

令和6年度 修士論文

TA 実験における大気透明度が
空気シャワー解析へ与える
系統誤差



提出者

信州大学総合理工学研究科 工学専攻
電子情報システムユニット

水野 航太

2024年12月2日 提出

序論

宇宙空間を飛び交う放射線である宇宙線は、地球に到来する際に大気分子と相互作用を起こし空気シャワーと呼ばれる現象を引き起こす。この空気シャワーを地上で捉えることによって宇宙線についてを調べる研究が世界中で行われている。

米国ユタ州に位置するテレスコープアレイ (TA) 実験では 10^{18} eV を超える超高エネルギー宇宙線の観測を目的としている。TA 実験では 507 台の地表検出器 (SD) と 3 ステーションの大気蛍光望遠鏡 (FD) を有しており Black Rock Mesa” (BR), ”Long Ridge”(LR), ”Middle Drum”(MD) と呼ばれる 3 つの大気蛍光望遠鏡ステーションが SD の周りに設置されている。FD は空気シャワーの発達過程において発せられる大気蛍光を PMT カメラで撮像観測を行っている。

大気蛍光は FD に到達するまでの伝播過程において、大気分子や大気中のエアロゾルによって散乱・吸収によって減衰が起こる。TA 実験の観測地は米国ユタ州の広大な砂漠地帯に広がっており、砂や塵などのエアロゾルが舞いやすい環境にある。そのためエアロゾルの分布量による大気透明度を知り、蛍光の減衰量を知りそれに応じたキャリブレーションが必要となる。

Central Laser Facility (CLF) というレーザー施設によって大気的时间変化を追う大気透明度測定が行われており、エアロゾルによる光学的厚さ (Vertical Aerosol Optical Depth, VAOD) を得ることができる。この VAOD の解析によって季節変動があることがわかり、その季節変動を月ごとの VAOD の代表値を出すことでモデル化を行ったものが作られた。

本論文ではこの月ごとの VAOD の値を使用して空気シャワー解析を行った際の再構成される一次宇宙線のエネルギーと X_{max} と呼ばれるパラメーターに対して与える系統誤差への影響を報告する。

目次

第 1 章	宇宙線・Telescope Array 実験	1
1.1	宇宙線	1
1.2	空気シャワー現象	2
1.3	Telescope Array 実験	3
1.3.1	大気蛍光望遠鏡	4
1.3.2	TA-LIDAR システム	7
1.3.3	Central Laser Facility	8
第 2 章	大気透明度	21
2.1	大気散乱	21
2.1.1	ランバート・ベールの法則	21
2.1.2	サイズパラメータ	22
2.1.3	Rayleigh 散乱	22
2.1.4	エアロゾル散乱	24
2.2	VAOD	24
2.3	CLF を用いた VAOD の計算方法	25
2.4	VAOD の分布	27
2.5	VAOD の季節依存性	28
第 3 章	系統誤差の見積もり	31
3.1	解析のデザイン・概念	31
3.2	シミュレーション条件	32
3.3	再構成条件	33
3.4	シミュレーションで設定した VAOD と再構成する際の VAOD の 値に差がある場合の挙動	34
3.5	空気シャワーのコア位置の分布の季節依存性	35

3.6	エネルギーについての結果	37
3.6.1	各典型値による再構成結果の違い	37
3.6.2	一次宇宙線のエネルギー再構成に対する系統誤差	38
3.7	X _{max} についての結果	46
3.7.1	各典型値による再構成結果の違い	46
3.7.2	X _{max} の再構成に対する系統誤差	48
第 4 章	エネルギー再構成結果と宇宙線パラメータの関係	53
4.1	方位角との関係	53
4.2	天頂角との関係	55
4.3	インパクトパラメーター (R_p) との関係	57
4.4	VAOD との関係	60
4.5	関数化	63
第 5 章	結論	66
参考文献		67
謝辞		68

第1章

宇宙線・Telescope Array 実験

1.1 宇宙線

宇宙線は宇宙空間を飛び交う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。宇宙線の主たる成分は陽子であり、その他にも様々な原子核を含んでいる。宇宙線のエネルギーは 10^8 eV から 10^{20} eV 程度まで観測されている。中には 10^{20} eV を超える宇宙線の報告もある。特に 10^{18} eV を超える宇宙線のことを超高エネルギー宇宙線と呼んでおり、このような高エネルギー放射線の源が何であるのか、宇宙のどこで加速されたのか、どのような機構で加速されたのかについては未知の点が多く、研究が進められている。図 1.1 は 10^8 eV から 10^{21} eV までの宇宙線スペクトルを、図 1.2 は 10^{17} eV から 10^{21} eV までの宇宙線スペクトルを示した図である。宇宙線の到来頻度はエネルギーが高くなるほど急激に減少しており、到来頻度はエネルギーのおよそ -3 乗に比例して変化する。 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、その付近では”knee”と呼ばれるスペクトルの折れ曲がり確認できる。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へ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 程度であることなどが原因であると考えられる。また 5×10^{15} 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。

10^{20} eV 付近で GZK カットオフと思われるスペクトルの落ち込みの構造が見える。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と相互作用して、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。

[1, 2] その付近の超高エネルギー宇宙線は、その到来頻度の低さから観測統計量が少なく正確な形はまだ定まっておらず、実験間の差も大きい。

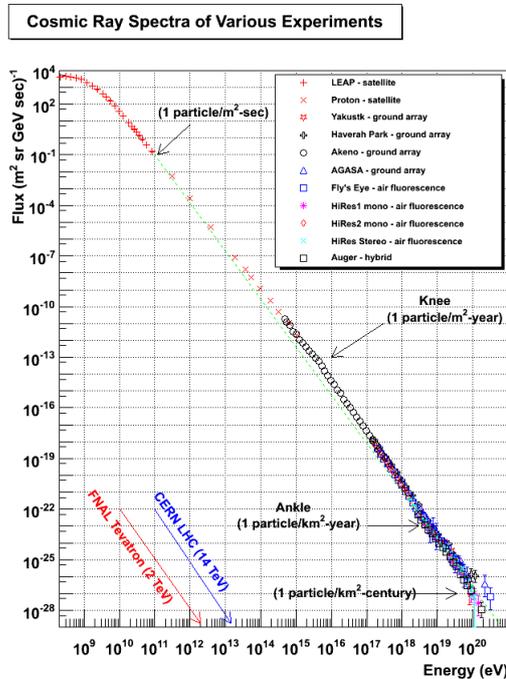


図 1.1: 10^8 eV から 10^{21} eV までの宇宙線スペクトル

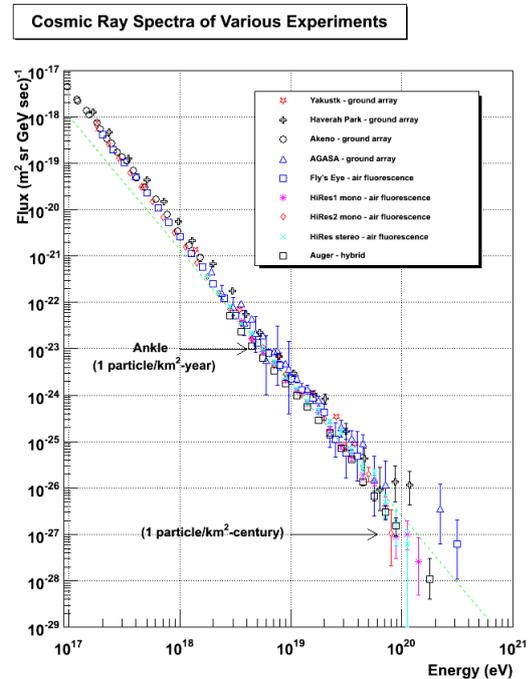


図 1.2: 10^{17} eV から 10^{21} eV までの宇宙線スペクトル

1.2 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。この現象を繰り返すことによって最終的に大量の二次粒子が地上に降り注ぐ。この現象は空気シャワー現象と呼ばれている。空気シャワーを模式的に表したものを図 1.3 に示す。生成される粒子の中でも寿命の短いものは崩壊し、地表には残ったガンマ線、電子、ミューオン等が到達する。

相互作用により、宇宙線のエネルギーは次々と二次粒子へと写っていき、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の大気深さを X_{\max} といい、一次宇宙線の質量組成の推定に用いられている。 X_{\max} は到来する宇宙線のエネルギーが高く、質量が軽いほど深くなる。

また、空気シャワーは軸に対して垂直方向にも広がる。この横方向の広がりの様子を空気シャワーの横方向発達という。この過程において二次粒子が窒素分子を励起させ、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。

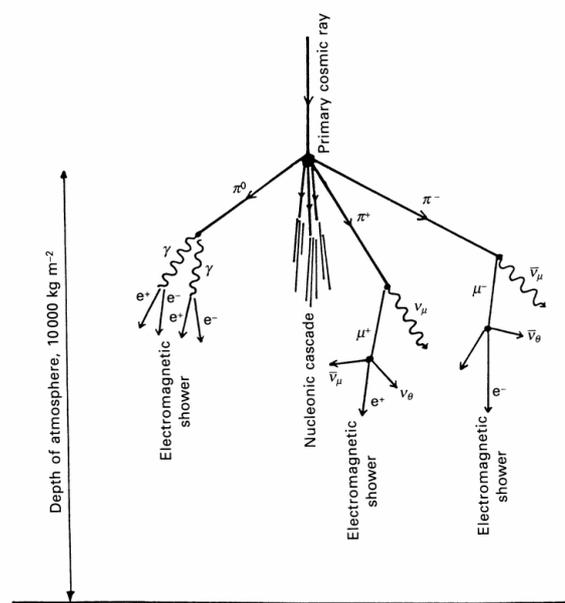


図 1.3: 空気シャワーの模式図

1.3 Telescope Array 実験

Telescope Array(TA) 実験は超高エネルギー宇宙線の観測および起源同定を目的とする国際共同実験であり、北半球で最大の宇宙線観測実験である。米国ユタ州ミラード郡デルタ市に実験サイトが設置されており、507 台の地表検出器と 3 ステーションに大気蛍光望遠鏡が 700 km^2 の広さの土地に設置されている。これらの観測装置の配置図を図 1.4 に示す。3 つの大気蛍光望遠鏡 (FD) ステーションが緑四角、地表検出器 (SD) が黒四角で示されている。3 つの FD ステーションが SD を取り囲むように配置されており、これらの中心の位置に Central Laser Facility(CLF) を設置し、大気透明度の計測を行っている。

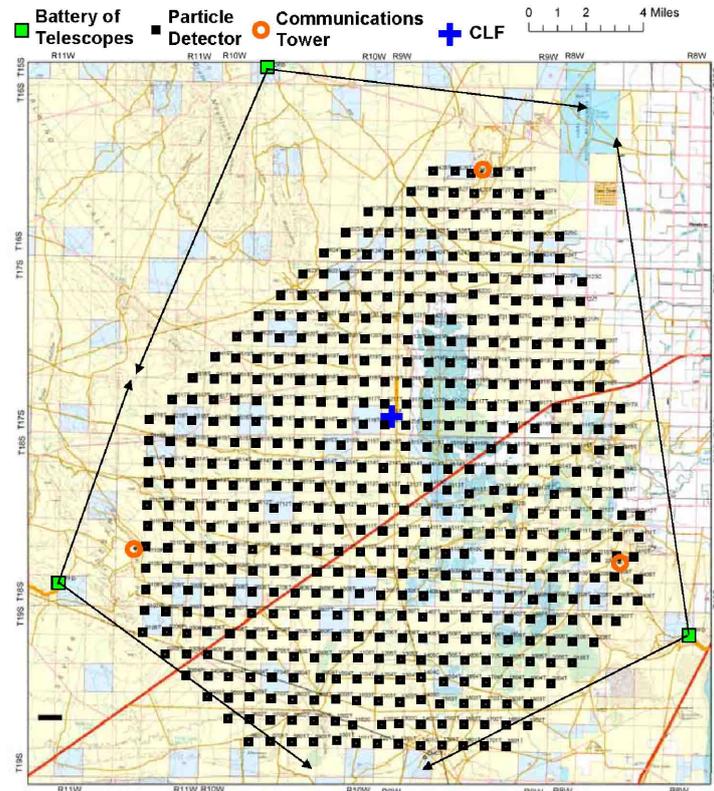


図 1.4: TA 実験の装置配置図

1.3.1 大気蛍光望遠鏡

大気蛍光望遠鏡 (FD) で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励起することによって発せられる紫外光を望遠鏡で撮像して観測を行う。この大気蛍光はとても微弱なため、18 枚の鏡を組み合わせた大きな複合球面鏡で集光を行い、ハニカムアレイ状に並べた 256 本の PMT カメラで撮影を行う。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 箇所と、構成の異なる 1 箇所の合計 3 ステーションで観測を行うことで広い天空の領域をカバーして空気シャワーによる発光を待つ。観測は月が出ておらず、晴れて大気が透明な夜に限られるため稼働率は全時間の 10 % 程になってしまうが観測された光の量から宇宙線のエネルギーを決定できる利点があり、SD での観測と組み合わせることでより精度の高い観測を行うことができる。



図 1.5: 大気蛍光望遠鏡の外観

光学系

FD ステーションの複合球面鏡の外観を 1.6 に示す．広視野での観測を行うために 1 つの FD ステーションには上下 2 段 1 対を横に 6 個設置している．すなわち 1 つの FD ステーションに 12 台のカメラが設置されていることになる．望遠鏡 1 台あたりの視野は方位角 18.0 度，仰角 15.5 度であるので 1 ステーションの視野は方位角 108 度，仰角は 3～33 度である．FD に用いられる複合球面鏡は曲率半径 6.067m，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 を構成するセグメントミラーは対辺の距離が 600 mm の六角形で，表面は Al_2O_3 でコーティングされている．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 以下になるように調整し配置してある．

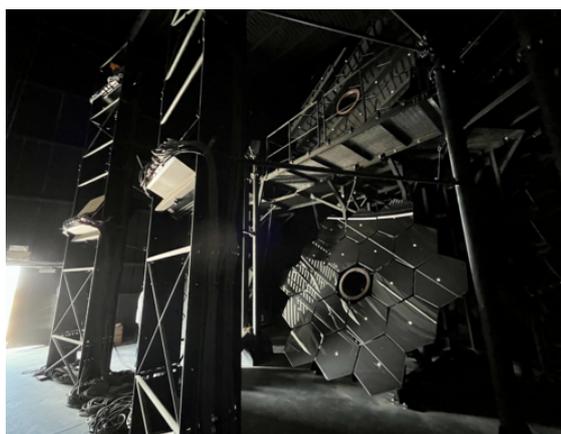


図 1.6: FD の複合球面鏡

PMT カメラ

PMT と PMT を構成するカメラボックスの外観を図 1.7 に示す。カメラボックスには 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 の感面上には夜行や街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、紫外透過パラグラス (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 1.8 に示すデータ取得システムに送られる。

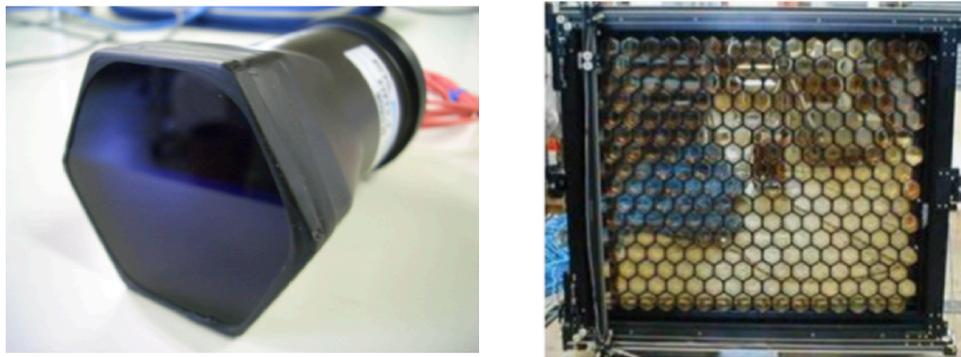


図 1.7: PMT とカメラボックス

データ収集システム

エレクトロニクスの概略図を図 1.8 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), Centrak Trigger Distributor(CTD) で構成されている。[3] 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あと、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 4bin(100 ns) 毎に積分され、 $12.8 \mu\text{s}$ 毎に記録される。記録されたデータごとに SN 比による SN 判定を行い、その判定結果を TF に送信する。SDF1 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を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カメラごとの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を含めた最終判定を行い、飛跡信号があった場合、データ取得信号を生成する。またステーション内のすべてのFDを同期させるための初期化信号の生成を行う。

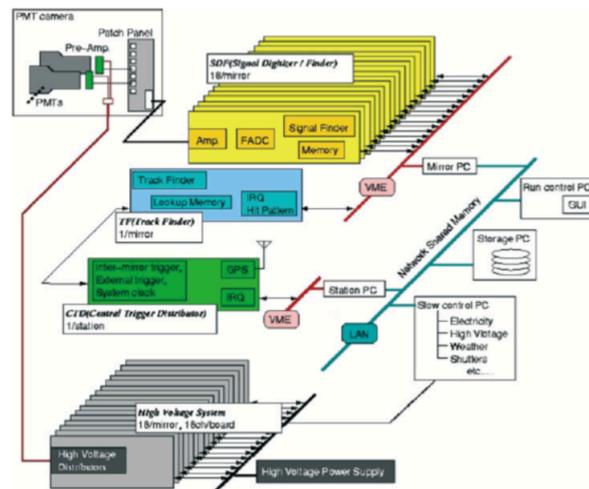


図 1.8: FD でのデータ取得システム

1.3.2 TA-LIDAR システム

TA-LIDAR(図 1.9) 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ており、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する。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の測定を行っている。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 FD での宇宙線観測オペレーションの直前と直後の2度の測定に限られる。現在このシステムは稼働していないが、過去2年間の運用データによる大気透明度の代表値がFDの大気校正に使われている。



