令和6年度修士論文

TA 実験大気蛍光望遠鏡の光学特 性較正と宇宙線解析におけるそ の影響



提出者

信州大学 大学院 総合理工学研究科 工学専攻 電子情報システムユニット

佐藤 大輝

2024年12月2日提出

序論

宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線のことを宇宙線と呼ぶ。その中でも特 に 10¹⁸eV 以上のエネルギーを持つ宇宙線のことを超高エネルギー宇宙線と呼ぶ。 超高エネルギー宇宙線の起源や加速機構、化学組成は解明されておらず、様々な研 究が行なわれている。超高エネルギー宇宙線の起源天体や加速機構を特製するため に重要な要素である一次宇宙線の化学組成は、直接計測が困難なため、大気との相 互作用で生じる空気シャワーの最大発達の大気深さを計測することで化学組成の推 定を行う。

Telescope Array(TA)実験では、地表に到達した粒子を検出する地表検出機 (SD)と宇宙線空気シャワーから発する大気蛍光を観測する大気蛍光望遠鏡 (FD) の2種類の検出機で観測を行っている。FDを用いた精密な化学組成の推定やエネ ルギーの決定は、望遠鏡や大気の較正を正確に行う必要がある。また、超高エネル ギー宇宙線は到来頻度が低いため統計量が小さく、実験当初よりも要求される決定 精度が1桁ほど小さくなったため、化学組成の推定やエネルギー決定をより精度良 く行う必要となった。そこで、大気蛍光望遠鏡の光学特性の新たな較正として、ド ローンに光源と即位用 GPS である RTK-GPS を搭載した"Opt-copter"が開発さ れた。この装置によって望遠鏡の視野方向が決定精度±0.03°で解析できるように なった。これは従来の視野方向解析手法より決定精度は1桁良い。

本研究では、より高精度に解析された望遠鏡視野方向を宇宙線解析に適用した際 の影響を見積もる。解析は現行用いている星解析による視野方向から新たに用いる Opt-copter 解析での視野方向に変更させた際の影響、視野方向を更新した際の宇 宙線解析のバイアス、視野方向の不定性 (±0.03°) が与える宇宙線解析の不定性を 評価する。

目次

第1章	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	宇宙線の質量組成	2
1.4	宇宙線観測と空気シャワー..................	3
第2章	Telesope Array 実験	4
2.1	大気蛍光望遠鏡 (FD)	4
	2.1.1 光学系	5
	2.1.2 PMT カメラ	6
	2.1.3 データ収集システム	6
2.2	望遠鏡の較正.........................	9
	2.2.1 鏡の反射率	9
	2.2.2 UV 透過フィルター	10
	2.2.3 CRAYS	10
	2.2.4 YAP	11
	2.2.5 Xe-フラッシャー	12
	2.2.6 XY-スキャナー	13
	2.2.7 星解析	14
	2.2.8 TA-LIDAR	16
	2.2.9 CLF	17
	2.2.10 WEAT code	17
	2.2.11 ELS	17
2.3	地表検出器 (SD)	19
第3章	TA 実験標準のシミュレーションとイベント再構成ソフトウェア	20

3.1	空気シャワー生成シミュレーション	20
	3.1.1 縦方向発達曲線の決定	21
	3.1.2 大気蛍光発光	22
	3.1.3 チェレンコフ光	23
	3.1.4 散乱チェレンコフ光	23
3.2	検出器シミュレーション	24
3.3	イベント再構成ソフトウェア	27
	3.3.1 解析に使用する PMT の選別	27
	3.3.2 空気シャワー到来方向の再構成	33
	3.3.3 縦方向発達再構成 - 逆モンテカルロ法	36
第4章	Opt-copter	40
4.1	Opt-copter 構成	41
	4.1.1 UAV Unmanned Aerial Vehicle	41
	4.1.2 光源	41
	4.1.3 即位用 RTK-GPS モジュール	43
4.2	TA 実験サイトでの Opt-copter 観測	44
	4.2.1 試験概要	44
	4.2.2 光源位置	46
	4.2.3 受光重心位置	46
4.3	望遠鏡視野方向解析	48
	4.3.1 FD の総受光量から得た PMT の輪郭探索による視野方向	
	解析	48
	4.3.2 補完なしでの FD の総受光量から得た PMT の輪郭探索に	
	よる視野方向解析	52
	4.3.3 FD の受光量重心と光源位置による視野方向解析	54
第5章	mono 解析による視野方向影響解析	59
5.1	解析ソフトウェアでの視野方向	59
5.2	mono 解析による視野方向影響評価	62
	5.2.1 影響解析手法	62
	5.2.2 影響解析結果	64
第6章	hybrid 解析における視野方向影響解析	76
6.1	影響解析	76

	6.1.1 解析手法	77
6.2	解析結果	77
6.3	バイアス) 0
	6.3.1 解析手法) 0
	6.3.2 結果) 1
6.4	不定性) 9
	6.4.1 解析手法) 9
	6.4.2 結果)0
第7章	結論 10)8
7.1	まとめ)8
7.2	展望)8
謝辞	10)9

第1章

宇宙線

1.1 宇宙線とは

宇宙線とは宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線である。その主成分は陽子 であり、そのほかにもさまざまな原子核を含んでいる。宇宙線は絶えず地球に到来 しており、1912 年にオーストラリアの物理学者、V.F.Hess によって発見され、現 在もさまざまな実験によって観測や研究が進められている。これまで観測された宇 宙線のエネルギーは、10⁸ eV から 10²⁰ eV 以上までの広範囲にわたっており、そ の到来頻度はエネルギーのほぼ3 乗に比例して小さくなる。しかし、宇宙線の起源 や加速機構など解明されていない部分があり、特に到来頻度の低い高いエネルギー を持つ宇宙線は未だ多くの謎に含まれている。

1.2 宇宙線のエネルギースペクトル

図 1.1 に一次宇宙線のエネルギースペクトルを示す。太陽風や太陽フレア などの影響を受けない 10¹⁰ eV 以上のエネルギー領域の宇宙線の到来頻度は $F(E) = K \times E^{-\gamma}$ で近似される. 10^{15.5} eV 付近までは $\gamma \approx 2.7$ であり、そこか $\delta \gamma \approx 3.1$ と変化し、10^{18.5} eV 付近からとなる。 $\gamma \approx 2.7$ となる。これらの γ の 変化はエネルギースペクトルにおいて特徴的な折れ曲がりであり、10^{15.5} eV 付近 を"knee"、10^{18.5} eV 付近を"ankle"と呼ぶ。これらは宇宙線の加速機構や機構や 宇宙空間における磁場の変化が関係しているのではないかと考えられている。



