

令和3年度 修士論文

TA 実験におけるエアロゾル
大気透明度のモデリング
卒業論文



提出者

信州大学大学院 総合理工学研究科
工学専攻 電子情報システム工学分野

中村 智行

2022年1月27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。この宇宙線に注目した研究は世界中でいくつも行われている。

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 つの大気蛍光望遠鏡ステーション (Fluorescence Detector, FD) と多数の地表検出器の 2 種類の検出器を用いたアプローチをしている [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 PMT カメラで撮像観測を行っている実験機器である。FD で正確に高エネルギーの宇宙線を測定するための校正の 1 つのファクターとして、蛍光の大気散乱量の FD 校正の理解が重要である。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 (エアロゾル) が舞いやすい環境下にある。大気蛍光現象による蛍光は発生点から検出器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減衰が起こるため、大気透明度を測定するようなデバイスが必要である。

そこで、Central Laser Facility (CLF) というレーザー装置を有したシステムにより、FD 観測時にレーザーを 30 分毎に射出し、大気の時変化をリアルタイムに追う大気透明度測定システムの研究を行っている。このシステムは、蛍光波長域 355nm 程度のレーザーを高高度 10km 程度まで射出し、散乱光を FD で受光するバイスタティック方式により、大気を与える減光量を推定することを可能としている。我々はこの CLF システムによって得られるエアロゾルによる光学的厚さを Vertical Aerosol Optical Depth (VAOD) と呼んでいる。

この VAOD について、これまでの解析により季節性があることが分かっている。CLF システムのデータには観測条件や装置の状態から FD 観測を補完できない期間が存在する。このため、エアロゾルの季節変動についてモデル化を行うことにより、宇宙線解析に精度の向上した大気透明度を提供する。本論文では、CLF システムを用いた VAOD 解析によるエアロゾルの季節性とそのモデル化の内容について報告する。

目次

第 1 章	超高エネルギー宇宙線	1
1.1	宇宙線とは	1
1.2	宇宙線のエネルギースペクトル	1
1.3	空気シャワー現象	2
1.4	超高エネルギー宇宙線観測	3
第 2 章	宇宙線望遠鏡実験	4
2.1	地表検出器	4
2.2	大気蛍光望遠鏡	6
2.2.1	光学系	6
2.2.2	PMT カメラ	6
2.2.3	データ収集システム	7
2.3	雲モニター	9
2.3.1	IR カメラ	9
2.3.2	CCD カメラ	10
2.4	大気モニター	10
2.4.1	TA-LIDAR システム	11
2.4.2	CLF システム	11
第 3 章	大気散乱	13
3.1	レイリー散乱	14
3.2	エアロゾル散乱	15
第 4 章	CLF システム	17
4.1	背景・目的	17
4.2	CLF システム構成	18

4.2.1	電力供給部	20
4.2.2	レーザー部と光学系	21
4.2.3	制御部と環境管理部	24
4.3	CLF システムオペレーション	26
4.4	レーザーエネルギーのリニアリティー測定	27
第 5 章	CLF における VAOD	29
5.1	CLF における VAOD 導出概念	29
5.1.1	FD の受光量 (N_p/E)	32
5.1.2	天候による影響の除去	34
5.1.3	レーザーエネルギーの不安定な期間	35
5.1.4	低いレーザーエネルギーの期間	37
5.2	CLF 解析の基準データ	37
5.3	大気分子年間変動の補正	38
5.3.1	GDAS のデータ	39
第 6 章	大気透明度の評価	41
6.1	VAOD 年間変動	42
6.2	低高度における減衰	42
6.2.1	湿度との関係	45
第 7 章	VAOD の評価	46
7.1	先行実験での結果との比較	46
7.2	大気分子の年間変動影響の除去による変化	47
7.3	別ステーションとの比較	48
第 8 章	年間変動のモデル化	50
8.1	月毎の代表値	50
8.2	フィッティング関数	51
第 9 章	結論	54
付録 A	参考文献	55
謝辞		56

第1章

超高エネルギー宇宙線

1.1 宇宙線とは

宇宙線とは、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。宇宙線の主な成分は陽子であり、様々な原子核を含んでいる。これまでに宇宙線は 10^8 eV から 10^{20} eV という幅広いエネルギー領域で観測されてきた。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。中でも 10^{18} eV 以上のエネルギーを持った宇宙線は超高エネルギー宇宙線と呼ばれ到来頻度は極端に少なくなる。また、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分子に衝突して生成される二次粒子のことを指す。

1.2 宇宙線のエネルギースペクトル

宇宙線の到来頻度はエネルギーが増すにつれ急激に減少する。図 1.1 に一次宇宙線のエネルギースペクトルを示す。 10^{15} eV 以下のエネルギーの宇宙線は銀河系内が起源の宇宙線であると考えられており、その付近で”knee”と呼ばれるエネルギースペクトルの折れ曲がり構造が確認できる。これはエネルギーが 10^{15} eV を超える宇宙線は銀河磁場を振り切って銀河外に漏れ出す可能性があること、超新星爆発で供給できる最大エネルギーが 10^{15} eV であることなどが原因であると考えられている。また、 5×10^{18} eV 付近でスペクトルが再び折れ曲がる構造がある。これは”ankle”と呼ばれ、銀河系内が起源となる宇宙線と銀河系外が起源となる宇宙線が混じることが原因だと言われている。さらに 10^{19} eV 付近で GZK カット

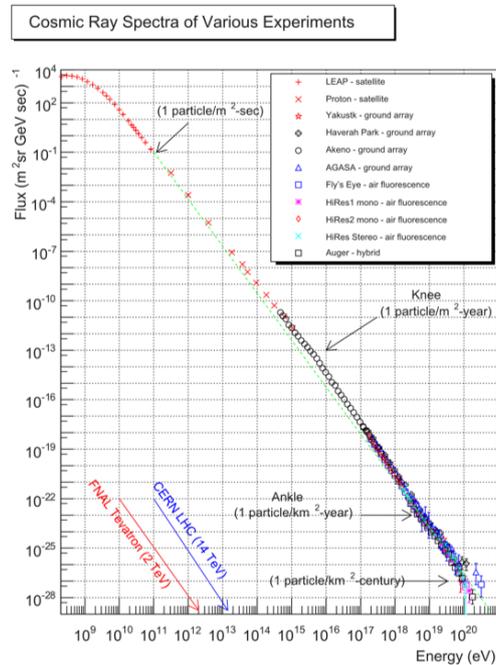


図 1.1: 宇宙線のエネルギースペクトル

オフと思われる構造が見える。GZK カットオフとは 6×10^{19} eV を超える宇宙線が宇宙背景放射 [2] と相互作用して急激にエネルギーを失うため、それ以上のエネルギーではスペクトルが急激に減少するというものである [3][4]。しかしその付近の超高エネルギー宇宙線は到来頻度の低さから観測統計量が圧倒的に少なく正確な形はまだ定まっていない。これらの変化は加速機構や宇宙空間における伝播の変化が関係しているのではないかと考えられている。

1.3 空気シャワー現象

宇宙線は大気に突入した際に大気中の主に窒素分子と相互作用を起こして二次粒子を生成し、二次粒子はさらに次の大気分子と相互作用を起こす。この現象を繰り返して最終的に大量の二次粒子が地上に降り注ぐ、これ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表したものを図 1.2 に示す。

相互作用によって宇宙線のエネルギーは次々と二次粒子に移っていき、この過程で二次粒子の数は大気の深さとともに増えていくが、エネルギー分配を続けて一定までエネルギーを失った粒子は電離損失によってエネルギーを失い大気に吸収される。このように大気の深さによって空気シャワーの粒子数が増減する様子を空気

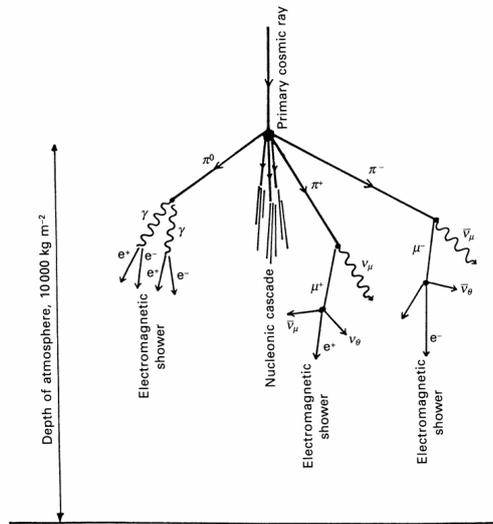


図 1.2: 空気シャワー現象

シャワーの縦方向発達という。特に空気シャワーの二次粒子数が最も多くなる空気シャワーの最大発達点を X_{\max} といい、宇宙線の質量組成の推定に用いられる。 X_{\max} は到来した宇宙線のエネルギーが高く、質量が軽いほどより深くなる [5]。また、空気シャワーは軸に対して垂直方向にも広がる。この広がり様子を空気シャワーの横方向発達という。この過程で二次粒子によって励起された窒素分子が大気蛍光という微弱な紫外線を発する。この大気蛍光を集光して空気シャワーを観測する方法を大気蛍光法という。

1.4 超高エネルギー宇宙線観測

超高エネルギー宇宙線の領域になると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。そのため、現行の宇宙線観測は空気シャワーから生じる大気蛍光を捉える大気蛍光望遠鏡と、空気シャワーによって生じる二次粒子を地上で直接捉える粒子検出器の 2 種類の検出器による観測が主である。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天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

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 1400 m (大気深さ 875 g/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 がアレイ上に配置され, SD 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, 大気透明度を測定している。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。また, 観測範囲を増やすため地表検出器と望遠鏡を増やし観測面積を現在の 4 倍とする計画 TA_{x4} が進行中である。

2.1 地表検出器

図 2.2 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。内部に空気シャワーの二次粒子に反応して発光するシンチレーターが設置してあり, 光電子増倍管によってそのシンチレーション光を検出してタイミングを記録する。地表検出器は昼夜問わず

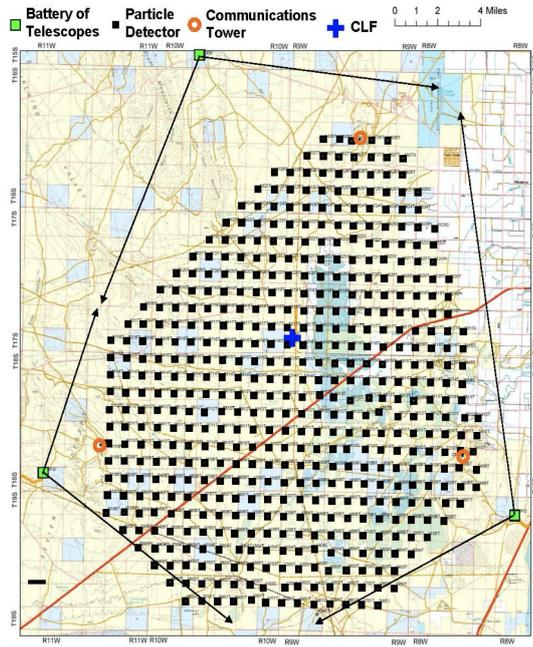


図 2.1: TA 実験の装置配置図



図 2.2: SD 外観



図 2.3: FD 外観

検出を行うことができるので稼働率はほぼ 100 % となる. これを 1.2 km 間隔で約 700 km² の範囲に配置して観測を行っている.

地表検出器はエネルギーと到来方向の推定を行うことはできる. しかし, 質量組成の決定に必要な Xmax の決定はできないのが現状である.

2.2 大気蛍光望遠鏡

図 2.3 に FD の外観を示す.FD は空気シャワーによって励起した大気中の窒素分子等が発する大気蛍光を撮像観測する検出器である.18 枚の鏡を組み合わせた複合球面鏡で反射集光を行い,ハニカムアレイ状に並べられた 256 本の PMT がカメラ部分となる. TA 実験ではこの大気蛍光望遠鏡 12 台を 1 ステーションとしたものを 2 ヲ所と構成の違う 1 ヲ所の 3 ステーションで観測を行う.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 ステーションの複合球面鏡の外観を図 2.4 に示す.広視野で観測するため,FD 1 ステーションには上下 2 段 1 対を横に 6 対設置されている.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されているので,1 ステーションの視野は方位角 108 度,仰角 3 ~33 度となる. FD に用いられる複合球面望遠鏡は曲率半径 6.067 m,口径 3.3 m の球面鏡(セグメントミラー)を 18 枚組み合わせた合成鏡である.FD 望遠鏡を構成するセグメントミラーは対辺の距離が 660 mm の 6 角形で,表面には Al_2O_3 でコーティングが施してある.セグメントミラーは焦点距離でのスポットサイズが 30 mm 以下になるよう調整し配置している [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図 2.5 に示す.FD のカメラ部分は,16 × 16 に並べた計 256 本の PMT (浜松ホトニクス社製 R9508) で構成される.各 PMT の感面上には夜光や外灯等のノイズ除去のために BG3 フィルター (Schott 社製) が取り付けられており,宇宙線の大気蛍光の波長域 300 ~ 400 nm 以外の光を遮断している.また,カメラボックス前面には観測環境は砂漠であることから,砂などの埃がノイズとして PMT に影響を与えることを防ぐため,紫外透過パラグレス (クラレ社製) が取り付けられている. PMT からのアナログ信号は図 2.6 に示すようなデータ取得システムに送られる.



