや宇宙線核種や相互作用等によって決まる。ハドロンシャワーによって形成される横広がりよりも、電磁シャワーの広がりは大きいため、空気シャワーを電磁シャワーの横方向発達で近似して考える事ができる。電磁シャワーについて荷電粒子のどこ方向分布が3次元で解析的に計算されており、それを Greisen が近似して得られた Nishimura-Kamata-Greisen (NGK) 関数がよく用いられる。

1.4 超高エネルギー宇宙線観測

前述したとおり、宇宙線は高エネルギーになればなるほど到来頻度は極端に小さくなるため、観測には広大な検出面積と長時間の観測が必要になる。空気シャワーの観測手法は大きく分けて2つある。空気シャワー中の荷電粒子が大気中を通過した際に生じるチェレンコフ光や大気蛍光といった微小な光の観測があげられる。地表に到達した2次粒子の観測は、地表に複数の検出器を配置して、そこを通過した粒子を測定することによって行われる。空気シャワーから発生する微小な光の観測は、望遠鏡の視野を大気に向け月のない暗い夜に観測を行う。電波を用いた観測は、電波の検出には成功しているが、実用的な空気シャワーの観測手段としては

確立されてはいない。これまでに ankle 領域を超えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線の観測には、AGASA 実験、HiRes 実験などが行われてきたが、両実験のエネルギー決定制度が 20% 程度あるため、その詳細は未確定である。これは、 10^{19} eV 以上の超高エネルギー宇宙線の到来頻度が年間 1 個/ 100km^2 程度と極めて低く、統計量が非常に少ないためである。このことから、超高エネルギー宇宙線の起源の解明と GZK カットオフ問題の解決には、より多くのデータ量とデータ容量が必要になる。現在、超高エネルギー宇宙線観測を行う実験グループは宇宙線望遠鏡実験 (Telescope Array: TA) 実験と Auger 実験の 2 つである [6]。TA 実験では、北半球のアメリカで観測を行っており、Auger 実験では南半球のアルゼンチンで観測を行っている。両実験により宇宙線の全点観測からの詳細な起源の探求が行われることが期待されている。

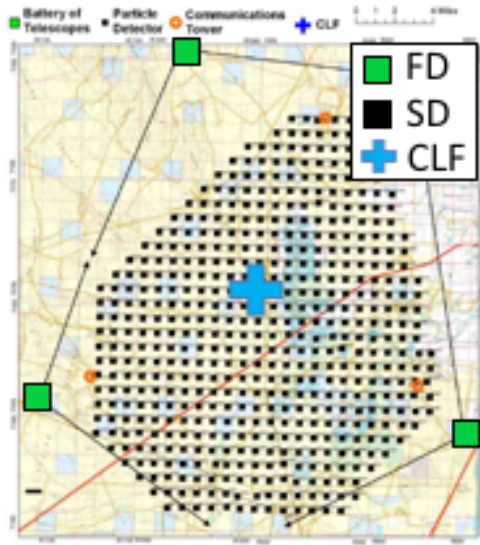
第2章

宇宙線望遠鏡実験

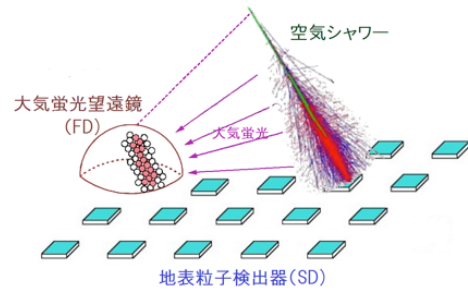
宇宙線望遠鏡 (TA) 実験は 507 台の地表検出器 (Surface Detector:SD) と 3 ステーションに設置された大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector:FD) を用いた超高エネルギー宇宙線の観測を行う実験である。米国ユタ州ミラード郡、北緯 39 度、西経 113 度、平均標高 1400m (大気深さ $875\text{g}/\text{cm}^2$) の砂漠環境が実験サイトとなっている。この場所は人工光が少なく、晴天率 60% 程度であり、大気蛍光の観測に適しており、また多数の SD を設置するのに十分な広さを有する。TA 実験における実験装置の配置を図 2.1 に示す。多数の SD は 1.2km 間隔でアレイ上に配置され、その SD アレイを取り囲むように FD ステーションが 3 カ所 (Black Rock Mesa”BRM”、Long Ridge”LR”、Middle Drum”MD”) に設置されている。また、3 カ所の FD ステーションから等距離の位置に Central Laser Facility(CLF) を設置し、大気透明度の測定を行っている。BRM 付近には線形加速器 (ELS) を設置し、大気蛍光望遠鏡の絶対エネルギー較正を行っている。SD、FD の 2 つの装置で宇宙線観測を行うことで、両検出器の系統誤差の見積もりを行えるだけでなく、より高いエネルギー決定精度、到来方向決定精度で観測を行うことができる。

2.1 地表検出器

図 2.2(a) に SD の外観を示す。TA 実験の SD はプラスチックシンチレーターを使用し、荷電粒子を直接観測する検出器である。SD はシンチレーター無線通信用アンテナ、ソーラーパネルを収納したステンレスボックス、エレクトロニクスとバッテリーを収納するステンレスボックスから構成される。

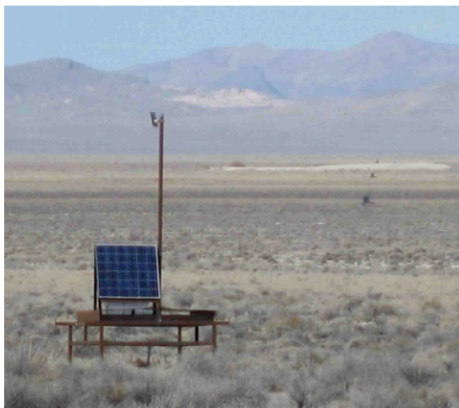


(a) 実験装置配置図



(b) 観測概要

図 2.1 TA 実験



(a)SD 外観



(b)FD 外観

図 2.2 観測装置

2.2 大気蛍光望遠鏡

図 2.2(b) に大気蛍光望遠鏡 (FD) の外観を示す。FD は空気シャワーが大気中の窒素分子等を励起することで発生する大気蛍光を複合球面鏡で集光させ、256 本の PMT がカメラとなり、宇宙線の撮像観測を行っている。TA 実験では 3 ヲ所の

FD ステーションを保有しており、ステーションごと 12~14 台の望遠鏡が設置されている。複数ステーションでステレオ観測することで空気シャワーのエネルギーや到来方向をより精度良く解析することが可能になる。

2.2.1 光学系

FD ステーションには上下視野に対応する FD が上下 2 段で 1 対に設置されており、さらにこの組み合わせを横に 6 対設置することで広視野での観測を実現している (図)。FD1 台あたりの視野は方位角 18.0 度、仰角 15.5 度であり、上下 FD 同士の視野を 1 度ずつ重なるように配置するので、1 ステーションの視野は方位角 108 度、仰角 3~33 度である。

FD に用いられる球面望遠鏡は球面鏡 (セグメントミラー) を 18 枚組み合わせ、曲率半径 6.067m、口径 3.3m とした合成鏡である。FD 望遠鏡を構成するセグメントミラーは対辺の距離が 660mm の 6 角形で、表面には Al_2O_3 でコーティング施してある。セグメントミラーは焦点距離でのスポットサイズが 30mm 以下になるよう調整された配置になっている。セグメントミラーの外観を図 2.3 に示す [7]。

2.2.2 PMT カメラ

PMT と PMT を構成するカメラボックスの外観を 2.4 に示す。FD の PMT カメラは、16 × 16 に並べた計 256 本の PMT (浜松ホトニクス社製 R9508) で構成され、各 PMT の感面上には BG3 フィルター (Schott 社製) が取り付けられている。BG3 フィルターを取り付けることにより、宇宙線の大気蛍光の波長域 300~400nm 以外の光を遮断する事が可能になる。これにより、夜光や外灯等のノイズの多くを除去することができ、FD が宇宙線以外のイベントをトリガすることが格段に少なくすることができる。また、観測環境は砂漠であり砂などの埃が PMT にノイズとして影響を与えると考え、カメラの前面には紫外透過パラグレス (クラレ社製) のカバーの役割となる箱で保護している。PMT からのアナログ信号は図 2.5 に示すようなデータ取得システムに送られる。

2.2.3 データ収集システム

FD のデータ取得用エレクトロニクスには VME ボードが採用されており、Signal Digitizer and Finder(SDF)、Track Finder(TF)、Central Trigger Distrib-

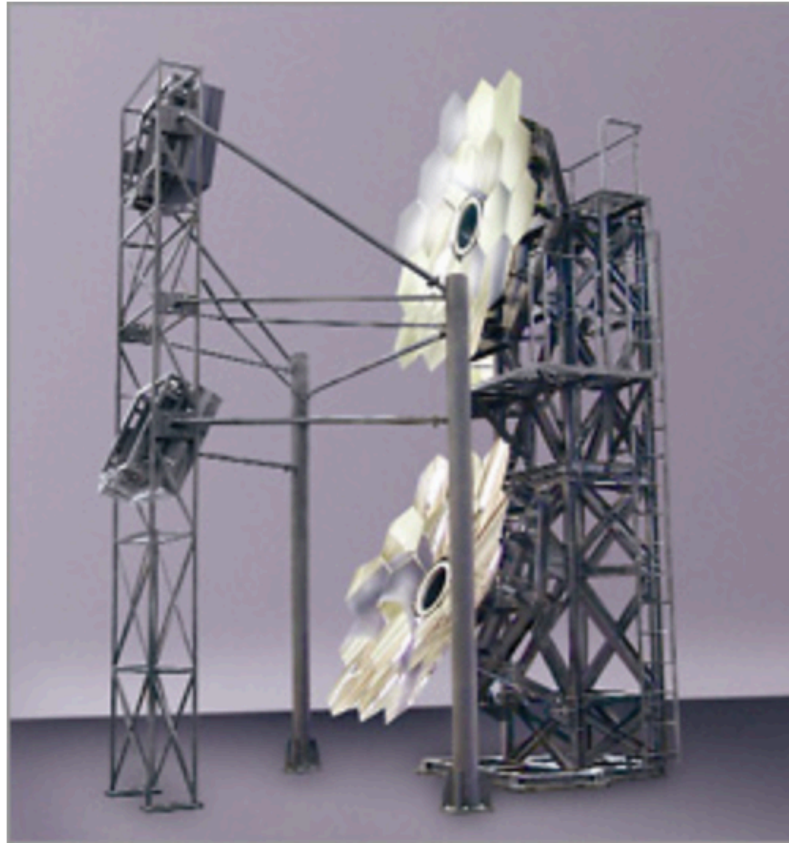


図 2.3 セグメントミラー外観

utor(CTD) で構成されている [8][9]。それぞれの VME ボードの役割をいかに述べる。

SDF の外観を図 2.6 に示す [10]。SDF:SDF は 256 本の PMT で光が大気蛍光かどうかの判定を行う作用を持ったモジュールであり、ファーストレベルトリガーとも呼ばれる。PMT アナログ信号を増幅させ、デジタル変換を行った後、SN 解析から PMT ごとの信号を判定する。PMT からのアナログ信号を 12bit、40MHz でサンプリングを行い、フラッシュ AD コンバーターでデジタル変換を行う。サンプリングされたデータは 4bin(100[ns]) 毎に積分され、12.8[μ s] 毎に記録される。記録されたデータ毎に S 比による SN 判定を行い、その判定結果を TF ボードに送信する。SDF ボード一枚には 16ch あり、それぞれ 1 本の PMT の判定をおこなうので、各カメラ毎に 16 枚の SDF が必要である。

TF の外観を図 ref2.7 に示す [10]。TF:TF は 256 本の PMT で取得した光が空気シャワーのトラックであるか認識するモジュールでセカンドレベルトリガーとも呼ばれる。TF ボードはカメラ 1 台分の SDF ボードから得られる信号の中に、隣

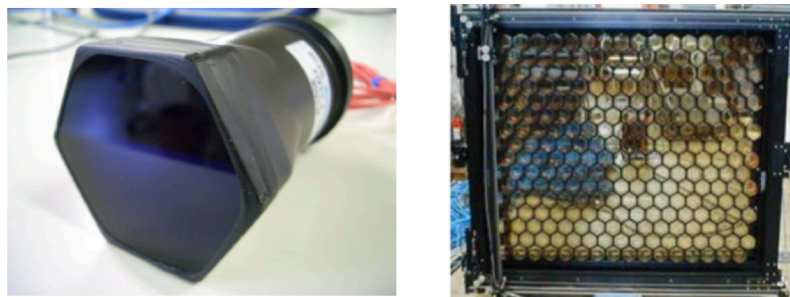


図 2.4 PMT とカメラボックス外観

り合う 5 本以上の PMT（カメラの端の場合、3 本以上）から信号、もしくは高い信号閾値を超えた信号を出力した PMT が 1 本以上ある場合、飛跡信号やその候補があると判定し、その判定情報を CTD ボードに送信する。

CTD の外観を図 2.8 に示す [10]。CTD:CTD は最終的に取得すべきデータがあるかを判定する、モジュールでファイナルトリガーとも呼ばれる。PMT カメラ毎の TF ボードからのトリガー情報を集め、PMT カメラ間にまたがる飛跡信号も含めた最終判定を行い、飛跡信号が会った場合データ取得信号を生成する。またステーション内、全ての FD を動悸させるための初期化信号の生成も行う。

FD は空気シャワーからの大気蛍光を測定することで、その発光量や発達過程から 1 次宇宙線のエネルギーや空気シャワーの最大発達深さを知ることができる。このため、FD の光子量検出効率、空気シャワーから FD までの伝搬過程での大気状態による光子減衰量、空気シャワー中の電子の単位エネルギーあたりの発光量を把握することが重要となる。これらは大気蛍光望遠鏡実験においての主な系統誤差の要因となっていた。空気シャワー解析時に較正值として使用するための大気モニ

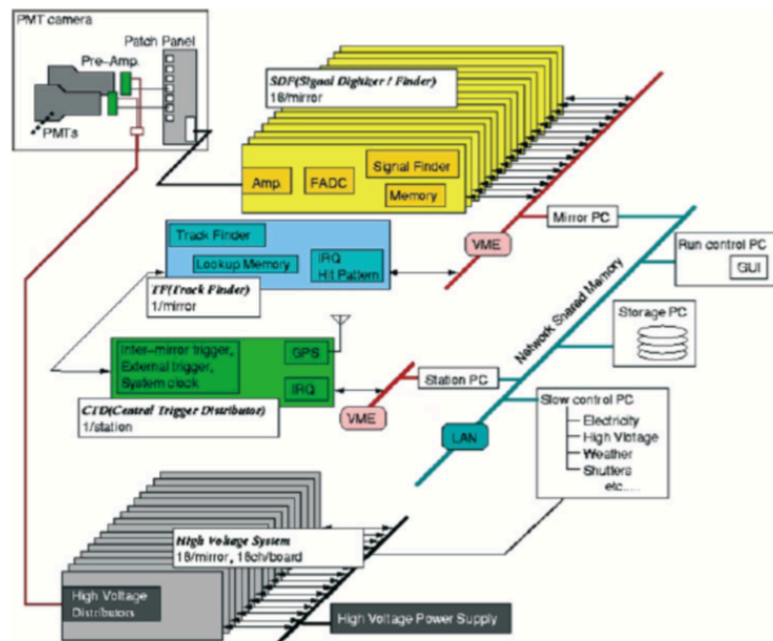


図 2.5 FD におけるデータ取得システム

ターシステムが必要になる。このような大気状態や雲等による系統誤差を補正するために TA では大気モニターや雲モニターが運用されている。

2.3 雲モニター

宇宙線観測時に雲が存在する場合、大気蛍光が FD 伝搬する過程で大きく減光、または光を遮断してしまうため、空気シャワー観測が困難を強いられている。そのため、TA 実験では雲量や雲底高度を測定し、空気シャワーの再構成に生かすために雲モニターを行っている。雲モニターの主な手法、機器は以下の 2 つである。