図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル

1.3 宇宙線の質量組成

到来頻度の高い太陽宇宙線や低エネルギー領域の銀河宇宙線については気球や人 工衛星などを用いて一次宇宙線を直接観測できる。高度組成探査機に搭載された宇 宙線同位体分光器による直接観測により、組成や同位体比が高精度で測定されてい る。その結果から宇宙線の成分は陽子が90%、ヘリウム原子核が8%、その他鉄原 子核までの思い荷電粒子で構成されていることがわかっている。宇宙線の化学組成 と太陽系の化学組成を比較すると各原子量は類似しているが、存在量が異なる原子 核もある。これは宇宙線が地球に到来するまでに星間物質と衝突することで原子核 が粉砕、別の原子核が生成されることや、宇宙線の起源、加速機構によって生じる と考えられる。したがって、宇宙線の組成は起源や加速機構、伝播中に衝突した星 間物質などを知るうえで大きな手がかりとなる。また 1963 年に超高エネルギー宇



図 1.2: 空気シャワー現象の模式図

宙線は宇宙背景放射との相互作用により地球に到来する前にエネルギーを失うと Greisen、Zatsepin、Kuzmin により予測された。これを提唱者の頭文字から GZK カットオフと呼ぶ。陽子、原子核ではエネルギーの失われ方に差があるので宇宙線 の組成を知ることはやはりその起源に迫ることにつながる。

1.4 宇宙線観測と空気シャワー

宇宙線は大気に突入すると窒素や酸素などの待機中の原子核と相互作用を起こ し、二次粒子を生成する。また、その二次粒子も同様に大気との相互作用を起こ す。これが繰り返されることで、待機中に大量の二次粒子が発生する。この現象は 空気シャワー現象と呼ばれる。図 1.2 に空気シャワー現象の模式図を示す。宇宙線 の到来頻度はエネルギーの3乗で比例して減少するため、エネルギーが高くなるほ ど到来頻度が急激に少なくなる。到来頻度の高い、低エネルギーの宇宙線は観測装 置で直接観測することができる。しかし、10¹⁴ eV 以上の宇宙線は到来頻度がすく なく観測には大きな検出面積と観測時間が必要となるため、直接観測が難しい。一 次宇宙線が大気と相互作用して生成される二次宇宙線シャワーを大きな検出面積を 持つ検出器で間接的に測定されている。

第2章

Telesope Array 実験

Telescope Array(TA)実験は超高エネルギー宇宙線の観測を行う実験である。 観測器として 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)を用いている。実験サイト は米国ユタ州ミラード群、北緯39度、西経113度、平均標高1400m(大気深さ 875g/cm²)の砂漠環境である。この場所は人口光が少なく、晴天率が60%程度で あり、大気蛍光の観測に適しており、また多数のSDを設置するのに十分な広さを 有する。TA実験における実験装置の配置を図2.1に示す。多数のSDは1.2 km 間隔でアレイ状に配置され、そのSDアレイを取り込むようにFDステーション を3ヶ所 (Black Rock Mesa" BR"、Long Ridge"LR"、Middle Drum"MD") に設置されている。また3箇所のステーションから等距離の位置に CLF(Central Laser Facility)を設置し、大気透明度の測定やステーション間の相対較正を行って いる。SD、FDの2つの検出器の宇宙線観測を行うことで、両検出器の系統誤差 の見積もりを行うだけでなく、より高いエネルギー決定精度、到来方向決定精度で 観測を行うことができる。

2.1 大気蛍光望遠鏡 (FD)

空気シャワー中の荷電粒子が大気を通過すると、大気中の窒素が励起される。励 起された窒素は基底状態に戻る際にエネルギーを蛍光として放出する。この蛍光を 測定することで空気シャワーを間接的に観測する手法が大気蛍光法である。これは 大気蛍光の発生量がシャワー中の荷電粒子のエネルギー損失量に比例することを利 用して宇宙線のエネルギーを決定する。

TA 実験の大気蛍光望遠鏡で大気蛍光を複合球面鏡で反射集光し、256本のハニカ



図 2.1: TA 実験における実験装置の配置

ムアレイ状に並んだ PMT カメラに入光して宇宙線空気シャワーの撮像観測を行っ ている。3 箇所の大気蛍光望遠鏡ステーションには、ステーションごとに 12~14 台の望遠鏡が設置されている。ステーションには望遠鏡前にシャッターが設置され ており観測を行わないときはシャッターが閉じることで望遠鏡は保護されている。 望遠鏡ステーション、望遠鏡の外観を図 2.2 に示す。また、別ステーション同士で 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精度良く解析する ことが可能になる。

2.1.1 光学系

BRM と LR には上下視野に対応する FD が上下 2 段で 1 対に設置されており、 さらにこの組み合わせを横に 6 対設置することで広視野の観測を実現している。 FD1 台あたりの視野は方位角が 18.0 度、仰角が 15.5 度である。また、上下 2 つ の FD の視野は 1 度ずつ重なるように設置されているため、1 ステーションあたり



図 2.2: BRM ステーションと FD

の視野は方位角が 108 度、仰角が 3~33 度である。BR と LR の FD には口径 3.3 m、曲率半径 6.067m の複合球面鏡があり、18 枚の六角形のセグメントミラーで構成されている。セグメントミラーは対辺の距離が 660mm で、表面には Al₂O₃ によるコーティングが施されている。また、鏡は焦点距離でのスポットサイズが 30 mm 以下となり、これはカメラ 1 ピクセル (61mm) に比べて十分小さくなるように調整されている。

2.1.2 PMT カメラ

FD の PMT カメラは 16 × 16 のハニカムアレイ状に並べられた計 256 本の PMT(浜松ホトニクス社 R9508) で構成されている。使用している PMT とカメラ ボックスを図 2.3 に示す。また、各 PMT には図 2.4 のように番号が与えられてい る。各 PMT の感面状には Schott 社製の BG3 フィルターが取り付けられており、 宇宙線による大気蛍光の波長域 300~400nm 以外の光をカットするようになって いる。これにより、夜光や街灯等のノイズの多くを除去することができ、宇宙線空 気シャワー以外のイベントでトリガすることが少なくなる。また、PMT1 本あた り約1×1度の視野を持っている。

2.1.3 データ収集システム

FD のデータ取得用エレクトロニクスには VME ボードが採用されており、 Signal Digitizer and Finder(SDF)、Track Finder(TF)、Central Trigger Distributor(CTD) で構成されている。データ収集システムの概略図を図 2.5 に示す.