図 1.9: TA-LIDAR 外観

1.3.3 Central Laser Facility

Central Laser Facility(CLF)(図 1.10) は、3 箇所 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た装置である。FD 観測中にレーザーを射出し、FD でその大気による側方散乱光を観測することで大気透明度を観測することができる。30 分ごとにレーザー射出を行って大気透明度を測定することができる。また、レーザーを脱偏光状態にし、大気中に鉛直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ることで各 FD の標準光源としての役割も担っている。



図 1.10: CLF の外観

CLF のシステム構成

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 1.1 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．

	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
電力供給部	LP ガス発電機 太陽光発電パネル × 5 バッテリー × 4

表 1.1: CLF システムの構成要素

CLF システムのレーザーは波長 355 nm の水冷式 Nd:YAG レーザーを採用している．レーザー波長を 355 nm とすることで，空気シャワーによる大気蛍光 (300

nm~400 nm) 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 1.11 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、絶対出力と相対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。

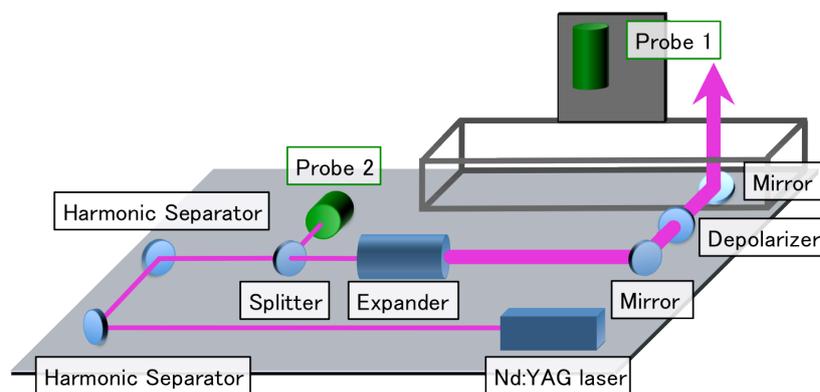


図 1.11: CLF 光学系

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

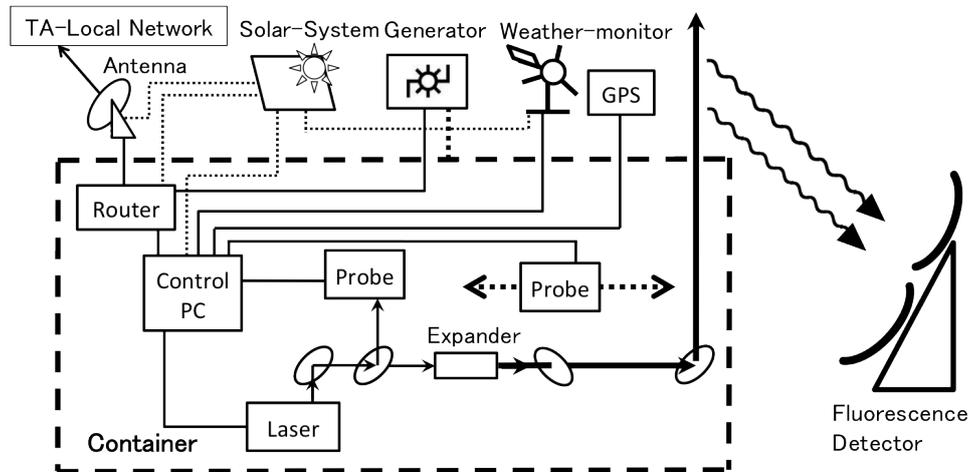


図 1.12: CLF システムにおけるダイアグラム

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 1.12 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。

電力供給部

実験サイトの中央に設置された CLF システムは市街地から離れた環境であり、幹線道路からも離れているため外部からの電力供給は不可能である。そこで、CLF では太陽光発電システムと LP ガス発電機の 2 つの発電方法で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ので、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 1.13 に示す。



図 1.13: CLF の電力供給システム

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 600 W 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 1.2 に示す。LP ガ

表 1.2: 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

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。

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。

CLF レーザーの仕様を表 1.3 に、レーザーの外観を図 1.14 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図 1.15 のように、取り囲む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。

表 1.3: 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



図 1.14: CLF レーザー外観



図 1.15: CLF 光学系用の定盤

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 [4]。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 1.16 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 [4]。



図 1.16: 脱偏光試験装置（左: 制御装置, 右, 偏光プリズム）

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 1.17 に、仕様を表 1.4 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。

表 1.4: エナジーマーター (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

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相対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 1.18 に示す。



図 1.17: エナジーマーター (rm3700)



図 1.18: ステッピングモータ制御変位機

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 1.19 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 5 W 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）が 1 つ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．



図 1.19: CLF 制御用ボードパソコン

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 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。

CLF システムオペレーション

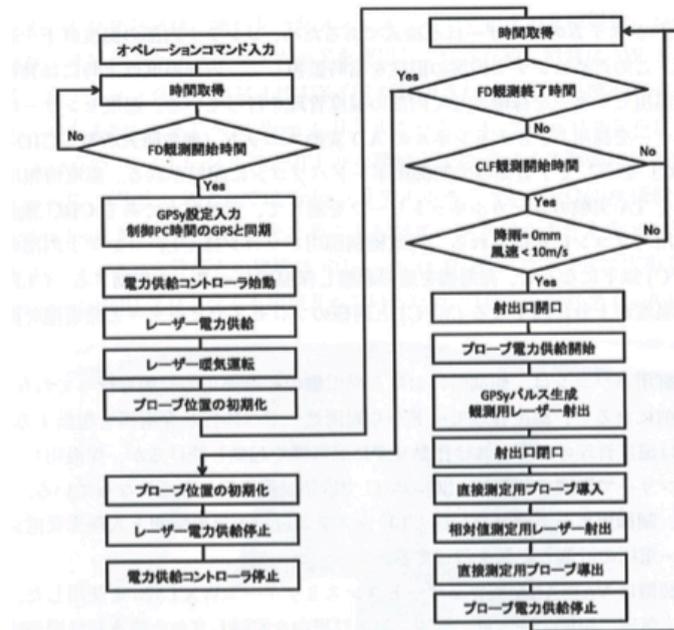


図 1.20: CLF 観測のフローチャート

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 1.20 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 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 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。

レーザーエネルギーのリニアリティー測定

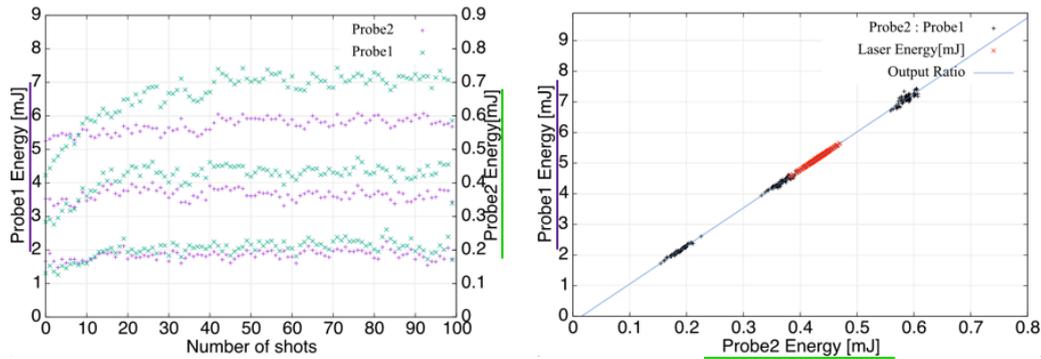


図 1.21: リニアリティー測定 (左) とレーザー出力の決定 (右)

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。光学系は図 1.11 に示してある。リニアリティー測定時に、すぐ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 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リティー測定を図 1.21 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 [4]。

第2章

大気透明度

2.1 大気散乱

空気シャワーの発達過程に発生する大気蛍光は大気中を伝播する際、大気分子やエアロゾル等の散乱体によって減衰する。散乱の仕方は散乱体の大きさによって異なる。大気散乱を理解することは大気透明度を求める、または空気シャワーを解析する上で非常に重要である。

2.1.1 ランバート・ベールの法則

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。

$$dI = -I\sigma N dx \quad (2.1)$$

この両辺を積分すると

$$I \equiv I_0 \exp(-\sigma N x) \quad (2.2)$$

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 $\alpha = -\sigma N$ と定義することで

$$I \equiv I_0 \exp(\alpha x) \quad (2.3)$$

で置き換えたものをランバートベールの法則という。

2.1.2 サイズパラメータ

ここで大気蛍光の割合を考えると，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 ζ を以下のように定義する．

$$\zeta \equiv \frac{\pi}{D} \lambda \quad (2.4)$$

サイズパラメータ ζ 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．

- $\zeta \ll 1$: レイリー (Rayleigh) 散乱
- $\zeta \approx 1$: ミー (Mie) 散乱
- $\zeta \gg 1$: 幾何光学的散乱

2.1.3 Rayleigh 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 0.11~0.12 nm，ファンデルワールス半径は 0.152~0.155 nm であり，大気蛍光 (300~400 nm) やレーザー波長 (355 nm) 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．以下にレイリー散乱の理論値算出に関して説明する [5][6][7]．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場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，

$$\sigma(\lambda) = \frac{24\pi^3 (n^2 - 1)^2}{\lambda^4 N^2 (n^2 - 2)^2} F_k, \quad F_k = \frac{6 + \rho}{6 - 7\rho} \quad (2.5)$$

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 ($P_0 = 1013.25$ hPa)，気温 $+15^\circ\text{C}$ [$T_0 = (15 + 273.15)$ 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

$$PV = nRT, R = 8.31 [\text{JK}^{-1} \text{mol}^{-1}] \quad (2.6)$$

から $N_0 = 2.54 \times 10^{25} \text{ [m}^{-3}\text{]}$ となり，同条件下の波長 λ の光の屈折率は以下の式に近似が可能になる．

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = \frac{5791817}{238.0815 - \left(\frac{1}{\lambda} [\mu\text{m}]\right)^2} + \frac{167909}{57.362 - \left(\frac{1}{\lambda} [\mu\text{m}]\right)^2} \quad (2.7)$$

式 (2.7) に $\lambda = 355 \text{ nm}$ を代入し，この条件下での波長 355 nm の光の屈折率 $n_0 = 1.000286$ が得られる．ここで波長 355 nm 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

$$\sigma = 2.76 \times 10^{-30} \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.8)$$

となる．大気分子密度 N は理想気体の状態方程式 (2.6) より算出可能であるので，

$$\alpha_{\text{Ray}} = N \times 2.76 \times 10^{-30} \text{ [m}^2\text{]}, \quad N = N_0 \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad (2.9)$$

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

$$\frac{\sigma}{\theta} \propto 1 + \cos^2 \theta \quad (2.10)$$

となり，前後方向に対称な散乱になる．図 2.1 にレイリー散乱の微分散乱断面積を示す [4]．

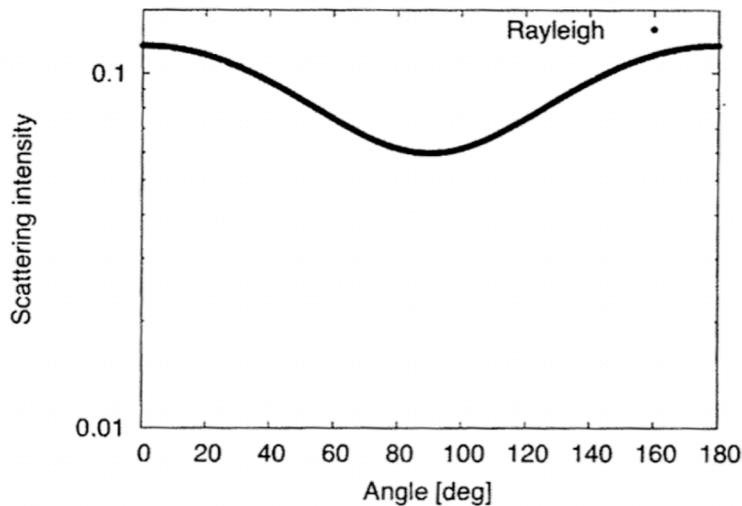


図 2.1: レイリー散乱の散乱強度

2.1.4 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_{AS} 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、乾燥している。また、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% 以内と極めて小さい。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 [4]。

2.2 VAOD

VAOD は Vertical Aerosol Optical Depth の頭文字を取った略称であり、垂直方向の光学的厚さを示すものである。エアロゾルは大気中に存在する砂や塵などの微粒子である。エアロゾルによる透過率を考える際には以下の式を用いる。地上から高度 h までの VAOD を $\tau_{\text{AS}}(h)$ とおくと、 $\tau_{\text{AS}}(h)$ はエアロゾル散乱による消散係数の高度ごとの分布 $\alpha_{\text{AS}}(h)$ を地上から高度 h まで積分することで得られる。

$$\tau_{\text{AS}}(h) = \int_0^h \alpha_{\text{AS}}(h') dh' \quad (2.11)$$

また光学的厚さ τ は以下の式によって透過率 T に変換することができる。

$$T_{\text{AS}} = \exp(-\tau_{\text{AS}}(h)) \quad (2.12)$$

しかしながら CLF を用いて高度ごとの消散係数を求めることは難しいため、以下に記述する方法で VAOD を求めている。

2.3 CLF を用いた VAOD の計算方法

CLF によるエアロゾル大気透明度測定概念図を図 2.2 に示す。CLF から射出されたレーザーの最初の光子数 N_{P_0} は散乱点の高度 H までの伝播過程において、エアロゾルと大気分子による散乱を受けて減衰が起こる。そのため、高度 H におけるレーザーの光子数 N_{P_T} はそれぞれエアロゾルによる光学的厚さ $\tau_{AS}(H)$ と大気分子による光学的厚さ $\tau_{Ray}(H)$ による透過率を考えることで式 2.13 のように求めることができる。

$$N_{P_T}(H) = N_{P_0} \exp[-\tau_{Ray}(H)] \exp[-\tau_{AS}(H)] \quad (2.13)$$

光子が散乱高度 H において散乱した後上空へ通り抜けていく光量 $N_{P_{through}}(H)$ 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、

$$N_{P_{through}}(H) = N_{P_T}(H) \exp[-\tau_{Ray}(\Delta h)] \exp[-\tau_{AS}(\Delta h)] \quad (2.14)$$

となる。よって散乱高度 H における総散乱光量 $N_{P_s}(H)$ は

$$N_{P_s}(H) = N_{P_T}(H) - N_{P_{through}}(H) \quad (2.15)$$

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} として、散乱高度 H から FD までの光学的厚さを τ_{Ray} , τ_{AS} とすると、FD での CLF システムのレーザー光の受光量 $N_P(H)$

$$N_P(H) = N_{P_s}(H) (S_{Ray} + S_{AS}) \exp[-\tau_{Ray}(L)] \exp[-\tau_{AS}(L)] \quad (2.16)$$

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 $\Delta\sigma(90^\circ - \theta)$ の関数であり $S \propto \alpha\Delta h$ の関係がある (α は消散係数)。大気透明度は $T = \exp[-\tau]$ なので式 (2.16) を T を使って表すと、

$$N_P(H) = N_{P_0} T_{Ray}(H) T_{AS}(H) (S_{Ray} + S_{AS}) T_{Ray}(L) T_{AS}(L) \quad (2.17)$$

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）の時の受光量 $N_{P_{ideal}}$ を考える。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、 $T_{AS}(H) = T_{AS}(L) = 1$, $S_{AS} = 0$ であるとみなすことから以下のようになる。

$$N_{P_{ideal}}(H) = N_{P_{0-ideal}} T_{Ray-ideal}(H) S_{Ray-ideal} T_{Ray-ideal}(L) \quad (2.18)$$

ここから式 (2.17) を式 (2.18) 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。

$$\frac{N_P(H)}{N_{P_{ideal}}(H)} = \frac{N_{P_0}}{N_{P_{0-ideal}}} \frac{T_{Ray}(H)}{T_{Ray-ideal}(H)} T_{AS}(H) \left(\frac{S_{Ray} + S_{AS}}{S_{Ray-ideal}} \right) \frac{T_{Ray}(L)}{T_{Ray-ideal}(L)} T_{AS}(L) \quad (2.19)$$

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。

$$\tau(L) = \frac{\tau(H)}{\sin \theta} \quad (2.20)$$

ここから式 (2.19) は次のように表せる。

$$\begin{aligned} \frac{N_P(H)}{N_{P_{ideal}}(H)} &= \frac{N_{P_0}}{N_{P_{0-ideal}}} \exp \left[-\tau_{AS}(H) \frac{\sin \theta + 1}{\sin \theta} \right] \\ &\quad \exp \left[\frac{\sin \theta + 1}{\sin \theta} (-\tau_{Ray}(H) + \tau_{Ray-ideal}(H)) \right] \left(\frac{S_{Ray} + S_{AS}}{S_{Ray-ideal}} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

ここで大気分子の分布が支配的である高度 4.5 km 以上に散乱点高度を取る場合 [4], $S_{AS} = 0$ となるので VAOD : τ_{AS} は式 (2.21) から以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \tau_{AS}(h) &= -\frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} \log \left[\frac{N_P(H) N_{P_{0-ideal}}}{N_{P_{ideal}}(H) N_{P_0}} \right] \\ &\quad + (\tau_{Ray-ideal}(h) - \tau_{Ray}(h)) + \frac{\sin \theta}{\sin \theta + 1} (\alpha_{Ray-ideal}(h) - \alpha_{Ray}(h)) \Delta h \end{aligned} \quad (2.22)$$

N_{P_0} と $N_{P_{0-ideal}}$ 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 [4][8].