2.3.1 IR カメラ

IR カメラの外観を図 2.9 に示す。TA 実験サイトの BRM に設置されており、FD での宇宙線観測時に 30 分に一回、FD 視野内にカメラを動かし、雲の撮像を行っている。IR カメラの撮像例を図 2.10 に示す。温度が高く確認される位置には

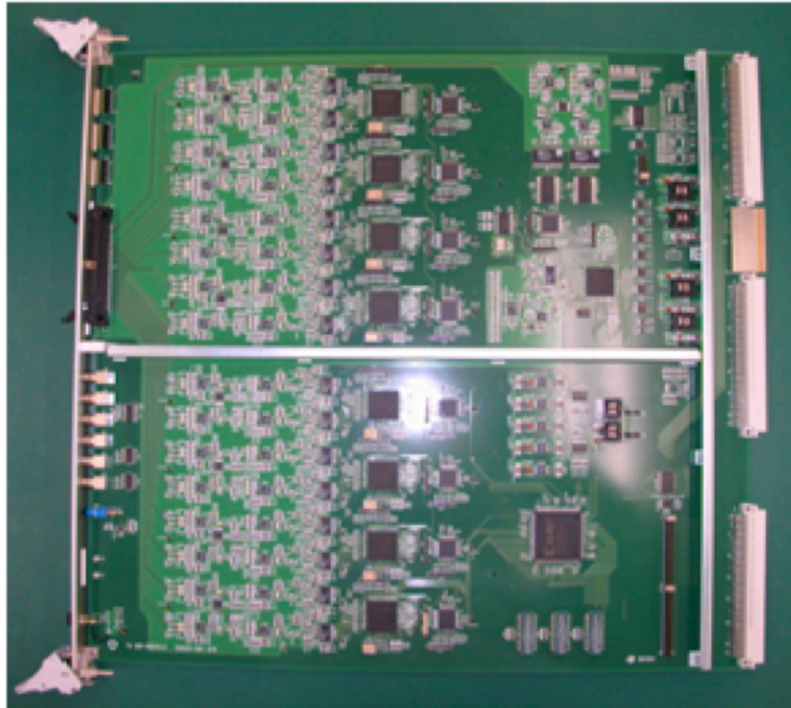


図 2.6 SDF 外観

雲が存在し、低い部分は雲が存在しないと判断するシステム構成となっている。IR カメラのコストは 300 万円と高価であり、保守に人手が必要なため、TA 実験では BRM での運用に限られている。

2.3.2 CCD カメラ

CCD カメラの外観を図 2.11 に示す。3 台の FD の横に配置され、魚眼レンズを用いて広範囲の垂直方向の雲の撮像観測を行っている。夜間の宇宙線観測時においての星の検出を行い、検出した星と天体カタログとの比較によって雲量の測定を行っている。CCD カメラの撮像例を図 2.12 に示す。特徴として、コストは 30 万円以下で抑えられ、環境依存も少なく保守の必要が少ないため長期観測が可能となる。現状、IR カメラの運用が厳しくなっており、カメラによる撮像画像データを人間の肉眼で見ることによって、空気シャワーデータの選定が行われている。人間による判断になるため、個人差が生まれてしまう。そこで魚眼レンズを用いた CCD による星解析を行うことで人間の目が変わりうる雲モニターとして期待され

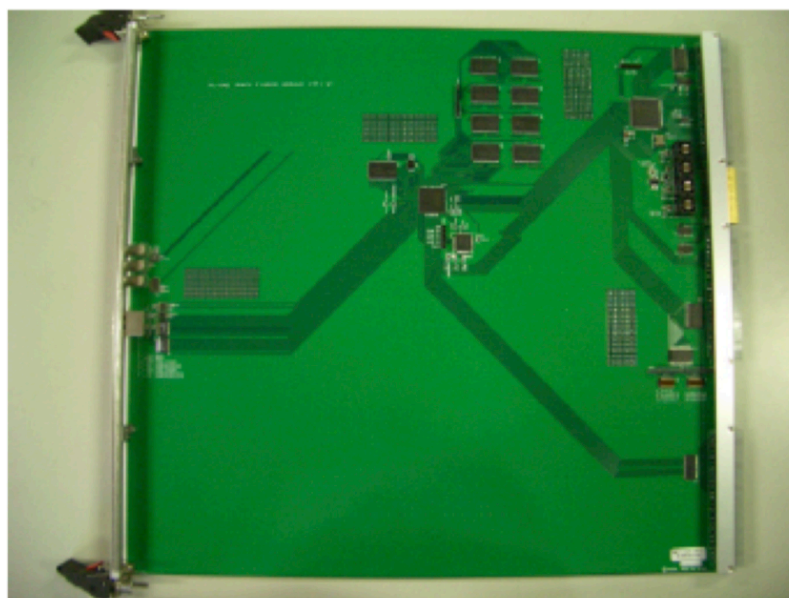


図 2.7 TF 外観

ている [4]。

2.4 大気モニター

前述の通り、空気シャワーによる大気蛍光現象で発生する紫外光は、発達地点から FD 到達途中に大気を伝搬する。そのため大気蛍光は大気分子やエアロゾルによって散乱・吸収し、減衰する。空気シャワーの発生地点は発生毎に異なるため、大気を伝搬する距離が変わり、大気減衰の度合も異なってくる。大気中の大気分子の分子量は一定であると考えられており、大気分子による減衰率は算出が可能である。しかし、TA 実験の観測環境においてエアロゾルの分布量は、短時間で大きく変動するため、その都度エアロゾルによる大気透明度を算出し、モニターする必要がある。ここでは、TA 実験における 2 つの大気モニターシステムについて述べる。

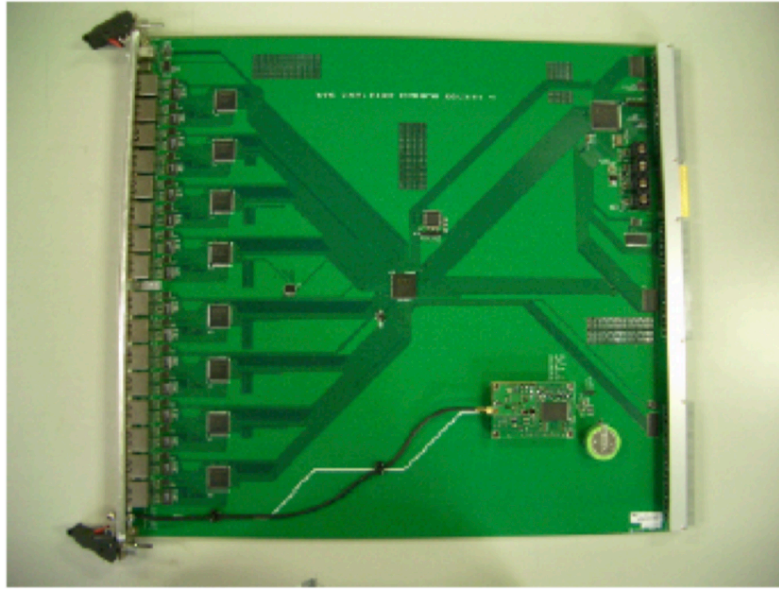


図 2.8 CTD 外観

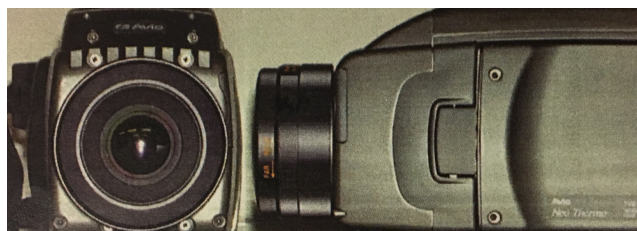


図 2.9 IR カメラ外観

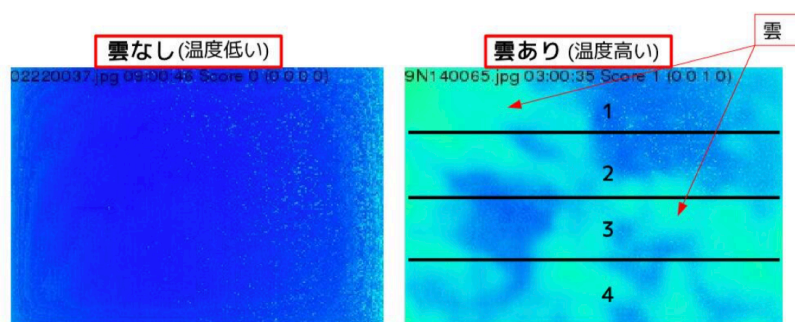


図 2.10 IR カメラによる撮像例



図 2.11 CCD 外観

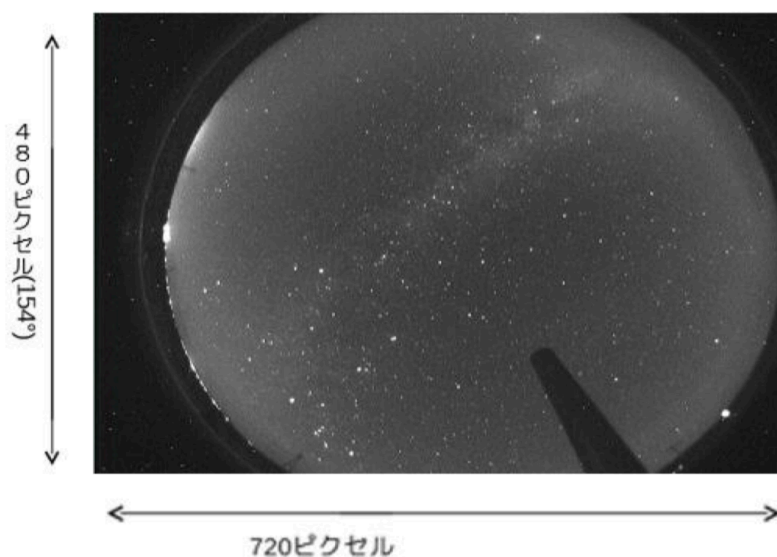


図 2.12 CCD 撮像画像例

2.4.1 TA-LIDAR システム

TA-LIDAR は TA 実験サイト（図 2.1 参照）における BRM の横に配置され、地面に対して水平方向と垂直方向の 2 方向にレーザーで紫外光を射出し、その後方散乱光を自ら保有する光検出器で観測することによって大気透明度を測定する。TA 実験の本意である宇宙線観測の邪魔にならないように、FD での宇宙線観測の直前と直後の 2 度の大気透明度の測定に限られる。TA-LIDAR の外観を図 2.13 に示す。現在、TA 実験では稼働しておらず、過去 2 年間の運用データによる大気透明度の平均値が FD の大気校正に使用されている。

2.4.2 CLF システム

TA 実験サイトにおける 3 台の FD から 20.8km 離れた中心に CLF は配置され、遠隔地からの操作により、地面に対して垂直方向に紫外光レーザーを射出し、大

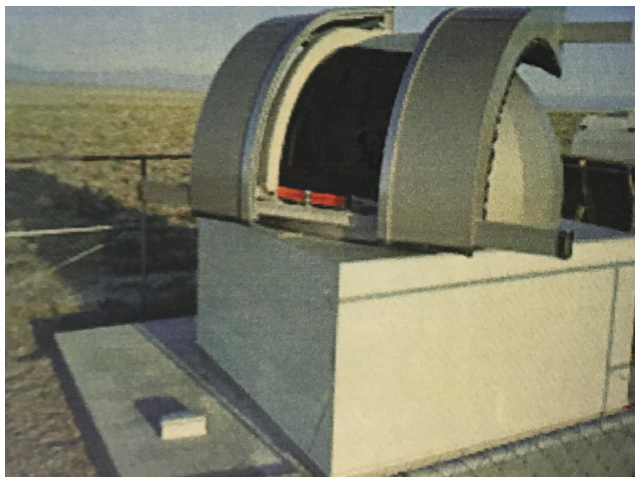


図 2.13 TA-LIDAR 外観

気散乱による側方散乱光を各 FD で観測することによって大気透明度の測定を行う。宇宙線観測時にオペレーションが可能であり、30 分毎の大気モニターが可能である。レーザー光を脱偏光状態にし、光軸に対して 360 度に等量程度、光を散乱させ、各 FD の標準光源としての役割も担っている [5]。CLF の外観を図 2.14 に示す。



図 2.14 CLF 外観

第3章

大気散乱

宇宙線が大気に衝突する際に、窒素分子などと励起することによって大気蛍光現象を引き起こす。発生した大気蛍光は、大気中を伝搬する過程で大気分子やエアロゾル等の散乱体によって減衰する。

ここで単位面積で厚み dx の立体に、大気蛍光が入射する場合を考える。この立体内に存在する平均的な吸収散乱断面積を σ 、単位体積あたりの散乱体の個数を N とすると、この立体の全吸収散乱断面積は $\sigma N dx$ となる。この立体に光量 I が入射する場合、散乱光 dI との関係は

$$dI = -I\sigma N dx \quad (3.1)$$

と表される。この両辺を積分すると

$$I \equiv I_0 \exp(-\sigma N x) \quad (3.2)$$

となる。 I_0 は吸収散乱媒質入射時の光量で、吸収散乱媒質内での全散乱光量が算出可能になる。さらに消散係数 $\alpha = -\sigma N$ と定義し、

$$I \equiv I_0 \exp(-\alpha x) \quad (3.3)$$

で置き換えたものをランバートベールの法則という。

ここで大気蛍光の場合を考えると、大気蛍光の伝播過程での散乱媒質は大気となり、大気中での散乱体の主な成分は大気分子と塵や埃などのエアロゾルが挙げられる。大気蛍光の大気減衰率のパラメータとして消散係数 α を用いる場合、大気分子による散乱とエアロゾルによる散乱は、散乱体の粒子直径と波長の関係により引

き起こされる散乱が違うため分けて考える。散乱粒子直径を D 、入射光の波長を λ とし、サイズパラメータ S を以下のように定義する。

$$S \equiv \frac{\pi D}{\lambda} \quad (3.4)$$

サイズパラメータ S と引き起こされる散乱の種類は以下のように分類される。

$S \ll 1$: レイリー (Rayleigh) 散乱

$S \approx 1$: ミー (Mie) 散乱

$S \gg 1$: 幾何光学的散乱

3.1 レイリー散乱

大気分子による散乱を大きくレイリー散乱と呼ぶ。酸素や窒素等の大気分子の原子間距離は 0.12~0.11nm、ファン、デルワールス半径は 0.152~0.155nm であり、レーザー波長よりも十分に小さいため、大気分子はレイリー散乱を引き起こす。大気中のレイリー散乱の消散係数 α_{Ray} は実験値が理論値を誤差 1% で再現する。よってラジオゾンデ観測データから気圧、気温の情報が得られれば、その大気状態でのレイリー散乱の消散係数を得ることが可能である。以下にレイリー散乱の理論値算出に関して説明する [6][7][8]。大気分子 1 個あたりのレイリー散乱による散乱断面積は入射乗によって誘導された電磁気的双極子の放射と考え、ある気圧、気温状態の分子密度を N 、同条件下での光の屈折率を n とした場合、

$$\sigma(\lambda) = \frac{24\pi^3(n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N^2 (n^2 - 2)^2} F_k, \quad F_k = \frac{6 + \rho}{6 - 7\rho} \quad (3.5)$$