図 2.3: 使用している PMT とカメラボックス

15 31 47 63 79 95 111 127 143 159 175 191 207 223 239 255 14 30 46 62 78 94 110 126 142 158 174 190 206 222 238 254 13 29 45 61 77 93 109 125 141 157 173 189 205 221 237 253 12 28 44 60 76 92 108 124 140 156 172 188 204 220 236 252 11 27 43 59 75 91 107 123 139 155 171 187 203 219 235 251 10 26 42 58 74 90 106 122 138 154 170 186 202 218 234 250 09 [25]41]57]73]89]105]121]137]153]169]185]201]217]233[249 08 24 40 56 72 88 104 20 136 152 168 184 200 216 232 248 07 23 39 55 71 87 103 119 135 151 167 183 199 215 231 247 06 22 38 54 70 86 102 118 134 150 166 182 198 214 230 246 05 21 37 53 69 85 101 117 133 149 165 181 197 213 229 245 20 36 52 68 84 100 116 132 148 164 180 196 212 228 244 þ4 03 19 35 51 67 83 99 115 131 147 163 179 195 211 227 243 02 18 34 50 66 82 98 114 30 146 162 178 194 210 226 242 01 17 33 49 65 81 97 113 129 145 161 177 193 209 225 241 00]16]32]48 [64]80]96]112]128]144]160]176]192]208[224]240

図 2.4: PMT 番号

Signal Digitizer and Finder(SDF)

SDF は 256 本の PMT で光が大気蛍光かどうかの判定を行う作用を持ったモ ジュールであり、ファーストレベルトリガーとも呼ばれる。PMT アナログ信号 を増幅させ、デジタル変換を行った後、SN 解析から PMT ごとの信号を判定す る。PMT からのアナログ信号を 12 bit40 MHz でサンプリングを行い、フラッ シュ AD コンバーターでデジタル変換を行う。サンプリングされたデータは 4



図 2.5: エレクトロニクスの概略図

bin(100[ns]) 毎に積分され、12.8 μs 毎に記録される。記録されたデータ毎に S 比 による SN 判定を行い、その判定結果を TF ボードに送信する。SDF ボード一枚 には 16ch あり、それぞれ 1 本の PMT の判定をおこなうので、各カメラ毎に 16 枚の SDF が必要である。

Track Finder(TF)

TF は 256 本の PMT で取得した光が空気シャワーのトラックであるか認識する モジュールでセカンドレベルトリガーとも呼ばれる。TF ボードはカメラ1台分の SDF ボードから得られる信号の中に、隣り合う5本以上の PMT(カメラの端の場 合、3本以上)から信号、もしくは高い信号閾値を超えた信号を出力した PMT が1 本以上ある場合、飛跡信号やその候補があると判定し、その判定情報を CTD ボー ドに送信する。

Central Trigger Distributor(CTD)

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

2.2 望遠鏡の較正

大気蛍光法を用いた宇宙線空気シャワー解析で、一次宇宙線のエネルギーの高精 度の決定や粒子種の高精度な推定ためには、望遠鏡の較正、大気状態の把握をそ れぞれ正確に行う必要がある。本節では TA 実験で使用されている望遠鏡の較正、 PMT の感度較正、大気モニター、大気蛍光効率の較正について述べる。

2.2.1 鏡の反射率

TA-FD の鏡は 18 枚のセグメントミラーでが構成される直径 3.3m の複合球面 鏡である。全てのセグメントミラーにおいて 250nm 以上の波長でのスペクトル反 射率があらかじめ製造会社で測定されている。また、定期的に反射率は分光測色計 (KONICA MINOLTA CM-2500d)を用いて測定される。分光測色計を図 2.6 に 示す。この装置の感度範囲の最小波長が 360nm であるため、製造会社が測定した データを絶対反射率として使用し、時間変動や劣化を相対反射率として測定を行 う。ミラーは測定後に純水で洗浄し、洗浄後にも測定を行う。各ミラーの絶対反射 率は、ミラーの個体差、時間変動、および製造時の絶対反射率をもとに計算され る。図 2.7 に望遠鏡の反射率を示す。測定された反射率の誤差は、分光測色計の精 度や時間変動の補間を考慮して、約 3% である。



図 2.6: 分光光度計 KONICA MINOLTA CM-2500d



図 2.7: 2008 年に行われた反射率測定の結果

2.2.2 UV 透過フィルター

TA FD には二種類の光学フィルターが取り付けてある。一つは UV 透過フィル ター (SCHOTT BG3) で夜空のバックグラウンドとなる光を減らすためにそれぞ れの PMT に、もう一つは UV 透過アクリルパネル (KURARAY PARAGLAS-UV00) で埃などから PMT を保護するために PMT カメラに取り付けている。UV 透過フィルターの透過率は吸光分光光度計 (HITACHI U-1100) で取り付け前の 99 枚の UV 透過フィルターが測定された。また、Xe-フラッシャーによって UV 透過 フィルター取り付け前と取り付け後での透過率の測定が行われた。その誤差は 3% 以下である。

2.2.3 CRAYS

Calibration using RAYleigh Scattering(CRAYS) はレイリー散乱光を利用した 絶対一様光源であり、基準となる PMT の較正を行う。CRAYS は窒素ガスを充填 したチェンバーと N_2 パルスレーザーからなり、レーザーの波長は 337.1 nm、光 量は 300 nJ/pulse、パルス幅は 4 μ sec である。ただし、我々が使用しているレー ザーはパルスごとに ±5% の発光量のばらつきがあることがわかっている。

CRAYS は PMT の視野中心がレーザーの光路と垂直になるように PMT がセットされ、レーザー光のレイリー散乱のみを検出する。レイリー散乱断面積は既に測定されており、理論計算値ともよく一致している。そのため、レーザーの出力を測定することで散乱光量がわかる。これにより、FD1 台あたり 3 本取り付けられて

いる基準 PMT の量子効率と収集効率の測定をしている。CRAYS の外観を図 2.8 に示す。

なお、CRAYS はレーザー光量以外にも実験装置の位置関係やガスの温度、圧力 などが正確に測定されており、結果として本測定の系統誤差は±8% と見積もられ ている。



図 2.8: CRAYS の外観

2.2.4 YAP

Yttrium Aluminum Perovskite(YAP) は CRAYS によって較正された基準 PMT の光源面の中心に取り付けられている絶対光量光源である。YAP は観測中 の絶対ゲインをモニターするために用いられており、基準 PMT の経年劣化を測定 している。また、YAIO₃:Ce をシンチレーターを窓とする直径 4 mm、高さ 1 mm の円筒容器内にアメリシウム-241(²⁴¹Am) α 線源を入射粒子として封入したもの であり、ピーク波長は 370 nm、パルス幅は約 20 nsec、PMT 光電面で発生する光 電子数はやく 450 個、パルスごとのばらつきは ±5% である。CRAYS を使った基 準 PMT のゲイン測定の際に、同時にその PMT に取り付けられている YAP の光 量の絶対値も CRAYS の光量との比較によって測定されている。YAP の外観を図 2.9 に示す。



図 2.9: YAP の外観

2.2.5 Xe-フラッシャー

Xe-フラッシャーは FD の複合球面鏡の中心に取り付けられた一様光源であり、 PMT のゲイン調整およびモニターを行う。また、外部トリガーによって制御され ており、パルス幅 2 μsec 、光量 2 × 10⁴ pe/pulse のパルス光を 25 Hz で発射する。