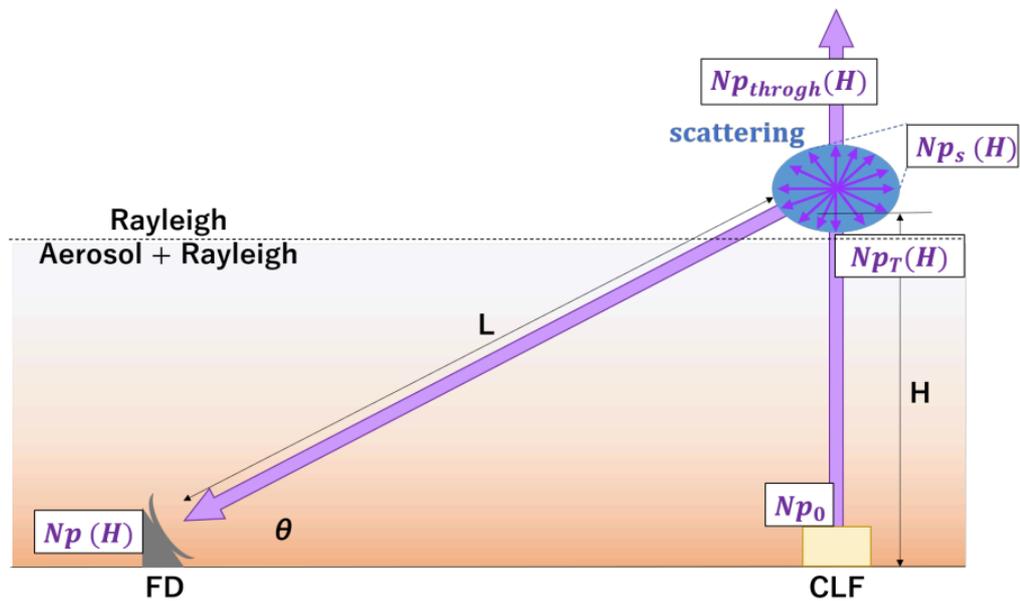


図 2.2: CLF による大気透明度測定概念図: CLF から鉛直方向に打ち上げられたレーザーが高度 H で散乱し, その散乱光が距離 L を通って FD に向かう様子を示している.

2.4 VAOD の分布

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 2.3 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. 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.

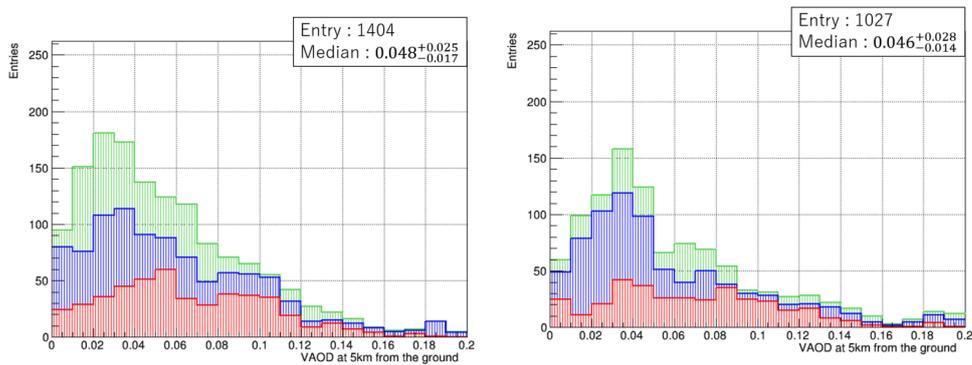


図 2.3: VAOD 分布 (赤 : 2012/01–2012/12, 青 : 2015/09–2016/08, 緑 : 2016/10–2017/09)

左図:BR ステーション 右図 : LR ステーション

2.5 VAOD の季節依存性

CLF による VAOD 算出の結果を季節ごとに分けてみると、変動があることがわかった。そこで各月での VAOD の中央値を代表値とするモデルが作られた。表 2.1 は BR ステーションと LR ステーションでの VAOD の月別の中央値と 1σ の分布幅を記したものであり、各月のデータ数も記している。夏季のデータ数が少なくなっているのは日照時間による観測時間の変動によるものである。また、図 2.4 は BR ステーションと LR ステーション両方での月別中央値と分布幅の結果をプロットしたものである。夏季には VAOD が上昇し、冬季には VAOD が低下する傾向があることがプロットから見てとれる。

CLF システムによる大気観測は CLF, FD の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 の解析を行えない場合がある。このために CLF の観測データから導出した VAOD を用いて、宇宙線イベントと一対一対応したキャリブレーションを行おうとすると全ての FD 観測期間をカバーすることができない。そのために典型値を用いたキャリブレーションが必要となる。現在は年間を通して一定の値 (VAOD=0.04) でキャリブレーションが行われている。そこで表 2.1 と図 2.4 に示した、各月を代表する VAOD の値を用いて空気シャワー解析を行った際の系統誤差の見積もりを行った。以下ではその系統誤差の見積もりの方法及び値についてを述べるとともに、比較のために年間典型値を用いた際の系統誤差についても述べる。

月	VAOD Median BRM			VAOD Median LR		
	透過率	Entries		透過率	Entries	
1	$0.057^{+0.026}_{-0.014}$	73.9 %	135	$0.044^{+0.011}_{-0.012}$	79.1 %	101
2	$0.029^{+0.021}_{-0.008}$	86.0 %	100	$0.036^{+0.028}_{-0.007}$	82.9 %	86
3	$0.025^{+0.012}_{-0.010}$	87.5 %	145	$0.026^{+0.017}_{-0.004}$	87.3 %	91
4	$0.044^{+0.007}_{-0.008}$	79.3 %	123	$0.040^{+0.004}_{-0.009}$	81.1 %	75
5	$0.070^{+0.030}_{-0.017}$	69.1 %	163	$0.074^{+0.028}_{-0.018}$	67.6 %	136
6	$0.067^{+0.016}_{-0.021}$	70.3 %	118	$0.069^{+0.016}_{-0.021}$	69.6 %	100
7	$0.082^{+0.014}_{-0.012}$	64.8 %	82	$0.083^{+0.023}_{-0.011}$	64.5 %	61
8	$0.065^{+0.047}_{-0.008}$	71.0 %	74	$0.071^{+0.074}_{-0.006}$	68.6 %	62
9	$0.074^{+0.042}_{-0.017}$	67.7 %	148	$0.096^{+0.035}_{-0.041}$	60.1 %	104
10	$0.027^{+0.014}_{-0.010}$	86.8 %	261	$0.024^{+0.016}_{-0.008}$	88.0 %	218
11	$0.018^{+0.013}_{-0.008}$	91.1 %	219	$0.021^{+0.011}_{-0.008}$	89.7 %	210
12	$0.022^{+0.011}_{-0.007}$	89.1 %	139	$0.025^{+0.011}_{-0.007}$	87.5 %	83

表 2.1: BR ステーションと LR ステーションでの VAOD の月別中央値と分布幅

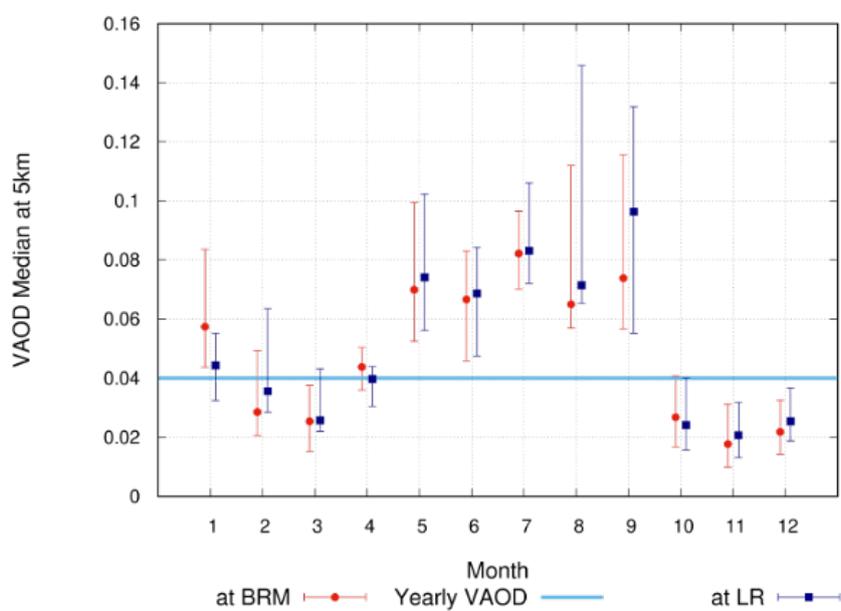


図 2.4: BR ステーションと LR ステーションでの VAOD の月別中央値と分布幅をプロットしたもの。 赤 : BRM 青 : LR

第3章

系統誤差の見積もり

3.1 解析のデザイン・概念

VAOD 典型値を使用した際に生じる系統誤差を用いるために、天頂角や方位角、エネルギーなどの一次宇宙線の情報を与えることのできる TA 実験の FD 観測シミュレーターを用いる。自分でパラメータを設定した一次宇宙線を到来させるとともに、観測サイトの大気の状態を与えたうえで FD の応答をシミュレーションすることができる。また、その FD 応答シミュレーションの情報を用いて一次宇宙線の情報を再構成を行い、一次宇宙線の情報を得る。実際の観測データでは一次宇宙線のパラメータや大気状態の真値を知ることはできず、推定を行うしかない。そのため今回の大気状態による系統誤差を見積もる際には自分でパラメータを与えた宇宙線観測シミュレーションの結果を真値としたうえで、再構成を行うことでその誤差を考える。今回は大気状態（エアロゾルの分布）の変動のみによる系統誤差を見積もるために真値を使って再構成した結果とそれぞれの典型値を使って再構成した結果を比べる。2.4 節で述べた VAOD の分布を FD 観測シミュレーションに与える。これを図 3.1 に示した概念に従って再構成を行った。すなわち 1 つの FD 観測シミュレーションのデータに対して、真値 (①) とそれぞれの典型値 (②, ③) を用いて再構成を行うことでこれらの結果を比較する。

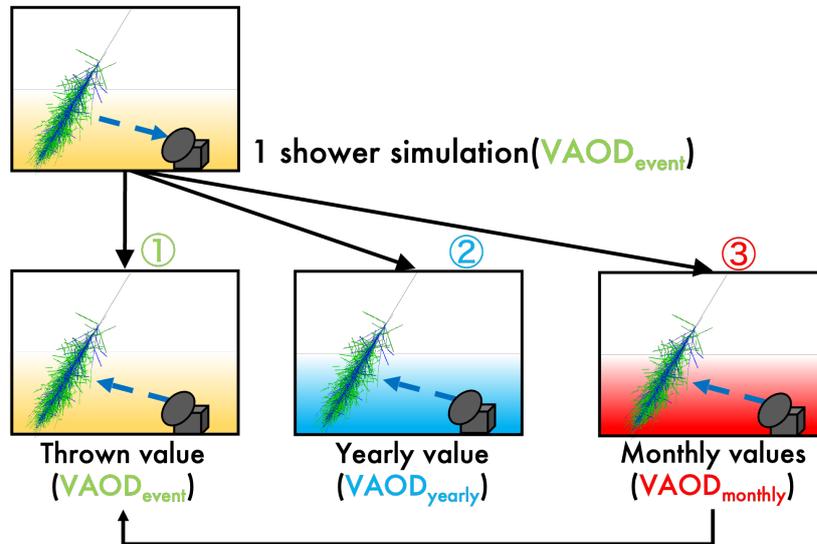


図 3.1: 解析の概念図

3.2 シミュレーション条件

陽子によるシャワー観測シミュレーションは、 10^{18} eV, 10^{19} eV, 10^{20} eV の3つのエネルギーで、表 3.1 に示す条件で生成される。天頂角や方位角に関しては等方的になるようにしているが、コア位置に関してはエネルギーによって見えやすい範囲が変わるのでそれに応じた範囲に設定している。例えば、BR ステーションにおける11月にはVAOD データは135個あるので、シミュレーションは $135 \times 500 = 63500$ 個生成されることになる。

Primary particle	Proton
Interaction model	QGSJETII-04
$\log(E/eV)$	18.0, 19.0, 20.0
Zenith angle	0 - 65°
Azimuth angle	0 - 360°
Core position ($\log(E/eV)=18.0$)	Fan shape centered on BR or LR (17.5km radius)
Core position ($\log(E/eV)=19.0$)	within 25km from CLF
Core position ($\log(E/eV)=20.0$)	within 35km from CLF
Number of events	Number of CLF data per month \times 500

表 3.1: シミュレーションに与える条件

3.3 再構成条件

これらの条件によって生成された1つのシミュレーションデータに対して表 3.2 に示す3つの大気状態で再構成を行う。また、ジオメトリについてはVAODの変動による影響のみを考えるために、シミュレーションの値と同じになるように設定した。

1 : Thrown VAOD (シミュレーションと同じ値)
2 : Yearly VAOD (年間を通して一定の値 : 0.04)
3 : Monthly VAOD (各月における平均的な値)

表 3.2: 1つのシミュレーションに対して再構成を行う3つの大気状態

本解析では、再構成における質を担保するためのクオリティカットを行っている。クオリティカットの条件については表 3.3 に示した。表 3.2 のそれぞれの3つの条件で再構成され、表 3.3 のクオリティカットをクリアしたものを解析に使用している。

Number of PMTs > 10
time extent > 2 μ s
track length > 10°
Xmax が FD の視野内にある
Zenith angle < 55°

表 3.3: 再構成されたイベントに対して行うクオリティカットの条件

3.4 シミュレーションで設定した VAOD と再構成する際の VAOD の値に差がある場合の挙動

ここではシミュレーションで設定した VAOD の値（真値）と再構成した際の VAOD の値に差 (Δ VAOD) があった場合に再構成の結果にどのような違いが出るかについてを述べる。図 3.2 は BR ステーションと LR ステーションのそれぞれでの単眼解析を使用した 10^{19} eV のイベントに対して真値の VAOD を用いたエネルギー再構成の結果を横軸に、縦軸には Monthly VAOD を用いた場合のエネルギー再構成の結果を示しており、各点を Δ VAOD で色付けをしている。図 3.2 を見ると、両ステーションともに VAOD が真値よりも大きい場合にはエネルギーが大きく見積もられており、VAOD が真値よりも小さい場合にはエネルギーが小さく見積もられている傾向があることがわかる。

また図 3.3 には真値の VAOD を用いた Xmax 再構成の結果を横軸に、縦軸には Monthly VAOD を用いた場合の Xmax 再構成の結果を示しており、VAOD の値が真値と異なると Xmax の再構成結果も異なったものになることがわかる。

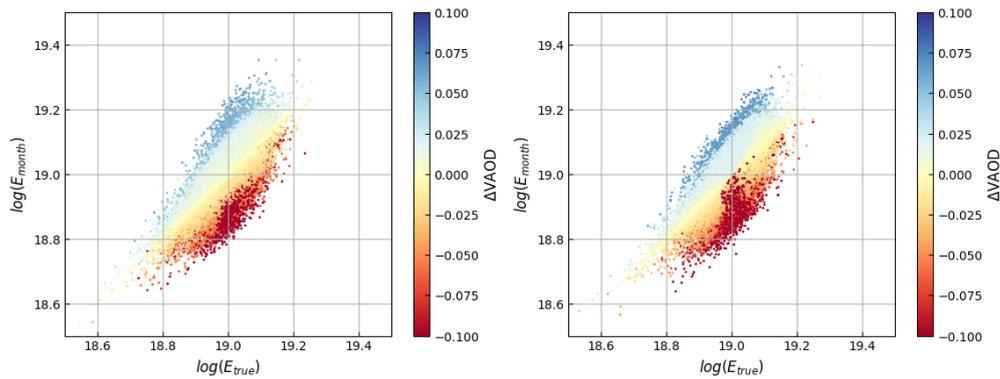


図 3.2: 真値の VAOD で再構成されたエネルギーと月別典型値で再構成されたエネルギーの比較 (Δ VAOD で色付け) 左図: シミュレーションの際のエネルギーが 19 乗で BR ステーションを使用したもの 右図: シミュレーションの際のエネルギーが 19 乗で LR ステーションを使用したもの