と表される。 F_k は King correction factor というものであり、大気密度の異方性による係数で、入射光の波長に依存する。また ρ は depolarization factor である。ここで 1 気圧 ($P_0 = 1013.25\text{hPa}$)、気温 $+15^\circ\text{C}$ [$T_0 = (15 + 273.15)\text{K}$] の大気での散乱断面積を求める。この状態の分子密度は状態方程式

$$PV = nRT, \quad R = 8.31[\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}] \quad (3.6)$$

から $N_0 = 2.54 \times 10^{25}[\text{m}^{-3}]$ となり、同条件下の波長 λ の光の屈折率は以下の近似が可能である。

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = \frac{5791817}{238.0815 - (\frac{1}{\lambda}[\mu\text{m}])^2} + \frac{167909}{57.362 - (\frac{1}{\lambda}[\mu\text{m}])^2} \quad (3.7)$$

式 3.7 に 255nm を代入し、この条件下での波長 355nm の光の屈折率 $n_0 = 1.000286$ が得られる。ここで波長 355nm の入射光の場合、 $F_k = 1.052$ である。よって、1 気圧、気温 $+15^\circ\text{C}$ の大気状態での散乱断面積は

$$\sigma = 2.76 \times 10^{-30} [\text{m}^2] \quad (3.8)$$

となり、大気分子密度 N は理想気体の状態方程式 3.6 より算出可能であるので、

$$\alpha = N \times 2.76 \times 10^{-30} [\text{m}^2], \quad N = N_0 \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad (3.9)$$

が得られる。

その他にレイリー散乱の特徴として、一様な円偏光の光が入射した場合、微分散乱断面積が

$$\frac{\sigma}{\theta} \alpha (1 + \cos^2 \theta) \quad (3.10)$$

となり、前後方向に対称な散乱になる。図 3.1 にレイリー散乱の微分散乱断面積を示す [12]。

3.2 エアロゾル散乱

エアロゾルの典型的な直径は $1\mu\text{m}$ 程度であり、大きさは不均一である。ミー散乱の理論式において散乱体は球形であることを仮定している。エアロゾルは球形ではないために、エアロゾル散乱はミー散乱と同一とはいえないが、前述したサイズパラメータからミー散乱に近い散乱を引き起こすことが考えられる。しかしながら、エアロゾル散乱による消散係数 α_{Ray} の実験値はミー散乱の理論からの算出には、エアロゾルの存在量や素材の屈折率および複素屈折率を知る必要があり困難である。また、観測地は広大な砂漠であり、乾燥しており、風通しも良いためエアロゾルの浮遊量は日々大きく変化する。ゆえに、エアロゾルの消散係数は実験での測定が不可欠となる。TA 実験では大気透明度の測定のために、モノスタティックライダーである TA-LIDAR システム、バイスタティックライダーである CLF システムの 2 つの装置を建設した。TA-LIDAR システムや CLF システムから得られるのは大気分子とエアロゾルの混合気体の散乱情報である。先行研究からレイリー散乱の消散係数は大気密度と散乱断面積による算出は可能であり、実験値と理論値の誤差は 1% いないと極めて小さい。このことから、両散乱が混在する状態から、レイリー散乱の成分と切り分けることにより、エアロゾル散乱の様相を決定するこ

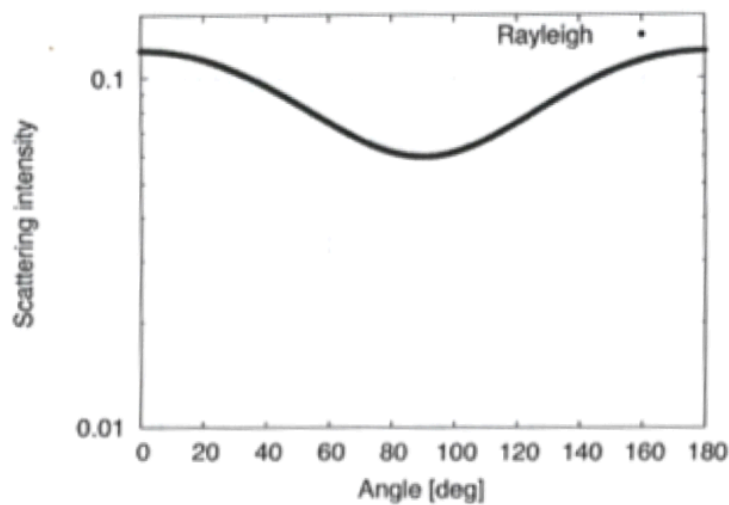


図 3.1 レイリー散乱の散乱強度

とができる。つまり、観測による全消散係数の値からレイリー散乱の成分を差し引くことで、エアロゾル散乱による消散係数を実験的に求めることができる。

3.3 VAOD

Vertical Aerosol Optical Depth (VAOD) は垂直方向のエアロゾルの光学的厚さを示す大気透明度である。高度 h までの VAOD を $\tau_{AS}(h)$ で表すと、 $\tau_{AS}(h)$ はエアロゾル散乱による消散係数の高度分布 $\alpha_{AS}(h)$ を地上から地上高度 h まで積分することで得られる。

$$\tau_{AS}(h) \equiv \int_0^h \alpha_{AS}(h') dh' \quad (3.11)$$

第4章

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に米軍コンテナを流用して建設されており、FD観測中にレーザーを射出し、FDでその大気による速報散乱光を観測することで大気透明度を測定することができる。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おり、その他に自動遠隔観測および保守のための環境モニターを含む環境管理部、通信用の長距離通信用アンテナも存在している。CLFの場合、FDによって散乱光を受光するので受光部は独自に持たない。さらに、CLFコンテナには気象観測装置も設置されており、実験サイト中心の気象情報も取得している。CLFシステムの構成要素を表4.1に示す。CLFの周囲は砂漠に囲まれているため、CLFシステムには独自に太陽光発電システムとLPガス発電機を設置し、稼働電力を供給している、通常時、CLFシステムの電力は制御系と環境モニターは運用コスト等の面から太陽光発電システムで賄われる。しかし、レーザーを使用する観測地とコンテナ内の保温用ヒーターの使用時は数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。

CLFシステムのレーザーは波長355nmの水冷式Nd:YAGレーザーを採用している。レーザー波長を355nmとすることで、空気シャワーによる大気蛍光(300nm~400nm)の擬似的な光源として捉えることが可能となる。

CLFシステムのレーザー光は図4.1に示されるような多くの光学系を介し、多くの調整を経た後に大気中へ射出される。まずはじめに、2種のハーモニックセパレーターを通して、1倍と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はビームエキスパンダーによりビーム径を3倍にされた後、脱偏光板によってビーム断面上でランダムな偏光にされることで実質的に脱偏光状態になる。脱偏光状態にすることによって、散乱光は光軸

表 4.1 CLF システムの構成要素

| | Item |
|---------|--|
| レーザー制御部 | Nd:YAG レーザー（水冷式） ハーモニックセパレーター × 2 ビームスプリッター ビームエキスパンダー 反射鏡 脱偏光板 エナジープローブ × 2 |
| 制御部 | 低電力 PC 希少モニター 温度センサー 電圧センサー |
| 電力供給初 | LP ガス発電機 太陽光発電パネル × 5 バッテリー × 4 |

に対して 360° 様な光量を持つようになる。これにより 3 箇所の FD ステーションに向かって散乱する光量は一定となり、CLF レーザーの散乱光は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になる。脱偏光後、レーザー光をビームスプリッターによってその 10 % を反射し、レーザー出力測定プローブによってレーザー出力を相対的に測定する。ビームスプリッターを透過したレーザー光は最後に、反射鏡で垂直に跳ね上げられて CLF 射出口より射出される。また、1 回ごとの観測終了時に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、絶対出力と総体出力の同時測定により両者の相関を測定している。絶対出力と相対出力の関係と CLF 観測時の相対出力から射出出力は見積もることが可能である。観測デバイスの制御は CLF 内に設置されたパソコンで行われる。

また、CLF システムのレーザーの観測は FD で行われるため、空気者ワニー夜イベントとの簡単な選別のために、その射出タイミングは GPS モジュールによって制御されている。

CLF システムのレーザーは水冷式レーザーである。冬季におけるコンテナ内の温度低下はレーザーの凍結による故障につながってしまう。そのため、CLF は安定な自動温度管理および、発電機の遠隔制御の必要性が高い。

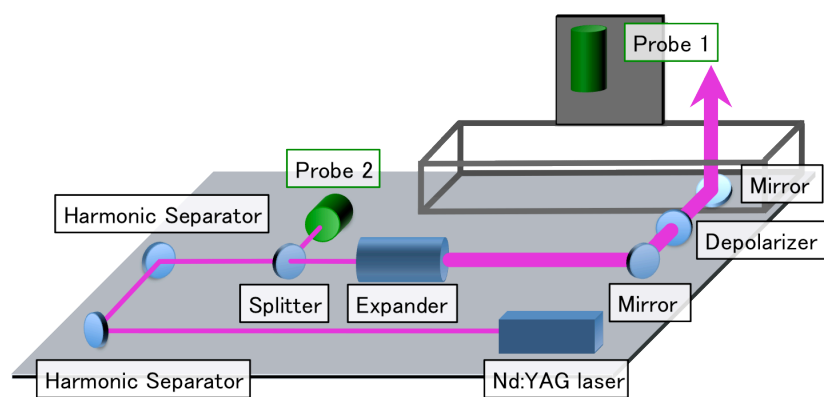


図 4.1 CLF 光学系

温度管理のために、CLF コンテナ内部は 1 分刻みで内部温度を測定して CLF 内のパソコンに記録される。この情報は、TA 実験のローカルネットワークを通じて、観測員の活動拠点になっている。発電機制御用パソコンは、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。CLF システムのダイアグラムを図 4.2 に示す。

観測時間の 1 時間ほど前に発電機制御用パソコンによって発電機は自動起動され、観測終了後に自動停止するようになっている。観測時間中は温度管理の機能を一時停止し、温度管理用プログラムとのコマンド同士の衝突を回避している。

以下、CLF システムの各部の詳細について述べる。

4.1 背景・目的

FD で正確に宇宙線観測を行うためには、蛍光の大気減衰率の理解が重要である。大気蛍光が発生した地点から、伝搬過程で大気を通過するため、望遠鏡までに散乱し、減衰する (図 4.3)。FD で受光した蛍光量から宇宙線のエネルギーや到来

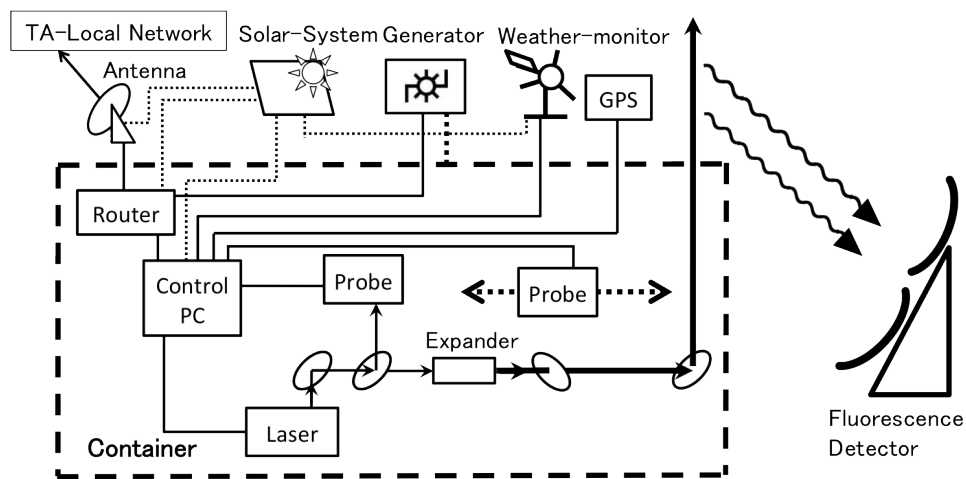


図 4.2 CLF システムにおけるダイアグラム

方向を推定しているため、大気による減衰は無視できない。FD で検出された宇宙線のデータに対して観測系の機器校正する他に、大気による蛍光減衰率や蛍光発生効率等の校正を行うことで、宇宙線のエネルギーの誤差を小さく見積もることが可能である。観測地は非常に空気が乾燥している広大な砂漠地帯であり、エアロゾルの分布量が短時間で大きく変化する。そのため、大気中のエアロゾルの分布量を高頻度でモニターすることで、即時の正確な宇宙線のエネルギーを推定することができる。CLF システムは 30 分毎にレーザーを射出して、大気透明度を 30 分毎に測定可能である。

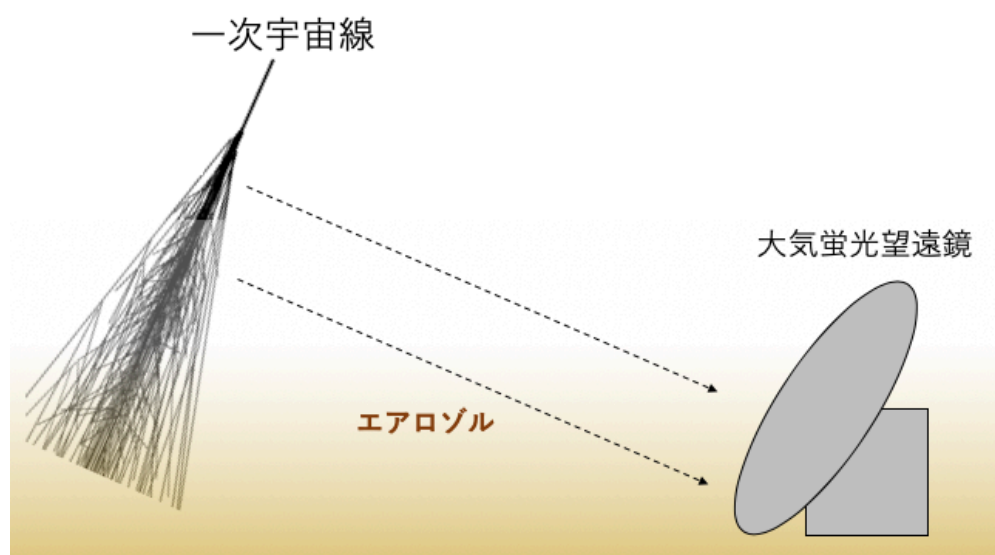


図 4.3 FD 観測における大気蛍光のエアロゾル散乱

4.2 CLF システム構成

4.2.1 電力供給部

約 900km 平方メートルの敷地面積をもつ実験サイトの中央に配置された CLF は設置されており、周囲は砂漠という過酷な環境下である。そのため、外部からの電力供給は不可能である。太陽光発電システムと LP ガス発電機の 2 つの発電手法を用いた電力確保を行っている。LP ガス発電は運用コストが非常に高いため、CLF 内ではレーザー使用時とコンテナ内の保温用ヒーター使用時に限られており、それ以外のシステム制御は太陽光発電システムで運用されている。電力供給システ