主鏡から約 3m 離れた位置にある PMT カメラ面を一様パルス光源で照らし、 PMT 増幅率と印加電圧との関係が明らかになっている基準 PMT を基準として、 同じ反応をするように他の PMT のゲインを調整する。PMT カメラ面における光 量一様性からのばらつきは 2% である。相対ゲインの調整は年に 3 回程度の頻度 で行われており、通常観測中は 1 時間に 1 回の頻度で Xe-フラッシャーを用いて PMT のモニターが行われている。照射のイメージを図 2.10 に示す。



図 2.10: Xe-フラッシャーの照射イメージ

2.2.6 XY-スキャナー

XY-スキャナーは、UV-LED 光源を用いて PMT カメラ面を 4 mm 間隔で操作 することで、PMT カメラの出力二次元不均一性を測定し較正する。この測定に よって、QE×CE×PMTgain の場所依存性が決定する。複合球面鏡のスポットサ イズは 30 mm 以下になるように調整されており、これは 1 つの PMT 感面の大き さ 61 mm より小さい。したがって、一様光源を照射して PMT 単位でゲイン調整 するだけでなく、PMT 感面状の二次元不均一性をより高い位置分解能であらかじ め知っておく必要がある。そこでカメラに装着する UV-LED 光源を搭載した大型 XY-スキャナーが開発された。XY-スキャナーはカメラに PMT を取りつける際に 生じる PMT 間隔 (約 2 mm) のばらつきや。望遠鏡設置場所での地磁気の影響を 考慮し、カメラに直接取り付けることができる装置である。また、実測取り付け制 度の系統誤差が ±2 mm、位置決定精度の系統誤差が ±0.1 mm である。

この装置に搭載されている UV-LED 光源は波長 365 ± 10nm の単色光を発 し、そのパルス幅は 400 nm、スポットサイズは 3.83 mm(1.65σ, 90%)、光量は約 1000 pe/pulse である。不均一測定は UV-LED 光源をカメラ有効感度面上を 4mm 間隔で 60 パルスずつ照射することで行われ、各測定ごとの相対ゲインの決定精度 は約 2.6% となる。この較正で求められた PMT カメラ感面の出力二次元不均一性 は、観測から一次宇宙線の情報を推定する際に用いられる。XY-スキャナーの概観 を図 2.11 に示す。



図 2.11: XY-スキャナーの概観

2.2.7 星解析

TA 実験では望遠鏡の光学特性パラメータを星を用いた解析で決定している。 解析は 2 手法あり、BRM サイトと LR サイトは 2 手法を組み合わせた Joint geometry を用いている。解析される望遠鏡の光学特性パラメータは、望遠鏡視 野方向、ミラーの曲率半径、SSP(spot-size parameter)、カメラの回転角がある。 Joint geometry では視野方向を 2 手法の非加算平均、ミラーの曲率半径を 6.067m または 6.165m に固定、SSP を星トラック解析、カメラの回転角を 0° としている。 BRM と LR でのこれらの望遠鏡ジオメトリを以下では star geometry と呼ぶ。

星クラスター解析

星クラスター解析では FD のカメラを白のスクリーンで覆い、スクリーンに結像 した星を利用し FD の光学特性を解析する。スクリーンに結像した星の集光象は ミラーの中心に取り付けるデジタルー眼レフカメラによって撮影される。またその 際の露光時間は 30s である。図 2.12 に撮影された写真を示す。撮影された星のス ポットの重心と星を特定する。手法は以下二つである。

- 画像処理ソフトウェアで PMT カメラ上の星のスポットの重心を測定する。 写真のメタデータを用い写真の日時や観測地点での FD 番号を取得する。写 真のメタデータや FD の位置から Yale Bright Star Catalog を用い、星や 惑星の方位角仰角を計算し、それらから予測される感面での X,Y 座標を計 算し、それらと星のスポット重心とを比較することで星を特定する。
- 写真のメタデータと星のスポットからのおおよその星の仰角と方位角を算出し、Python libraryを用いたプログラムにより星の位置を探索する。撮影された写真のピクセルの輝度値の重み付き平均を計算しカメラ感面上の星のスポット重心を決定する。星のスポット重心が探索結果と一定の距離にあればカタログの星と一致とする。

得られた星のスポット重心と星の位置を用いて、望遠鏡の仰角、方位角、ミラーの 回転角、曲率半径を使ったカイ二乗検定で最小のものを決定する。



図 2.12: 星クラスター解析で撮影された写真

星トラック解析

星トラック解析では FD でトリガーされるバックグラウンドの星をを用いて FD の光学特性を解析する。FD では通常 2~4Hz でのトリガーのため、星光による バックグラウンドレベルの変動が FD によって安定的に観測される。図 2.13 に星 光によるバックグラウンドレベルの変動を示す。PMT の視野は約 1° であるため、 星が通過する 5 分の間に FADC のバックグラウンドレベルが上昇する。星がトリ ガーされた時刻における星の方向は天体カタログから見積もることができるため、 これらを用い望遠鏡の視野方向を決定する。与えられるデータは PMT カメラの中 心から 1° 以内の範囲にある星、FD データを用いる。

FD の視野内にある星からの平行光線はカメラ上に像を形成する。カメラ上に結 像する光のサイズは、幾何学的反射の方向と、2 次元ガウス分布からランダムに選 ばれる変動角 (SSP:spot-size parameter) によって決定される。SSP はセグメン トミラーの整列精度で異なり、設置時のセグメントミラーの整列精度から SSP は 0.05°と見積もられ、その際のスポット半径は 68% 信頼区間で 21mm である。た だし、セグメントミラーの整列精度によって実際のスポット半径は設置時の値より 大きくなる可能性がある。そのため、本解析では FD の SSP を望遠鏡 1 台ごとに 解析する。FD の SSP を変化させ、FD に平行に光子を入射し、星の移動のレイト レースシミュレーションを行う。行ったシミュレーションが実際の観測データに一 番近い SSP を探索し最適値とする。



図 2.13: 星のバックグラウンドレベルの変動

2.2.8 TA-LIDAR

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.図 2.14 に TA-LIDAR の外観を示す。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 の大気較正に使われている.



図 2.14: TA-LIDAR 外観

2.2.9 CLF

Central Lazer Facility(CLF) は 3 箇所の FD ステーションからほぼ等距離に設 置されており、待機透明度の推定に使用される。CLF の概観と内部を図 2.15 に示 す。YAG レーザー (355 nm)を垂直方向に射出し、上方での側方散乱光を光源と して 3 箇所の FD ステーションで観測する。レイリー散乱による散乱数は計算に よって求めることができるため、計算で求めたレイリー散乱量と実際に観測された 光量との差がミー散乱による散乱量を表すことになる。ここからミー散乱の消散係 数 α_{mie} を求めることができる。また、現在 CLF は観測中 30 分ごとにレーザーを 射出しており、FD で観測されている。



図 2.15: CLF の概観と光学系

2.2.10 WEAT code

FDを観測する際 MD ステーションのオペレーターは、毎時目視で天気を観察し 記録している。このコードは WEAT コードと呼ばれている。このコードは、東西 南北、頭上の雲量、雲の厚さ、霧の有無について記録され、雲がある場合は 1、な い場合は 0 と記録される。BRM と LR で FD の解析をする際は WEAT コードの 東と南の情報が使用される。