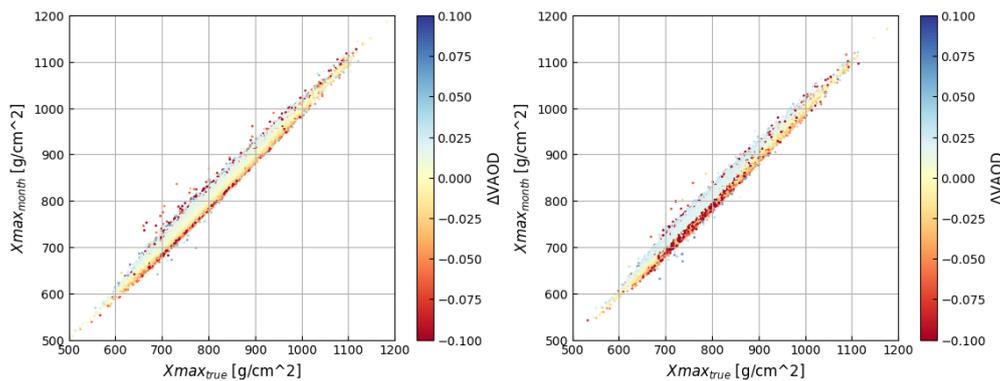


図 3.3: 真値の VAOD で再構成されたエネルギーと月別典型値で再構成された Xmax の比較 (Δ VAOD で色付け) 左図: シミュレーションの際のエネルギーが 19 乗で BR ステーションを使用したもの 右図: シミュレーションの際のエネルギーが 19 乗で LR ステーションを使用したもの

3.5 空気シャワーのコア位置の分布の季節依存性

季節によって（大気状態によって）再構成された空気シャワーのコア位置の分布が異なっていることを示したものを図 3.4 と図 3.5 に示す．これらは 10^{19} eV で生成したシミュレーションを BR ステーションと LR ステーションのそれぞれの単眼解析で再構成することのできた空気シャワーイベントのコア位置の結果であ

る。補助のために扇型を描写しており中心から半径が 5km, 10km, 15km, 20km, 30km になるようにしている。図 3.4 と図 3.5 のそれぞれをみると、7月に比べて11月の空気シャワーイベントは両方のFDステーションから30km程度離れたところで再構成されている数が増えていることがわかる。図 2.4 で示したように11月はエアロゾルの分布量が少ない傾向にある月であり、エアロゾルの分布量が少ないときにはコア位置が離れているイベントが多く再構成されている。これは大気状態によって1つのFDが観測することのできる空気シャワーイベントの範囲が変動することを示している。

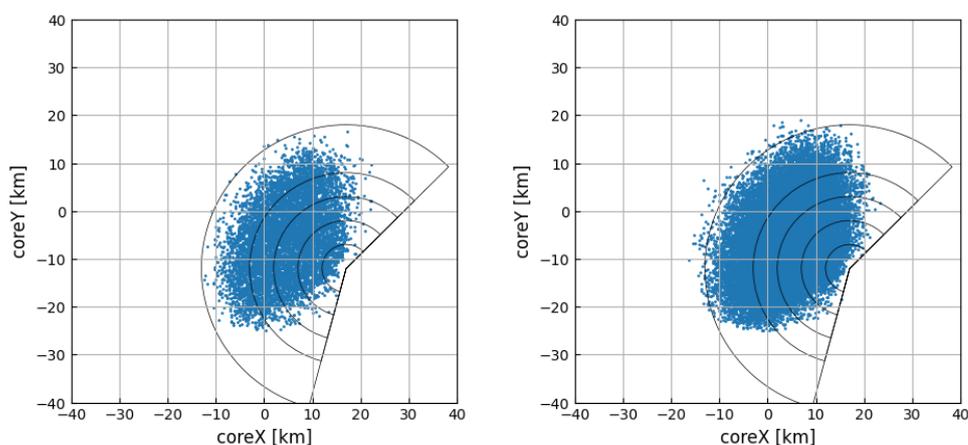


図 3.4: シミュレーションの際のエネルギーが 19 乗で BR ステーションを用いた際の再構成されたコア位置の分布) 左図: 7月 右図: 11月

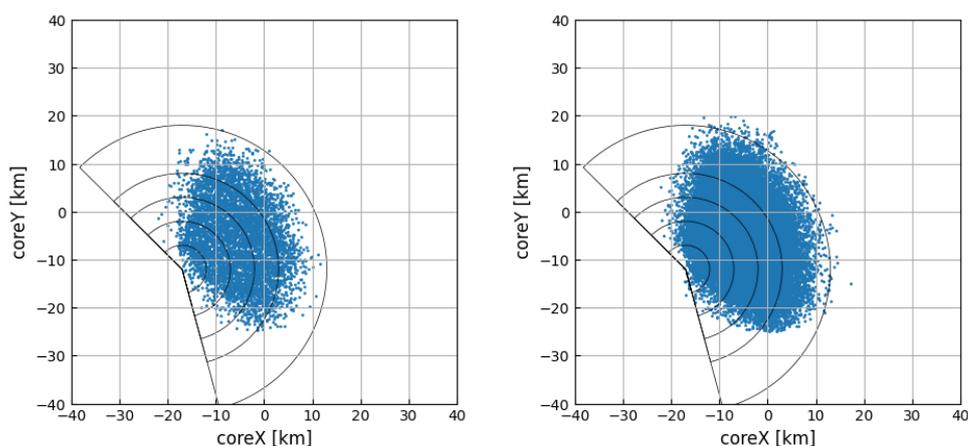


図 3.5: シミュレーションの際のエネルギーが 19 乗で LR ステーションを用いた際の再構成されたコア位置の分布) 左図: 7月 右図: 11月

3.6 エネルギーについての結果

3.6.1 各典型値による再構成結果の違い

シミュレーションで設定したエネルギーが、3つの異なる大気状態で再構成された場合に、エネルギーの結果にどのような影響を与えるかを示したものが、図 3.6 および図 3.7 である。図 3.6 と図 3.7 では、それぞれ異なる月における再構成結果を示しており、シミュレーションで与えたエネルギーとシミュレーションと同じ VAOD の値を使って再構成されたエネルギーとの差分の比を横軸として、縦軸には Yearly VAOD および Monthly VAOD を使って再構成されたエネルギーとの値の差分を取っている。まず、図 3.6 は 7月のデータのみを基にした再構成結果を示しており、ここでは Yearly VAOD を使用した場合にエネルギーが過小評価される方向にバイアスがかかる傾向が見られる。このことから、年間を通しての典型値を使用した再構成は、バイアスを持つ可能性があることがわかる。しかしながら、このバイアスは Monthly VAOD を用いて再構成を行うと解消されており、7月の実際の大気状態に近づけた Monthly VAOD を用いることの有効性が示される。次に、図 3.7 は 11月のデータのみを基にした再構成結果を示す。ここでは Yearly VAOD を使用すると、エネルギーが過大評価される方向にバイアスがかかる様子がみられ、7月とは逆の傾向が見られる。このように、Yearly VAOD を 11月のデータに対して適用した場合には、実際の 11月の大気状態に一致しないことが原因でエネルギー評価にバイアスが生じることがわかる。しかしながら、このバイアスも Monthly VAOD を用いることでほぼ解消され、11月における大気状態を反映した Monthly VAOD を使用することが、再構成の精度向上に貢献していることが確認される。これらの結果から、エネルギーの再構成においては年間を通じた典型的な大気状態の値よりも、月ごとに異なる大気の典型値を用いる方が、より精度の高いエネルギー評価が可能であることが示唆される。

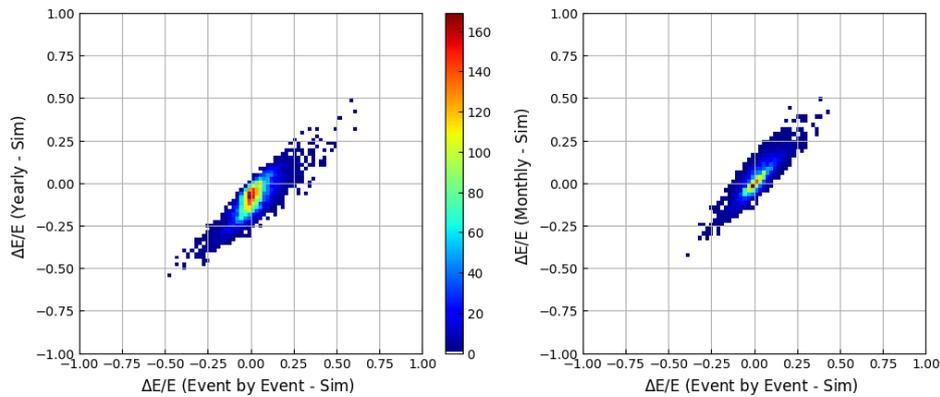


図 3.6: 7月のみのシミュレーションで与えたエネルギー（19 乗）に対して，横軸は真値の VAOD，縦軸は典型値を使って際の再構成されたエネルギーとの差分の比をプロットしたもの．左図：Yearly VAOD 右図：Monthly VAOD

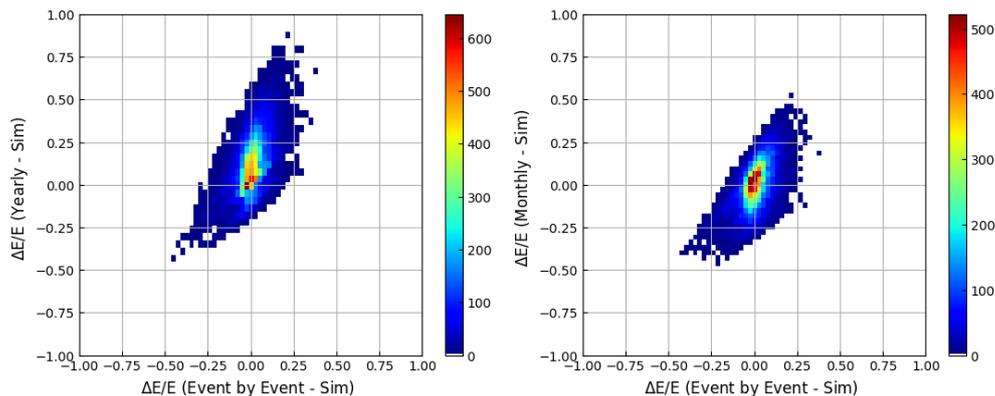


図 3.7: 11月のみのシミュレーションで与えたエネルギー（19 乗）に対して，横軸は真値の VAOD，縦軸は典型値を使って際の再構成されたエネルギーとの差分の比をプロットしたもの．左図：Yearly VAOD 右図：Monthly VAOD

3.6.2 一次宇宙線のエネルギー再構成に対する系統誤差

ここでは，一次宇宙線のエネルギー再構成に対する系統誤差についてを述べる．シミュレーションと同じ VAOD の値で再構成されたエネルギーと各典型値で再構成されたエネルギーとの変化率の分布から系統誤差を求める．系統誤差の評価方法としては，各変化率のヒストグラムの中央値を代表値とし，これを基準として両側での標準偏差を±の誤差範囲として採用している．この中央値を基準とした誤差の評価方法により，誤差の中心値とばらつきが統一的に表現され，以降の全てのヒス

トグラムにおいても同様の手法で系統誤差の評価を行っている。図 3.8 は、7月における BR ステーションでの 10^{19} eV というエネルギーに対して、yearly VAOD と monthly VAOD をそれぞれ使用した場合の系統誤差の評価結果を示している。まず、7月に yearly VAOD を使用した場合の系統誤差は $-9.8_{-6.2}^{+5.0}$ % という結果になった。この結果は、7月において yearly VAOD 値を使用することで、実際のエネルギーが過小評価される方向にバイアスがかかっていることを意味している。このバイアスは、7月のように VAOD が大きくなる傾向のある月において、yearly VAOD が実際の大気条件を十分に反映できていないために発生していると考えられる。次に、monthly VAOD を使用した場合の系統誤差は $0.0_{-3.8}^{+5.4}$ % という結果となり、バイアスが解消され、分布幅が小さくなったことが確認できる。このことは、monthly VAOD を使用することによって、7月の VAOD 値に基づいたより正確なエネルギー評価が可能となり、yearly VAOD を使用した場合に見られたバイアスが解消されることを示す。

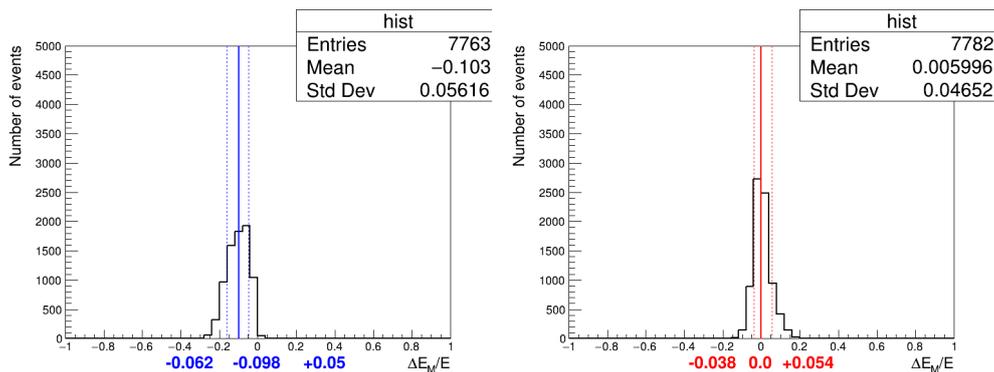


図 3.8: BR ステーションで7月のみの 10^{19} eV の宇宙線イベント
に対する系統誤差 左:yearly VAOD, 右:monthly VAOD

図 3.9 は 11月の BR ステーションにおける 10^{19} eV での yearly VAOD と monthly VAOD を使った際の系統誤差を示している。11月において、yearly VAOD を使用した際の系統誤差は $+10.7_{-11.9}^{+15.8}$ % となった。この結果は 11月において yearly VAOD を使用することで、実際のエネルギーが過大評価される方向にバイアスがかかっていることを意味している。また、monthly VAOD を使った際の系統誤差は $0.0_{-12.1}^{+9.2}$ % となり、バイアスが解消され分布幅が小さくなったことも確認できる。このことから、monthly VAOD を使用することによって 11月の VAOD 値に基づいた正確なエネルギーの評価が可能となり、yearly VAOD を使用した場合に見られたバイアスが解消されることを示す。

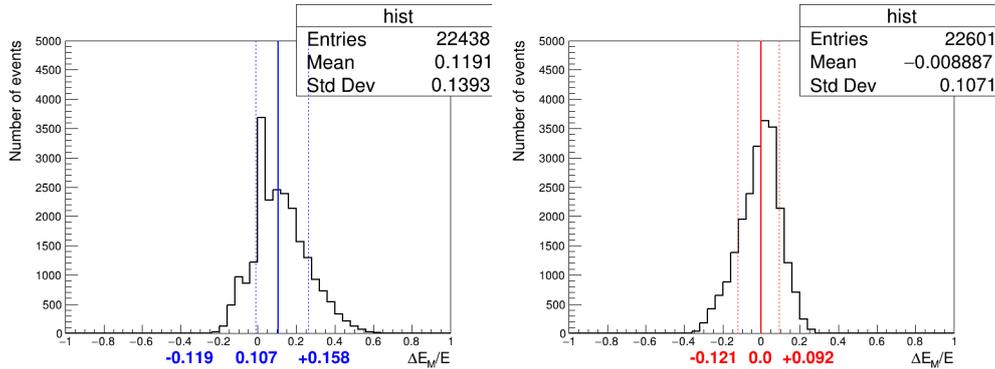


図 3.9: BR ステーションで 11 月のみの 10^{19} eV の宇宙線イベント
に対する系統誤差 左:yearly VAOD, 右:monthly VAOD

図 3.10 は、 10^{19} eV におけるエネルギーの系統誤差について、各月で yearly VAOD と monthly VAOD のそれぞれを用いた場合の結果をプロットしたものである。図 3.11 と図 3.12 は同様に 10^{18} eV と 10^{20} eV における各月での系統誤差をプロットしたものである。この図は、1 年間を通した各月のエネルギー再構成の傾向を示し、月ごとの系統誤差の変化を視覚的に確認できるようにしたものである。yearly VAOD を使用した場合、特に夏場と冬場で顕著なバイアスが観察され、エネルギーの見積りに季節変動が影響を与えることがわかった。具体的には、夏場にはエネルギーが過小評価される方向にバイアスがかかり、逆に冬場にはエネルギーが過大評価される方向にバイアスがかかる傾向が、BR ステーションと LR ステーションの両方で確認された。このようなバイアスが発生する原因として、年間の典型的な大気条件に基づく yearly VAOD が、月ごとの実際の大気条件の変動を十分に反映できていないことが考えられる。一方、monthly VAOD を使用した場合には、各月ごとの実際の大気状態を反映した中央値を用いるため、エネルギー再構成において季節によるバイアスが見られないことが確認された。これにより、monthly VAOD を用いることで年間を通じてエネルギー評価の精度が向上し、エネルギーの過小評価や過大評価といったバイアスが解消されることが示唆される。

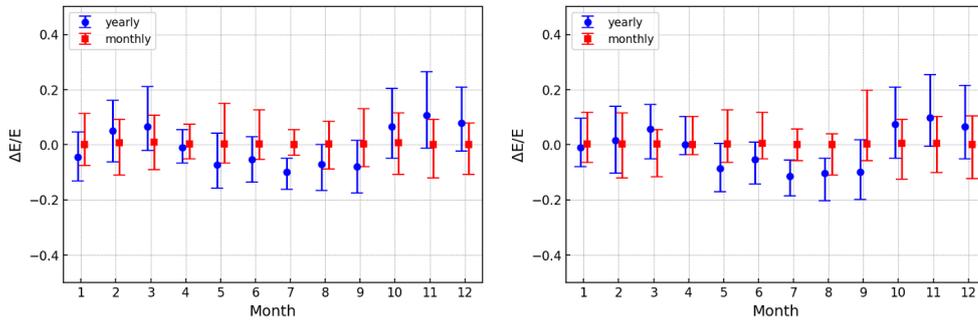


図 3.10: 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する各月でのエネルギー再構成に対する系統誤差 (青 : yearly VAOD, 赤 : monthly VAOD)
左 : BR ステーション, 右:LR ステーション