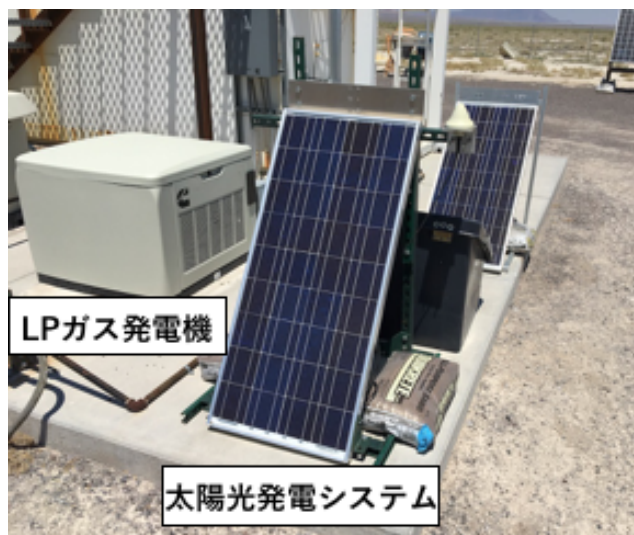


図 4.4 LP ガス発電機、太陽光発電システム外観

ムの外観を図 4.4 に示す。

太陽光発電システムは、太陽光パネル（京セラ製:KC125TJ × 4、シャープ製:ND-L3ELJE × 1）5 枚、充放電コントローラー（Xantrex”TRACE”製:C40 × 2、MORN-INGSTAR 製:SunLIGHT × 2）4 台、バッテリー（DYNASTY 製 DCS-100L）4 台で構成されている。太陽光発電パネル 2 枚と MORNINGSTAR 製の充放電コントローラーは、LP ガス発電機の起動用バッテリーの保守用と CLF 環境モニターの保守に用いられる。この装置の発電量は最大 600W であり、最大蓄電量 400Ah(4800Wh) である。日の出、日の入り時間が季節ごとに異なるため、FD の観測時間も異なる。冬期の観測時間が 16 時間であると長めに見積もり、更に悪天候等のトラブルによる発電不能な日を考慮して安全係数を 5 倍取ると、制御用ボードパソコン、気象観測装置、長距離通信用アンテナ、及び CLF 内のローカルネットワーク用のルーター等の消費電力は合わせて 60W 以下にしなければならない。太陽光システムで稼働する装置とその消費電力を表 4.2 に示す。

LP ガス発電機は Cummins 社製 Onan Generator を使用しており、CLF システムには予備電源を含め、2 台設置されている。この発電機は 60Hz 交流 120V で 12kW の出力を持つ。発電機はそれぞれ個々に IP アドレスを持つことが可能であり、外部から遠隔での動作状況を確認することが可能である。

表 4.2 太陽光発電システムで稼働する装置と消費電力

| Item | load Power [W] |
|---------------------|----------------|
| 制御用ボードパソコン | 5.0 |
| 長距離無線システム | 10.3 |
| CLF ローカルネットワーク用ルーター | 4.3 |
| 気象観測装置 | 0.1 |
| DCDC コンバーターによる損失 | 1.0 |
| その他 | 1.0 |

4.2.2 レーザー部と光学系

CLF システムでは、パルス幅を 1ns 単位で制御可能な Q スイッチ制御 Nd:YAG レーザーを使用している。Nd:YAG レーザーのような固体レーザーは個体媒体によってその波長は決まっており、この場合は波長が 1064nm の赤外線レーザーを発する。この赤外線レーザーに波長 355nm だけを抽出するようにフィルターを用い、3 倍高調波のみを得ることが可能になる。この CLF システムのレーザーは FD 観測時であるため、本旨である宇宙線観測の妨げにならないように、1 回のオペレーションを短時間で行わなければいけない。そのため、高頻度でレーザー射出を行うことができる水冷式レーザー (Big Sky Laser Technologies 社製:ULTRA CFR、Nd:YAG レーザー) が採用された。

CLF レーザーの仕様を表 4.3 に、レーザーの外観を図 4.5 に示す。CLF の光学系はレーザー光を蛍光の波長域である 355nm のみの光を抽出し、散乱光の角度依存性をなくし、脱偏光状態を作り出すように設計されている。CLF 内には光学用定盤が設置されており、複数の光学鏡を用いた光軸の設定を行っている。強風などによって、CLF コンテナが振動しても光軸が影響をできるだけ受けないように、地面に直接打ち付け固定を施してある。また、作業用の安全面と防塵等の装置保護の面から図 4.6 のように、トリ加工用に紫外線不透過のプラスチックで作られたカバーが取り付けられている。プラスチックカバーには、レーザー射出用の射出口が開けられている。

CLF レーザーから数 % の 1 倍波と 2 倍高調波が同時に射出される。これは波長変換用非線形結晶の変換効率は 100% ではないためである。FD で散乱光を観測するには、3 倍高調波の射出エネルギーを正確に測定する必要がある。ハーモニック



図 4.5 CLF レーザー外観



図 4.6 CLF 光学系用の定盤

表 4.3 Big Sky Laser Technologies 社製：Nd:YAG レーザーの仕様

| 型番 | |
|----------------------|--------|
| パルス幅 | 6~8ns |
| ビーム径 | 3.0mm |
| 最大射出出力@1064nm (1 倍波) | 100mJ |
| パルスレート | 0~20Hz |
| 最大パルスレート | 30Hz |
| ジッター | ± 7nm |

セパレータを用いて、3 倍高調波のみを反射させ、1 倍波と 2 倍高調波を透過させ、3 倍高調波のみのレーザー光を得ている。ハーモニックセパレータの 3 倍高調波の反射率は 99.5% であり、1 倍波、2 倍高調波の透過率は 90% である。

TA 実験の 3 台の FD に可能な限り一様な光量にするために、レーザー光を脱偏光状態にする必要がある。発射時のレーザーは直線偏光の状態であり、散乱が発生した場合散乱強度は偏光方向に依存してしまい、ステーション間の光子検出効率の較正が不可能になる。このような状況を避けるため、脱偏光板（シグマ光機製:DEQ-2S）を用いて、光線断面上の偏光を不規則な状態にしている [12]。CLF レーザーは、ビームエキスパンダーによりレーザー径を 3 倍にしてある。これは、脱偏光板は光線断面積が大きいほど変換効率が高いためである。このビームエキスパンダーは望遠鏡と同様の構造をしており、これを通すことで遠方でのレーザー径の広がりを抑えることにも利用されている。脱偏光板は脱偏光状態を維持するために、定期的な調整を行う必要がある。そこで、脱偏光板を透過したレーザー光の 1 方向の偏光を切り出し、偏光プリズムを回転させながら、各方向のレーザー強度の測定を行っている。偏光試験で用いる偏光プリズムとその制御装置を図 4.7 に示す。この手法で不規則偏光具合を測定すると、完全に不規則な偏光状態であった場合は透過強度は一様になる [13]。

CLF のレーザー光をビームスプリッター（CVI laser 社製;WG4105-0A）により、10% を反射させ、レーザー出力測定用のエネルギーメーター（LASER PROBE inc. 製:RjP-734、rm3700）で測定を行っている。残りの 90% は（反射鏡 CVI laser 社製:EH-353/633-1037-45UNP）で最後に鉛直方向に曲げられ、大気に向かって射出される。使用しているエネルギーメーターを図 4.8 に、仕様を表 4.4 に示す。前述したとおり、CLF 装置には直径 2cm の射出口があり、そこから真下の定盤上にはミラー調整用の目印がある。そのミラー調整用の目印を用いて、鉛直方向への射出の

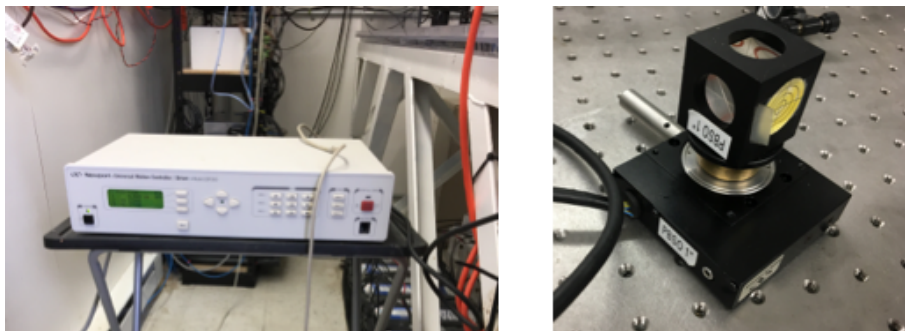


図 4.7 脱偏光試験装置（左:制御装置、右、偏光プリズム）

角度調整を行う。反射鏡上の光軸中心をこの目印上に来るように光軸調整を行い、あとは上部の直径 2cm の穴から射出するだけで精度 0.5° で射出が可能である。

FD で宇宙線観測時には、大気中に向かってレーザーの射出を行うために、ビーム径内にプローブを入れてのレーザーエネルギーの測定を行うことができない。そのため射出前にエネルギープローブと同様のものを、ステッピングモータ制御変位機（Velmex 社製:VMX、MN10-0300-E01-21）用いて移動させ、CLF レーザーの射出出力と総体出力を同時測定している。使用しているステッピングモータ制御変位機を図 4.9 に示す。

4.2.3 制御部と環境管理部

CLF システムの電力供給部の通常運転の消費可能電力は小さいので、常時起動状態にする制御部のデバイスの消費電力は可能な限り小さくする必要がある。そ



図 4.8 エナジーメーター (rm3700)

表 4.4 エナジーメーター (rm3700) の仕様

| 型番 | RjP-734 |
|-----------|-----------------------|
| 波長範囲 | 0.18 ~ 20 μ |
| エネルギーレンジ | 2 μ J ~ 2 J |
| 損傷係数 | 0.4 J/cm ² |
| 較正確度 | 5% ² |
| 線形性 | 0.5% ² |
| 最大繰り返しレート | 40 Hz |
| 最大パルス幅 | 1.0 ms |
| センサー直径×深さ | 5.8 cm × 19.5 cm |



図 4.9 ステッピングモータ制御変位機

のため、CLF システムでは、CLF システムの制御管理用に、小型のボードパソコン (technologic 製:TS-5500) が採用された。ボードパソコンの外観を図 4.10 に示す。このボードパソコンは、コンパクトフラッシュカードで、オペレーションシステムやデータの記憶媒体を使用しているため、消費は 5W に抑えられる。また、オペレーションシステムに LINUX-OS を採用しており、CLF システムのデバイス制御を行っている。また、拡張ボードによって、シリアルポートを 8 つ追加しており、外部機器との通信も充実している。外部との接続は Ethernet-TCP/IP プロトコルで実現されており、SSH (Secure Shell) プログラムも実装されているため、外部からのログインも可能としている。

制御用ボードパソコンの配下にはレーザー、エネルギーセンサー× 2、ステッピングモーター、リレー回路内臓の電力マルチタップがある。さらに PC/104 接続の

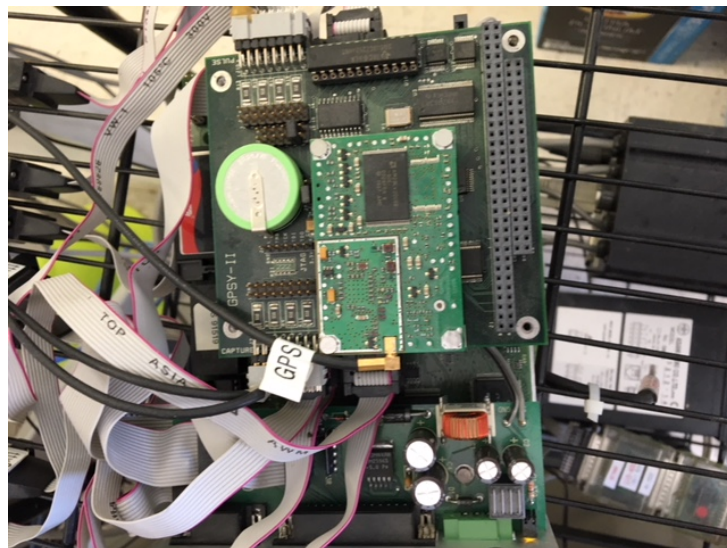


図 4.10 CLF 制御用ボードパソコン

GPS-Timing モジュール (GPSy-II) 1 が取り付けられており、レーザー射出用のトリガーパルスの生成と射出時間の記録を行っている。また、レーザー、エネルギーセンサー、ステッピングモーター、レーザー射出口は電力的にはレーザー回路内臓の電力マルチタップの下流にあり、これを制御することで各デバイスの電力供給を制御している。

制御用ボードパソコンでは CLF システム近辺の気象情報と太陽光発電システムバッテリー電圧の計測と記録を行っている。

気象観測装置に VAISALA 製ウェザーとトランスミッター:WXT520 を使用し、気温、気圧、湿度、降水量、風速、および風光を記録している。降水量は CLF の射出の有無の判断の基準となる。

また、制御用ボードパソコンのデータ保存量は 64MB で非常に小さい。そのため 8GB の USB フラッシュメモリーによって、データ保存容量を拡張している。レーザー出力や気象情報などの全データはこの記憶媒体に保存される。

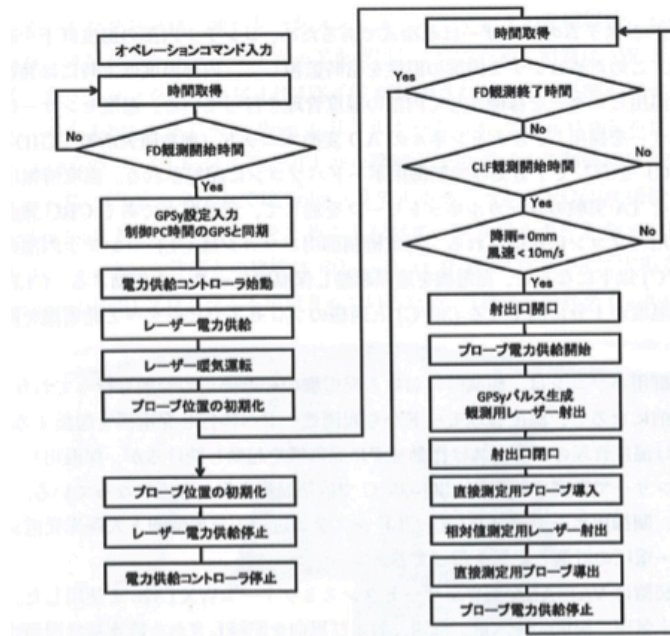


図 4.11 CLF 観測のフローチャート

4.3 CLF システムオペレーション

CLF は 3 台の FD ステーションから 20.8km も離れているため、CLF の観測コマンドは、FD ステーションから遠隔操作で CLF 制御コンピュータに投げられる。コマンドが投げられた後は図 4.11 に示されるフローチャートに従って FD 観測の終了時刻まで自動観測になる。FD 観測終了後の停止操作まで自動となるので、観測者はコマンドの投入だけで良い仕組みになっている。

CLF では、制御コンピュータの時間を GPS 時間と同期させている。次に電力供給コントローラーにより、レーザーに電力供給を開始させる。その直後にレーザーは射出出力が不安定になるため、1Hz のレーザーを 900 発の射出を行う暖気運転を行う。そして、レール可動式に動くプローブ位置の初期化を行い、CLF 観測時間まで待機となる。CLF の観測時間になると、ウェザーモニターデータを読み込み、過去 15 分間の降雨量、風速の確認を行う。降雨や風速 10m/s 以上が直近の 15 分に観測された場合は、CLF からのレーザー射出は行われないように制御されている。観測時間内 30 分毎に射出口を開け、大気にレーザーの射出を行う。これ