2.2.11 ELS

ELS(Electron Light Source) は、BRM ステーションにおいて end-to-end の絶 対エネルギー較正ができる装置である。ELS は BRM ステーションから 100m 離 れた地点に設置されており、望遠鏡の視野に対して上向きの電子ビームを発射す る。発射される電子ビームは 40MeV × 10⁹ 個の電子を 1 パルスとして 0.5Hz で放 出し、それらに必要な水冷システムが 40 フィートと 20 フィートのコンテナに収 められている。ELS から射出された電子ビームは大気蛍光を発生させ、その大気 蛍光を FD で観測することにより、大気蛍光効率、鏡の反射率、フィルターの透過 率、PMT のゲインなど、全ての検出器部品を一斉に較正することができる。また、 ELS から射出される電子ビームのエネルギーは既知であり、BRM から 20 km 離 れた地点で発生する 10²⁰eV のシャワーによる光子量に相当する。図 2.16 に ELS の概略図を、図 2.17 に ELS のイベントディスプレイを示す。



図 2.16: ELS の概略図



図 2.17: BRM で観測された ELS のイベントディスプレイ

2.3 地表検出器 (SD)

SD は面積 3m² のプラスチックシンチレーション検出器である。SD の外観を 図 2.18 に示す。SD は 1 m × 1.5 m × 1.2 cm のプラスチックシンチレーターを 2 層にして使用する。これはノイズイベントを減らすことができるためである。シン チレーターには 2 cm 毎に波長シフトファイバーが張られ、PMT へと接続される。 空気シャワー粒子がシンチレーターに到達すると、シンチレーターが発光し波長シ フトファイバーによって光子が PMT に送られ読み出される。太陽光パネルとバッ テリーにより、外部からの電源供給なしに 24 時間 365 日 自立稼働している。夜間 だけでなく日中も観測できるため、FD より観測時間が長く、多くのデータを集め ることができる。



図 2.18: SD の外観とシンチレーターの概略図

第3章

TA 実験標準のシミュレーション とイベント再構成ソフトウェア

TA 実験では観測された宇宙線を解析するための宇宙線再構成ソフトウェアとそ のソフトウェアを評価するためのシミュレーションソフトウェアがある。本章では 今回使用した TA 実験の大気蛍光望遠鏡用に開発されたシミュレーションソフト ウェアとイベント再構成ソフトウェアについて説明する。

シミュレーションソフトウェアは、空気シャワーの縦方向発達から望遠鏡に入射 する光子数を求める空気シャワー生成シミュレーションクラス群と、この光子数か ら望遠鏡の構造を考慮して実際に記録されるデータを作る検出器シミュレーショ ンクラス群の2つのグループで構成されている。イベント再構成ソフトウェアは、 PMT セレクション、ジオメトリ再構成と縦方向発達再構成の3グループで構成さ れている。

3.1 空気シャワー生成シミュレーション

空気シャワーシミュレーションを行う上で、初期条件として一次宇宙線の情報 をソフトウェア内の「セッションファイル」に書き込んで設定することができる。 セッションファイルの情報は役 30 項目あるが、重要な一次宇宙線の情報は以下の 通りである。

- 一次宇宙線のエネルギー E₀
- 初期発達深さ X₀
- 最大発達深さ X_{max}

- 到来方向
- コア位置

3.1.1 縦方向発達曲線の決定

ー次宇宙線の情報から空気シャワーの縦方向発達を計算する。一次宇宙線が生成 する空気シャワーの縦方向発達は、Gaisser-Hillas 関数によって表されることが知 られている。Gaisser-Hillas 関数のパラメータのうちセッションファイルに指定さ れていないものは N_{max} である。以下の説明は本シミュレーションソフトウェア 内での N_{max} の計算方法である。

空気シャワー中にはニュートリノや高エネルギーのミューオンといった、大気 蛍光の観測では直接計測しにくい粒子が存在するため一次エネルギーの E_0 の一部 は Missing Energy となる。そのため、セッションファイルに与えられた E_0 から Missing Energy、 E_{miss} を引いたエネルギー E_{cal} を求める。

$$E_{\rm cal} = E_0 - E_{\rm miss} \tag{3.1}$$

ただし CORSIKA による空気シャワーシミュレーションから

$$\frac{E_{\rm cal}}{E_0} = A - B \left(\frac{E_{\rm cal}}{10^{18} {\rm eV}}\right)^{-C}$$
(3.2)

の関係が成り立つことがわかっているので、この式から E_{cal} を求める。なお、A、 B、C は正確には一次宇宙線の粒子種、到来方向の天頂角成分に依存するパラメータ であるが、ここでは鉄と陽子からなる適当な混合組成モデルを仮定して、入射天頂 角が 45°の場合についてのシミュレーションから求めた値 A = 0.967、B = 0.078、C = 0.140を使用する。

 N_{\max} はエネルギーの増加とともに線形一次で変化する値であると仮定して, $N_{\max} = 1$ 、 X_{\max} 、 X_0 のときの Gaisser-Hillas 関数を積分することで求まるエネルギー

$$E_0^1 = \frac{dE(s)}{dX} \int_{X_0}^{\infty} N_e(X, N_{\max}, X_0) dX$$
(3.3)

を使用し、

$$N_{\max} = \frac{E_{\text{cal}}}{E_0^1} \tag{3.4}$$

として求める。ここで、 $\frac{dE(s)}{dX}$ はエイジパラメータsの空気シャワーの1電子が単位大気深さを走った時の平均 energy deposit である。ここで求めた N_{\max} と初

期条件として与えた X₀ を Gaisser-Hillas 関数に代入して、任意の大気の斜め大 気深さ Xg/cm² における電子成分数が求まる。空気シャワーをその軸に沿って 1g/cm² 刻みで「セグメント」に分け、各セグメントでの電子数を計算し保存する。 セグメントには初期条件として与えた到来方向やコア位置の情報をもとにして計算 されたその位置情報も保存している。

3.1.2 大気蛍光発光

セグメントに与えた各深さごとの電子数とジオメトリ情報を用いて大気蛍光、 チェレンコフ光と散乱したチェレンコフ光の望遠鏡に入射する光子数を求める。 (図 3.1)



図 3.1: 空気シャワーから望遠鏡に入射する光子。発生点から直進して望遠鏡に入射する大気蛍光 (direct floulescence) とチェレンコフ光 (direct Cherenkov) に加えて、大気に散乱されて入射するチェレンコフ光 (scattered Cherenkov) が考慮される。