図 2.4: 複合球面鏡外観

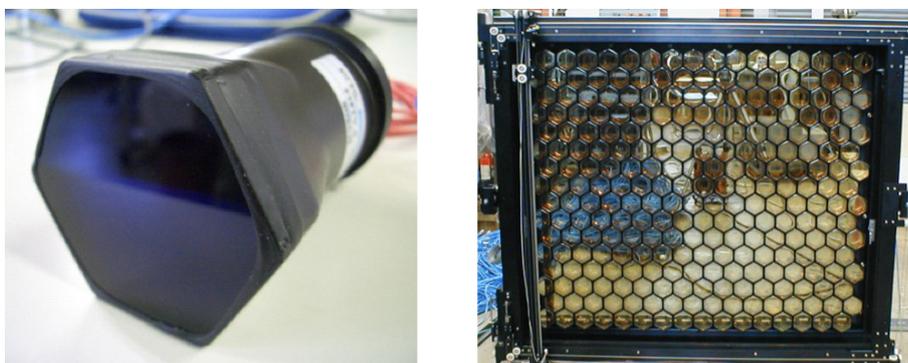


図 2.5: PMT とカメラボックスの外観

2.2.3 データ収集システム

エレクトロニクスの概略図を図 2.6 に示す.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 Distributor(CTD) で構成されている [8][9].

SDF は ファーストレベルトリガーとも呼ばれ,PMT での光が大気蛍光かどうか

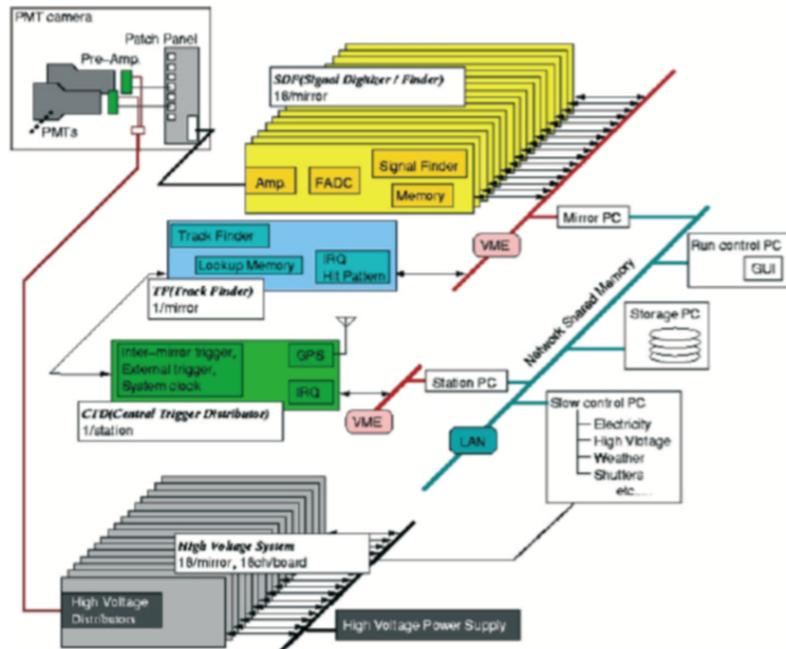


図 2.6: FD におけるデータ取得システム

かの判定を行う作用を持ったモジュールである.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 12 bit, 40 MHz でサンプリングし,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 4 bin(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 に送信する.SDF 1 枚に 16ch , 計 16 枚の SDF があり,1ch につき 1 本の PMT の判定を行う.

TF はセカンドレベルトリガーとも呼ばれ, 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ある.TF はカメラ 1 台分の SDF から得られる信号の中に, 隣り合う 5 本以上の PMT (カメラの端の場合,3 本以上) から信号がある場合, もしくは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,CTD に送信する.

CTD はファイナルトリガーとも呼ばれ, 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ある.PMT カメラ毎の TF 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, 飛跡信号が合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 を同期させるための初期化信号の生成も行う.

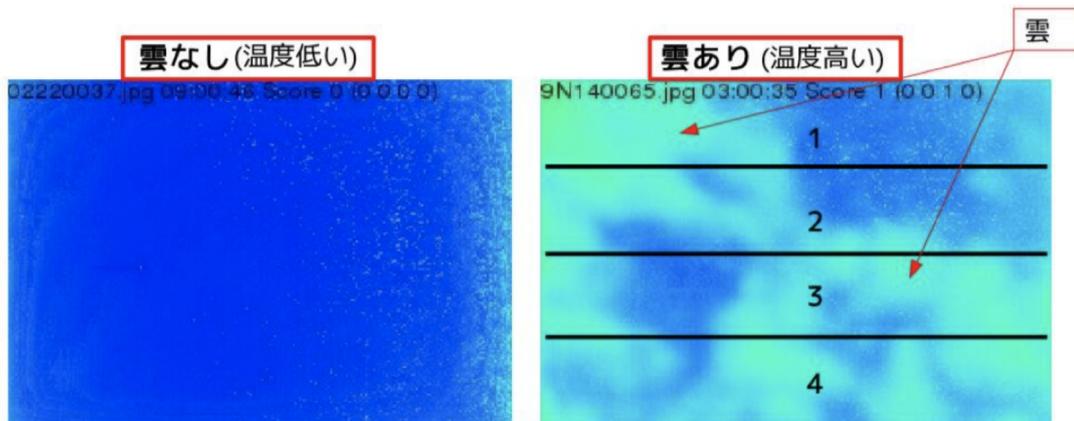


図 2.7: IR カメラによる撮像例

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。そのためには 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 TA 実験においての主な系統誤差の要因となっていた。そのため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ターシステムが必要になる。

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

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 2.7 に示す。温度が高く確認される位置には雲が存在し、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。



図 2.8: CCD 外観

2.3.2 CCD カメラ

CCD カメラの外観を図 2.8 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 2.9 に示す. 特徴として, コストは 50 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 カメラの運用は厳しくなっており, 魚眼レンズを用いた CCD による星解析を行うことで空気シャワーデータの選定が行われている. [12]

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.

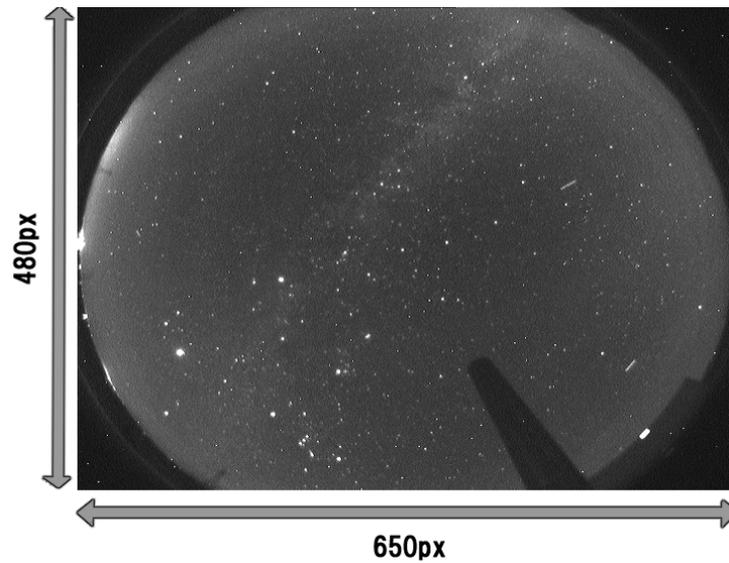


図 2.9: CCD 撮像画像例

2.4.1 TA-LIDAR システム

TA-LIDAR は TA 実験サイトにおける BR ステーションの横に配置され、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が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 2.10 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

Central Laser Facility (CLF) は TA 実験サイトの中心に配置される大気透明度測定のためのデバイスである。遠隔地からの操作により地面に対して垂直方向にレーザーを射出し、大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、観測中 30 分毎の大気モニターを行っている。CLF の外観を図 2.11 に示す。CLF については 4 章に詳しく述べる。



図 2.10: TA-LIDAR 外観



図 2.11: CLF の外観

第3章

大気散乱

空気シャワーによって発生した大気蛍光は大気中を伝搬する際、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 の光が入射する場合、散乱光 dI との関係は以下のように表される。

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

この両辺を積分すると

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

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、

$$I \equiv -I\alpha N dx \quad (3.3)$$

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エアロゾル (TA 実験では塵や埃等) 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異なるため分けて考える。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

3.1 レイリー散乱

大気中に多い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, 大気蛍光 (300nm~400nm) やレーザー波長 (355nm) よりも十分に小さい. よって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% 以内で再現する. よってラジオゾンデ観測データから気圧, 気温の情報が得ることで, 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. 以下で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,

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

と表される. F_k は King correction factor というものであり, 大気密度の異方向性による係数で, 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.

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = \frac{5791817}{238.0815 - (\frac{1}{\lambda}[\mu\text{m}])^2} + \frac{167909}{5} 7.362 - (\frac{1}{\lambda}[\mu\text{m}])^2 \quad (3.7)$$

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 $n_0 =$

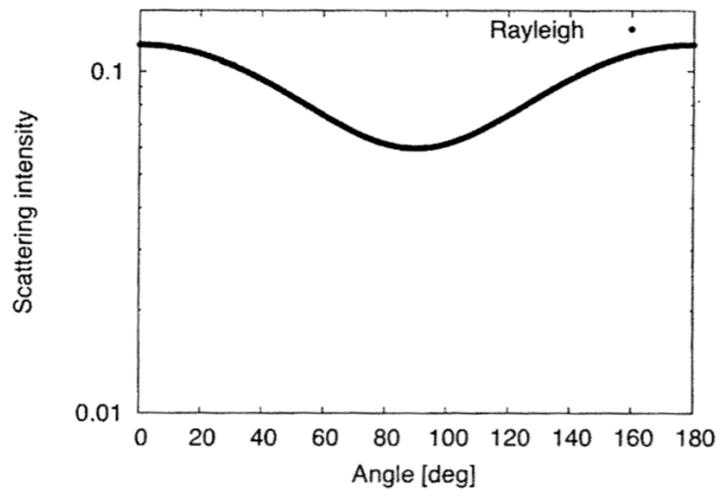


図 3.1: レイリー散乱の散乱断面積

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 °C の大気状態での散乱断面積は

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

となり, 大気分子密度 N は理想気体の状態方程式より算出可能であるので以下のようなになる。

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

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 [13]。

3.2 エアロゾル散乱

エアロゾルの場合大きさは不均一であるが, その典型的な直径は $1\mu\text{m}$ 程度である。ミー散乱の理論式において散乱体は球形を仮定している。エアロゾルは球形

ではないために、エアロゾルによる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、エアロゾル散乱による消散係数 α_{AS} の実験値をミー散乱の理論から算出するには、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。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%以内と極めて小さい。このため、両散乱が混在する状態からレイリー散乱の成分を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 [13]。よって、エアロゾルによる散乱の消散係数を求めるため、垂直方向のエアロゾルの光学的厚さを Vertical Aerosol Optical Depth (VAOD) として大気透明度のエアロゾルに関する関数として表した。高度 h までの VAOD を $\tau(h)$ とするとエアロゾル散乱による消散係数の高度分布 $\alpha_{AS}(h)$ は以下のようなになる。

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

第4章

CLF システム

CLF は3つのFDから20.8 km等距離に離れたTA実験サイトの中心に配置され、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する。そのレーザーの大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分毎に大気モニターを行っている。レーザーを脱偏光状態にし、大気中に射出されたレーザーの光軸に対して360度に等方的に光を散乱させ、各FDの標準光源としての役割も担っている [13]。

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。FDで受光した蛍光量から宇宙線のエネルギーや到来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。

4.2 CLF システム構成

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。そのため、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は LP ガスによる発電機を起動し電力を供給している。CLF システムの構成要素を表 4.1 に示す。

表 4.1: CLF システムの構成要素

	Item
光学系	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
制御系	低電力 PC 気象モニター 温度センサー 電圧センサー
電力供給系	LP ガス発電機 太陽光発電パネル × 5 バッテリー × 6

CLF システムのレーザー光は図 4.9 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。始めに 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、散乱光は光軸に対して 360° 一様な光量を持つようになる。脱偏光後、レーザー光をビームスプリッ

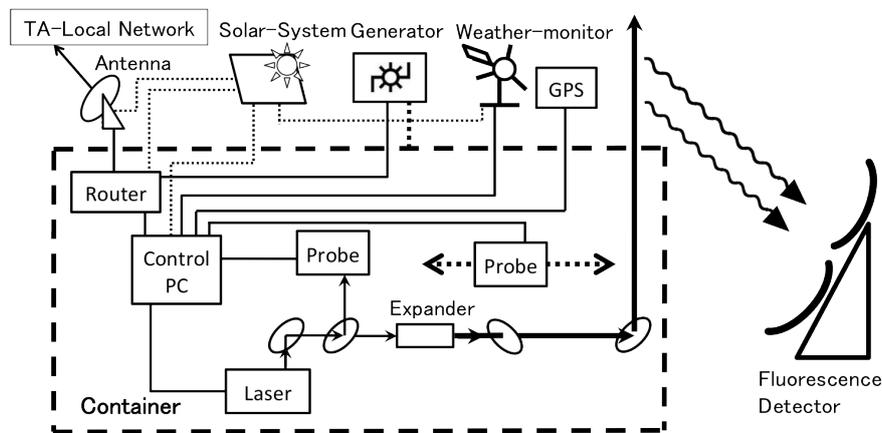


図 4.1: CLF システムにおけるダイアグラム

ターによってその 25 % 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、空気シャワーイベントとの選別のために、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。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 4.1 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。