は雨や、風による砂等によつての、ミラーの汚れ等を防ぐためである。

CLF は FD 観測時間内に、30 分毎に 30 秒間 10Hz のレーザーを 300 発射出している。射出後は、射出口を自動的に閉じるように制御されている。

4.4 リニアリティー測定

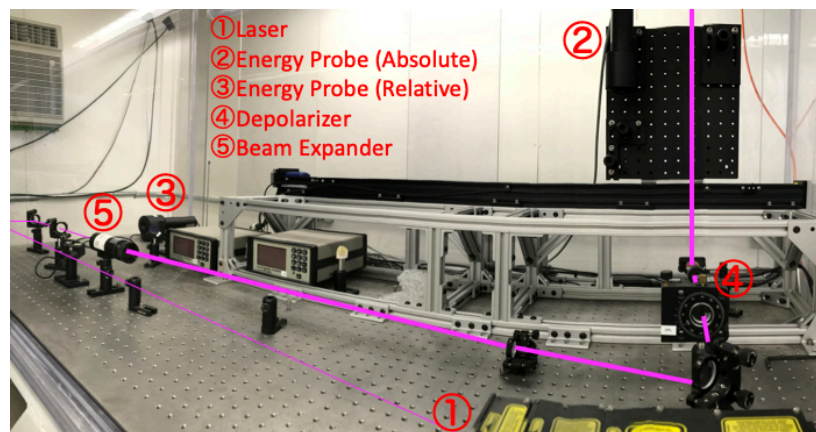


図 4.12 CLF の光学系

CLF での 30 分毎のレーザー射出直後に、大気中に射出したレーザー出力の決定を行うために、リニアリティー測定を行っている。光学系を図 4.12 に示す。リニアリティー測定時に、すぐにステップングモーターで制御の行われたプローブをレーザーのビーム径内に移動させ、レーザーを 300shots 射出し、このプローブとビームスプリッターによってレーザーの 10% を反射させているプローブの 2 つで測定を行う。一回のリニアリティー測定での全 300shots の射出の内、100shots 射出する毎に出力を変え、プローブの出力比を算出可能な出力設定にしてある。リニアリティー測定終了後、ステップングモニターによって、ビーム径内に移動したプローブは次の CLF オペレーションに備え、ビーム径外に取り除かれる。このリ

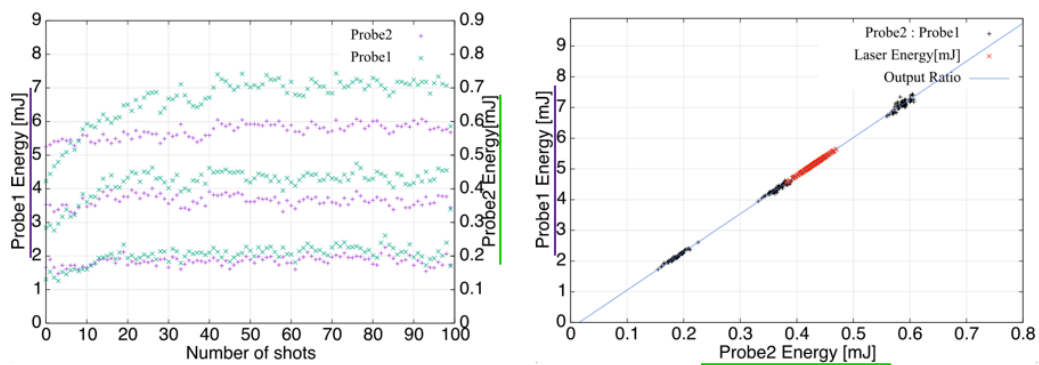


図 4.13 リニアリティー測定 (左) とレーザー出力の決定 (右)

アリティ測定によって観測毎のレーザー出力を 1shot ずつ決定することが可能となる。ある CLF オペレーションでのリニアリティー測定を 4.13 に示す。左図はリニアリティー測定を表しており、緑点がビームスプリッターによってレーザーの 10% を反射させているプローブの測定値、ステッピングモニターによって、ビーム径内に移動したプローブの測定値を表している。右図は各プローブの測定値の比の近似直線が青線である。赤は CLF オペレーション時のビームスプリッターによってレーザーの 10% を反射させているプローブの測定値を代入して決定されたレーザーの出力値である。

第5章

CLF を用いた VAOD の算出

5.1 VAOD 導出概念

CLF を用いた大気透明度の測定は、CLF によって地面に対して垂直方向に射出されたレーザーの大気分子やエアロゾルによる側方散乱光を観測することで行われる。CLF の導出の概念を図 5.1 に示す [13]。

CLF によるレーザー光の FD までの伝播過程を順を追って説明する。CLF レーザーエネルギー E から射出時の光子数 Np_0 にすると、以下の式 5.1 のように表される。

$$Np_0 = \frac{E\lambda}{hc} \quad (5.1)$$

Np_0 は散乱点高度 H まで、エアロゾルと大気分子による散乱を受け、減衰した高度 H でのレーザー光量 $Np(H)$ は、以下の式 5.2 のように表される。ここで、 c は光速、 λ はレーザー波長、 h はプランク定数を示す。

$$Np(H) = Np_0 \exp[-\tau_{Ray}(H)] \exp[-\tau_{As}(H)] \quad (5.2)$$

散乱点 H において散乱した後に、上空へ通り抜けていく光量 $Np_{through}(H)$ は、ランバートベールの法則から、散乱点における微小な厚み Δh を通り抜けるとすると、

$$Np_{through}(H) = Np(H) \exp[-\tau_{Ray}(\Delta h)] \exp[-\tau_{As}(\Delta h)] \quad (5.3)$$

となる。よって、散乱高度 H における総散乱光量 $Np_s(H)$ は

$$Np_{last}(H) = Np(H) - Np_{through}(H) \quad (5.4)$$

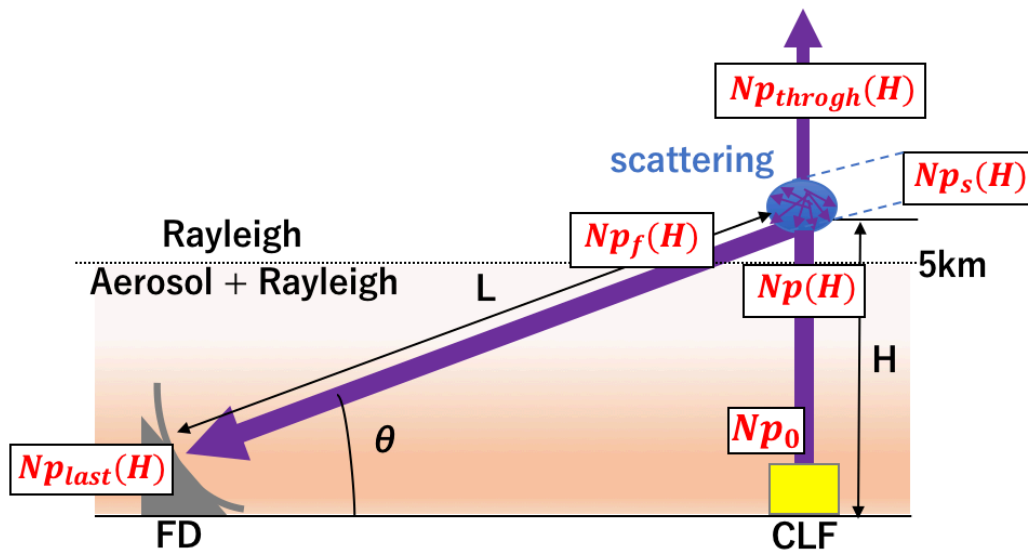


図 5.1 CLF における VAOD 導出概念図

となる。さらに、大気分子、エアロゾルの散乱係数をそれぞれ S_{Ray} 、 S_{As} とし、散乱点 H から FD までの光学的厚さを $\tau_{Ray}(L)\tau_{As}(L)$ とすると、FD の受光量 $N_{plast}(H)$ は

$$N_{plast}(H) = N_{ps}(H) \left(S_{Ray} + S_{As} \right) \exp[-\tau_{Ray}(L)] \exp[-\tau_{As}(L)] \quad (5.5)$$

となる。散乱係数は散乱点から FD 視野方向 ($90^\circ - \theta$) に散乱する光子の割合を示す係数で、微分散乱断面積 $\Delta\Sigma(90^\circ\theta)$ の関数である。大気透明度 $T = \exp[-\tau]$ なので、式 5.5 を T で表すと、

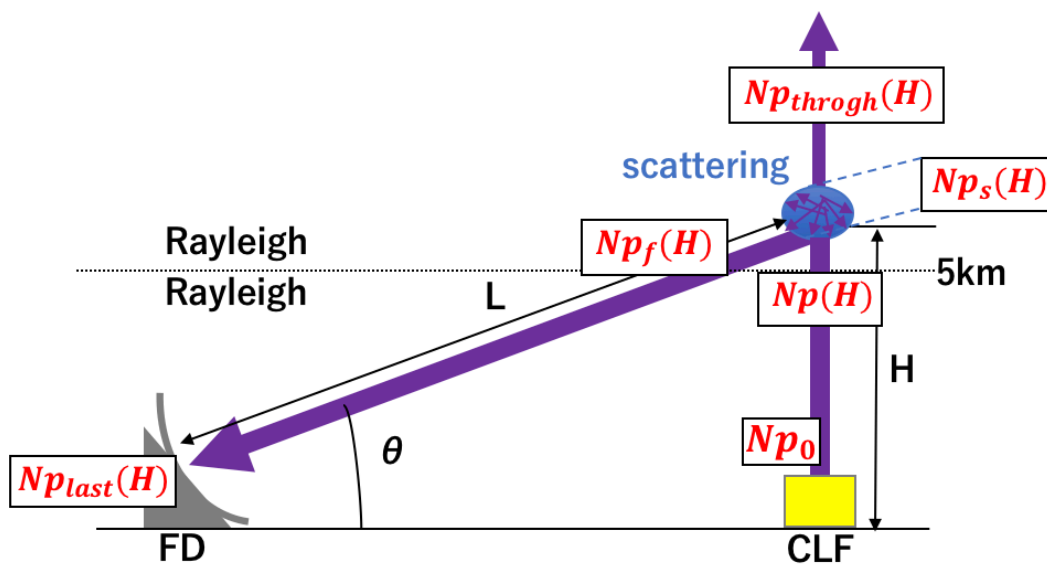


図 5.2 大気がきれいなときのレーザー光の伝播過程

$$N_{plast}(H) = N_{p0} T_{Ray}(H) T_{As}(H) (S_{Ray} + S_{As}) T_{Ray}(L) T_{As}(L) \quad (5.6)$$

となる。

ここで、エアロゾルの存在しない理想的な大気状態（大気がきれい）の受光量 N'_{plast} を考える。その模式図を図 5.2 に示す。エアロゾルの存在量が非常に少ないと考え、 $T_{As}(H) = T_{As}(L) = 1$ 、 $S_{As} = 0$ となり、

$$N'_{plast}(H) = N_{p0}' T_{Ray}(H) S_{Ray} T_{Ray}(L) \quad (5.7)$$

となる。式 5.6 を 5.7 で割ると

$$\frac{Np_{last}(H)}{N'p_{last}(H)} = \frac{Np_0}{Np'_0} T_{As}(H) T_{As}(L) \left(1 + \frac{S_{AS}}{S_{Ray}}\right) \quad (5.8)$$

ここで、水平方向に対して大気状態が一定であると仮定すると、

$$\tau_{As}(L) = \frac{\tau_{As}(H)}{\sin \theta} \quad (5.9)$$

であり、式 5.8 は

$$\frac{Np_{last}(H)}{N'p_{last}(H)} = \frac{Np_0}{Np'_0} \exp\left[-\tau_{As}(H) \frac{\sin \theta + 1}{\sin \theta}\right] \left(1 + \frac{S_{AS}}{S_{Ray}}\right) \quad (5.10)$$

が得られる。ここで散乱点高度を大気分子の分布が支配的である 5km 以上の場合 [13]、 $S_{As} = 0$ となるので、

$$\frac{Np_{last}(H)}{N'p_{last}(H)} = \frac{Np_0}{Np'_0} \exp\left[-\tau_{As}(H) \frac{\sin \theta + 1}{\sin \theta}\right] \quad (5.11)$$

となる。この式から、VAOD はエアロゾルの浮遊していない大気がきれいなときの CLF オペレーションを詮索し、その時のエネルギーと FD の受光量から解析が可能となる。 Np_0 と Np'_0 はレーザーの射出エネルギー E 、 E' に比例するためエネルギーの日から光子の比は算出することが可能となる。

5.1.1 レーザーの射出エネルギー (E)

レーザーエネルギーは前述の通り、CLF オペレーションによる大気へのレーザー射出の直後に、リニアリティー測定を行いプローブの出力比を測定することにより、エネルギー推定を行っている。図 4.8 のリニアリティー測定において、レーザーの射出直後の出力の不安定から各 100shots ずつの測定値の 40shots ~ 100shots を抽出した全 180shots での出力比を用いたレーザーエネルギーの推定を行った。一回の CLF オペレーションで 300shots レーザーを射出しており、レーザーエネルギー E は、この 300shots の平均値とする。TA 実験における CLF システムのレーザー出力の年間変動を図 5.3 に示す。赤点は各 30 分ごとの CLF オペレーションの全 300shots の平均値を示している。レーザーエネルギーの変動の面から、中でも安定している、2012 年 1 月 ~ 2013 年 1 月、2013 年 7 月 ~ 2014 年 9 月の 2 つの期間を VAOD の解析対象とした。

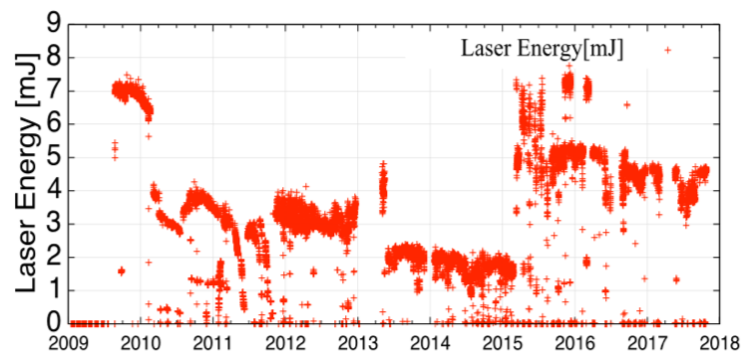


図 5.3 CLF システムのレーザー出力の年間変動

5.1.2 FD の受光量 (N_{plast})

FD の PMT 郡のそれぞれの受光タイミングから、CLF イベントの受光量の時間分布を得ることができる。FD の PMT が密に並べられた PMT カメラにおける、レーザーのビームラインを表したイメージを図 5.4 に示す。一つの六角形は PMT 一本を示しており、白色は受光量を示す。FD による空気シャワー用の観測システムでは、記録できる時間幅に限度があり、イメージ図のように PMT カメラ上段の途中で受光信号が途切れてしまう。

図 5.6 は、CLF のレーザー 1shot における PMT カメラ上の光子の移動を示している。紫点は PMT カメラにおける下視野で、緑点は上視野の光子移動を示している。FD の PMT カメラの下視野から上視野にかけて光子量が移動している事がわかる。また、PMT カメラの下視野で CLF の側方散乱光を観測してからの時間幅を Δt とし、光速を c 、CLF-FD 間の距離を L_G 、FD を基準とした散乱点の仰角を θ とすると、PMT カメラの下視野の仰角は 3° (図 5.5) なので

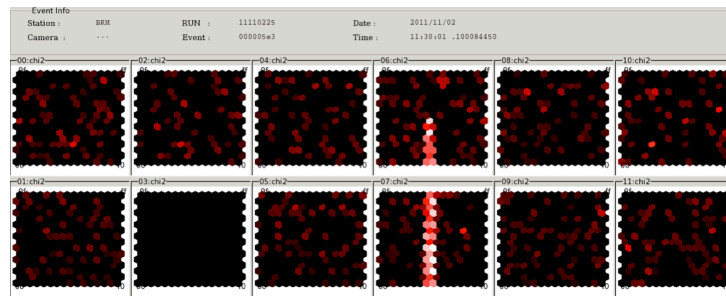


図 5.4 PMT カメラにおける CLF イベントのイメージ図

$$\Delta t = \frac{\left(\frac{L_G}{\sin \theta} + L_G \tan \theta \right) - \left(L_0 + H_0 + \frac{L_G}{\sin 3^\circ} + L_G \tan 3^\circ \right)}{c} \quad (5.12)$$