セグメントごとに、そこでの電子数 $N_{e,i}$ から、大気傾向によって発生する光子数 $N_{i\lambda}^{Fl}$ を各波長 λ ごとに求める。

$$N_{i\lambda}^{Fl} = N_{e,i} \frac{dE(s_i)}{dX} Y_{i\lambda}^{Fl}(H_i) S_{\lambda}^{Fl}(H_i) dl_i$$
(3.5)

iはセグメントを区別する番号、 s_i は空気シャワーセグメントでのセグメントでの エイジパラメータ、 $Y_{i\lambda}^{Fl}(H_i)$ 、 $S_{\lambda}^{Fl}(H_i)$ はそれぞれ高度 H_i における大気傾向発光 効率と発行スペクトル、 dl_i はセグメントの長さである。大気蛍光は等方的に放射 され、さらには大気によって散乱されるため、望遠鏡に到達する光子数 $N_{i\lambda}^{Fl,tel}$ は

$$N_{i\lambda}^{Fl,tel} = N_{i\lambda}^{Fl} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Aerosol}}(r_i) \frac{A_i}{4\pi r_i^2}$$
(3.6)

と計算される。ここで r_i はセグメントから望遠鏡までの距離、 $T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i)$ 、 $T_{i\lambda}^{\text{Aerosol}}(r_i)$ は距離 r_i 進んだ時の大気によるレイリー散乱、エアロゾル散乱による 波長 λ の光の透過率、 A_i は望遠鏡の検出面積である。ここでの望遠鏡の検出面積 は、合成鏡を一枚の球面鏡と仮定した時の面積である。

3.1.3 チェレンコフ光

チェレンコフ光の場合も大気蛍光と同様にセグメント電子数から発生する光子数 を求める。大気蛍光とは異なり、チェレンコフ光の発光効率、発光スペクトルはエ イジパラメータに依存する。そのためセグメントで発生するチェレンコフ光の光子 数は

$$N_{i\lambda}^C = N_{e,i} \frac{dE(s_i)}{dX} Y_{i\lambda}^C(H_i, s_i) S_{i\lambda}^C(H_i, s_i) dl_i$$
(3.7)

ここで $Y_{i\lambda}^{C}(H_{i}, s_{i})$ 、 $S_{i\lambda}^{C}(H_{i}, s_{i})$ は高さ H_{i} 、エイジパラメータ s_{i} におけるチェレ ンコフ光の発光効率、発光スペクトルである。チェレンコフ光は大気蛍光とは異な り等方的に放射されない。そこでチェレンコフ光の角度分布 D_{i}^{C} を以下の式で近 似して計算する。

$$D_i^C(\theta_i) = \frac{1}{\theta_0} \exp\left(-\frac{\theta_i}{\theta_0}\right)$$
(3.8)

ここで θ_i はシャワー軸と放射方向のなす、 θ_0 はチェレンコフ光を発する閾値 E_{thr}^C から求まるパラメータで $\theta_0 = a E_{\text{thr}}^{C - b}$ 、(a, b) = (0.83, 0.67)を使用する。さらに 大気中での散乱を考慮して、望遠鏡に入射するチェレンコフ光 $N_{i\lambda}^{C,tel}$ は

$$N_{i\lambda}^{C,tel} = N_{i\lambda}^C T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(r_i) \frac{2}{\sin\theta_i} \frac{A_i}{4\pi r_i^2} D_i^C(\theta i)$$
(3.9)

から計算する。

3.1.4 散乱チェレンコフ光

FD で観測されるチェレンコフ光には発生点から直接入射するものだけでなく、 大気分子やエアロゾルによって散乱され、方向が変えられたチェレンコフ光もふく まれる。この光を以下では散乱チェレンコフ光を呼ぶ。

あるセグメントにおける散乱チェレンコフ光の光量は、シャワー軸上に沿って大 気頂上からそのセグメントまでに放射されたチェレンコフ光の積分値に比例すると みなせる。*i*番目のセグメントでの総チェレンコフ光量 *N*^{CTotal} はその深さで発す るチェレンコフ光と*i*-1番目のセグメントを散乱されることなく通過したチェレ ンコフ光の和、

$$N_{i\lambda}^{\rm C\,Total} = N_{i\lambda}^{\rm C} + N_{i-1}^{\rm C\,pass} \tag{3.10}$$

である。 $N_{i\lambda}^{\text{C Total}}$ からこのセグメントでレイリー、ミー散乱する光 $N_{i\lambda}^{\text{RayC}}$ 、 $N_{i\lambda}^{\text{MieC}}$ と次のセグメントに伝播する光 $N_{i\lambda}^{C pass}$ を求める。

$$N_{i\lambda}^{C \ pass} = N_{i\lambda}^{C \ Total} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(dl_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(dl_i)$$
(3.11)

$$N_{i\lambda}^{\text{RayC}} = N_{i\lambda}^{\text{C Total}} [1 - T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(dl_i)] T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(dl_i)$$
(3.12)

$$N_{i\lambda}^{\text{MieC}} = N_{i\lambda}^{\text{C Total}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(dl_i) [1 - T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(dl_i)]$$
(3.13)

また、レイリー散乱とミー散乱の角度分布の違いを考慮し、

$$N_{i\lambda}^{\text{RayC,tel}} = N_{i\lambda}^{\text{RayC}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(r_i) \frac{A_i}{4\pi r_i^2} D_i^{RayC}(\theta_i)$$
(3.14)

$$N_{i\lambda}^{\text{MieC,tel}} = N_{i\lambda}^{\text{MieC}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(r_i) \frac{A_i}{4\pi r_i^2} D_i^{MieC}(\theta_i)$$
(3.15)

から望遠鏡に入射する光子数を求める。

上記では空気シャワーの横方向分布を考慮せずにセグメントの中央から平行光が 来ると仮定し、角度分布を考慮して望遠鏡に入射する光子数を求めた。次節では、 各セグメントの光子数に横方向分布を持たせ、PMT カメラで観測される波形デー タをシミュレートする。

3.2 検出器シミュレーション

このシミュレーションソフトウェアでは PMT カメラで観測されるデータをシ ミュレーションするために、「レイトレース」している。レイトレースとは望遠鏡 に光子を入射させ、光子の軌跡を各光子についてシミュレーションする方法であ る。そのためには、ソフトウェア中に細部の構造も含めて望遠鏡を詳細に記述して おく必要がある。図 3.2 にソフトウェアに実装したステーションの内部構造を示 す。実際のステーション同様、合成鏡はもとより望遠鏡を支える支柱やカメラ構造 まで再現してある。



図 3.2: ソフトウェア中に再現された FD ステーションの内部構造。左の直線 (仮想的シャ ワー軸)の上から望遠鏡に向かって行ったレイトレースの軌跡も表示している。

レイトレースでは1光子ずつの軌跡を求めるため、計算量が多くなる。時間短縮 のためにもレイトレースを開始する前に、望遠鏡に入射する光子に鏡の反射率や紫 外線光透過フィルターの透過率など入射位置に依存しない係数をかけて光子数を 減らしておく。具体的には鏡の反射率、紫外光透過フィルターの透過率、量子効率 をもとに各波長ごとに以下の式を計算する。結果的にもとまる N_i^{RayTrace} は PMT カメラ面に到達する光子数である。

$$N_{i}^{\text{RayTrace}} = \int N_{i\lambda}^{\text{p,tel}} R_{i\lambda}^{\text{mirror}} \tau_{i\lambda}^{\text{para}} \tau_{i\lambda}^{\text{BG3}} Q_{i\lambda} d\lambda \qquad (3.16)$$