4.2.1 電力供給部

観測地の中央に配置された CLF システムは市街から隔離された環境であるため、外部からの電力供給は不可能である。よって CLF は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て稼働電力を確保している。LP ガス発電は運用コストが非常に高いため、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る。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。電力供給システムの外観を図 4.2 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 400 Ah (4800 Wh) 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 60 W 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 4.1 に示す。

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

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 60 Hz 交流 120 V で 12 kW 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



図 4.2: CLF の電力供給システム

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．

4.2.2 レーザー部と光学系

CLF システムでは，パルス幅を 1 ns 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 1064 nm の赤外線レーザーを発する．この赤外線レーザーに波長 355 nm 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:ULTRACFR, Nd:YAG レーザー) が採用された [12]．

CLF レーザーの仕様を表 4.2 に，レーザーの外観を図 4.3 に示す．CLF の光学系はレーザー光を蛍光の波長域である 355 nm 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定盤を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



図 4.3: CLF レーザー外観

ている。

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

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 [13]。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、



図 4.4: 脱偏光試験装置 (左:制御装置, 右:偏光プリズム + 回転子)

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 4.4 [13] 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ナジメーター (LASERPROBE 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。使用しているエナジメーターを図 4.5 に、仕様を表 4.3 に示す。前述したとおり、CLF 装置には直径 2 cm 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 2 cm 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 で宇宙線観測時は、CLF レーザーは大気に向かってレーザーの射出を行っているために、レーザーの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 30 分毎に行っているレーザーの射出直後に、大気に射出される直前の垂直光軸上に、上述のエナジ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)



図 4.5: エナジーメーター (rm3700)

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 4.6 に示す。

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 μm
エネルギーレンジ	2 μJ ~ 2.0 J
損傷係数	0.4 J/cm ²
較正確度	5 %
線形性	0.5 %
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

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 4.7 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



図 4.6: ステッピングモータ制御変位機

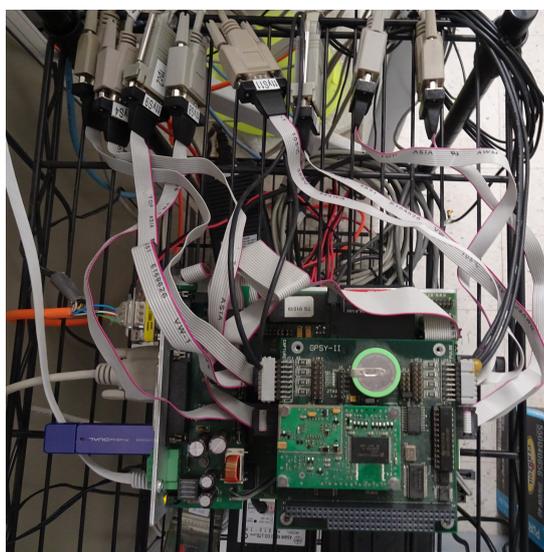


図 4.7: CLF 制御用ボードパソコン

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 GPS-Timing モジュール (GPSy-II) 1 つ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、エナジーセンサー、ステッピングモーター、レーザー射出口は電力的にはリレ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。また、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、および風向を記録している。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 64 MB で非常に小さい。そのため 8 GB 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。

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 20.8 km 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 4.8 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 システムでは、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、1 Hz 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 の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 10 m/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 システムは FD 観測時間内に、30 分毎に 30 秒間 10 Hz 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。

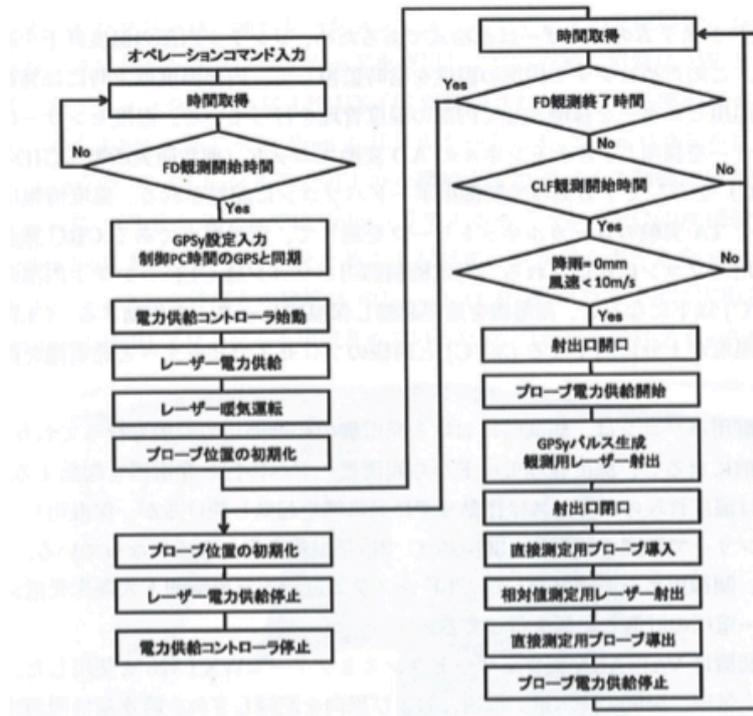


図 4.8: CLF 観測のフローチャート

4.4 レーザーエネルギーのリニアリティー測定

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のリニアリティー測定を行っている。光学系を図 4.9 に示す [13]。ビームスプリッターによってレーザーの 10% を反射し常時取得する。また、リニアリティー測定時にステッピ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 300 shots 射出する。射出されたレーザーをこのプローブで測定し、常時 10% 測定しているプローブとの比率から CLF オペレーション中のレーザーエネルギー推定を行う。1 回のリニアリティー測定での全 300 shots の射出の内、100 shots 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。このリニアリティー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

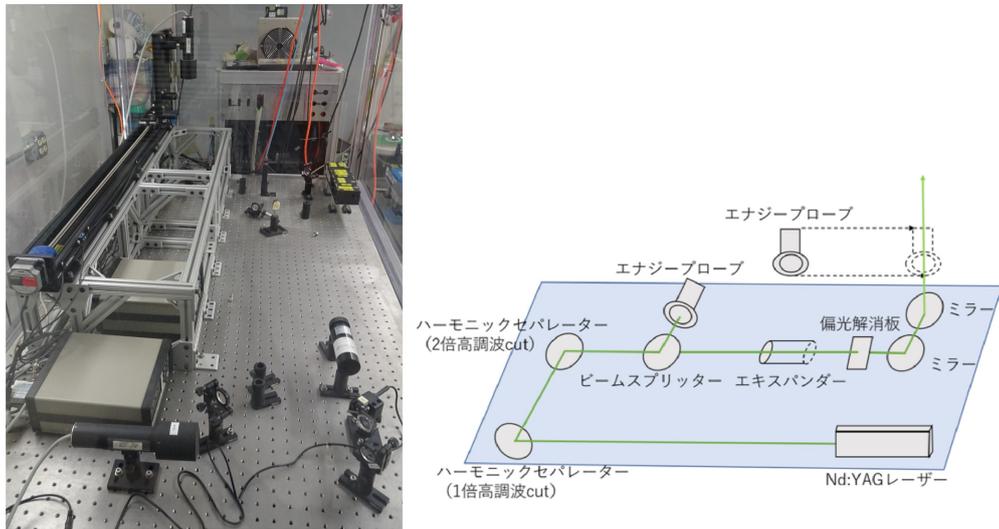


図 4.9: CLF の光学系と写真

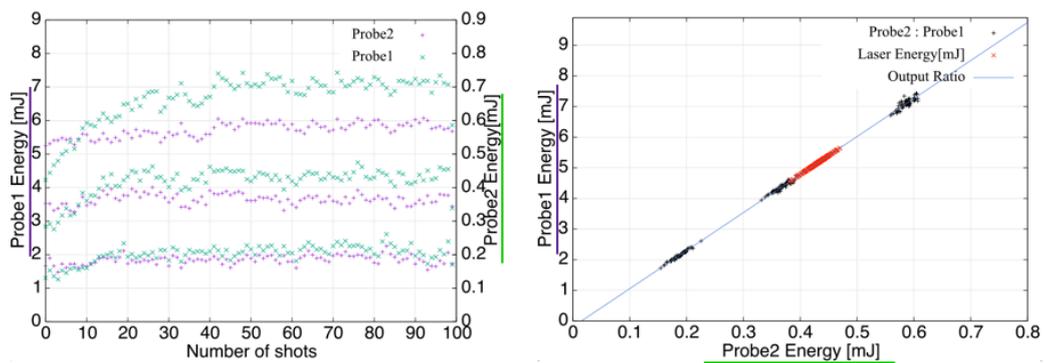


図 4.10: リニアリティー測定 (左) とレーザー出力の決定 (右)

リニアリティー測定を図 4.10 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 [13]。

第5章

CLF における VAOD

5.1 CLF における VAOD 導出概念

CLF を用いた大気透明度測定は、CLF システムによって鉛直方向に射出されたパルス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 における VAOD の導出の概念を図 5.1 に示す [12]。CLF によるレーザー光の FD までの伝播過程を説明する。CLF システムのレーザーエネルギー E から射出時の光子数 Np_0 は以下のように表される。

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

Np_0 は散乱点高度 H までの上昇過程においてエアロゾルと大気分子による散乱を受ける。高度 H での減衰したレーザー光量 $Np_T(H)$ 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、 \bar{h} はプランク定数を示す。

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

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

$$Np_{through}(H) = Np_0(H) \exp[-\tau_{Ray}(\Delta h)] \exp[-\tau_{AS}(\Delta h)] \quad (5.3)$$

となる。よって散乱高度 H における総散乱光量 $Np_s(H)$ は

$$Np_s(H) = Np_T(H) - Np_{through}(H) \quad (5.4)$$

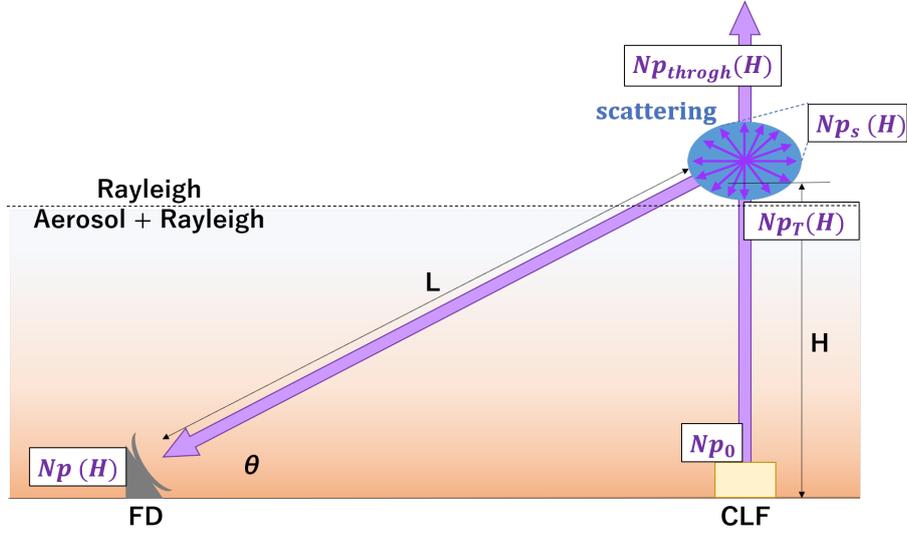


図 5.1: CLF システムによる大気観測イメージ

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，散乱高度 H から FD までの光学的厚さを $\tau_{Ray}(L)$, $\tau_{AS}(L)$ とすると， FD での CLF システムのレーザー光の受光量 $Np(H)$ は

$$Np(H) = Np_s(H)(S_{Ray} + S_{AS}) \exp[-\tau_{Ray}(L)] \exp[-\tau_{AS}(L)] \quad (5.5)$$

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．大気透明度は $T = \exp[-\tau]$ なので，式 5.5 を T で表すと，

$$Np(H) = Np_0 T_{Ray}(H) T_{AS}(H) (S_{Ray} + S_{AS}) T_{Ray}(L) T_{AS}(L) \quad (5.6)$$

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）の時における受光量 Np_{ideal} を考える．その模式図を図 5.2 に示す．理想的な状態においてはエアロゾルの存在量が非常に少ないと考え， $T_{AS}(H) = T_{AS}(L) = 1$, $S_{AS} = 0$ から以下のようなになる．

$$Np_{ideal}(H) = Np_{0-ideal} T_{Ray-ideal}(H) S_{Ray-ideal} T_{Ray-ideal}(L) \quad (5.7)$$