と表される。これを $L_0 = \frac{L_G}{\sin 3^\circ}$ 、 $H_0 = L_G \tan 3^\circ$ とおき、 θ について解くと

$$\cos \theta = \frac{2L_G \times \left(L_0 + H_0 + \Delta tc \right)}{\left(L_0 + H_0 + \Delta tc \right)^2 + L_G^2} \quad (5.13)$$

となり、受光時間から散乱点高度が算出可能になる。図 5.6 では、下視野と上視野の間に谷の構造が見受けられる。これは、PMT カメラの下視野と上視野の境界を示しており、受光量が不安定である。今回、この境界となる散乱高度を除いた VAOD の算出を行う。FD での受光量 N_{plast} は、全 300shots の CLF オペレーションの内、FD でトリガーされたイベントで平均化を行った光量になる。平均化を行い、受光時間を散乱点高度にした波形の例を 5.7 に示す。高度 1km~12km でのレーザーの側方散乱光を FD で捉えていることがわかる。

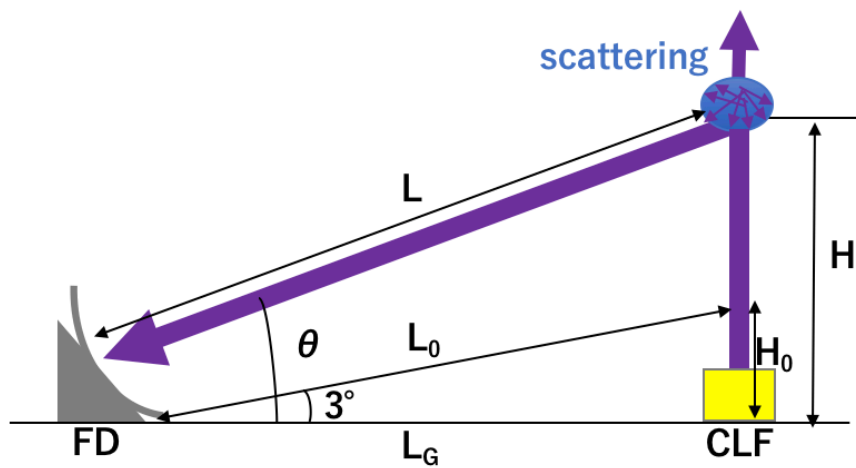


図 5.5 散乱高度の導出法

5.1.3 大気のきれいな日の選定

CLF オペレーションの射出毎に得られたレーザー出力エネルギー E を用いて、FD 受光量 N_{plast} をレーザー単位出力あたりにノーマリゼーション（規格化）することでオペレーションごと、時期ごとのレーザー出力による違いを解消し、他の CLF オペレーションによる FD の受光量と比較することが可能になる。ノーマリゼーションされた受光強度 $I(x)$ は

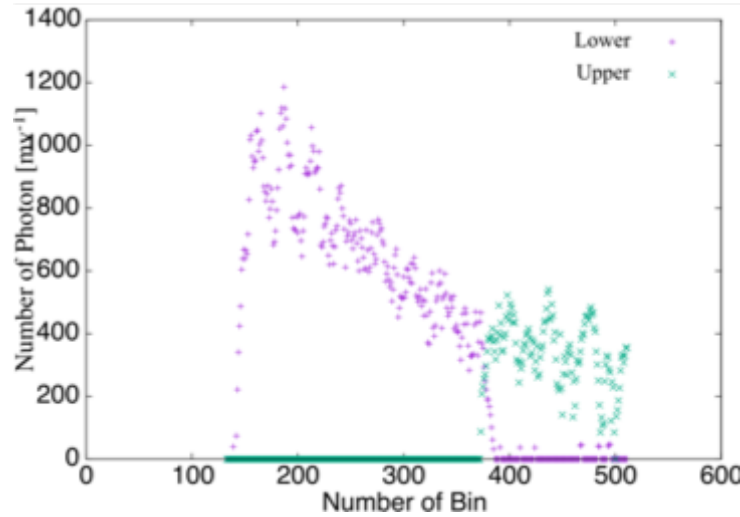


図 5.6 レーザー 1shot における PMT カメラ上での光量の時間分布

$$I(x) = \frac{N_p}{E} \quad (5.14)$$

となる。とある CLF オペレーションにおける、FD での受光量 N_{plast} をその時の射出エネルギーでノーマリゼーションを施した受光波形を図 5.8 に示す。

高度 5km 以上において雲を除けば、大気分子によるレイリー散乱が支配的である [11]。大気透明度が高い場合、高空までの散乱損失は小さいので残存光子数は多くなる。高空における散乱係数は支配的であるレイリー散乱のみとだけ、その散乱角度依存性も含め、日変化、時間変化はエアロゾルによる散乱量変化に比べ十分小さい。そのため、このノーマリゼーションされた受光強度が高い CLF オペレーションを、エアロゾルによる散乱が限りなく少ない、大気がきれいなときの CLF オペレーションと仮定する。CLF 解析対象の一つの期間の全 CLF オペレーションにおいて、受光強度の比較を行い大気がきれいなときの CLF オペレーション

レーザーが雲によって、影響を受けた FD の受光強度の波形例を図 5.9 に示す。CLF 地面から垂直方向に打ち上げられたレーザーの光子は、雲などによって遮蔽し、FD での受光量が増加したり、減少する。大気がきれいな時のオペレーションを選定するにあたり、雲の存在が確認できるようなデータのセレクションを行っ

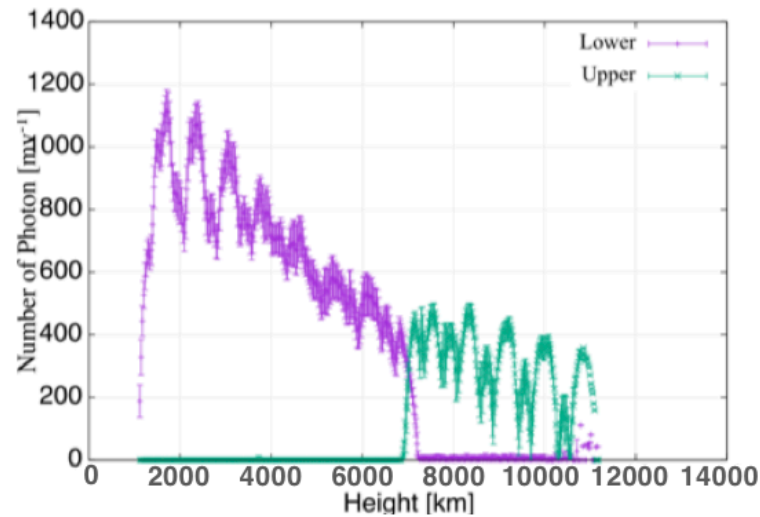


図 5.7 CLF1ope. における PMT カメラ上での平均光量の時間分布

た。図 5.10 に雲セレクションの概要を示す。FD の PMT カメラ構造によって受光強度の波形に山の構造が見られる。波形の山になる部分を最小二乗法でフィッティングを行い、フィッティング線に対する受光強度の割合から雲データを検出している。雲の選定において、Clear、Overcast、Cloud、Hazy、Partly Cloud の 5 つのクラスに分別した。雲データの選別後、データから 60 % 前後を観測領域において晴れ、40 % 程度を曇りと判定している。また、受光強度はレーザーエネルギーで割ることによってノーマリゼーションを施してあるため、一律にデータを比較することが可能である。受光強度の波形を 4.5km から 5.5km に積算し、高度間で平均した値に対するレーザーエネルギーを図 5.11 に示す。本来、レーザーエネルギーの大小に関わらず、受光強度の区間平均値は安定していると考えられるにも関わらず、図中ではレーザーエネルギーが上がるにつれ、受光強度の区間平均値は上がっており、データ点の遷移に傾き構造が見られた。各レーザーエネルギーの領域での分布を 5.12 に示す。各分布から分かる通り、ヒストグラムの分布は右に遷移しており、受光強度にレーザーエネルギーが依存することが示唆された。そこで、

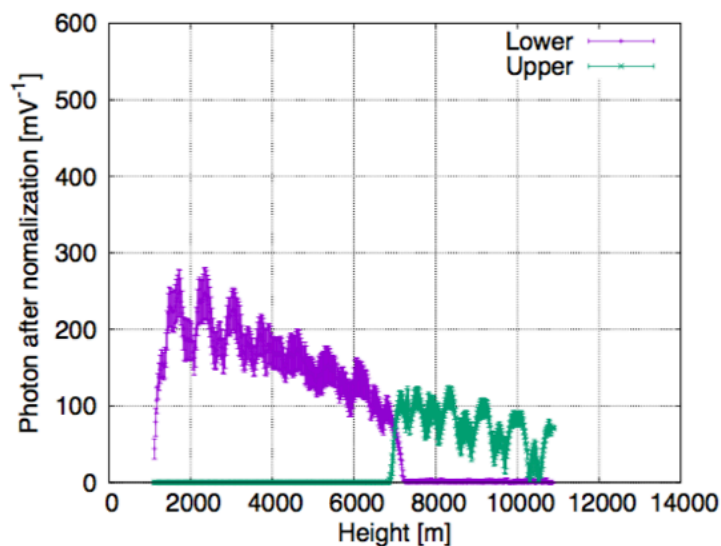


図 5.8 レーザー出力でノーマリゼーションを施した CLF イベント

過去の CLF のレーザーの運用履歴データからレーザーが不調だった期間を取り除くことで、解消した。図本論文では、雲が存在しない、レーザーエネルギーが安定している受光強度の波形のみ VAOD の算出を行った。

今回、大気がきれいな時の CLF オペレーションの決定に用いた 2 つの前提条件を以下に示す。

- 1: 別の FD(LR) においても大気はきれいである。
- 2: 別の高度においても大気はきれいである。

30km × 30km の領域である TA 実験サイトにおいて CLF から等距離離れた Long Lidge(LR) においても、大気がきれいな CLF オペレーションは同一のオペレーションである確率が高いことが考えられる。また、高度 5km 以上において大気分子の分布が支配的であるため、受光量の積算値は 5km 以上でどの高度でも高いと考えられる。そこで、BRM と LR の両ステーションにおいて 4.5km~5.5km、5.5km~6.5km、7.5km~8.5km の 3 つの高度における受光強度の積算値での同

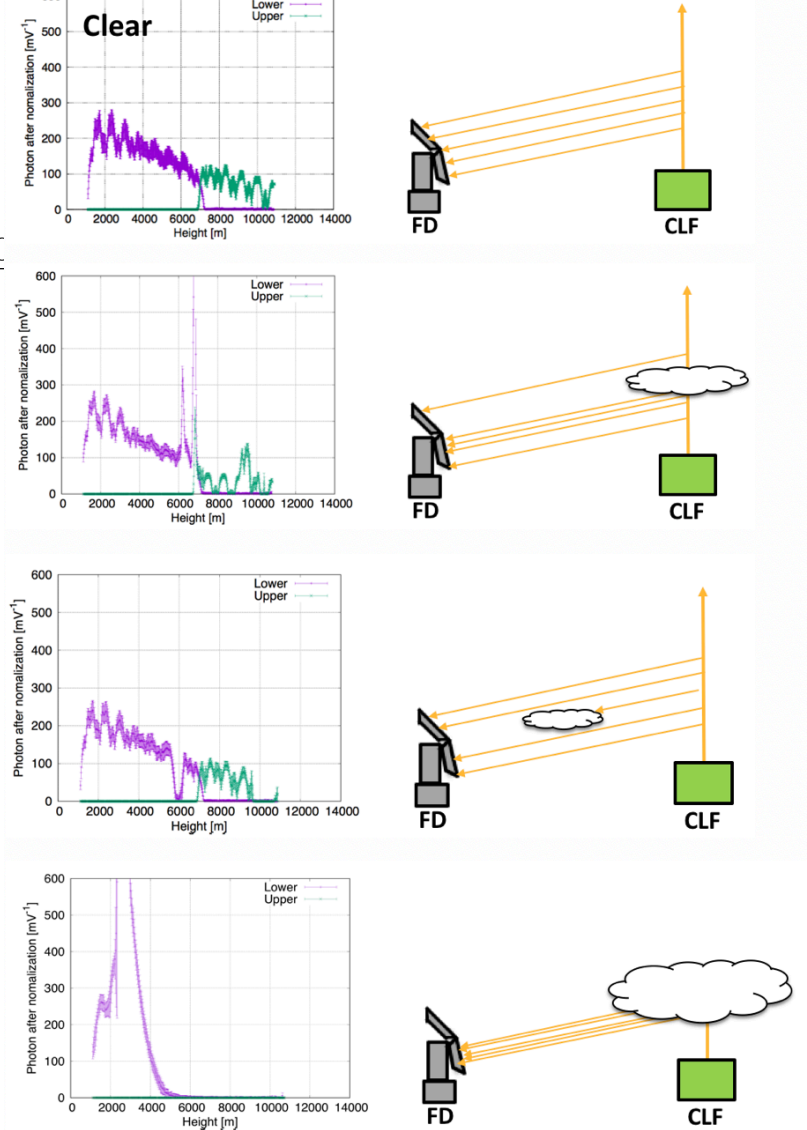


図 5.9 天候と FD 受光強度

日同時時間の CLF オペレーションを抽出した。そのうち、BRM と LR ともに受光強度の積算受光強度が高い 5 データの平均値を大気がきれいな時の FD 受光量 $N'p_{last}$ として VAOD の算出を行った。

5.1.4 VAOD の算出

過去 3 年分の CLF の受光強度データから VAOD の算出を行った。期間は 2012 年 1 月から 2013 年 1 月、2013 年 7 月から 2014 年 9 月、2015 年 9 月から 2016 年 9 月のそれぞれの期間で基準となる高度 4.5~5.5km における受光強度の積算値を選定して VAOD を算出した。BRM と LR で得られたそれぞれの分布図を図 5.13、図 5.14、図 5.15 に示す。

解析期間 3 年分の積算ヒストグラムを図 5.16 に示す。3 期間の中央値は 3 期間の分布幅以内で一致した。また、VAOD の時間分布と季節ごとの分布、各分布の中央値を示す表をそれぞれ図 5.17、5.19、5.18 に示す。算出された VAOD は冬場に高く、夏場に低い傾向が見られ、分布の中央値で比較してみても、夏が 0.074、冬