 $N_{i\lambda}^{\text{p,tel}}$ は望遠鏡に入射する光子数、 $R_{i\lambda}^{\text{mirror}}$ は鏡の反射率、 $\tau_{i\lambda}^{\text{para}}$ と $\tau_{i\lambda}^{\text{BG3}}$ はそれぞれ PMT カメラ全面と PMT の光電面上に取り付けている紫外光透過フィルターの透過率、 $Q_{i\lambda}$ は PMT の量子効率である。なお、PMT 感面での二次元不均一性は入射位置に依存するため、レイトレースによって入射位置を決定した後に考慮する。

ここまで準備できたところで、光子1つ1つについてカメラに入射する位置や時 刻をレイトレースによって求める。放射位置は、NKG 関数でシャワーの横方向粒 子分布を近似して考慮し、ランダムに選ぶ。次に、鏡の検出面積内でランダムな1 点を光子の到達点として選ぶと、この2点をつなぐ直線から光子の放射位置と方向 が決まる。そして、発生点から鏡で反射し、PMT カメラに到達するまでの軌跡を レイトレースする。鏡は合成球面鏡を使用しているため、鏡の隙間が反射位置に選 ばれたときやカメラに光子が入射しない場合、または途中の構造物にぶつかった場 合にはレイトレースをやめる。このレイトレースを全光子について N^{p,tel} 回繰り 返す。その後、PMT カメラ面での不均一性を考慮するために、カメラ面での入射 位置に応じて図 3.3 の上図の係数をかける。

図 3.3 は BRM ステーションのカメラ-05 の不均一性を XY-スキャナーで測定し た結果である。また、図 3.3 の下図は標準 PMT を除いた 253PMT の (標準偏差/ 平均値) の値である。XY-スキャナーの設定精度に加えて、PMT の端では感度が 悪いためばらつきが大きくなるが、中心から 27.5mm 以内では、標準偏差の比は 4% にピークをもち、かつ 95% が 10% 以内に分布する。そのため、全ての PMT カメラに入射した光子は高電子となり増幅された後、電子回路を経て FADC でデ ジタル化される。レイトレースの軌跡から PMT に入射する時刻を求め、ゲイン、 電子回路の応答関数をかけ合わせ、時間情報を含んだ波形データとし保存する。こ の手順を光子の数だけ繰り返し、重ね合わせることでカメラ全体のシミュレーショ ンデータが作られる。



図 **3.3**: BRM/LR ステーションの PMT カソードの不均一性 (上)、不均一性の (標準偏差/ 平均値) の分布 (下)。

3.3 イベント再構成ソフトウェア

FD による大気蛍光観測で得られる情報は、各 PMT に入射した光による信号波 形とその時刻である。これらから実際の空気シャワーの発達および一次宇宙線の情 報を導出するためのイベント再構成ソフトウェアの詳細について述べる。

再構成は、

1. PMT セレクション

2. ジオメトリ再構成

3. 縦方向発達再構成

の3つの段階を踏んで行われる。解析に使用する PMT の選別で、空気シャワー由 来の信号とノイズ信号 (夜光や人工光などの空気シャワー由来ではない信号) を区 別する。選ばれた PMT 信号を使い空気シャワー到来方向の再構成で空気シャワー の位置と方向を決定し、その後、縦方向発達再構成で空気シャワーの X_{max} 及び一 次宇宙線のエネルギーを決定する。

3.3.1 解析に使用する PMT の選別

実際の観測ではイベントトリガーが発生するとステーション内の全チャンネルの 信号が記録・保存されるため、1FD ステーションあたり 256×12 あるいは 256×12 本の PMT の信号が記録される。まず、以下の解析により各 PMT について空気 シャワーによる大気蛍光の入射の有無を判別し、以後の再構成に用いるどうか判定 する。また、再構成に必要となる光電子数や光子の到達時間を見積もる。

1st セレクション

第一に各 PMT で得られた波形を個々に解析し、大気蛍光信号の有無を判定する。BRM、LR ステーションで記録される空気シャワーの信号波形は、図 3.4 で示されるように三角形で近似できるような形をしている. これを図 3.5 のように、波形のピーク位置 p と幅 ω で表現されるトライアングルフィルターでフィットし、以下に示す有意度 $\sigma(\omega, p)$ が最大になる ω, p を求める。

$$\sigma(\omega, p) = \frac{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} F_{\text{sub}}(i)W(i)}{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} P_{\text{rms}}(i)W(i)}$$
(3.17)

$$W(i) = \omega - |p - i| \tag{3.18}$$

 $F_{
m sub}(i)$ はペデスタルの平均を差し引いた波形のi番目のビンの値、W(i)は重み、 $P_{
m rms}(i)$ はi番目のビンのペデスタルのゆらぎである。ペデスタルの平均やゆらぎ は SDF によって記録される。 ω の探索範囲は0から 30 である



図 3.4: シミュレーションによる波形



図 3.5: 重みを表しているトライアングルフィルターの概略図

有意度分布を図 3.6 に示す。空気シャワーの信号がない場合の有意度 (図 3.6(左)) はほぼ 6σ 以下に分布しているのに対して、空気シャワーの信号を含 む場合 (図 3.6(右)) は 6σ 以上の領域にテールを持つ。このことから、 6σ 以上の有 意度を持った PMT 信号を大気蛍光信号と判定し、以後の解析に使用する。 6σ に 満たない PMT は以下で説明する 4th セレクションにかけられる。

最大有意度を持つpと ω のペアが見つかったとき、タイミングTとその誤差 σ_T

を以下の式によって計算する。

$$rT = \frac{\sum_{i=p-\omega}^{p} i \times F_{\text{sub}}(i)}{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} F_{\text{sub}}(i)} \times 100 \text{ ns}$$
(3.19)

$$\sigma_T^2 = \frac{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} (T-i)^2 \times F_{\text{sub}}(i)}{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} F_{\text{sub}}(i)} \times 100 \text{ ns}$$
(3.20)

上2式では、サンプリング周波数は10 MHz なので相当するビン幅100 ns をかけ て時間に直している。T は上で求めた幅 ω 内での重心であることに注意する。現 在は PMT 信号幅が 30 ビンと求まった場合は、その信号はノイズとみなし、解析 には使用しない。光電子数は以下の式で得られる。

$$N_{\rm pe} = \operatorname{Gain} \times \sum_{i=p-3\omega}^{p+3\omega} F_{\rm sub} (i)$$
(3.21)

Gain は FADC 値からの光電子数の変換係数で、キャリブレーションにより得られる。



図 3.6: 観測で得られた波形の最大有意度の分布。空気シャワーの信号を含まない場合 (左) と含む場合 (右)