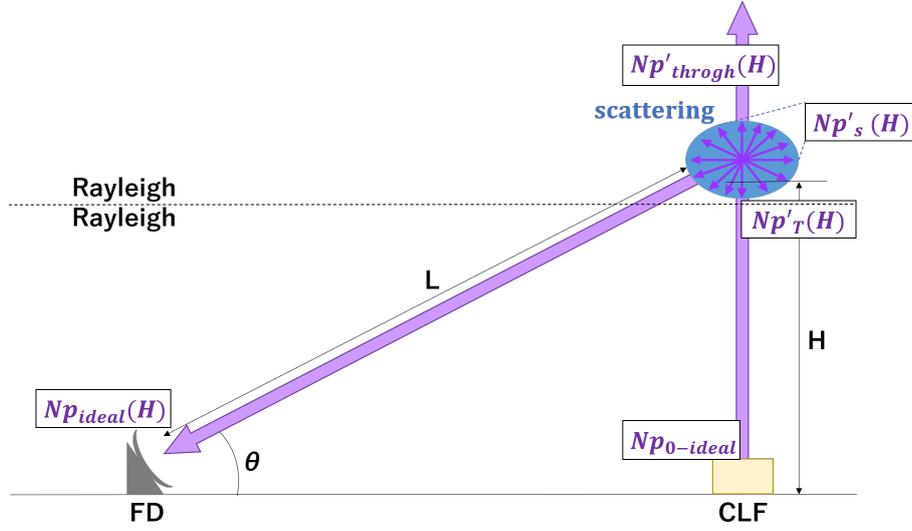


図 5.2: エアロゾルの存在しない理想的な状態のイメージ

ここから式 5.6 を 式 5.7 で割ることにより比を取り、全大気散乱からレイリー散乱の成分を取り除くことでエアロゾル散乱を導く。

$$\frac{Np(H)}{Np_{ideal}(H)} = \frac{Np_0}{Np_{0-ideal}} \frac{T_{Ray}(H)}{T_{Ray-ideal}(H)} T_{AS}(H) \frac{(S_{Ray} + S_{AS})}{S_{Ray-ideal}} \frac{T_{Ray}(L)}{T_{Ray-ideal}(L)} T_{AS}(L) \quad (5.8)$$

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距離 H と L の関係式は以下のようにおける。

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

ここから式 5.8 は次のように表せる。

$$\frac{Np(H)}{Np_{ideal}(H)} = \frac{Np_0}{Np_{0-ideal}} \exp\left[-\tau_{AS}(H) \frac{\sin\theta + 1}{\sin\theta}\right] \exp\left[\frac{\sin\theta + 1}{\sin\theta} (-\tau_{Ray}(H) + \tau_{Ray-ideal}(H))\right] \frac{(S_{Ray} + S_{AS})}{S_{Ray-ideal}} \quad (5.10)$$

ここで大気分子の分布が支配的である高度 4.5km 以上に散乱点高度を取る場合 [12], $S_{AS} = 0$ となるので, VAOD τ_{AS} は式 5.10 から以下のように表せる。

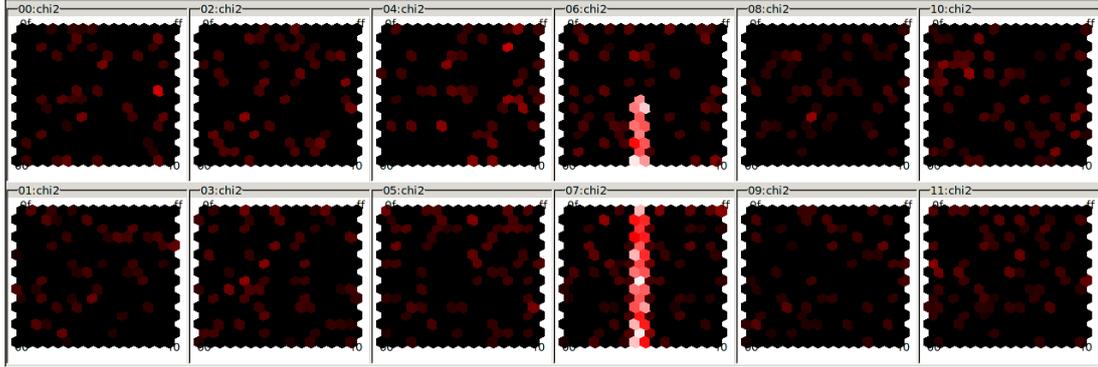


図 5.3: PMT カメラにおける CLF イベントのイメージ図

$$\tau_{AS}(h) = -\frac{\sin \theta + 1}{\sin \theta} \log \left[\frac{Np(H)Np_{0-ideal}}{Np_{ideal}(H)Np_0} \right] + (\tau_{Ray-ideal}(h) - \tau_{Ray}(h)) + \frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} (\alpha_{Ray-ideal}(h) - \alpha_{Ray}(h)) \Delta h \quad (5.11)$$

Np_0 と $Np_{0-ideal}$ はレーザーの射出エネルギー E , E_{ideal} に比例するためレーザーエネルギーの比から光子の比を算出することが可能となる.

5.1.1 FD の受光量 (Np/E)

CLF イベントのレーザー光は FD にて観測される. 観測されたレーザー光は 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 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 5.3 に示す. 一つの六角形は PMT 一本分の反応を示しており, 赤から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, 図 5.3 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?? は, CLF のレーザー 1 shot 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

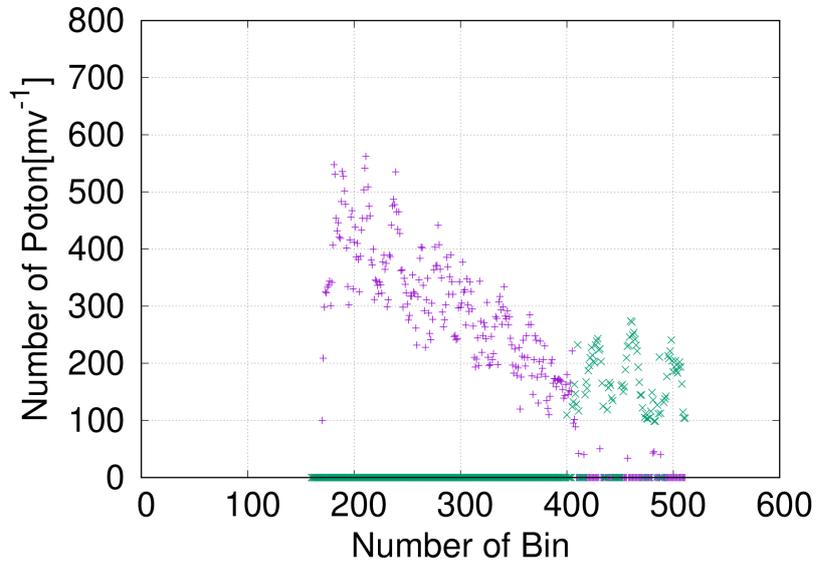


図 5.4: レーザー 1shot における受光強度の時間分布

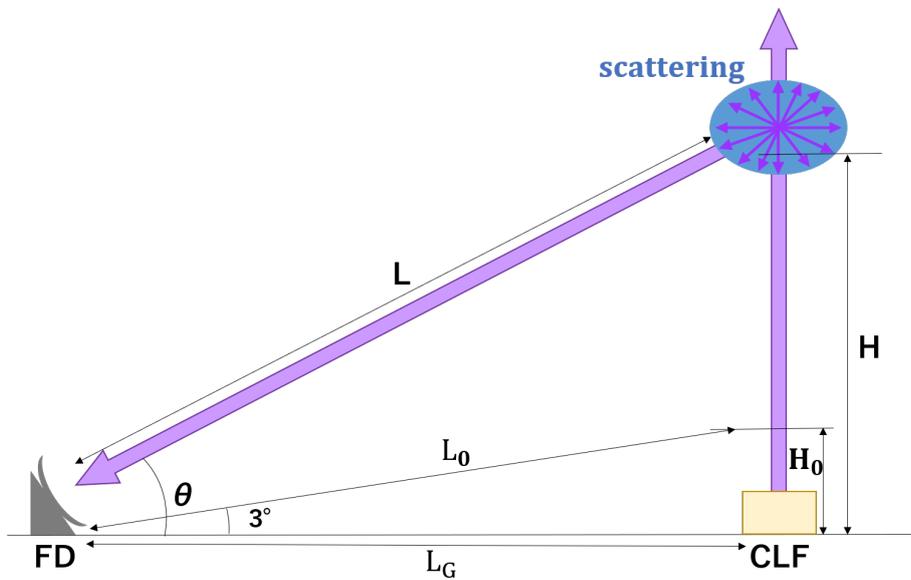


図 5.5: FD 仰角と CLF 観測イメージ

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

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

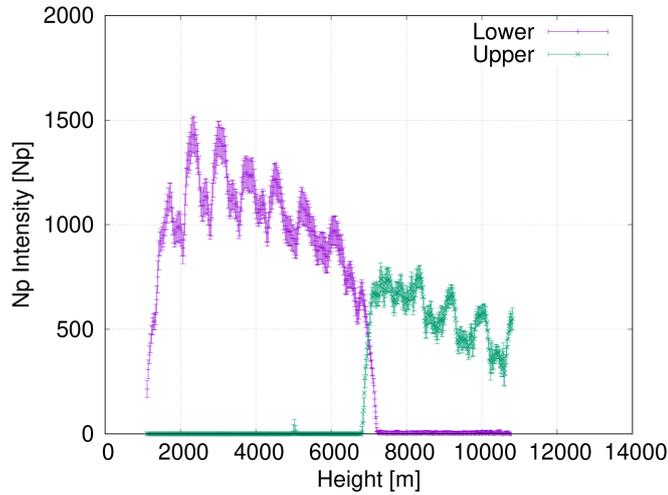


図 5.6: CLF イベントの PMT カメラ上での平均光量の高度分布

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

となり、受光時間から散乱点高度が算出可能になる。

図?? 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、その付近においては受光量が不安定である。今回、この境界となる領域の散乱高度を除いた VAOD の算出を行う。FD での受光強度 N_p は、全 260 shots 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図?? に示す。高度 1 km ~ 12 km 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。

CLF オペレーションのレーザーエネルギーは各観測及び観測時期により異なる。受光強度 N_p はレーザーエネルギーの影響を受けた値であるため、レーザーエネルギーによる規格化を行う。図 5.7 はある CLF オペレーションにおける受光強度 (N_p/E) の高度分布である。この高度分布の内、任意の高度を中心とした 1 km の区間の積算を対象高度における受光量 (N_p/E) として、VAOD 解析を行っている。

5.1.2 天候による影響の除去

レーザーが雲により影響を受けた FD の受光強度の波形例を図 5.8 に示す。地面から垂直方向に打ち上げられたレーザーの光子は、雲などにより FD での受光量が増加もしくは減少する。雲による散乱、減衰をエアロゾルによる影響と区別す

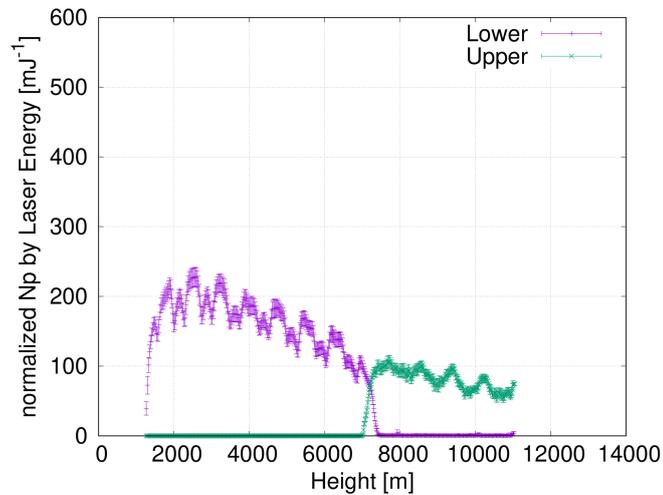


図 5.7: レーザーエネルギーで規格化を施した CLF イベント

るため、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た。図 5 の受光量の高度分布にて 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 (Hazy, Partly Cloud) を検出する。また、受光強度の分布が最大値より大きい、もしくは受光強度 0 が続くことから雲データ (Overcast, Cloud) 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。雲データの選別により 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。

5.1.3 レーザーエネルギーの不安定な期間

CLF システムのレーザーシステムに不調等がある場合、オペレーションが行われると受光量にも影響が出ることが分かっている。このレーザーシステムに不調がある期間及び、同様の傾向を示すデータを解析から除去する必要がある。また、レーザーシステムに不調が発生した場合に近い時期のデータも不調の影響を受けている可能性があるため、同様に解析から除去している。図 5.9 は CLF オペレーションのレーザーエネルギーの時間分布である。緑の点が選定により除かれるデータ期間である。[14]