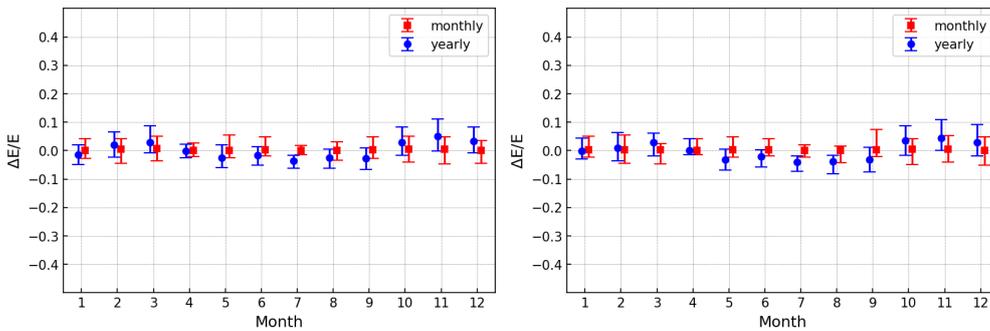


図 3.11: 10^{18} eV の宇宙線イベントに対する各月でのエネルギー再構成に対する系統誤差 (青 : yearly VAOD, 赤 : monthly VAOD)
左 : BR ステーション, 右:LR ステーション

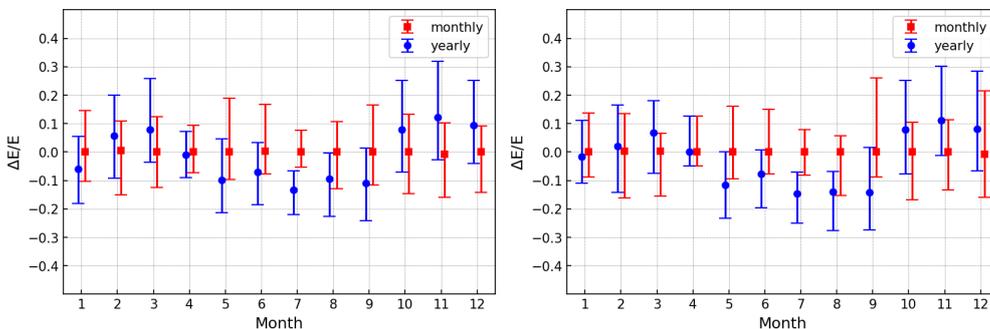


図 3.12: 10^{20} eV の宇宙線イベントに対する各月でのエネルギー再構成に対する系統誤差 (青 : yearly VAOD, 赤 : monthly VAOD)
左 : BR ステーション, 右:LR ステーション

図 3.13, 図 3.16 は全体としての系統誤差を算出するために 1 月から 12 月までの全ての月の結果を足し上げたヒストグラムである. 図 3.13 では BR ステーションでの結果, 図 3.16 では LR ステーションでの結果を示している. BR ステーションでの 10^{19}eV の系統誤差はそれぞれ yearly VAOD を使った場合, $0.0^{+15.4}_{-10.9}\%$, monthly VAOD を使った場合, $0.0^{+10.6}_{-9.3}\%$ となった. 両者ともに年間を通してみると, バイアスは持たないが, 図 3.10 で示したように正方向のバイアスと負方向のバイアスが集まった結果 yearly VAOD の結果はバイアスがなくなっていることに注意する必要がある. また, LR ステーションでの 10^{19}eV の系統誤差はそれぞれ yearly VAOD を使った場合, $0.0^{+14.9}_{-12.2}\%$, monthly VAOD を使った場合, $0.0^{+10.9}_{-9.7}\%$ となった. 両方のステーションにおいて monthly VAOD を使った際の系統誤差はより小さなものとなっており, monthly VAOD を使用する有用性が示されている.

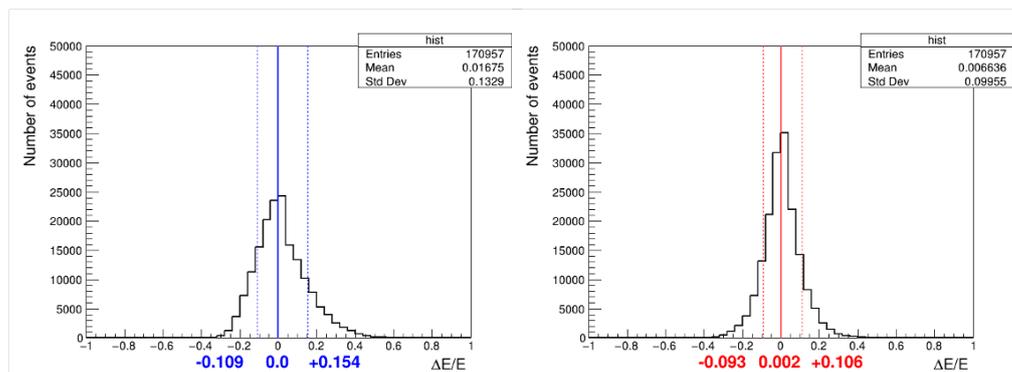


図 3.13: 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する BR ステーションでの
エネルギー再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

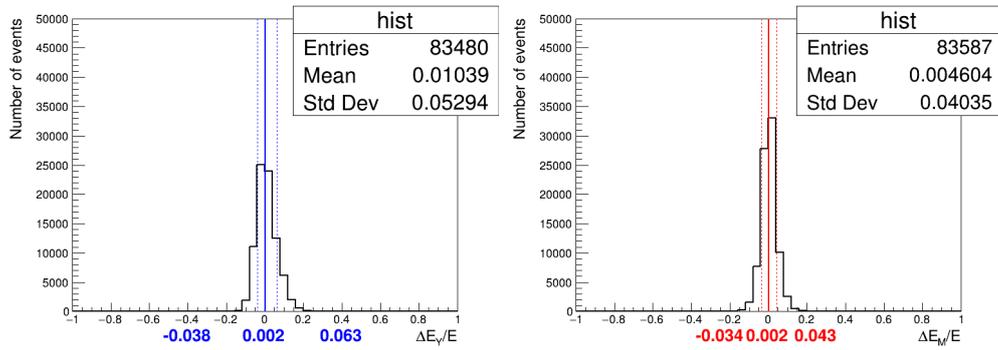


図 3.14: 10^{18} eV の宇宙線イベントに対する BR ステーションでのエネルギー再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

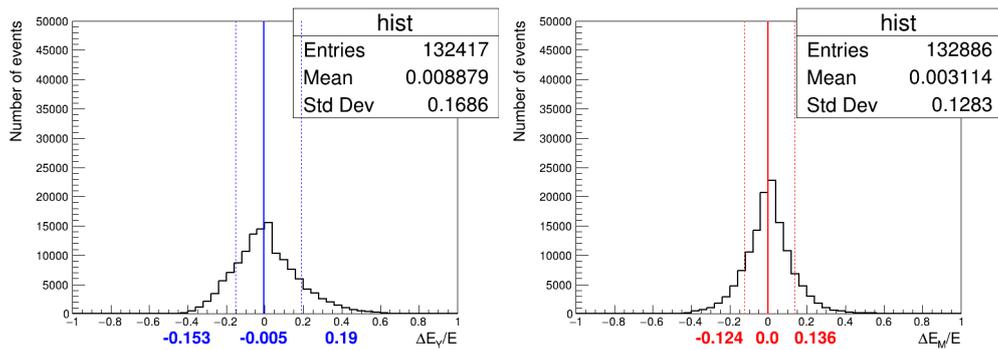


図 3.15: 10^{20} eV の宇宙線イベントに対する BR ステーションでのエネルギー再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

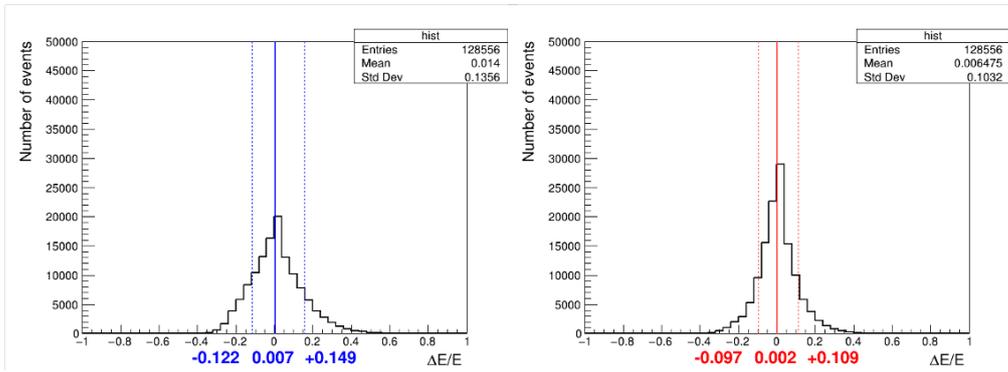


図 3.16: 10¹⁹ eV の宇宙線イベントに対する LR ステーションでのエネルギー再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

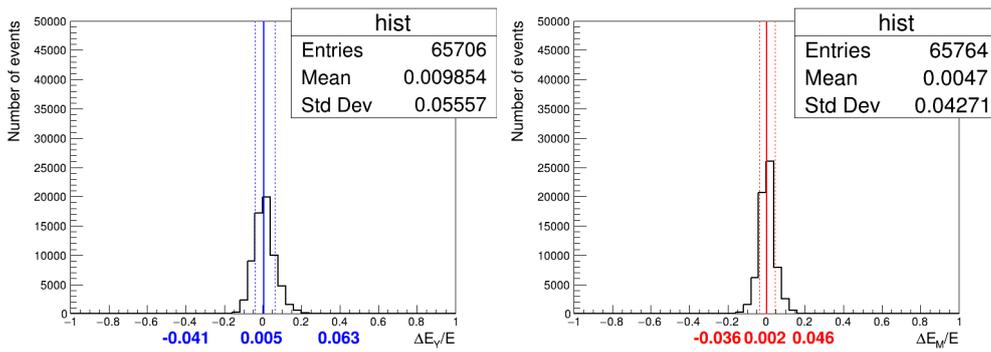


図 3.17: 10¹⁸ eV の宇宙線イベントに対する LR ステーションでのエネルギー再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

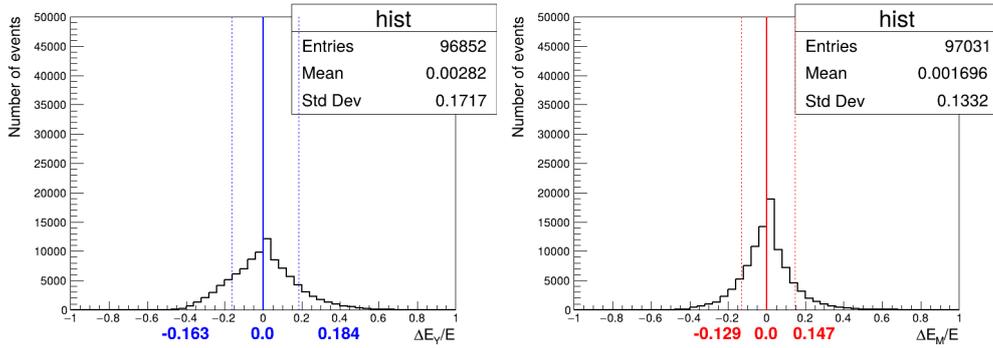


図 3.18: 10^{20} eV の宇宙線イベントに対する LR ステーションでのエネルギー再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

図 3.19 は、複数のエネルギーにおけるエネルギー系統誤差の結果をプロットしたものであり、異なるエネルギー値に対して系統誤差がどのように変化するかを示している。また、表 3.4 はその数値を表にまとめたものである。エネルギーが大きくなるにつれて、系統誤差も比例するように増加していることが確認できる。これは、より高エネルギーになるにつれ、再構成における不確かさや大気状態の影響が増すことを示しており、高エネルギー帯域での系統誤差の評価が重要であることが理解される。また、この傾向は BR ステーションと LR ステーションの両方で同様に確認されており、エネルギーの増加が系統誤差に一貫した影響を及ぼしていることが見て取れる。どのエネルギー帯においても、monthly VAOD を使用した場合の方が、yearly VAOD を使用した場合と比較して系統誤差が小さくなっている。これは、monthly VAOD を用いることで、毎月の実際の大気状態がより正確に反映されるため、エネルギー再構成においてバイアスが減少し、結果として系統誤差が小さくなることを示す。以上からエネルギー再構成における系統誤差の評価において、yearly VAOD ではなく monthly VAOD を使用することで、エネルギーの大小にかかわらずより精度の高い結果が得られることがわかる。

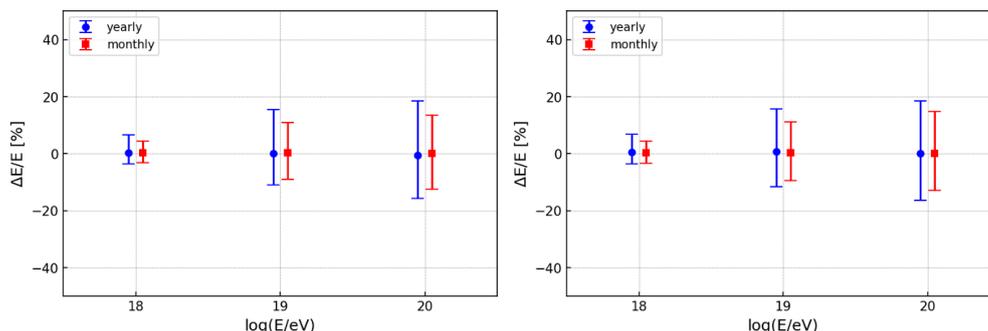


図 3.19: 各エネルギーにおけるエネルギー再構成に対する系統誤差
左:BR ステーション, 右:LR ステーション

	BR ステーション		LR ステーション	
Energy	Yearly	Monthly	Yearly	Monthly
10 ¹⁸ eV	0.0 ^{+6.3} _{-4.2} %	0.0 ^{+4.3} _{-3.8} %	0.0 ^{+6.3} _{-4.8} %	0.0 ^{+4.6} _{-4.0} %
10 ¹⁹ eV	0.0 ^{+15.4} _{-10.9} %	0.2 ^{+10.6} _{-9.3} %	0.0 ^{+14.9} _{-12.2} %	0.2 ^{+10.9} _{-9.7} %
10 ²⁰ eV	0.0 ^{+19.0} _{-14.6} %	0.0 ^{+13.2} _{-12.4} %	0.0 ^{+18.0} _{-16.3} %	0.0 ^{+14.2} _{-12.9} %

表 3.4: 各エネルギーにおけるエネルギー再構成に対する系統誤差の値

3.7 Xmax についての結果

3.7.1 各典型値による再構成結果の違い

シミュレーションで設定した Xmax が、3つの異なる大気状態で再構成された場合に、Xmax の結果にどのような影響を与えるかを示したものが、図 3.20 および図 3.21 である。図 3.20 と図 3.21 では、それぞれ異なる月における再構成結果を示しており、シミュレーションで与えた Xmax とシミュレーションと同じ VAOD で再構成された Xmax との差分を横軸として縦軸にはそれぞれ Yearly VAOD と Monthly VAOD を用いて再構成された Xmax との差分をとったものになっている。図 3.20 は 7 月のみの結果を示している。年間典型値を使った際には Xmax の差分の分布は広がりを見せているが、その広がりには月別典型値を用いると狭まって

いる。図 3.21 は 11 月のみの結果を示している。年間典型値を使った際には X_{\max} の差分の分布は広がりを見せており、少し上方向にバイアスを持っている分布になっている。月別典型値を使った際にはこのバイアスは解消されており、均一な広がりを見せる分布となった。

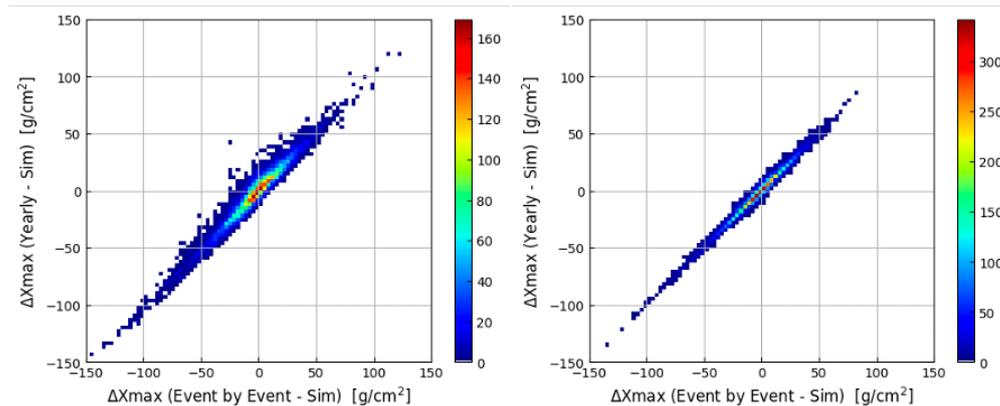


図 3.20: 7 月のみのシミュレーションで与えた X_{\max} (19 乗で生成したもの) に対して、横軸は真値の VAOD、縦軸は典型値を使って際の再構成されたエネルギーとの差分をプロットしたもの。左図: Yearly VAOD 右図: Monthly VAOD