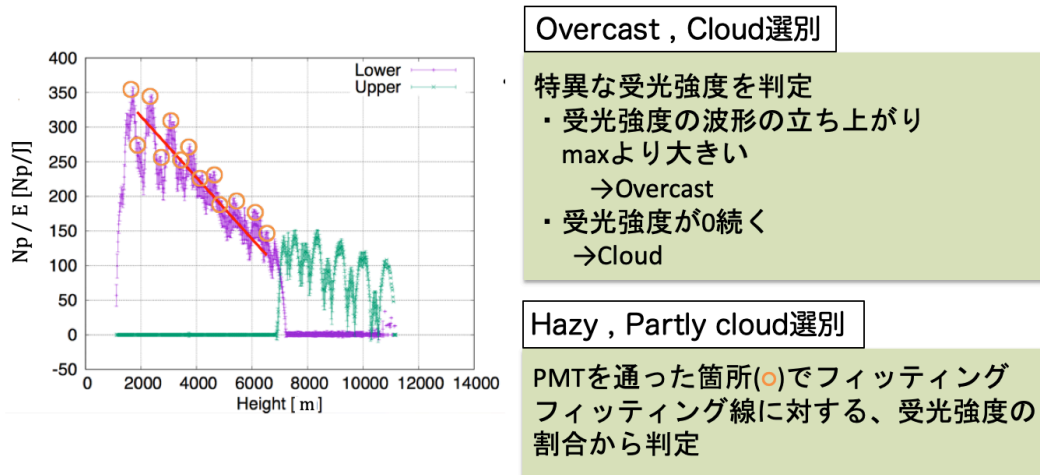


図 5.10 雲セレクション概要

が 0.029 であった。このことから、VAOD に季節依存性があることが示唆された。VAOD が夏場に高い一因は、実験サイトが広大な砂漠地帯であるため、空気が乾燥しており、エアロゾルが地上から舞いやすい環境にあるためだと考察する。対して、VAOD が冬場に低い一因として、積雪によって地上を覆うためにエアロゾルが浮遊しにくくなるためであると考察する。CLF では、上述の通り TA-LIDAR に比べて、FD 観測時間内に高頻度で VAOD を測定しているため、時間的な VAOD の分布をより子細に理解することができる。解析期間 3 年分のデータを 1 年のスケールで表した時間分布を図 5.20 に示す。図中の誤差は統計的な誤差を示している。今後、CLF を用いて算出した VAOD の季節依存性を活かして、時間分布を関

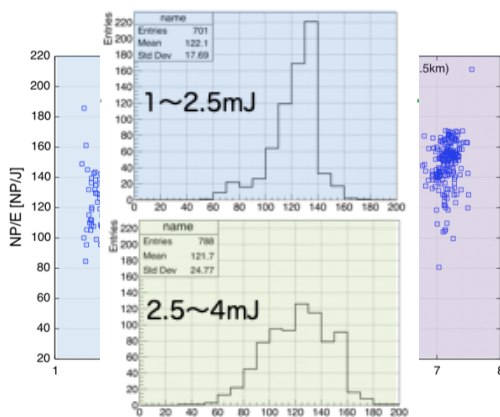


図 5.11 レーザーエネルギー 5 5.5km における区間平均値

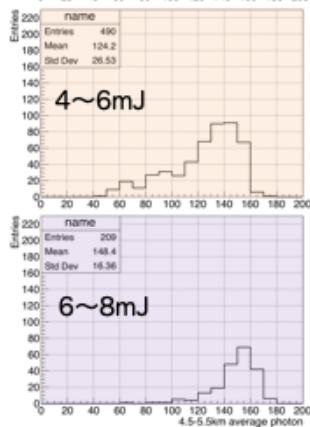


図 5.12 各レーザーエネルギーごとの受光強度における高度区間の平均値分布

数化が可能となれば、FD の大気校正に既定値として利用可能となる。

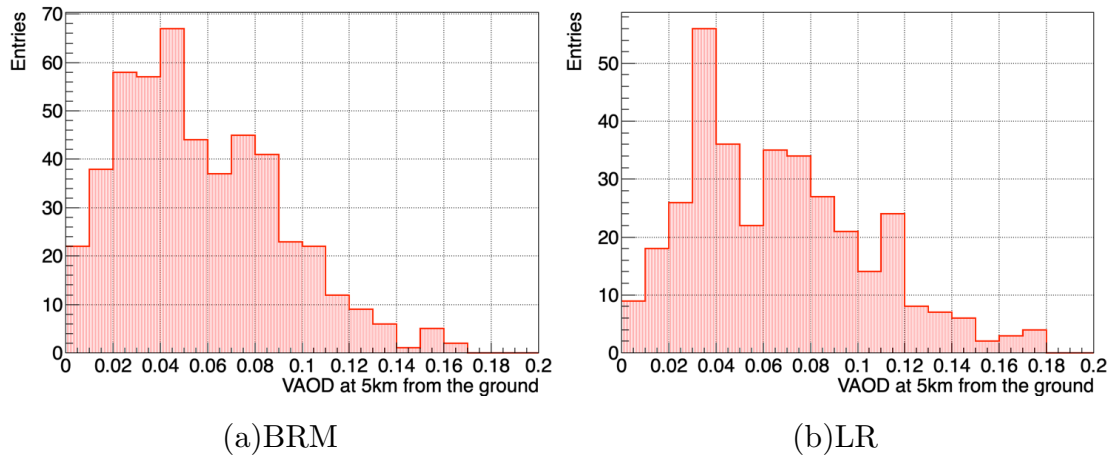


図 5.13 2012 年 1 月から 2013 年 1 月までの VAOD 分布

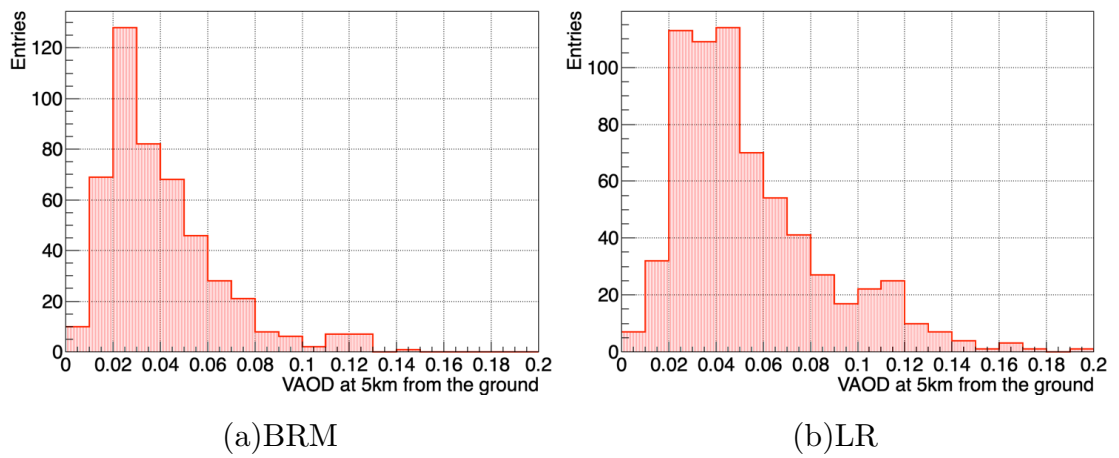


図 5.14 2013 年 7 月から 2014 年 7 月までの VAOD 分布

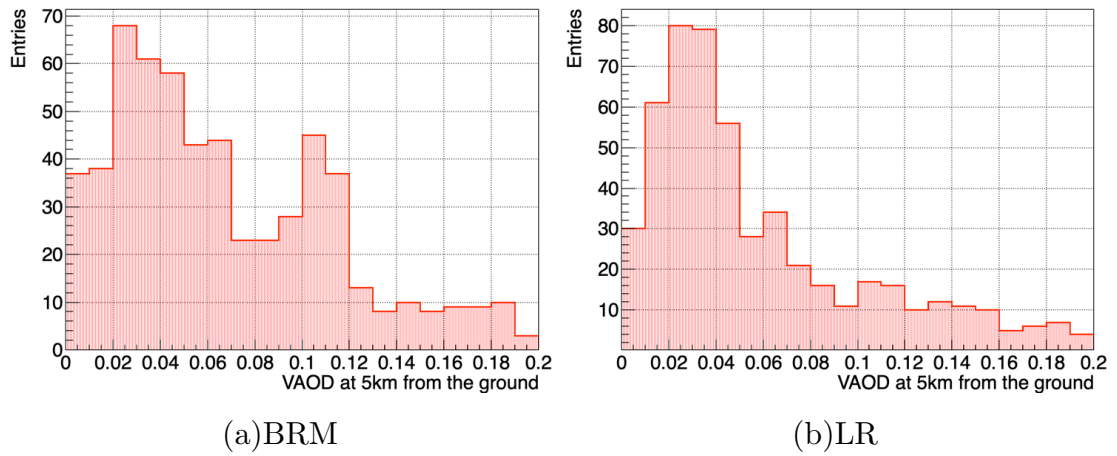


図 5.15 2015 年 9 月から 2016 年 9 月までの VAOD 分布

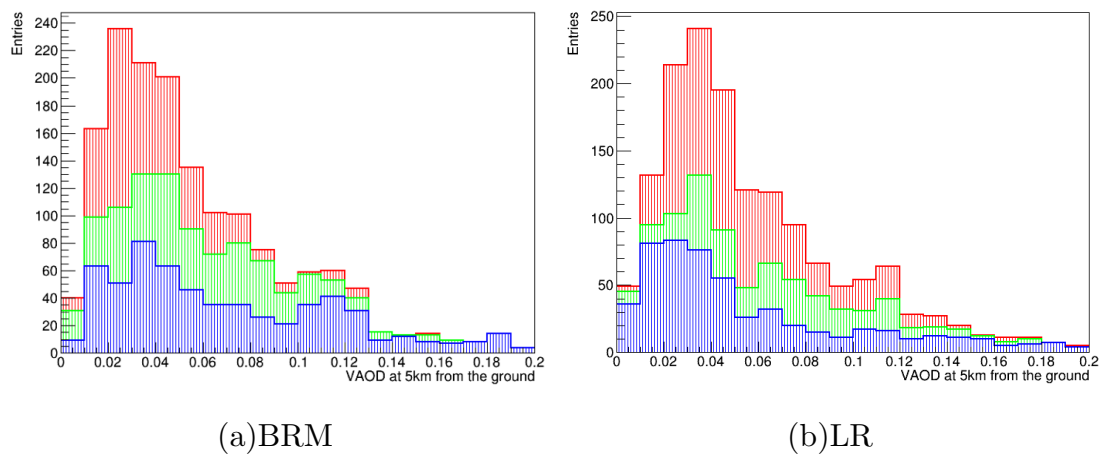


図 5.16 解析期間 3 年の VAOD の積算分布

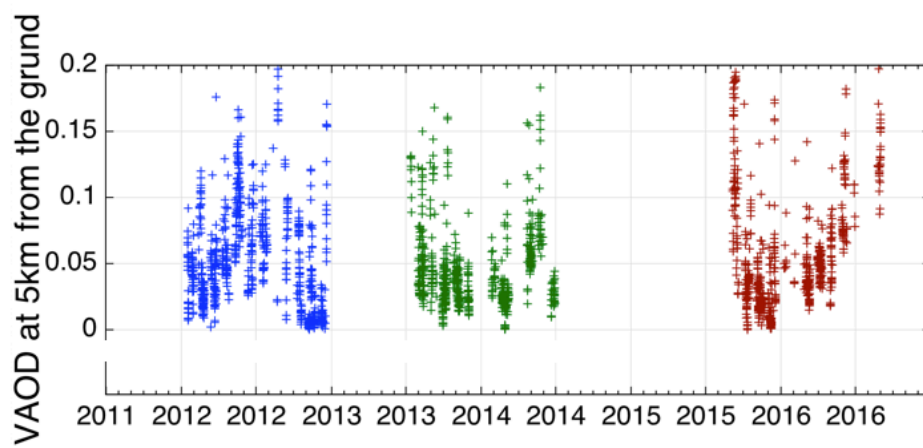


図 5.17 高度 5km における VAOD の時間的分布

| 季節 | 中央値 |
|----|-------|
| 春 | 0.037 |
| 夏 | 0.074 |
| 秋 | 0.047 |
| 冬 | 0.029 |

図 5.18 季節ごとの VAOD 分布の中央値

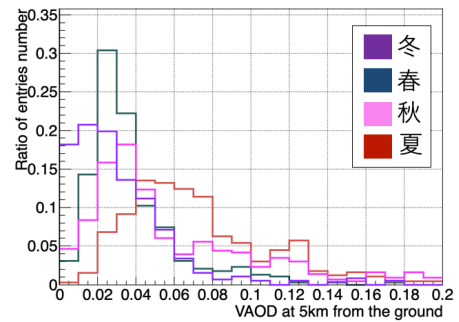


図 5.19 高度 5km における季節ごとの VAOD 分布

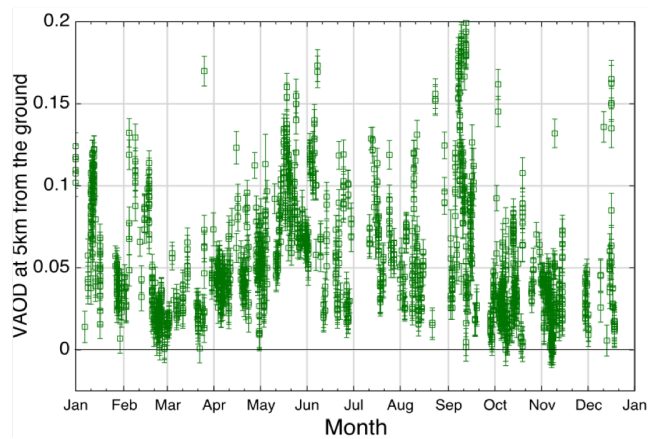


図 5.20 解析期間 3 年分のデータを 1 年のスケールで示した時間分布

第6章

大気透明度の評価

今回の VAOD の算出結果から、3つの比較を行う。

6.1 別手法の大気透明度測定結果との比較

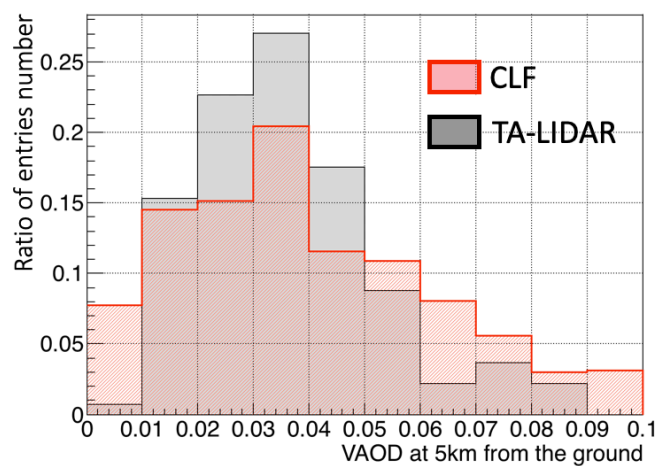


図 6.1 CLF vs. TA-LIDAR

前述の通り現在、FD を用いた宇宙線解析の大気校正として TA-LIDAR の 2 年間の大気透明度の平均データが用いられている。TA-LIDAR は、BRM ステー

表 6.1 VAOD < 0.1 において、分布の中央値と 1 σ の分布幅

| | 中央値と分布幅 (1 σ) | エントリー数 |
|----------|---------------------------|--------|
| CLF | $0.037^{+0.016}_{-0.011}$ | 1881 |
| TA-LIDAR | $0.035^{+0.019}_{-0.013}$ | 137 |

ションの横に配置されており、過去に大気透明度を測定していた LIDAR 装置である。LIDAR システムと CLF システムから得られた VAOD は算出方法が異なる。LIDAR システムは多方向への観測により大気透明度の高度分布を CLF より詳しく理解できる。一方で CLF は垂直方向の観測のみに限られ、地上から高度 5km 以上までを通じた大気透明度である VAOD が相対的に得られる。また、高頻度で射出可能な水冷レーザーを使用可能であり、1 回の観測に必要な時間は 30 秒であり、FD 観測中に 30 分毎の定期的な観測が可能である。TA-LIDAR と CLF の VAOD 比較には BRM ステーションの VAOD 測定結果を使用する。TA-LIDAR を用いた大気透明度の測定結果と CLF を用いた大気透明度の測定結果のそれぞれの分布を図 6.1 に示す。TA-LIDAR における 2012 年 1 月～2014 年 1 月の VAOD < 0.1 での分布の中央値とその値に対する 1 σ の分布幅は $0.035^{+0.019}_{-0.013}$ であり、CLF では $0.037^{+0.016}_{-0.011}$ であった (表 6.1)。CLF の大気透明度の分布と分布幅以内で一致した。大気透明度のイベント数に大きな違いがみられるのは、TA-LIDAR が FD 観測開始前と終了後の二度の測定に対し、CLF は観測中に 30 分毎測定を行っているからである。このことから、TA-LIDAR では不可能であった FD の宇宙線観測時間内における VAOD の変動をモニターする点に関して、CLF は 30 分毎に捉えること可能であり、有意であることを示した。