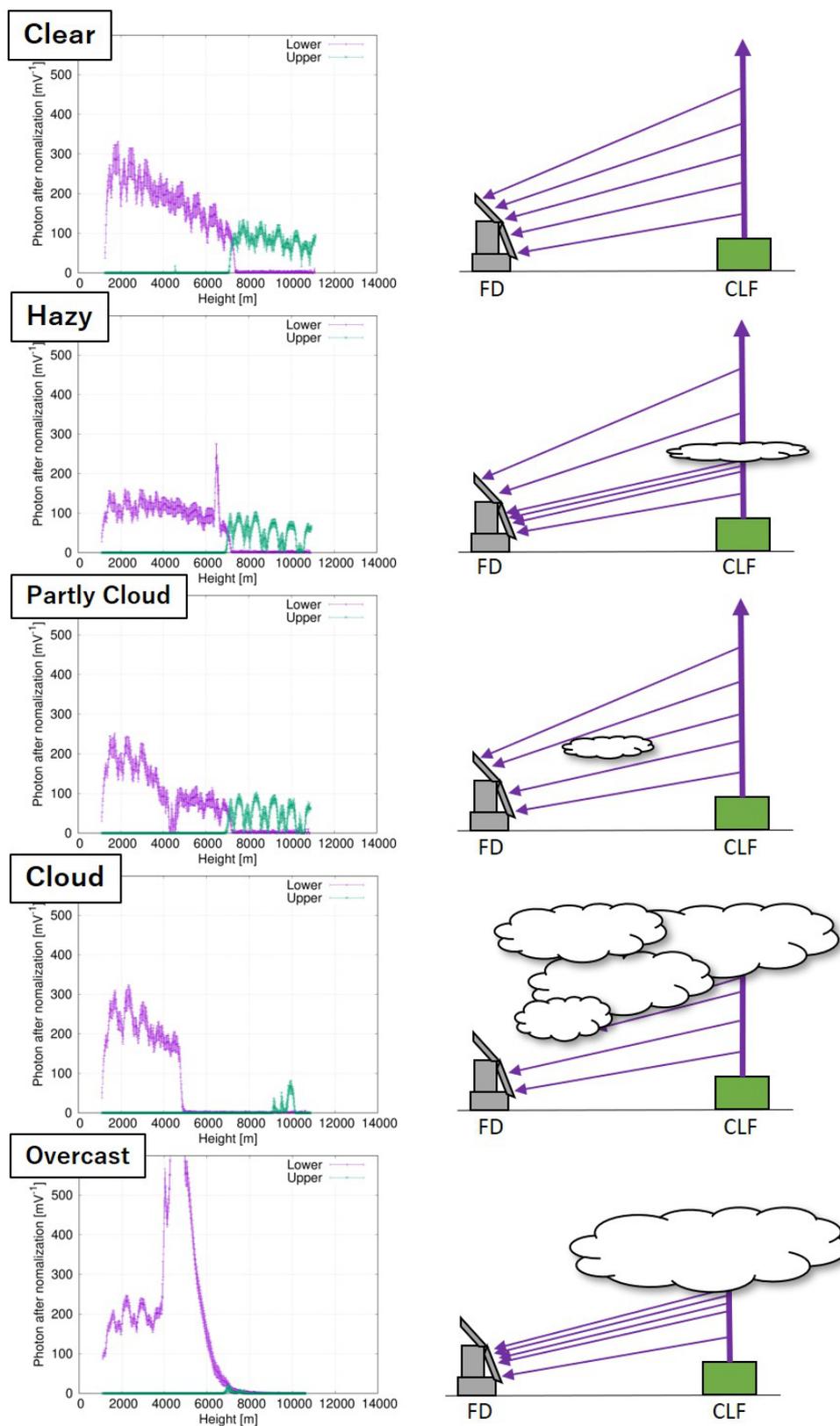


図 5.8: 天候と FD 受光強度

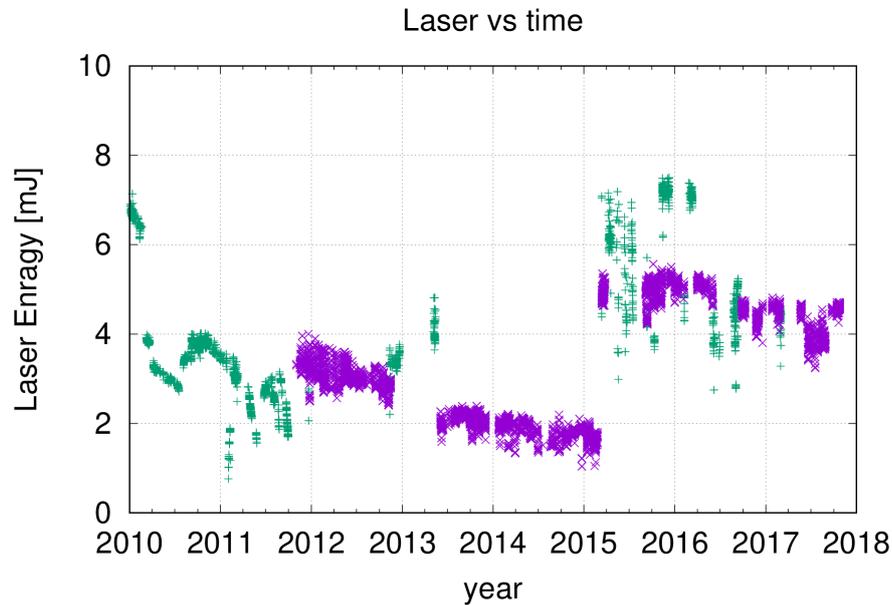


図 5.9: レーザーシステムの不調に関する選定 (紫 : 使用, 緑 : 除外)

5.1.4 低いレーザーエネルギーの期間

図 5.10 は雲の影響を除いたレーザーエネルギーと積算受光量 (N_p) の分布である。受光量 (N_p) はレーザーエネルギーに影響を受ける値であり、大気が綺麗な状態であればレーザーエネルギーに従って N_p も上昇する。そこから大気減衰により斜辺部分から下に分布が広がる三角形の分布になっている。レーザーエネルギーが 2.5 mJ 以下の領域においては、この斜辺からの下への広がり範囲が狭まっており、大気減衰の影響を正しく評価しきれていない可能性がある。このため、レーザーエネルギーの低い期間である 2013 年から 2015 年 3 月のデータ図 5.9 は VAOD 解析期間から除外している。

5.2 CLF 解析の基準データ

CLF 解析における基準となるエアロゾルの存在しない理想的な状態は観測データから選定する。図 5.11 は雲による散乱を除き、5.1.4 節での選定を行ったデータの内、BR ステーションの高度 5 km における受光量の分布である。エアロゾルが存在しない場合を考えた際に、光の伝播過程でのエアロゾルによる減衰が無いため、

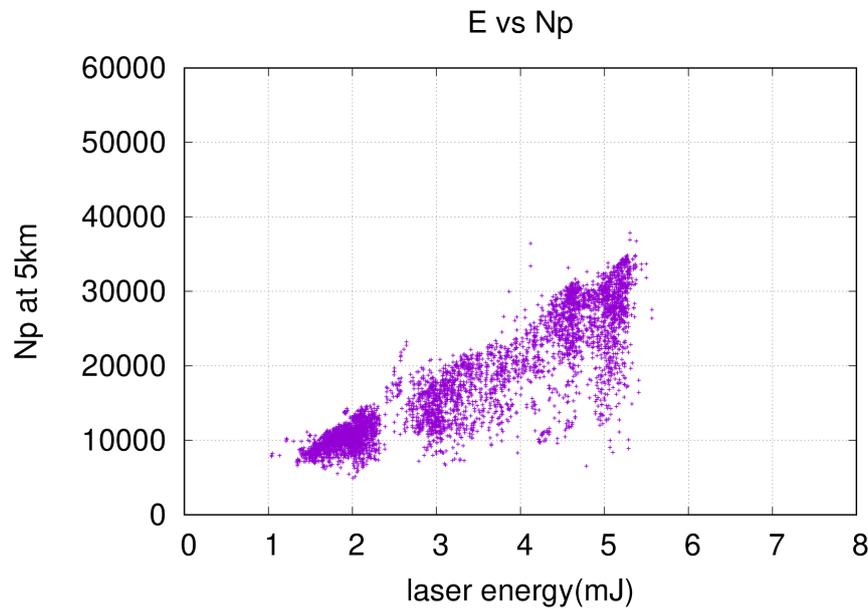


図 5.10: レーザーエネルギーと受光量 (Np) の比較

受光量は上昇すると考えられる。よって、理想的な状態のデータとしては雲による散乱を除き、受光量の特に高いデータを使用する。

理想的な状態のデータを考える際、局所的にエアロゾルが少なくなることは考えにくく、TA 実験サイトにて全体でエアロゾル量が少ないことが想定されることから、各ステーションで共に受光量が高くなると考えられる。また、縦方向にも同様に、エアロゾルが少ない場合は高度によらず受光量が高いことが考えられる。そのため各ステーションにて受光量が高く、かつ高度 5 km, 6 km, 8 km の 3 つの高度において受光量の高いデータの内、上位 5 % の平均の受光量を基準値としている。

5.3 大気分子年間変動の補正

大気分子はその状態がエアロゾルに対して安定的であるが、CLF システムでは基準の状態との比を取るため、大気分子の季節性の影響を考慮する必要がある。季節性の影響の補正は式 5.11 の後半部分 (下式) となり、大気分子による光学的深度と消散係数のそれぞれの基準時と観測データ時の比から年間変動の影響を除去する。

$$\left(\tau_{Ray-ideal}(h) - \tau_{Ray}(h)\right) + \frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \left(\alpha_{Ray-ideal}(h) - \alpha_{Ray}(h)\right) \Delta h \quad (5.14)$$

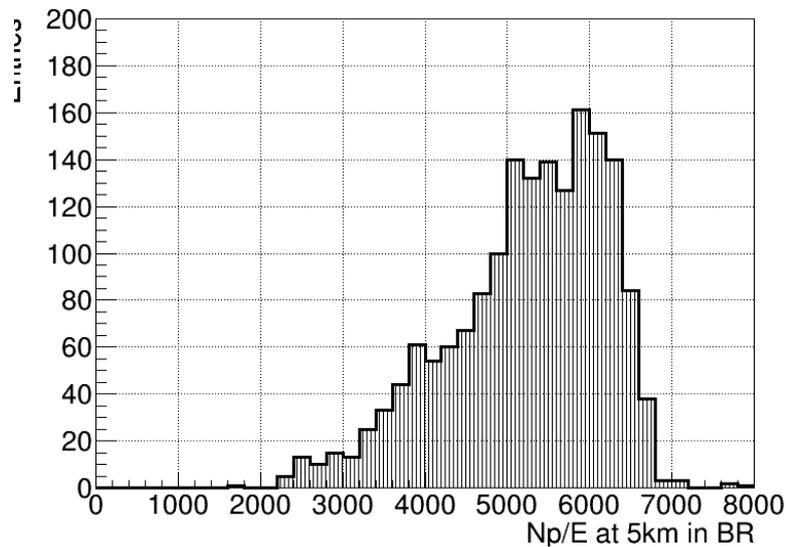


図 5.11: 高度 5 km における受光量の分布 (BR ステーション)

大気分子の影響の計算にて使用する基準時の大気データとしては、基準を計算するための最も高い受光量の平均として使用されるデータの日付を参照した。これまでの CLF 解析から 11 月を基準として使用する月としている。

5.3.1 GDAS のデータ

大気分子の影響は 3 章 1 節のレイリー散乱の計算から、気温及び気圧より計算される。実際に計算を行う際の気温及び気圧のデータについては TA 実験にて使用している GDAS のデータを使用した。GDAS のデータは緯度及び経度でグリッド状に取得されている。使用する大気データの場所としては TA 実験サイトに最も近い場所として北緯 39 度、西経 113 度を用いた。また、TA 実験サイトの平均的な標高は 1400 m [8] であり、GDAS の高度は海拔高度であるため解析に対応する高度は地上高度に直してデータを扱う。GDAS データより気温及び気圧の高度分布を取得する。図 5.12a、図 5.12b は GDAS 対象地点における気温及び気圧の高度分布である。

図 5.13 は GDAS データの高度 5.9 km ~ 6.9 km (地表高度 4.5 km ~ 5.5 km) における高度分布の年間変動である。GDAS のデータは定圧取得であり、データ高度は図のように観測時期やその時の気象状態により異なる。特に CLF の主要解析に使われる地上高度 5 km においては 1 km の区間にデータが 1, 2 データしか

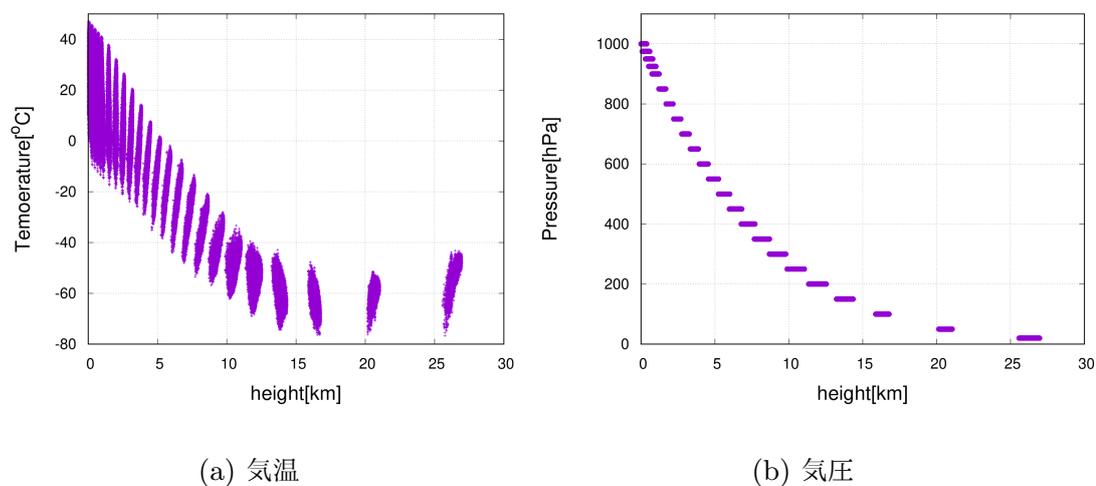


図 5.12: GDAS データの高度分布 (北緯 39 度, 西経 113 度)