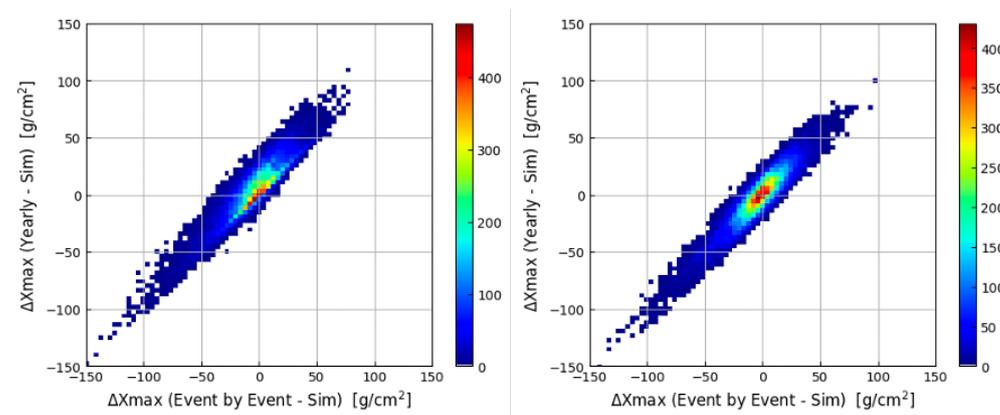


図 3.21: 11 月のみのシミュレーションで与えたエネルギー (19 乗で生成したもの) に対して、横軸は真値の VAOD、縦軸は典型値を使って際の再構成されたエネルギーとの差分をプロットしたもの。左図: Yearly VAOD 右図: Monthly VAOD

3.7.2 Xmax の再構成に対する系統誤差

ここでは Xmax の再構成に対する系統誤差についてを述べる。シミュレーションと同じ VAOD の値で再構成された Xmax と各典型値で再構成された Xmax との差分の分布から系統誤差を求める。エネルギーのときと同様に系統誤差の評価を行う際にはヒストグラムの中央値を代表値とし、中央値を基準とした両側での標準偏差を±の誤差としている。図 3.22 は7月の BR ステーションにおける 10^{19} eV での yearly VAOD と monthly VAOD を使った際の Xmax の系統誤差を示している。7月において yearly VAOD を使用した際の系統誤差は $0.0^{+7.3}_{-4.6}$ g/cm² となる。また monthly VAOD を使った際の系統誤差は $0.0^{+3.2}_{-2.3}$ g/cm² となり、monthly VAOD を使用した際には系統誤差が小さくなることが確認された。また、図 3.23 は11月の BR ステーションにおける 10^{19} eV での yearly VAOD と monthly VAOD を使った際の Xmax の系統誤差を示している。11月において yearly VAOD を使用した際の系統誤差は $7.2^{+12.7}_{-7.4}$ g/cm² となり、7月と比べて正の方向にバイアスを持っている。monthly VAOD を使用した際は $1.0^{+9.2}_{-8.9}$ g/cm² となり、バイアスが解消されていることがわかる。

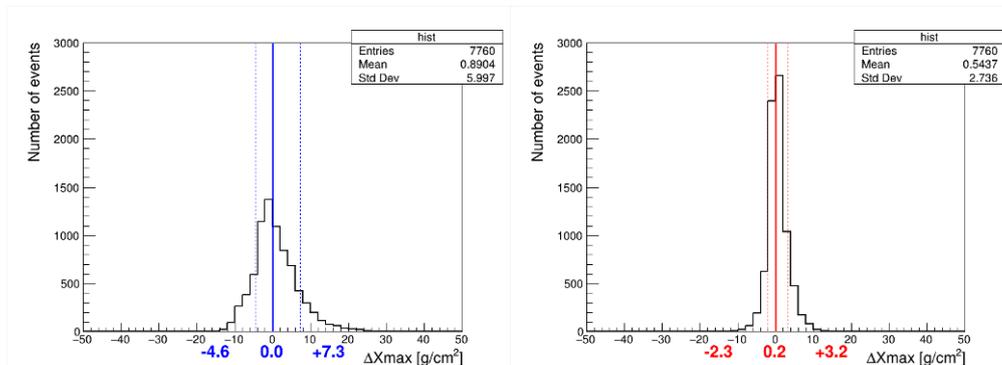


図 3.22: 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する BR ステーションでの Xmax 再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

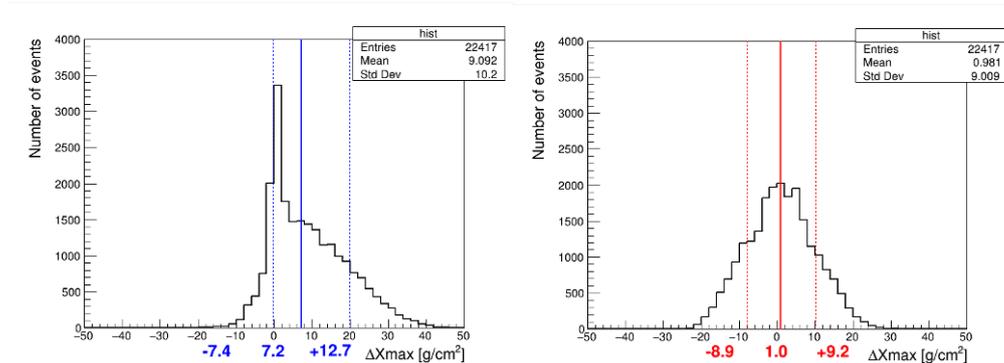


図 3.23: 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する LR ステーションでの Xmax 再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 赤:Monthly VAOD

図 3.24 は 10^{19} eV における, 各月での yearly VAOD と monthly VAOD のそれぞれを使った際の Xmax の系統誤差の結果をプロットしたものである. 同様に図 3.25 と 3.26 は 10^{18} eV と 10^{20} eV における, 各月での Xmax の系統誤差の結果をプロットしたものである. yearly VAOD を使った際に冬場に Xmax が大きく見積もられる傾向が両ステーションで見られる. その一方で,monthly VAOD を使った際には年間を通してバイアスを持たないことが確認できる.

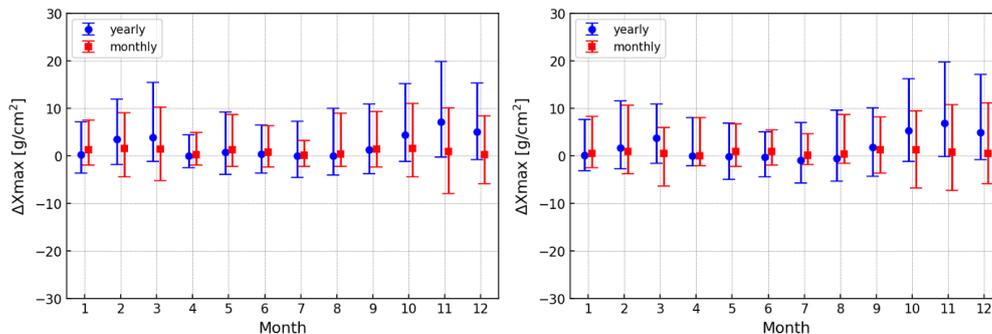


図 3.24: 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する Xmax 再構成に対する 各月での系統誤差
左:BR ステーション, 右:LR ステーション

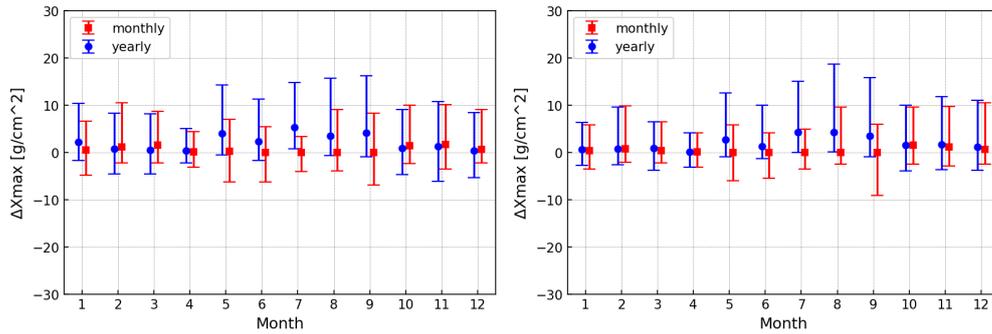


図 3.25: 10^{18} eV の宇宙線イベントに対する Xmax 再構成に対する
各月での系統誤差

左:BR ステーション, 右:LR ステーション

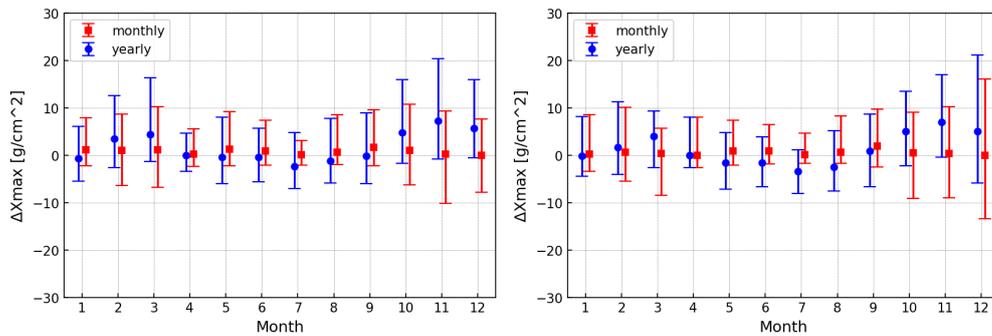


図 3.26: 10^{20} eV の宇宙線イベントに対する Xmax 再構成に対する
各月での系統誤差

左:BR ステーション, 右:LR ステーション

図 3.27, 図 3.28 は全体としての系統誤差を算出するために 1 月から 12 月までの全ての月の結果を足し上げたヒストグラムである。図 3.27 では BR ステーションでの結果, 図 3.28 では LR ステーションでの結果を示している。BR ステーションでの 10^{19} eV での系統誤差はそれぞれ yearly VAOD を使った場合, $2.1^{+11.0}_{-4.7}$ g/cm², monthly VAOD を使った場合, $0.9^{+8.0}_{-5.3}$ g/cm² となった。また, LR ステーションでの 10^{19} eV の系統誤差はそれぞれ yearly VAOD を使った場合, $1.9^{+11.3}_{-4.9}$ g/cm², monthly VAOD を使った場合, $0.7^{+8.1}_{-5.7}$ g/cm² となった。両ステーションで monthly VAOD を使用した際の系統誤差の方が小さくなっていることと, yearly VAOD を使用した際にあった分布の偏りが monthly VAOD の場合には軽減されていることが見える。

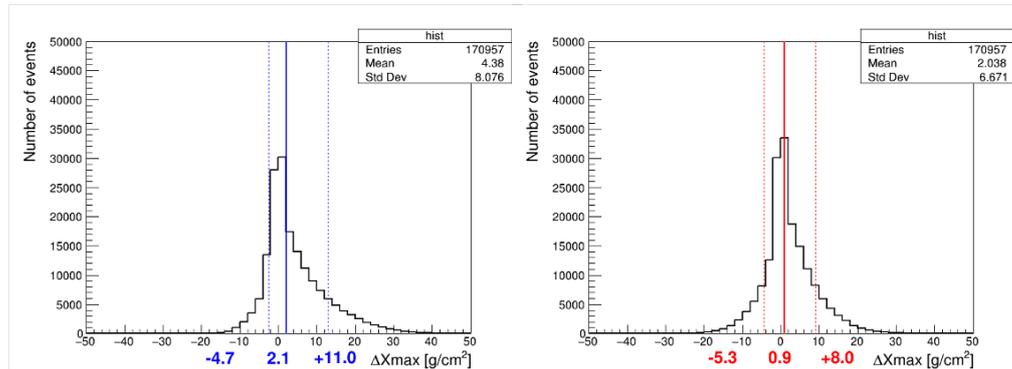


図 3.27: BR ステーションにおける 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する X_{\max} 再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 右:Monthly VAOD

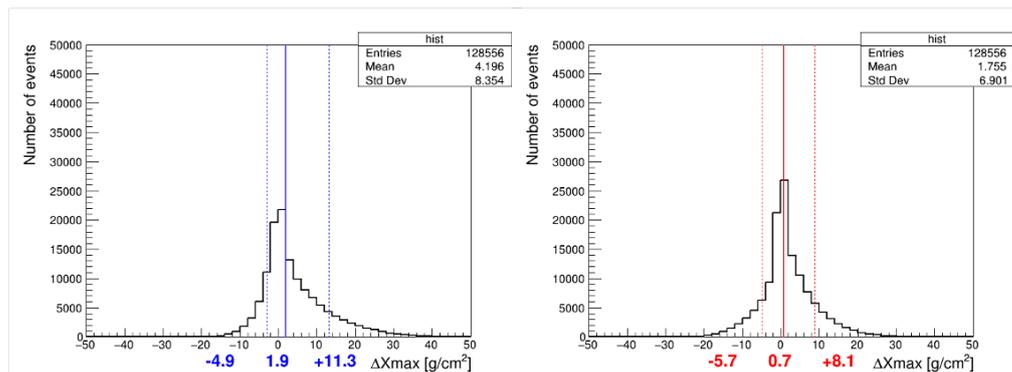


図 3.28: LR ステーションにおける 10^{19} eV の宇宙線イベントに対する X_{\max} 再構成に対する系統誤差
左:Yearly VAOD, 右:Monthly VAOD

図 3.29 では複数のエネルギーにおける X_{\max} の系統誤差の結果をプロットしたものであり、異なるエネルギーに対して X_{\max} の系統誤差がどのように変化するかを示している。また、表 3.5 はその数値を表にまとめたものである。エネルギーのときとは違い、エネルギーが大きくなるにつれて比例するように増加する様子は見られない。どのエネルギー帯でも同様に Yearly VAOD を用いた際には 2 g/cm^2 ほどのバイアスを持っており、Monthly VAOD を使うと約 1 g/cm^2 補正することができている。また分布幅で見ても monthly VAOD を用いた場合に、系統誤差が小さくなっていることがわかる。以上から X_{\max} 再構成に対して yearly VAOD ではなく monthly VAOD を使用することでより精度の高い結果が得られることがわかる。

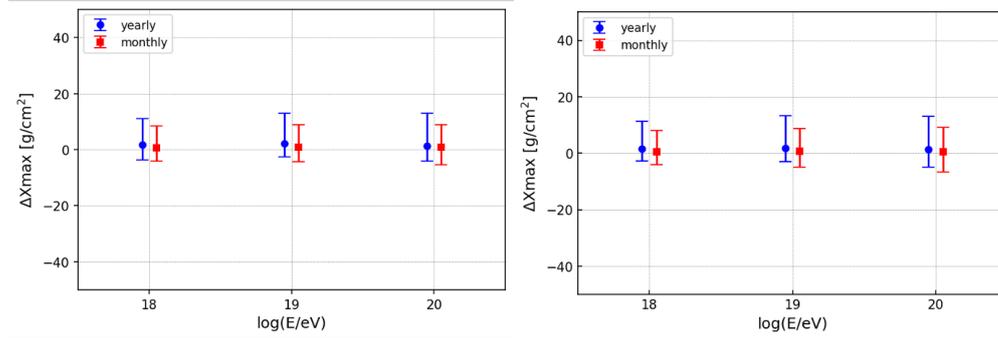


図 3.29: 各エネルギーにおける Xmax 再構成に対する系統誤差
 左:BR ステーション, 右:LR ステーション

Energy	BR ステーション		LR ステーション	
	Yearly	Monthly	Yearly	Monthly
10 ¹⁸ eV	1.7 ^{+9.3} _{-5.4} g/cm ²	0.7 ^{+7.7} _{-4.8} g/cm ²	1.6 ^{+9.7} _{-4.3} g/cm ²	0.5 ^{+7.5} _{-4.5} g/cm ²
10 ¹⁹ eV	2.1 ^{+11.0} _{-4.7} g/cm ²	0.9 ^{+8.0} _{-5.3} g/cm ²	1.9 ^{+11.3} _{-4.9} g/cm ²	0.2 ^{+6.3} _{-3.8} g/cm ²
10 ²⁰ eV	1.4 ^{+11.5} _{-5.5} g/cm ²	0.8 ^{+8.0} _{-6.3} g/cm ²	1.4 ^{+11.7} _{-6.3} g/cm ²	0.7 ^{+8.1} _{-5.7} g/cm ²