6.2 前身実験 HiRes の大気透明度測定結果との比較

HiRes は Telescope Array の前身であり、Telescope Array 実験の観測サイトがあるデルタ地域から約 40km 離れた、ダグウェイ地域の砂漠地帯で宇宙線観測を行っていた実験である。天候等の観測環境は非常に似ていると考えられる。HiRes-LIDAR は CLF と同様に垂直方向に射出したレーザー光の側方散乱光から大気透明度を測定するバイスタティック方式の LIDAR である。今回は、1999 年 12 月から 2001 年 9 月に HiRes-LIDAR を運用して得られた大気透明度の測定結果との比較を行う。HiRes-LIDAR の VAOD 分布の中央値は 0.030～0.034 であり、CLF の VAOD 分布の中央値の 1 σ の分布幅以内で一致している。この結果

から、同じ VAOD の観測手法である点に加え、観測環境が酷似していることから、CLF で測定した VAOD が大気透明度として、リーズナブルな値であると結論づける。

6.3 別ステーションで測定された VAOD との比較

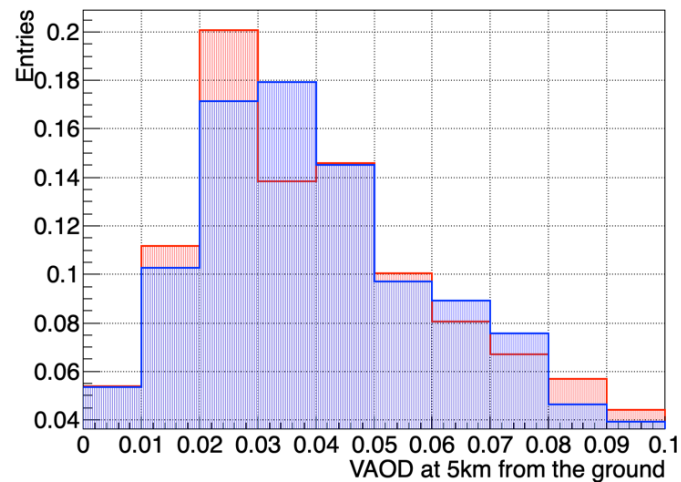


図 6.2 BRM vs. LR

表 6.2 VAOD < 0.2 において、分布の中央値と 1 σ の分布幅

| | 中央値と分布幅 (1 σ) | エントリー数 |
|-----|---------------------------|--------|
| BRM | $0.043^{+0.025}_{-0.014}$ | 1837 |
| LR | $0.045^{+0.026}_{-0.013}$ | 1505 |

CLF から等距離に位置している BRM と LR は、共に CLF によるレーザーの散乱光を観測している。また、この 2 つの望遠鏡ステーションは同じ機器構造であり、大気透明度の算出は前述の方程式から共に導出可能である。解析期間 3 年の両ステーションにおける VAOD 分布、VAOD < 0.2 での分布の中央値とその値に対する 1 σ の分布幅を図 6.2、表 6.2 に示す。図中の赤枠は BRM、青枠は LR の分

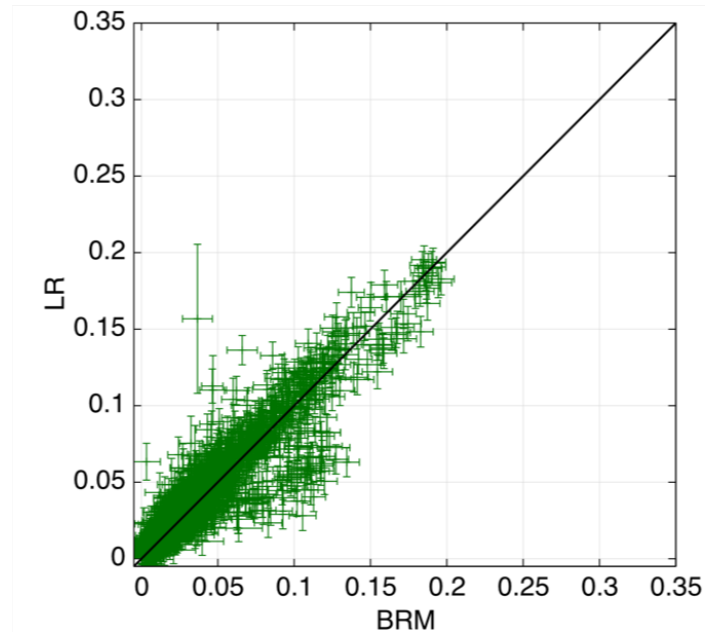
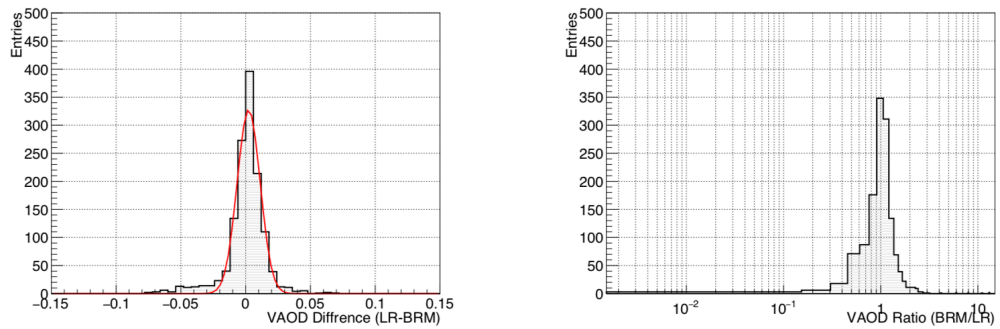


図 6.3 BRM vs. LR

布を示しており、統計数の違いを解消するためにヒストグラムの面積で規格化した値となっている。両者が分布の中央値が 1σ の分布幅以内で一致した。BRM での VAOD に対する LR の VAOD の散布図を図 6.3 に示す。図中の黒線は $y = x$ の方程式を示しており、BRM で測定された VAOD と LR で測定された VAOD は 1 対 1 の関係式に沿って分布している。図中のデータの 70 % が $y < 1.1x$ かつ $y = 0.9x$ 以内の領域に収まっている。反対に、1 対 1 の関係式から離れているデータはステーションが位置する大気状況の違いをモニターした結果であることが考えられる。この結果から、CLF を用いた測定は局所的な大気の変動を捉えることが可能であることを示唆している。

両者の差分と比の分布を図 6.4 に示す。差分の平均値は 0.001 であり、比の平均値は 1.07 であった。分布の 1σ である 68 % の対象のデータが VAOD の決定精度未満で一致しており、BRM と LR ステーションで測定された VAOD が高い相関が得られている。

図 6.5 は両ステーションでの観測ごとの VAOD の決定精度の分布である。この分布から平均的な決定精度は BRM が 0.013、LR が 0.011 である。両ステーションでの差は、ビームラインの像が PMT カメラの通過する位置によるものであり、



(a) 差分 (LR-BRM)

(b) 比 (LR/BRM)

図 6.4 BRM と LR で測定された VAOD の差分と比の分布

図 6.6 に示すように、BRM ではビームライン像が高度ごとに PMT の境界と感面中央を通過するのに対し、LR では高度ごとの変化はなく一様に感面に像が通過する。このため、500m ごとの受光強度の平均値の持つばらつきが BRM の方が大きくなるためである。

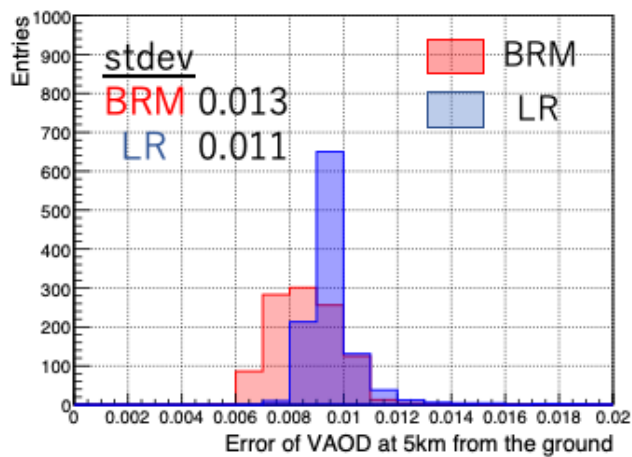


図 6.5 VAOD 決定精度

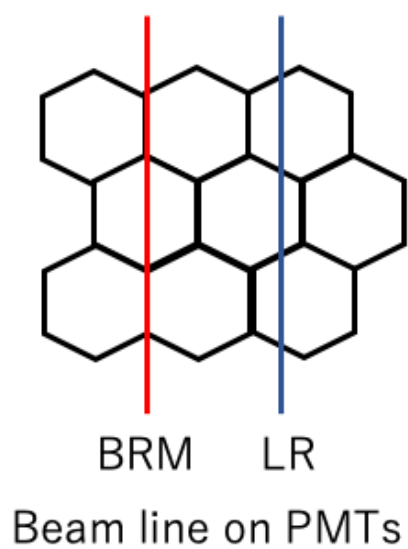


図 6.6 ビームライン像と PMT 位置

第7章

結論

7.1 結論

FD 観測データの宇宙線解析において、大気較正は重要である。レーザー装置である CLF を用いて大気較正用のパラメータである大気透明度を算出した。CLF は高頻度にレーザーを射出することができ、FD を用いた宇宙線観測時間内の大気透明度を 30 分毎に測定することが可能である。

CLF の観測データから基準となる受光量データと比較することで相対的に大気透明度 VAOD が算出可能である。BRM の観測データから得られた VAOD において VAOD_i0.1 を満たす分布の中央値と 1 σ の分布幅は $0.037^{+0.016}_{-0.011}$ となった。また、冬場に大気透明度が高く、夏場に大気透明度が低い傾向がみられ、大気透明度の季節依存性が示唆された。

また、算出した VAOD の評価を行った。FD 観測データの宇宙線解析において大気較正として用いられている TA-LIDAR の過去の VAOD の分布と比較を行ったところ、中央値が両者共に分布幅以内で一致した。また、TA 実験の前身である HiRes の LIDAR によって算出された大気透明度と比較を行った。HiRes は Dugway 地域に位置しており、TA 実験サイトから約 90km 離れた砂漠地帯で観測を行っていた実験である。HiRes の大気透明度分布の中央値が CLF によって得られた大気透明度の分布幅以内で一致した。さらに、同じ機器構造且つ、CLF から等しい距離の BRM と LR ステーションで測定された VAOD の比較を行ったところ、VAOD < 0.2 を満たす分布の中央値と 1 σ の分布幅は、BRM が $0.037^{+0.016}_{-0.011}$ 、LR $0.037^{+0.016}_{-0.011}$ であった。両者が分布幅以内で中央値が一致した。また、比 (LR/BRM) の分布の 1 σ である 68 % の対象のデータが VAOD の決定精度未満で一致しており、BRM と LR ステーションで測定された VAOD が高い相

関が得られている。

今後、CLF で測定された VAOD の時間分布の関数化を実現し、一次宇宙線のエネルギースペクトルの誤差への寄与を調査する。

付録 A

参考文献

- [1] Telescope Array Experiment, <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/>, (2018)
- [2] M.A.MALKAN et al, *Astro.Phys.*496, (1998).
- [3] K. Greisen, *Phys. Rev. Lett.* 16(1966)748.
- [4] G. T. Zatsepin and V. A. Kuzmin, *Sov. Phys. JETP Lett.* 4(1966)78.
- [5] H.Sagawa, テレスコープアレイ実験 (2013).
- [6] Pierre Auger Observatory, <https://www.auger.org/>(2018).
- [7] 浜松ホトニクス, <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/hamamatsu/newsroom/advertisemen>
(2018)
- [8] A.TAketa, et al., Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference in Merida, (2007)
- [9] Y.Tameda, et al., *Nucl.Instrum.Meth.Phys.Res.A* 609, 227(2009)
- [11] M.Hayashi, 宇宙線望遠鏡校正のための UAV 搭載型標準光源の開発, University of Shinshu, Japan, *PhyM*, 25-26, (2017)
- [11] R.Nakamura, 宇宙線望遠鏡実験における魚眼 CCD を用いた夜間天候モニタリングシステムの開発, University of Shinshu, Japan, *PhyB* 25-26, (2017)
- [12] 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, Japan, (2012)

謝辞

本研究にあたり、日々の手厚いご指導や様々な発表する場を頂き、私の研究の視野を大きく広げていただきました信州大学学術研究院の富田助教には深く感謝いたします。

定期的な研究ゼミにおいて、熱心なご指導や公な場で発表する機会を頂きました信州大学学術研究院の齊藤教授に深く感謝いたします。

毎週の会議にて、本研究について熱心なご指導やアドバイス、資料の適切な訂正をいただきました中部大学の山崎助教に深く感謝いたします。

本研究についてのアドバイスや観測作業のご指導をしていただきました神奈川大学の有働准教授に深く感謝いたします。

本研究についてのアドバイスや様々な発表の場を用意していただきました大阪市大の荻尾教授、常定准教授、東京大学の佐川教授、竹田准教授に深く感謝いたします。

本研究についての的確なアドバイスや生活での補助等、大変お世話になりました大阪電気通信大学の多米田講師、京都大学の藤井助教、東京大学地震研究所の池田研究員には深く感謝いたします。

本研究についてのアドバイスやSD 作業や生活の補助をしていただきました東京大学の野中助教、立命館大学の奥田助教に深く感謝いたします。

本研究についてのアドバイスやご指導、研究の環境を与えていただきましたユタ大学の John 教授、Gordon 教授、Pierre 名誉教授には深く感謝いたします。

本研究に対するご指摘や発表の場をいただきました TA 実験の関係者の皆様には深く感謝いたします。

本研究で行き詰まった際の的確なアドバイス、発表資料や予稿に適切な訂正を頂きました中村氏に深く感謝いたします。

本研究やゼミでアドバイスを頂きました久保田氏、関氏、西村氏、山本氏に深く感謝いたします。

研究室の同期として、アドバイスを頂きました稲富氏、岩倉氏、宇都宮氏に深く

感謝いたします。

CLF の研究を引き継ぎ、助言を頂きました中村氏に感謝いたします。

研究室の後輩として、生活の支えになりました佐野氏、曾根氏、中村氏、切中氏、窪田氏、柴崎氏、中澤氏、小笠原氏、亀谷氏に感謝いたします。

本研究に対して的確なアドバイスを頂き、生活の補助をしていただきました大阪市大の藤田氏に感謝いたします。

他大学ながら、研究に対する的確なアドバイスや生活での補助等、大変お世話になりました大阪市大の織田氏、尾村氏、田上氏、中井氏、藤原氏、大阪電通大の奥氏、笠見氏、東京大学の樋口氏、シン氏、埼玉大学の中田氏、増山氏に感謝いたします。

本研究室の合同ゼミ合宿にて、研究に対するご指導や生活の補助をしていただきました、千葉大学の椎名教授には感謝いたします。

ご精読ありがとうございました。