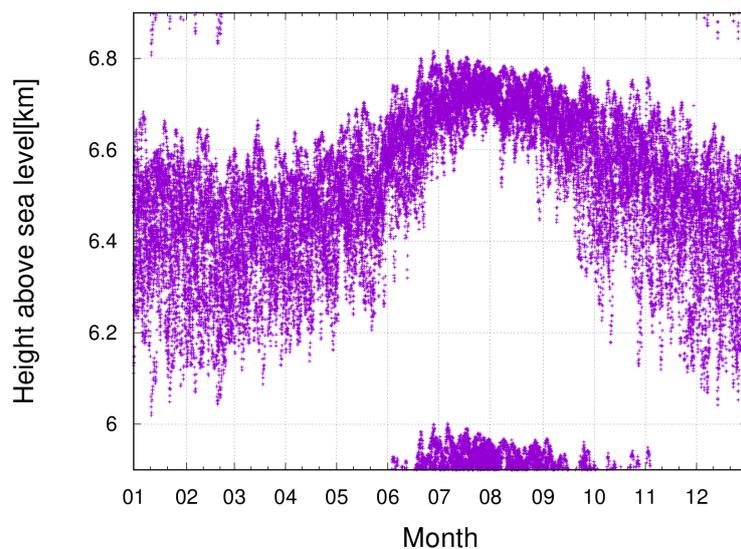


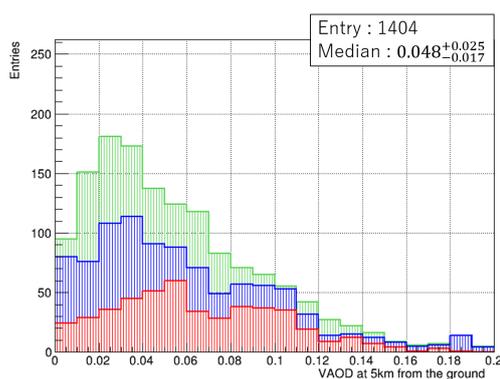
図 5.13: 地上 4.5km 5.5km におけるデータの分布

存在しない。またこの 1, 2 データも 図 5.13 から分かる通り、夏では 6.7 km 付近と 5.9 km 付近と言った形で別高度のデータが混在している。このため、データの高度分布に対する内挿補間を行うことで対象高度における気温及び気圧を取得して解析を行った。

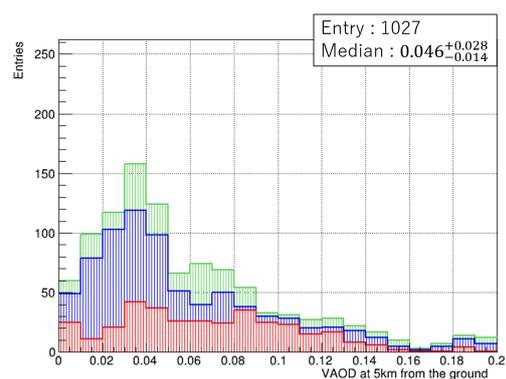
第6章

大気透明度の評価

CLF システムのレーザーエネルギーの安定している期間から過去3年分の CLF オペレーションデータについて VAOD 算出を行った。対象期間はレーザーエネルギーの変動から、2012年1月～2012年12月、2015年9月～2016年8月、2016年10月～2017年9月とした。図6.1a及び図6.1bはBR,LRそれぞれのステーションにおける上空5kmのVAODについて各年の分布を積算したヒストグラムである。図の右側に行く(VAODが高くなる)程、エアロゾル量が増加していることを表している。3年分のデータについての中央値はBRが0.048, LRが0.046となり、3つの期間のそれぞれの中央値と分布幅内で一致した。このVAODはCLF(20.8 km 遠方)の上空5 kmにおける透過率で約78%となる値である。



(a) BR ステーション



(b) LR ステーション

図 6.1: VAOD 分布 (赤 : 2012/01–2012/12, 青 : 2015/09–2016/08, 緑 : 2016/10–2017/09)

6.1 VAOD 年間変動

図 6.2a, 図 6.2b は解析期間 3 年分の VAOD の年間変動について期間毎に色分けしたものである。図中の誤差は 1 回の観測 260 shot の平均における統計誤差を示している。また図 6.3a, 図 6.3b は各年各月の中央値と 3 年分をまとめた各月の中央値を示したものである。算出された VAOD は冬場に低く、夏場に高い傾向が見られた。3 年分の中央値においては 9 月の VAOD が最も高く、11 月の VAOD が最も低くなった。また 8 月の分布にて VAOD 分布が上下に分かれている状態が確認された。VAOD が夏場に高い要因は実験サイトが砂漠地帯であり、乾燥によりエアロゾルが舞いやすい環境にあるためと考察する。対して冬場は積雪などによりエアロゾルが浮遊しにくくなるためと考察する。

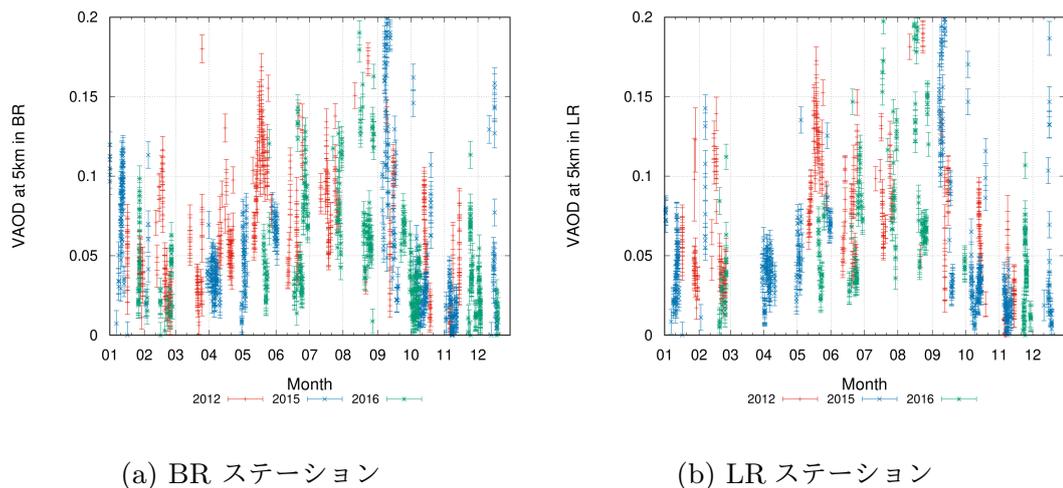


図 6.2: VAOD の年間変動 (赤 : 2012/01 – 2012/12, 青 : 2015/09 – 2016/08, 緑 : 2016/10 – 2017/09)

6.2 低高度における減衰

これまでの解析では VAOD は冬に低く夏に高い傾向を示していた。VAOD 年間変動においても同様の傾向を示しているが、1 月の分布では VAOD の上昇が見られる。これについて雲による影響を除いて、受光量の高度分布の波形から低高度にて減衰が見られる CLF オペレーションが増加していることが分かった。図 6.4 は CLF オペレーションの規格化された受光強度 (N_p/E) の高度分布である。左側は

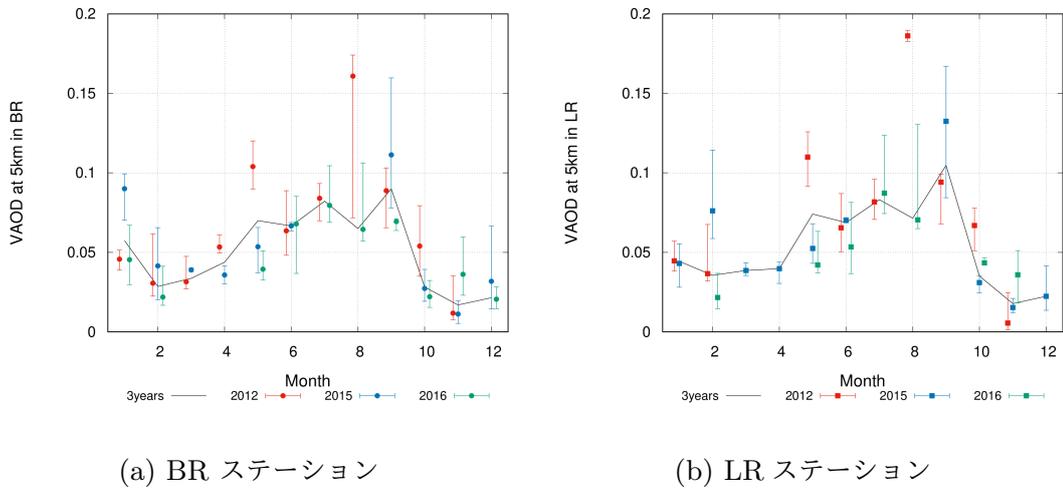


図 6.3: VAOD の月別中央値 (赤 : 2012/01–2012/12, 青 : 2015/09–2016/08, 緑 : 2016/10–2017/09)

VAOD が高い時の CLF オペレーションのものである。CLF から発射された光子は散乱高度が上がるにつれて、散乱媒質の減少や散乱点から受光面までの距離が広がることにより受光強度は減少してく。しかし、図の右側のように一部の CLF オペレーションでは高度 1 km ~ 3 km の低高度にのみ強い減衰が見られる。これについて、装置的影響であれば全体的な影響が想定される。またある程度の時間で連続して同様の波形が観測されており、雲による影響を除去しきれていない可能性は排除される。これらから低高度にて光を遮断するものが分布する霧のような現象が起きており、CLF オペレーションにて捉えられていることが推察される。

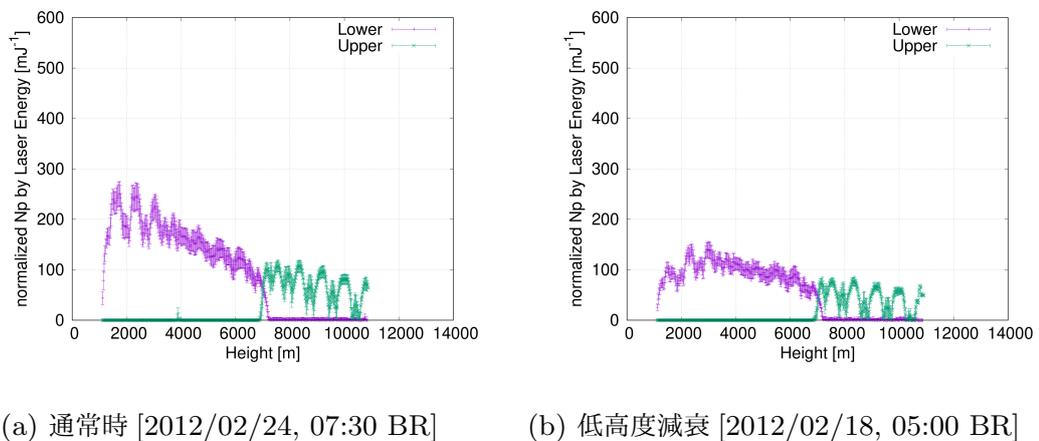


図 6.4: 受光量高度分布の比較

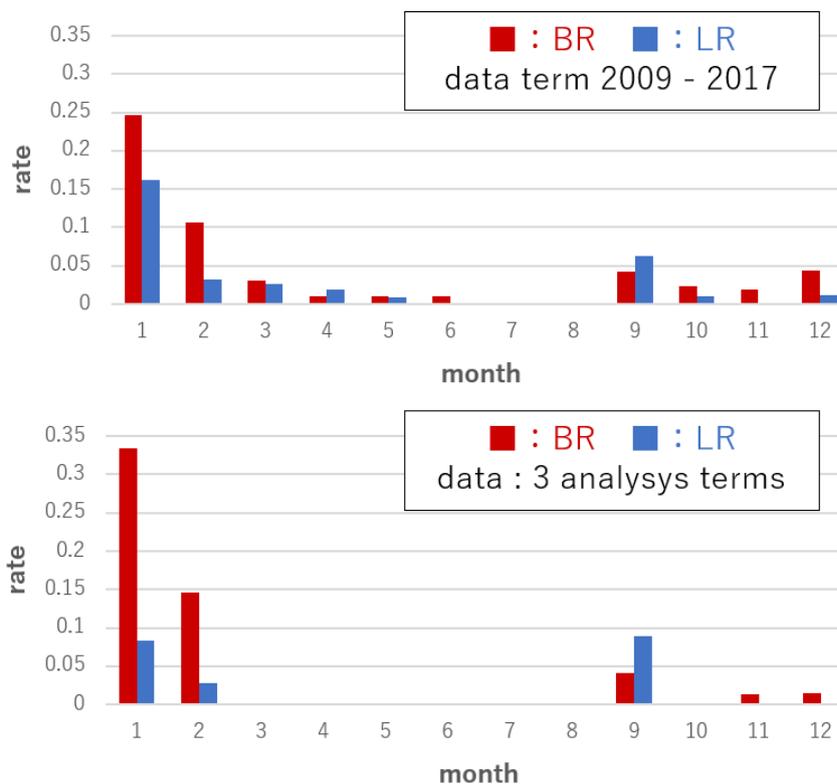


図 6.5: 低高度における減衰の出現割合

このような観測について、低高度にのみ減衰が見られているという特長から、5.1.3 節にて天候の影響の除去した手法と同様に、高度分布の PMT の山構造に対するフィットから概形の判別を行い、目視による確認を行うことで選定した。フィットパラメータの条件は最終的に目視を用いることを考慮して緩い条件に設定した。具体的には下視野全体に対して行った近似線の傾きが -1 以上 0.1 以下であり、 y 切片が 0 以上 160 以下であること、高度 3 km 以下の区間に対する近似線の傾きが 0 以上 2 以下とした。なお FD の鏡の結露の有無については確認できていない。