表 3.5: 各エネルギーにおける Xmax 再構成に対する系統誤差の値
 左:BR ステーション, 右:LR ステーション

第4章

エネルギー再構成結果と宇宙線パラメータの関係

3章で述べたように大気透明度の変動とエネルギー再構成の結果には大きく季節変動性があることがわかっており、 X_{\max} の再構成にも少なからず影響はあり monthly VAOD を用いるとより精度の高い解析を行うことができることがわかった。これまではシミュレーションで与えられたエネルギーと X_{\max} に対して各種の大気状態で再構成を行った際のエネルギーと X_{\max} がどう変動するののかのみをみてきた。ここでは特に季節依存性をもつエネルギー再構成について詳細にみていく。大気透明度の変動がどういった特徴を持つイベントに対して影響があるのかをみる。特に宇宙線イベントの方位角、天頂角、望遠鏡から空気シャワー軸までの最短距離を示すインパクトパラメーター (R_p) との間に依存性があるかを調査した。大気透明度の変動とエネルギー再構成の結果の2つのパラメーターの間の関係について関数化を行ったものについて述べる。

4.1 方位角との関係

図4.1は monthly VAOD を使用した際の再構成されたイベントの方位角を横軸に、縦軸には対応するイベントのシミュレーションと同じ VAOD の値で再構成されたエネルギーからの変化率 ($\Delta E/E$) をとった2次元ヒストグラムであり、 10^{19} eV のイベントに対して BR ステーションを使用したものである。これは全ての月で再構成されたイベントを描写したものであり、図4.2にはその中でも7月と11月の2つの月だけを抜き出して描写したものである。同様に図4.3と図4.4では 10^{19} eV のイベントに対して LR ステーションを使用して再構成を行った結果につ

いての方位角と $\Delta E/E$ の2次元ヒストグラムである。どちらのFDステーションにおいてもFDのもつ視野方向に対してイベントの集中がみられるが、それ以外の依存性は見られなかった。

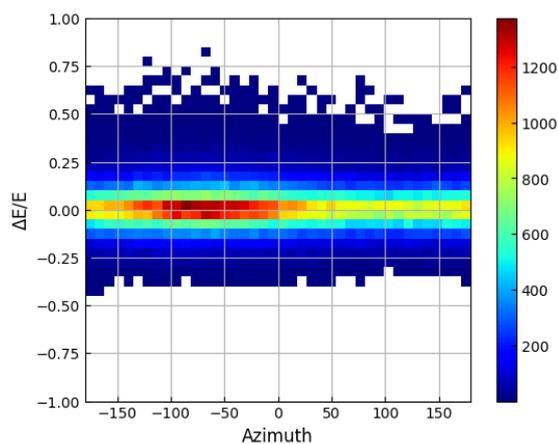


図 4.1: BR ステーションにおける方位角と $\Delta E/E$ の2次元ヒストグラム (monthly VAOD を使ったもの, 全月)

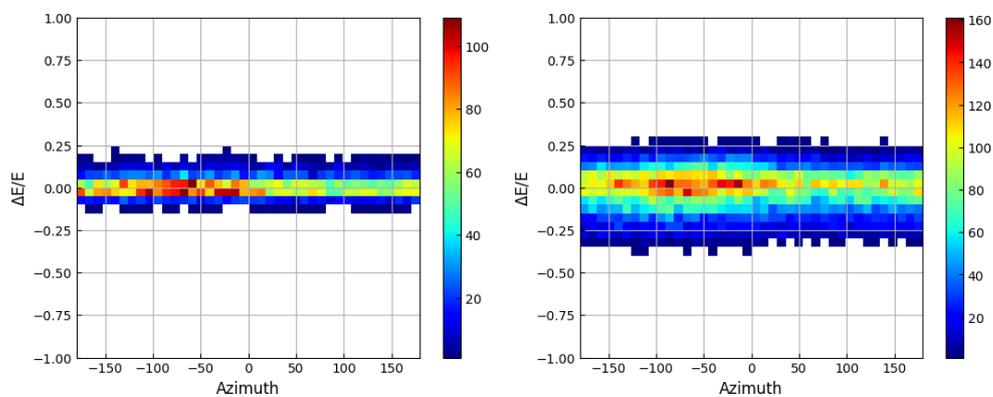


図 4.2: BR ステーションにおける方位角と $\Delta E/E$ の2次元ヒストグラム (monthly VAOD を使ったもの) 左: 7月, 右: 11月

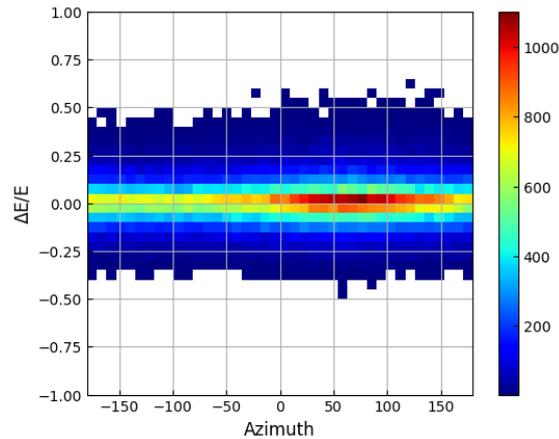


図 4.3: LR ステーションにおける方位角と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの, 全月)

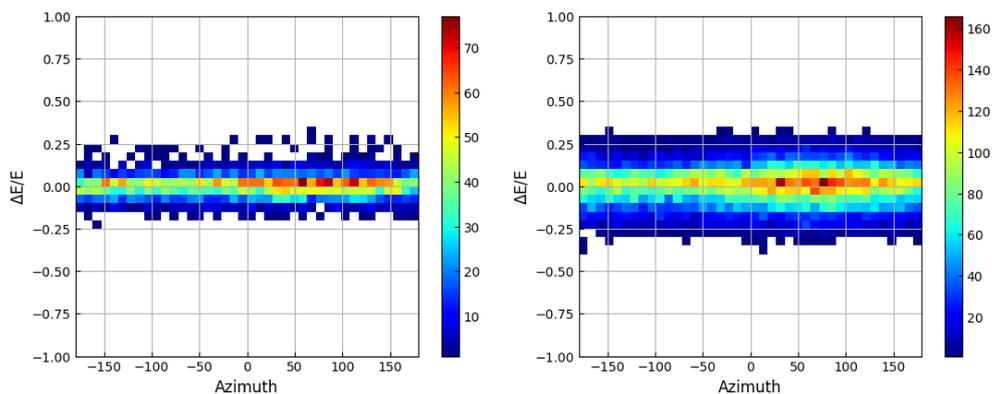


図 4.4: LR ステーションにおける方位角と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの) 左: 7 月, 右: 11 月

4.2 天頂角との関係

図 4.5 は monthly VAOD を使用した際の再構成されたイベントの天頂角を横軸に、縦軸には対応するイベントのシミュレーションと同じ VAOD の値で再構成されたエネルギーからの変化率 ($\Delta E/E$) をとった 2 次元ヒストグラムであり、 10^{19} eV のイベントに対して BR ステーションを使用したものである。これはすべての月で再構成されたイベントを描写したものであり、図 4.6 ではその中でも 7 月と 11 月の 2 つの月だけを抜き出して描写したものである。同様に図 4.7 と図 4.8 では 10^{19} eV のイベントに対して LR ステーションを使用して再構成を行った結果

についての天頂角と $\Delta E/E$ の2次元ヒストグラムである。両ステーションにおいて、天頂角によって $\Delta E/E$ の結果が変化する様子はみられず天頂角に対する依存性はみられなかった。また天頂角が50度を越えたところでクラスターがみられるのは、図4.6や図4.8の右図の11月のような大気透明度が小さいときに天頂角の大きなイベントが多く捉えられていることを示す。

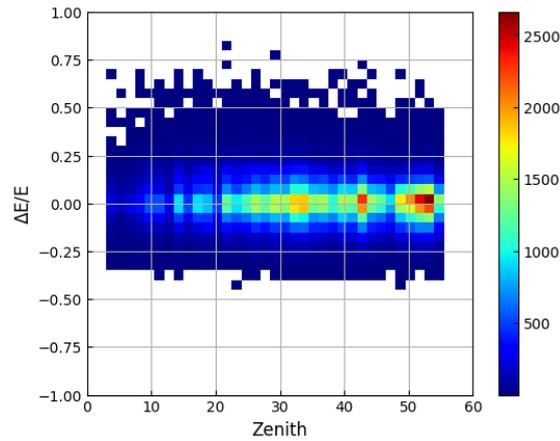


図4.5: BRステーションにおける天頂角と $\Delta E/E$ の2次元ヒストグラム
(monthly VAODを使ったもの、全月)

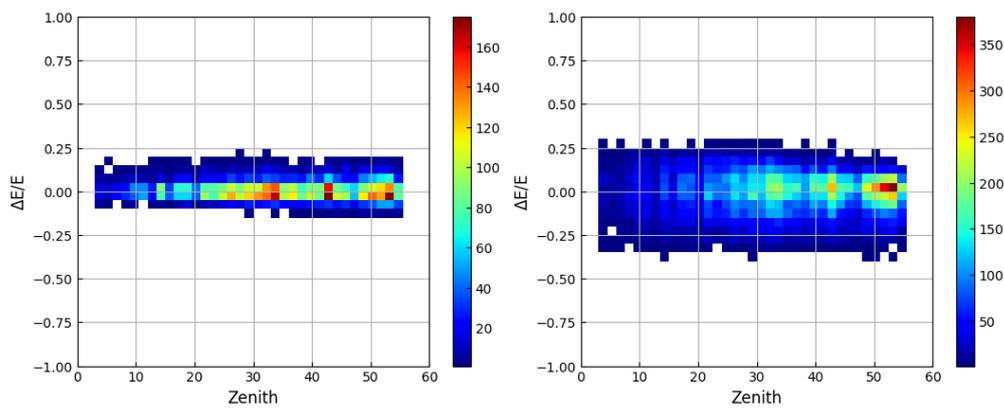


図4.6: BRステーションにおける天頂角と $\Delta E/E$ の2次元ヒストグラム
(monthly VAODを使ったもの) 左:7月, 右:11月

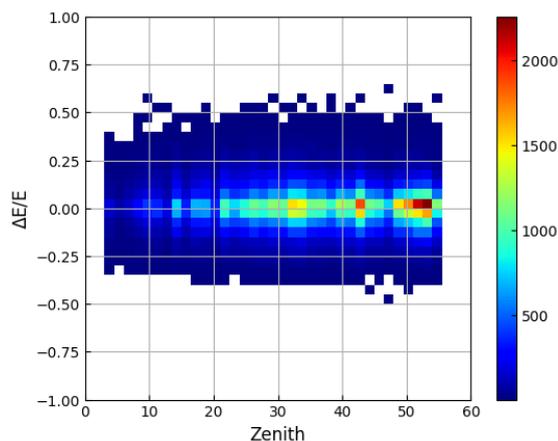


図 4.7: LR ステーションにおける天頂角と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの, 全月)

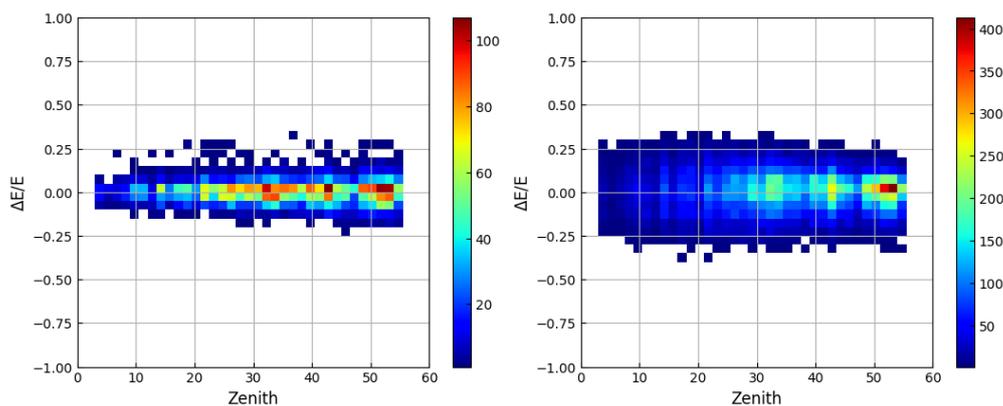


図 4.8: LR ステーションにおける天頂角と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの) 左: 7 月, 右: 11 月

4.3 インパクトパラメーター (R_p) との関係

R_p は FD と空気シャワー軸間の距離を示すパラメーターであり, すなわち R_p が小さいと FD に近いイベント, R_p が大きいと FD から遠いイベントであることを示す. 図 4.9 は monthly VAOD を使用した際の再構成されたイベントの R_p を横軸に, 縦軸には対応するイベントのシミュレーションと同じ VAOD の値で再構成されたエネルギーからの変化率 ($\Delta E/E$) をとった 2 次元ヒストグラムであり, 10^{19} eV のイベントに対して BR ステーションを使用したものである. これはすべ

ての月で再構成されたイベントを描写したものであり、図 4.10 ではその中でも 7 月と 11 月の 2 つの月だけを抜き出して描写したものである。同様に図 4.11 と図 4.12 では 10^{19} eV のイベントに対して LR ステーションを使用して再構成を行った結果についての R_p と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラムである。両ステーションにおいて R_p が大きくなるほど分布が広がっていく様子が見られる。これは距離が遠くなるほど大気透明度による光量に対する補正の程度が大きくなることによる。図 4.10 や図 4.12 のように分けて描写を行うと、7 月（大気透明度が大きい）と 11 月（大気透明度が小さい）の 2 つの月の間で分布の広がり方が異なっている。これは大気の状態によって補正の程度が変化することを示しており、大気透明度が小さいときには観測時と再構成時の間で大気透明度が変わることによる影響が大きいことを示している。

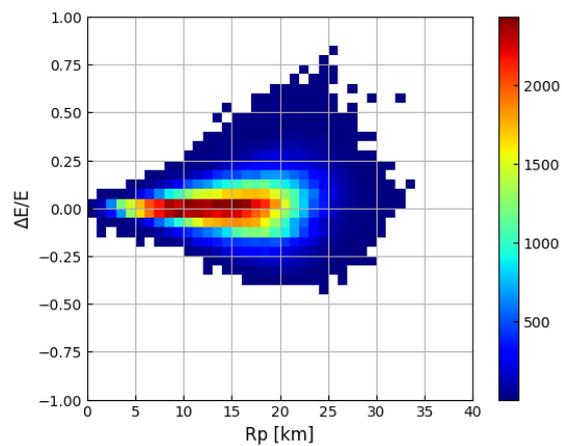


図 4.9: BR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの, 全月)

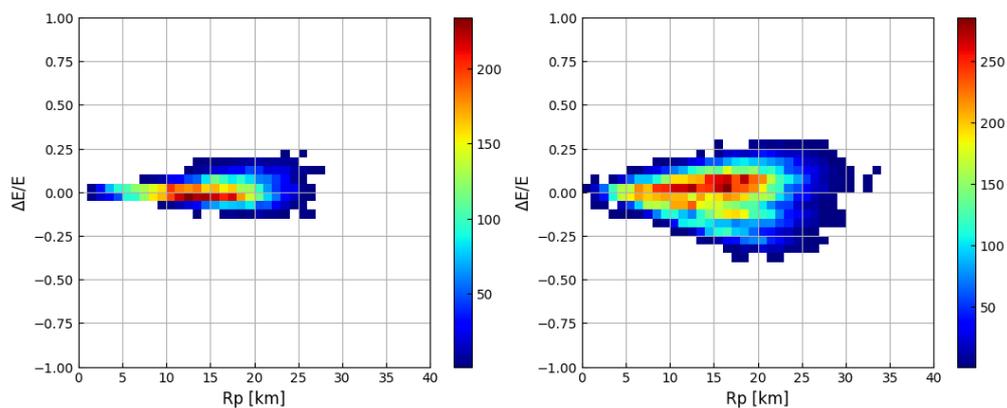


図 4.10: BR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの) 左: 7 月, 右: 11 月

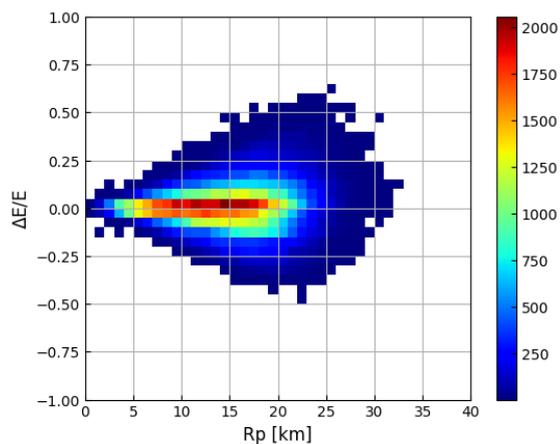


図 4.11: LR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの, 全月)

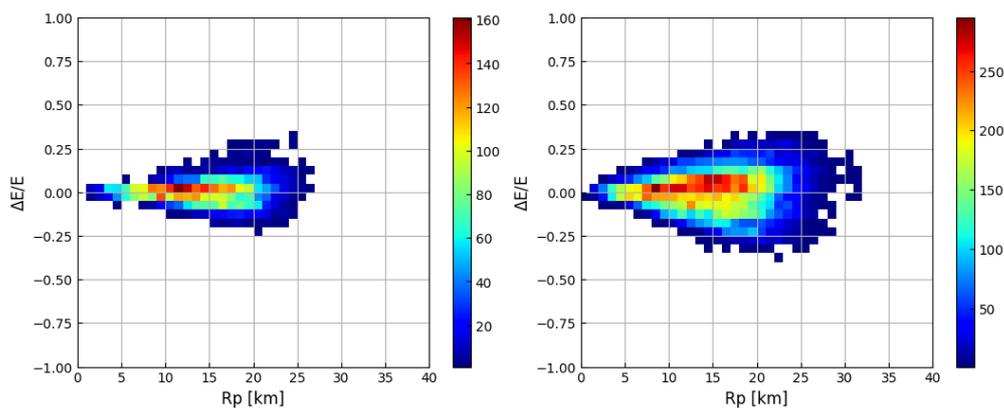


図 4.12: LR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の 2 次元ヒストグラム
(monthly VAOD を使ったもの) 左: 7月, 右: 11月