図??は選定された低高度に減衰が見られる波形の月毎の出現率である。上側は対象期間を 2017 年以前の CLF 全データとしたものであり、下側は VAOD 解析を行っている 3 年分の期間のものである。1 月に割合が増加しており、期間 3 年の BR では 3 割を超えている。また 9 月においても発生率の上昇が見られた。これらについて、冬の時期に関しては現地の環境から雪などにより湿度が高いことから、水分が大気中に浮遊する霧のような現象が考えられる。対して 9 月は乾燥する湿度の低い時期であるため、冬とは別の要因によるものと考えられる。またステーション毎の違いについて、1, 2 月は特に LR より BR の方が明らかに発生率が高

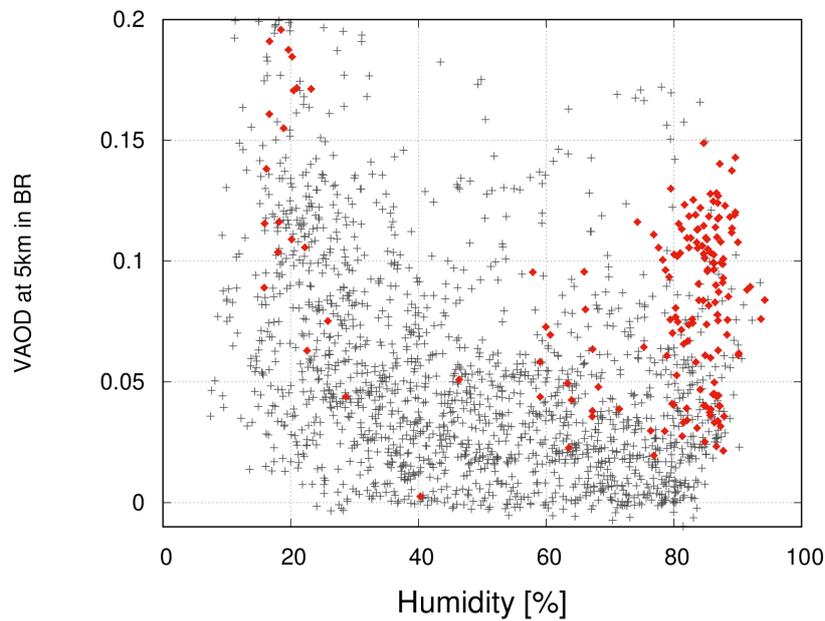


図 6.6: VAOD と湿度の比較 (赤：低高度における減衰)

くなっている. このことから, 低高度に減衰を及ぼす現象は局所的な現象であると考えられ, かつ BR ステーションの方が発生しやすいことが考えられる.

6.2.1 湿度との関係

低高度にて減衰が見られる観測の内, 冬季に観測されるものは現地の環境から水分による影響が想定される. 図 6.6 は BR における上空 5 km の VAOD と湿度の関係を示した図である. 図中の赤色は低高度における減衰が見られた観測を示している. 湿度 80 % 以上では湿度の上昇に従って VAOD が上昇しており, また湿度 40 % 以下では湿度の低下に従って VAOD が上昇する傾向が見られる. なお赤点の低高度に減衰が見られる観測については湿度 80 % 以上で多く出現していることが分かる. なお, 湿度が低い領域に出現している低高度に減衰が見られる観測 (赤点) については 9 月の乾燥した時期の観測であることが分かっている. 前述の通り, 低高度に減衰が見られる観測についてはその波形形状や出現状況から低高度に散乱体が分布している状態が考えられ, 今回の湿度の分布から冬の時期については霧の様な気象条件を分類できる可能性を示した.

第7章

VAOD の評価

CLF を用いた VAOD 算出による結果から 3 つの比較を行う。データ期間は前述の 3 期間 (2012 年 1 月 - 2012 年 12 月, 2015 年 9 月 - 2016 年 8 月, 2016 年 10 月 - 2017 年 9 月) である。

7.1 先行実験での結果との比較

CLF システムによる観測から得られた VAOD を前述の TA 実験地に設置された Mie-LIDAR による観測結果と比較評価する。Mie-LIDAR は, 2007 年 9 月 ~ 2009 年 10 月の約 2 年間の観測により, TA 実験地の大気透明度を測定した。Mie-LIDAR は CLF システムとは異なる観測手法を取っているが, 同様に TA 実験サイトにおける VAOD を解析可能である。そこで, Mie-LIDAR により得られた VAOD と, Mie-LIDAR の設置場所である BR で観測した CLF システムによる VAOD を比較する。また, Mie-LIDAR による結果は $VAOD < 0.1$ を条件として統計しているため, CLF を用いた今回の結果でも同一条件となる 1198 個のデータを用いて VAOD を比較した。

両実験による VAOD の中央値とその分布幅を表 7.1 に示す。CLF システムでは $0.040^{+0.018}_{-0.013}$ であり, Mie-LIDAR による観測値は $0.035^{+0.019}_{-0.013}$ となっており [13], 両者は中央値および分布幅で概ね一致している。CLF システムによる VAOD の方が高くなっていることについては Mie-LIDAR の場合, 解析手法上気象条件等が厳しく設定されていることなどが要因と考えられる, これにより, 先行研究の Mie-LIDAR の結果および本稿において議論した CLF システムを用いた VAOD の算出方法は相互に保証される。

表 7.1: VAOD at 5km comparison with Mie-LIDAR

	Median & Distrbution (< 0.1)	Event
CLF(BR)	0.040 ^{+0.018} _{-0.013}	1198
Mie-LIDAR	0.035 ^{+0.019} _{-0.013}	137

7.2 大気分子の年間変動影響の除去による変化

大気分子の影響はエアロゾルに対して安定的と考えられている。そのため、以前の VAOD 解析においては、VAOD 算出の際の理想的な状態と比を取る際に、大気分子の影響はデータの取得時期によらず一定 (固定値) として扱っていた。具体的には以下の式を用いて解析を行っていた。[10]

$$\tau_{AS}(h) = -\frac{\sin \theta + 1}{\sin \theta} \log \left[\frac{Np(H)Np_{0-ideal}}{Np_{ideal}(H)Np_0} \right] \quad (7.1)$$

本稿の VAOD 解析では大気分子の年間変動の影響を受けるものとして計算を行っている。つまり基準となるデータと比を取る際に、観測データのデータ取得時期と基準データのデータ取得時期の大気分子の影響を異なるものとして扱っている。そのため5章で述べたように式 7.1 に対しては、解析式に大気分子の年間変動の影響を除去する項が存在する (式 5.14)。この項は 5.3.1 節で述べたように GDAS のデータを用いて計算される。この大気分子の年間変動の影響を考慮した本手法 (式 5.11) と大気分子の年間の影響をないものとして計算した手法 (式 7.1) の比較を行った。

図 7.1 は BR ステーションにおける各月の VAOD 中央値の変動である。大気分子の年間変動の影響の除去による変動は誤差範囲内の変化となった。本稿の計算式では基準データの使用される月を 11 月としているため、11 月は差が 0 となる。11 月を除き、差が最も小さいのは 4 月であり -0.00048 ポイントとなった。対して差が最も大きい月は 7 月で 0.0092 ポイントとなった。全体的な変化としては夏の VAOD が高くなり、冬の VAOD が低くなる結果となり、年間変動における季節差が広がる形となった。これらから以前の VAOD 計算手法と同様に本稿の手法は大気の様相を表せており、大気分子の年間変動の影響除去によってより正しい大気を表せていると推察する。

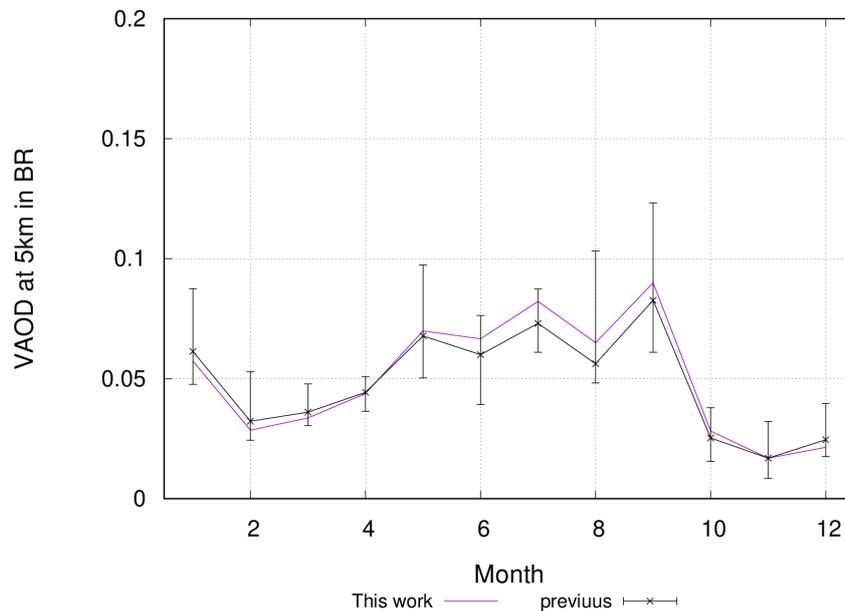


図 7.1: VAOD の月別中央値の変動 (紫: 本手法 [式 5.11], 前手法 [式 7.1])

7.3 別ステーションとの比較

CLF から等距離に位置する BR ステーションと LR ステーションは、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、同様の手法により大気透明度を導出可能である。

図 7.2 は CLF システムによる上空 5 km の VAOD に関する BR 及び LR の観測結果の比較である。黒の直線は 1 対 1 となる箇所を表している。3 年分の解析で両ステーション共に VAOD を導出可能なデータが存在するものは 810 個存在した。1 対 1 の直線を誤差範囲内に含むデータは 542 データ (66%) であり、また直線線形近似の相関係数は 0.94 の一致度であった。これに対して 1 対 1 の関係から離れているデータは各ステーションでの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 システムによる大気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が示唆された、また表 7.2 はそれぞれのステーションでの VADO の中央値を示しており、両者は分布の中央値が 1σ の分布幅以内で一致した。

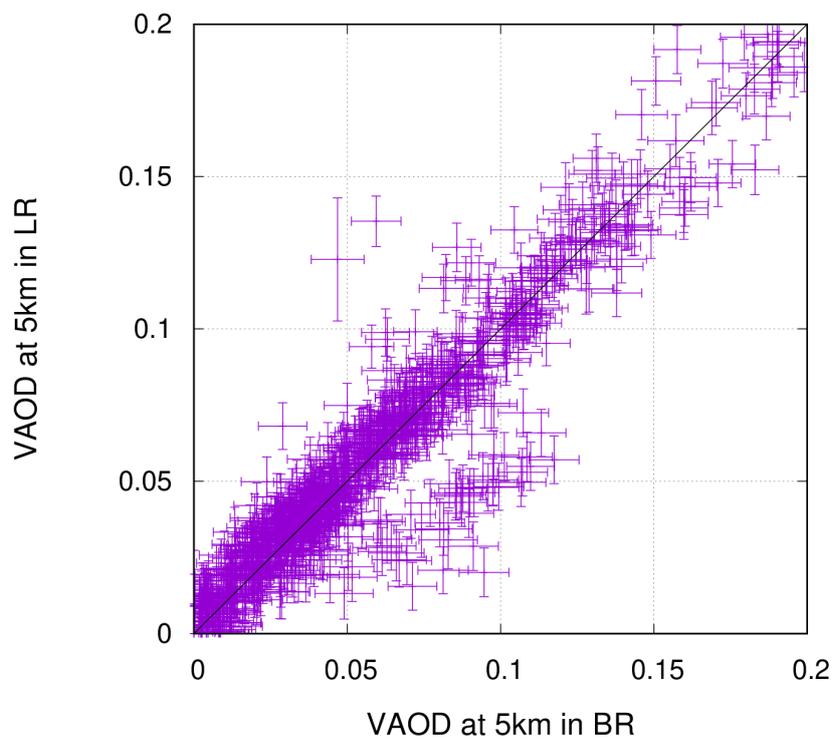


図 7.2: VAOD のステーション比較 (x : BR, y : LR)