4.4 VAOD との関係

図 4.9 – 図 4.12 で見られた R_p の値に応じて扇形に広がる分布の形は距離が遠くなるほど光量の補正の程度が大きくなるものによる。すなわち観測時の VAOD の値と再構成時の VAOD の値の差が大きくなるほど補正を行った際の誤差が大きくなることになる。そこで図 4.13 はは monthly VAOD を使用した際の再構成されたイベントの R_p を横軸に、縦軸には対応するイベントのシミュレーションと同じ VAOD の値で再構成されたエネルギーからの変化率 ($\Delta E/E$) をとった散布図

をシミュレーションに与えた VAOD の値と再構成の際の VAOD の値の差分で色付けを行ったものであり、 10^{19} eV のイベントに対して BR ステーションを使用したものである。また図 4.14 はそれぞれ7月と11月の2つの月を抜き出して描写したものである。同様に図 4.15 と 4.16 は 10^{19} eV のイベントに対して LR ステーションを使用したものである。分布は Δ VAOD の値に依存して広がっている様子が見られていて、 Δ VAOD の値が正のとき（再構成時の VAOD のほうが大きい）はエネルギーが大きく見積もられていて、 Δ VAOD の値が負のとき（再構成時の VAOD のほうが小さい）はエネルギーが小さく見積もられている様子がみられており、その程度は R_p の値が大きくなるほど大きくなる。

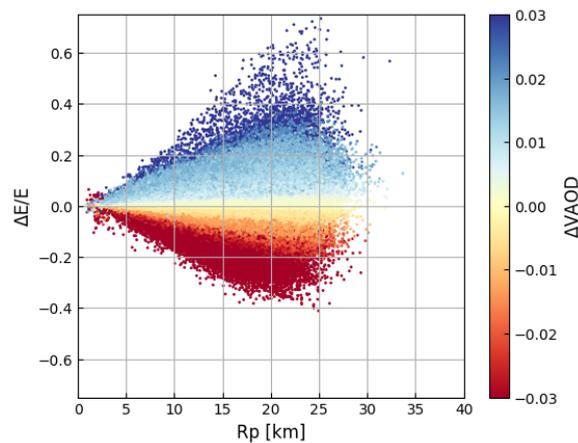


図 4.13: BR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の散布図を Δ VAOD の値で色付けをしたもの (monthly VAOD を使ったもの, 全月)

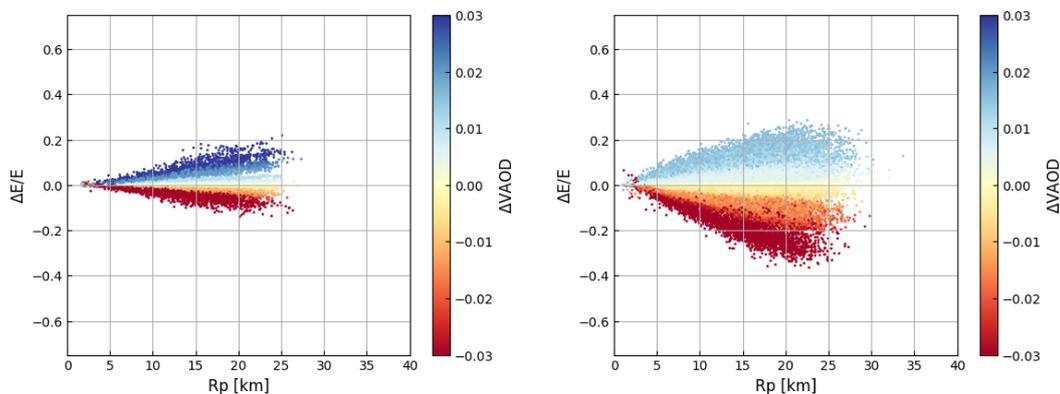


図 4.14: BR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の散布図を $\Delta VAOD$ の値で色付けをしたもの
(monthly VAOD を使ったもの) 左: 7月, 右: 11月

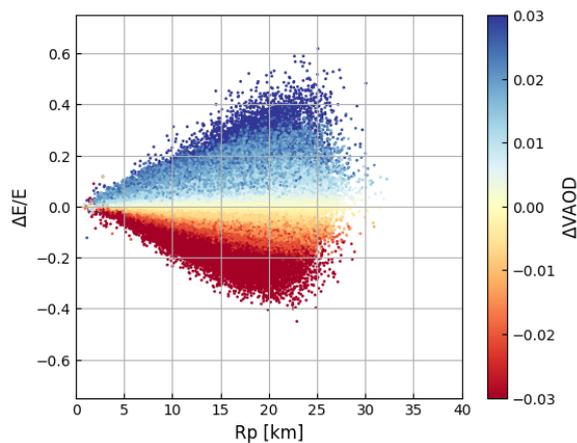


図 4.15: LR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の散布図を $\Delta VAOD$ の値で色付けをしたもの
(monthly VAOD を使ったもの, 全月)

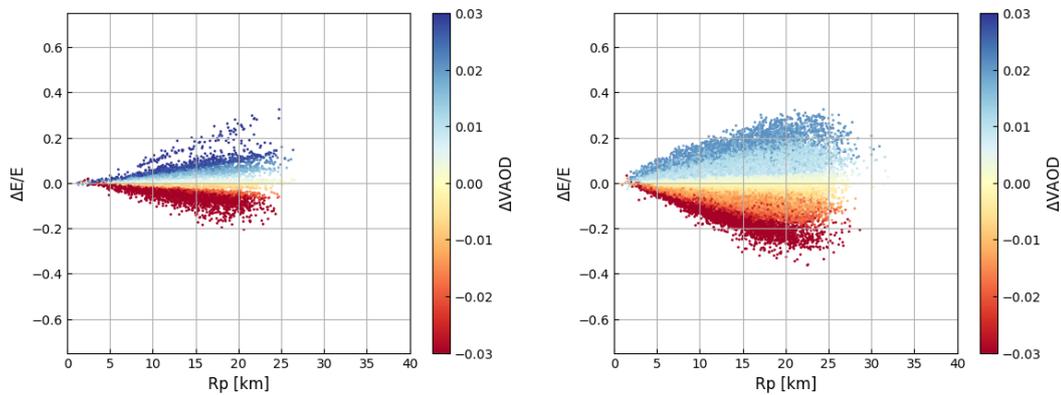
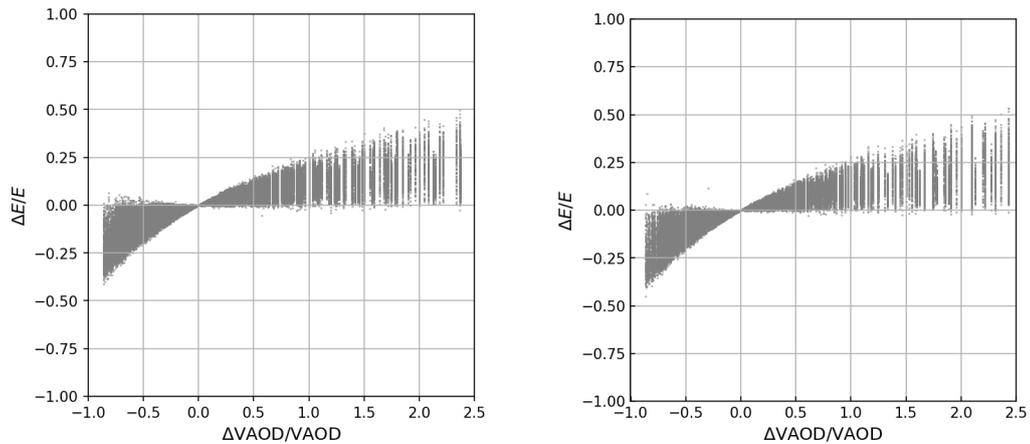


図 4.16: LR ステーションにおける R_p と $\Delta E/E$ の散布図を $\Delta VAOD$ の値で色付けをしたもの
(monthly VAOD を使ったもの) 左: 7 月, 右: 11 月

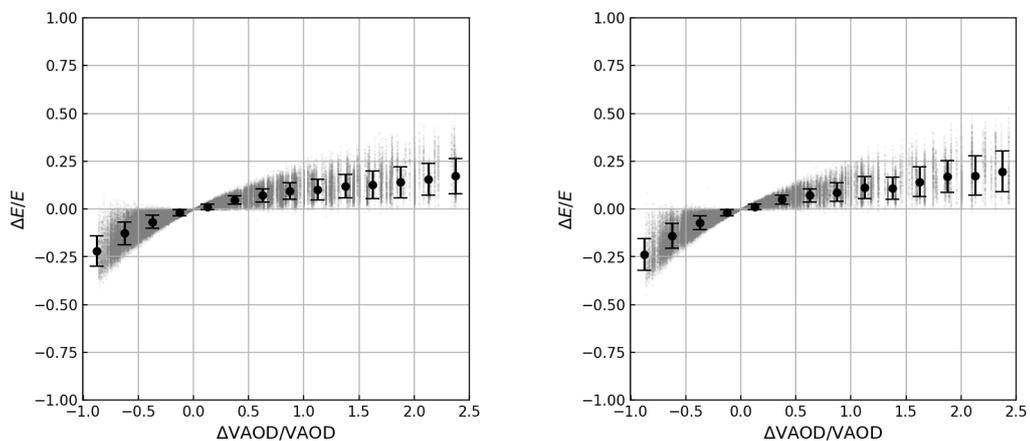
4.5 関数化

4.1 – 4.4 節までの結果から一次宇宙線のエネルギー再構成では今回の解析手法では VAOD の値の変動の影響がほとんどであることがわかった。そこでここでは再構成されたエネルギーの変動と VAOD の値の変動の間の関係をプロットし、関数化を行った。ここまで行ってきたモンテカルロシミュレーションをベースとした解析を行うことなく簡易的に VAOD の変動からエネルギーの不定性を推定することを目的としている。図 4.17 は 10^{19} eV で生成したシミュレーションに対して monthly VAOD を使用して再構成されたイベントに対して、横軸に VAOD の変化率を、縦軸には同じイベントに対してシミュレーション時と同じ VAOD で再構成されたエネルギーとの変化率をとったものである。左側が BR ステーションを使用したもの、右側が LR ステーションを使用したものである。

図 4.17: $\Delta VAOD/VAOD$ と $\Delta E/E$ の間の関係の散布図

左: BR, 右: LR

次に関数化を行うために区間ごとの代表値を求めた。各区間での代表値とそのエラーバーをプロットしたものが図 4.18 である。横軸の範囲 $[-1, 2.5]$ を 15 等分し、各区間での $\Delta E/E$ の値の中央値を求め、標準偏差をエラーバーとしている。

図 4.18: $\Delta VAOD/VAOD$ と $\Delta E/E$ の散布図の各区間での代表値とエラーバーをプロットしたもの

左: BR, 右: LR

図 4.18 をみると各区間の代表値のプロットは一つの曲線の上にあるように見える。そこでフィッティング関数を用意しフィッティングを行った。図 4.19 はフィッティングを行った関数を描画したものである。フィッティングを行う関数は $y = a * \log(x + b)$ と設定した。このフィッティング関数を用いると左側の LR

ステーションを用いたものでは $y = 0.13 * \log(x + 1.0)$, 右側の BR ステーションを用いたものでは $y = 0.14 * \log(x + 1.0)$ と得られた. これらの関数を用いると, VAOD の値のズレからエネルギーの再構成にどのくらい影響があるかを推測することができることを示唆している.

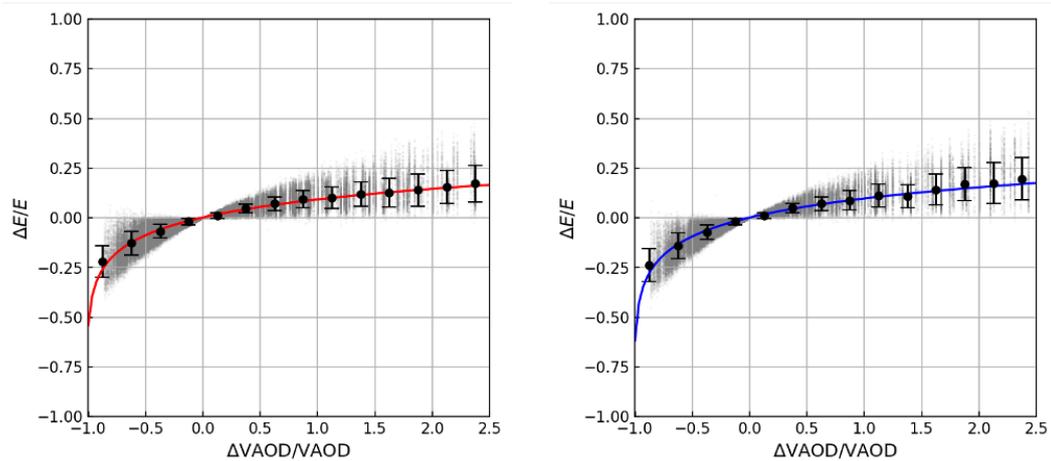


図 4.19: $\Delta VAOD/VAOD$ と $\Delta E/E$ の間をフィッティングして関数化を行ったもの 左: BR, 右: LR

第5章

結論

FD を用いた宇宙線観測において大気較正を行うためのエアロゾルによる大気透明度としての VAOD の値を従来の年間を通して一定の値を用いた解析と比較して VAOD の季節依存性を反映した月ごとの代表値を用いた解析を行うことでそれぞれの場合で空気シャワー解析へ与える系統誤差の評価を行った。

その結果、 10^{19} eV での陽子による空気シャワーに対する BR ステーションを用いた再構成への系統誤差は以下ようになった。

- Yearly VAOD を使った場合
 - エネルギー： $0.0^{+15.4}_{-10.9}$ %
 - Xmax： $2.1^{+11.0}_{-4.7}$ g/cm²
- Monthly VAOD を使った場合
 - エネルギー： $0.2^{+10.6}_{-9.3}$ %
 - Xmax： $0.9^{+8.0}_{-5.3}$ g/cm²

エネルギーと Xmax の両方で、monthly VAOD を使用した際の系統誤差のほうが小さくなるという結果が得られた。

また、monthly VAOD を使用した解析データを使用して、VAOD の不定性とエネルギーの不定性との関係の関数化を行った。その結果 $y = 0.13 * \log(x + 1.0)$ という関数が得られ、VAOD の不定性がわかればエネルギーの不定性を推定する事ができる可能性を示した。

今後は、まだ VAOD の解析が行われていない MD ステーションでの VAOD 解析が待たれるとともに、一次宇宙線のエネルギースペクトルへの影響の調査を行う。

参考文献

- [1] Kenneth Greisen. End to the cosmic-ray spectrum? *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 16, pp. 748–750, Apr 1966.
- [2] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min. Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, Vol. 4, p. 78, August 1966.
- [3] Yuichiro Tameda, et al. Trigger electronics of the new fluorescence detectors of the telescope array experiment. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 609, No. 2, pp. 227–234, 2009.
- [4] 孝幸富田. 宇宙線望遠鏡計画における大気透明度の研究. PhD thesis, 山梨大学, 2012.
- [5] Anthony Bucholtz. Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Appl. Opt.*, Vol. 34, No. 15, pp. 2765–2773, May 1995.
- [6] Hans Naus and Wim Ubachs. Experimental verification of rayleigh scattering cross sections. *Opt. Lett.*, Vol. 25, No. 5, pp. 347–349, Mar 2000.
- [7] Maarten Snee and Wim Ubachs. Direct measurement of the Rayleigh scattering cross section in various gases. *jqsrt*, Vol. 92, No. 3, pp. 293–310, May 2005.
- [8] 智行中村. 修士論文, 信州大学, 2022.

謝辞

本研究にあたり，数多くの助言，ご指導，発表をする機会を頂きました．信州大学学術研究院の富田孝幸助教に深く感謝いたします．

大気会議の場での本研究に対してのご指摘，資料の訂正など大変助けていただきました中部大学の山崎勝也准教授に深く感謝いたします．

友人であり研究の先輩である大阪公立大学の Fraser William Bradfield 氏には研究の議論を行うとともに，学会や出張の際には楽しい時を過ごしました．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 コラボレーターの皆様には深く感謝いたします．特に同期である東京大学宇宙線研究所の小山千里氏，大阪公立大学の河内祐輔氏，中原美紅氏，大阪電気通信大学の楠森優貴氏，小森康平氏とは切磋琢磨するとともに楽しいときを過ごしました．

研究室の同期である佐藤大輝氏とは研究についてのみならず，たくさんのお話を語り合いました．氏のおかげで3年間の研究室生活を送ることができました，深く感謝いたします．

研究室の後輩である小松晃一氏，小磯光氏，黒岩美羽氏，中山翼氏，松澤碧氏，斎藤温氏，服部拓彦氏，高山太志氏，高原直希氏は毎日での研究生活の支えとなりました．深く感謝いたします．

最後に，家族や友人の支えなくこの3年間は成り立ちませんでした，深く感謝いたします．