表 7.2: VAOD at 5km comparison BR and LR

	Median & Distrbution (< 0.2)	Event
BR	$0.048^{+0.025}_{-0.017}$	1404
LR	$0.046^{+0.028}_{-0.014}$	1027

第 8 章

年間変動のモデル化

CLF は FD による宇宙線観測における大気校正のためのエアロゾル大気透明度を観測するためのシステムである。この CLF システムは CLF が送信部、FD が受光部となるバイスタティック形式の大気観測システムである。しかし CLF システムによる大気観測は CLF、FD 双方の気象条件やシステムの状態により、大気観測を行えない、もしくは VAOD 解析を行えない場合が存在する。このため観測データから導出した VAOD を用いた校正を行おうとした場合、FD 観測を補完できない期間が存在する。そのためこれまでの CLF システムにより得られた大気観測データによる VAOD 解析からエアロゾルの季節変動についてのモデル化を行った。モデル化に使用するデータは前述の 3 期間 (2012/01 - 2012/12, 2015/09 - 2016/08, 2016/10 - 2017/09) の上空 5 km における各ステーションの VAOD である。モデル化の形式としては月毎の代表値とフィッティングによる関数化の 2 パターンを作成した。

8.1 月毎の代表値

VAOD の月毎の代表値モデルとして、中央値と 1σ の分布幅による表形式モデルを作成した。表 8.1 は BR 及び LR ステーションの各月の結果及びデータ数、20.8 km 遠方の上空 5 km における透過率を示している。なお図 8.1 は両ステーションの代表値の年間の変動について表示したものである。

傾向としては 6.1 節で述べたように 9 月に VAOD が最も高く、11 月に最も低くなり、透過率にて BR では 3 割近く、LR では 4 割以上の差となった。また 1 月の VAOD の上昇については 6.2 節で述べた低高度における減衰が見られる観測の影響であると推察される。また 5 月については 2012 年の期間のみ VAOD が上昇し

ていることが分かっている。また LR ステーションにおいては現状の解析期間では3月のデータ数が極端に少なくなっている。これについては今後、データ量を増やすことで対応できると考える。

表 8.1: VAOD comparison BR and LR

	BR ステーション			LR ステーション		
	Median (< 0.2)	透過率	Entry	Median (< 0.2)	透過率	Entry
1月	0.057 ^{+0.026} _{-0.014}	74.0 %	135	0.044 ^{+0.011} _{-0.012}	79.3 %	101
2月	0.057 ^{+0.021} _{-0.008}	86.3 %	100	0.036 ^{+0.028} _{-0.007}	82.7 %	86
3月	0.034 ^{+0.012} _{-0.006}	83.6 %	41	0.039 ^{+0.005} _{-0.003}	81.4 %	6
4月	0.044 ^{+0.007} _{-0.008}	79.3 %	123	0.040 ^{+0.004} _{-0.009}	81.0 %	75
5月	0.070 ^{+0.030} _{-0.017}	69.1 %	163	0.074 ^{+0.028} _{-0.018}	67.7 %	136
6月	0.067 ^{+0.016} _{-0.021}	70.2 %	118	0.069 ^{+0.016} _{-0.021}	69.5 %	101
7月	0.082 ^{+0.014} _{-0.012}	64.9 %	82	0.083 ^{+0.023} _{-0.011}	64.5 %	61
8月	0.065 ^{+0.047} _{-0.008}	71.0 %	120	0.071 ^{+0.074} _{-0.006}	68.7 %	62
9月	0.090 ^{+0.041} _{-0.022}	62.2 %	205	0.105 ^{+0.041} _{-0.029}	57.5 %	84
10月	0.028 ^{+0.013} _{-0.010}	86.3 %	169	0.035 ^{+0.015} _{-0.007}	83.1 %	113
11月	0.017 ^{+0.015} _{-0.008}	91.4 %	74	0.018 ^{+0.012} _{-0.006}	90.9 %	174
12月	0.021 ^{+0.015} _{-0.007}	89.5 %	135	0.022 ^{+0.019} _{-0.009}	89.0 %	29

8.2 フィッティング関数

関数形式のモデルとして、VAOD の年間変動の分布に対する関数フィットを用いてモデルを作成した。フィット関数は年間変動の描像から (図 6.2a, 図 6.2b), sin 関数を用いて以下のように設定した。

$$\alpha \sin\left(\frac{2\pi}{365.25}x + \beta\right) + \gamma \quad (8.1)$$

なお1月のデータに関しては、6.2節で述べた低高度に減衰が見られる観測例の発生数が特に増加しており、VAOD が上昇することが分かっている。このため関数フィットに使用するデータからは1月のデータを除いている。この際1月のエアロゾルモデルとしては前述の月毎の代表値を用いるものとする。

表 8.2 は BR 及び LR ステーションにける高度 5 km の VAOD に対する関数フィットのパラメータ及び決定係数を表している。また、図 8.3, 図??はパラメー

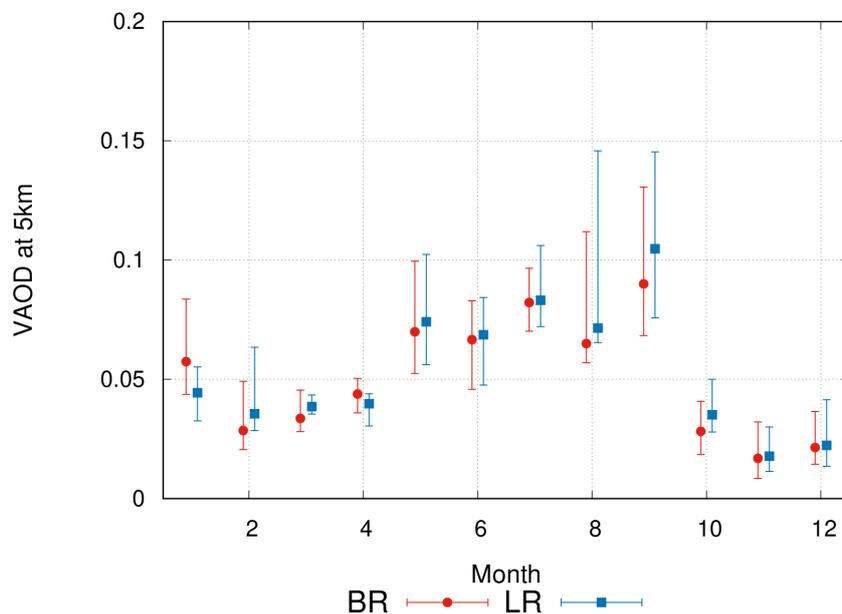


図 8.1: VAOD の年間変動 (赤 : BR, 青 : LR)

タに基づいた関数とフィッティングに使用したデータを表している。sin カーブのピーク (モデルにて VAOD の最も高くなる月) は両ステーション共に 7 月となった。なお 6.2 節に述べたように 2 月及び 9 月においても低高度にて減衰が見られる観測が増加しており、図からも 2, 9 月の VAOD はフィット関数に対しては大きく上昇している分かる。また、8 月も同様に VAOD の上昇が見られる。これに関して 1 月と同様にフィットデータから 2, 8, 9 月のデータを除去するべきかについては今後検討が必要と考える。なお 5 月については前述の通り 2012 年の期間の VAOD のみ上昇が見られることが分かっており、季節的なものではないと推測される。

表 8.2: VAOD fit parameter

ステーション	α	β	γ	決定係数
BR	-0.034	1.414	0.052	0.25
LR	-0.038	1.337	0.056	0.27

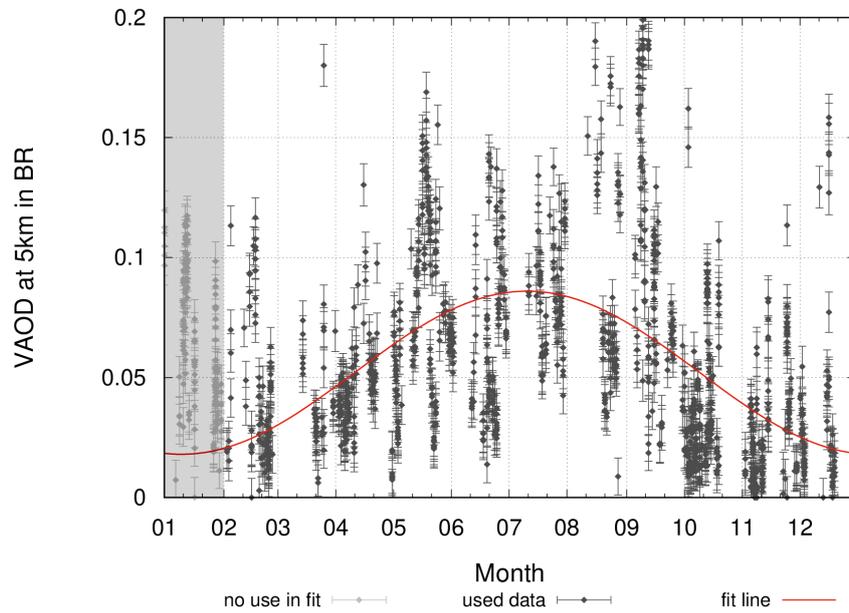


図 8.2: BR ステーションの VAOD 年間変動に対するフィッティング (1月除く)

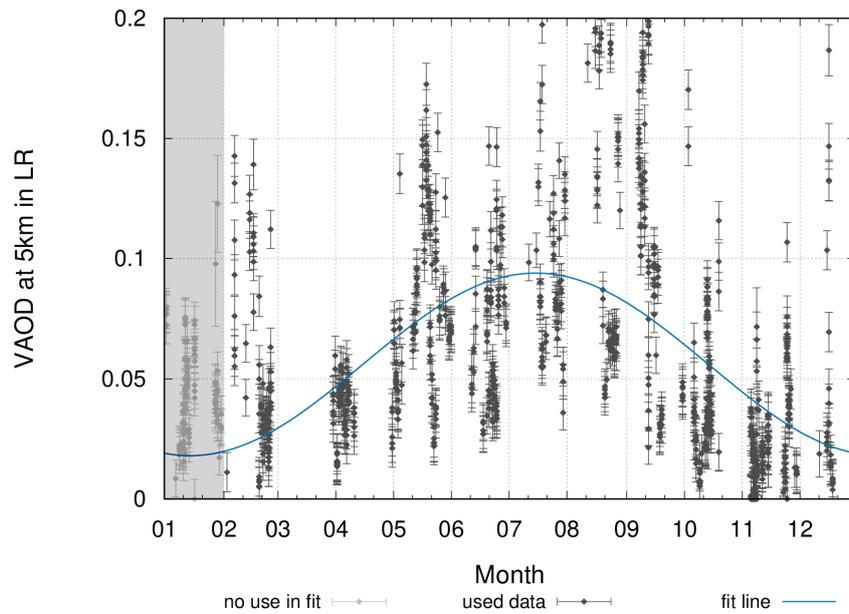


図 8.3: LR ステーションの VAOD 年間変動に対するフィッティング (1月除く)

第9章

結論

FD 観測実験の宇宙線解析において大気校正としてエアロゾルの透明度は重要である。レーザー装置である CLF システムによる大気観測から、大気校正用のパラメータであるエアロゾルの大気透明度を算出した。CLF システム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 を算出可能である。VAOD ≥ 0.2 を満たす分布の中央値と 1σ の分布幅は BR ステーションにおいて $0.048^{+0.025}_{-0.017}$, LR ステーションにおいて $0.046^{+0.024}_{-0.018}$ となった。

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校正として用いられている Mie-LIDAR の過去の VAOD の分布と比較を行った。VAOD < 0.1 を満たす分布の BR の中央値と 1σ の分布幅は $0.036^{+0.018}_{-0.012}$ であり、中央値が両者共に分布幅以内で一致した。さらに大気分子の年間変動の影響を考慮したことによる VAOD の変化は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 BR と LR ステーションで測定された VAOD の比較を行い、両者が分布幅以内で中央値が一致した。また VAOD の年間変動についてモデル化を行った。モデルは月別の中央値及び \sin 関数によるフィッティングの2形式を作成した。

今後、CLF システムで測定された VAOD のモデルにより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/advertisements/nature/0711.html/>, (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)
- [10] T. Uehama, 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, University of Shinshu, Japan, *PhyM* (2020)
- [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)
- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] T.Nakamura, TA 実験における大気透明度観測のデータ選定に関する研究. University of Shinshu, Japan, *PhB* (2020)

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。

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、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上濱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稲富氏、岩倉氏、宇都宮氏、佐野氏、切中氏、中村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窪田氏、柴崎氏、中澤氏に深く感謝いたします。

研究室の後輩として、生活の支えになりました齊藤氏、阿部氏、高桑氏、西本氏、日比氏に感謝いたします。

御精読ありがとうございました。