MD ステーションはエレクトロニクスに積分型 ADC(Sample and Hold 回路) を使用しているために信号の波形情報を持っていない。そのため、MD ステーショ ンでは独自の方法で PMT の信号の有意度を計算している。

2nd セレクション

1st セレクションによってほとんどのノイズ信号を除去できるが、それでも光量 の大きい夜光を信号として選択してしまうことがあり、上記の波形解析による選別 のみでは不十分である。そこでさらに別の方法による選別が必要となる。空気シャ ワーを撮像すると大気蛍光光子の入射した PMT はヒットマップ画面上に線状に分 布するので、この線状の形状を弁別に利用する。シャワー粒子数はシャワー軸付近 で最も多く、軸から遠くなるにしたがって減少する。大気蛍光もほぼ同じ分布に従 うので、シャワー軸から離れた方向を見ている PMT には大気蛍光が入射していな いとみなすことができる。そこで、シャワーイメージの中心軸をハフ変換アルゴリ ズムを用いて近似的にシャワー軸とみなし、この直線と PMT の視野方向との離角 (βとする)を求め、βが大きい PMT はノイズ信号として除外する。しかし、βの 分布は一次エネルギーやジオメトリによって決まり、あらかじめわかっていない。 そのため、離角についての分布をとり、独立した PMT を除去する。



図 **3.7**: シャワートラック (左) と離角 β の分布空気シャワーによるデータは離角小さい部 分に集中するのに対して、そこから外れたデータはノイズと考えられる

3rd セレクション

2nd セレクションではシャワートラックから離れたノイズは除去できる。しか し、トラックに隣接したノイズ信号は取り除けない。再構成では光子の入射した時 刻を用いるため、ノイズデータによる期待される時刻と明らかに異なったピークを 持つような信号が混入すると、再構成の精度が著しく落ちてしまう。そこで、1st セレクションで求めた波形の入射時刻 T からデータを選別する。

各 PMT への光子の入射時刻は空気シャワーの到来方向とコア位置から決まる 量である。PMT の方向とタイミング情報から仮のシャワージオメトリを決める。 ジオメトリ再構成については第 3.3.2 節で説明する。得られたシャワートラック中 心への方向ベクトルに対して、シャワー軸の方向ベクトルのなす角を ψ, i 番目の PMT の方向ベクトルがなす角 α_i とすると、PMT への光子入射時刻 t/i は

$$t_i = t^* + \frac{1}{c} \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin (\psi + \alpha_i)} r_0 \tag{3.22}$$

となる。ここで t_* はシャワートラックの重心方向にシャワーが到達した時刻、 r_0 は FD からシャワートラック中心までの距離である。 $\phi - \theta$ の直交座標系で考える 場合、厳密には上式は成り立たないが、 α が小さい場合には近似的に成り立つと考 えられている。離角 α_i はシャワートラック中心の方向ベクトル n_c とシャワー軸 上に投影した PMT の方向ベクトル n_i^{proj} から次式で決まる。

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left(n_i^{\text{proj}} \cdot n_c \right) \tag{3.23}$$

各 PMT における α_i と 1st セレクションで求めた T_i を式 (3.22) によってフィッ ティングし、フィッティングから大きく外れたものを除外する。



図 3.8: シャワートラック (左) とノイズ選別のためのタイミングフィット (右)。右図では フィッティング曲線から大きく外れた点 (-2.5°, 19 µs) があり、これはノイズ信号 である。

4th セレクション

4th セレクションでは、モノジオメトリ再構成と同じようにタイミング情報を 使い、PMT セレクションをする。1st、2nd、3rd セレクションによって 6σ 以上 の有意度を持った PMT だけが選定される。ここでは、6σ より小さい有意度を 持った PMT も含めてセレクションをする。まず初めに、求めた Shower-Detector Plane(SDP) 上での PMT の仰角と PMT のタイミング情報を、モノジオメトリ再 構成と同じ方法でタイミングフィットする。SDP の求め方とタイミングフィット の詳細は、第 3.3.2 節で説明する。
次に、フィットした関数とのタイミングの差 R_i 、擬似 χ^2 、SDP からの離角 β_i を、全ての PMT に対して計算する。

$$R_i = |f(\alpha_i) - T_i| \tag{3.24}$$

$$\chi^2 = \left(\frac{R_i}{\sigma_{T_i}}\right)^2 \tag{3.25}$$

$$\beta_i = \vec{P_i} \cdot \vec{V_{\text{SDP}}} \tag{3.26}$$

ここで、 α_i は SDP へ投影された *i* 番目の PMT の仰角、 $f(\alpha_i)$ は α_i でのフィット関数から得られるタイミング、 σ_{T_i} は 1st セレクションによって得られたピークのタイミング誤差、 $\vec{P_i}$ はポインティングベクトル、 $\vec{V_{SDP}}$ は SDP での垂線方向である。これらのパラメータが PMT の排除または追加の判定に使用される。

これらの PMT は表 3.1 に示される 2 種類の基準値 (SOFT セレクション、 HARD セレクション) によって分類される。最初に、SOFT セレクションの基準 値を使って、PMT を選定する。SOFT セレクション後、基準値を HARD セレク ションの基準値に変えて選別する。

item	SOFT	HARD
R_i	$< 1.2\mu s$	$< 0.8\mu{ m s}$
χ^2	< 20	< 15
β_i	$<4^{\circ}$	$<2^{\circ}$

表 3.1: 4th セレクションでの PMT 選別基準

分類された PMT は、離角が判定される PMT の 5[°]以内と時間差が 5 μ s 以内の 基準で選ばれた、隣接した PMT との α_i と T_i の "Linear" フィッティングにより 判定される。フィットされた関数からの時間差 R_{linear} 、擬似 χ^2_{linear} 、使用される PMT 数 N_{linear} が判定に使用される。表 3.2 が "Linear フィット" による PMT の選別基準である。この選定により、位置とタイミングが孤立している PMT を排 除する。PMT がこれらの基準を全て満たすとき、PMT は解析に使用する PMT として追加される。このセレクションは、追加または排除候補の PMT がなくなる まで繰り返される。

図 3.9 は観測された空気シャワーイベントのイベントディスプレイの1つの例で ある。各マーカーの位置は PMT の視野方向、色は光子の入射時刻、大きさは光量 を表している。左図が 1st から 4th の全ての PMT セレクションを行う前で、S/N

item	THRESHOLD
$N_{\rm linear}$	> 3
R_{linear}	$1.2\mu \mathrm{s}$
$\chi^2_{ m linear}$	$20\mu{ m s}$

表 3.2: 4th セレクションでの Linear フィットによる PMT 選別基準

が3以上の波形が記録された PMT を全てプロットしてある。右図は 1st から 4th の全ての PMT セレクションを行った後であり、以降の解析で使用しない PMT に は×を表示した。 PMT セレクションを行うことで有効にノイズ信号を持つ PMT を除去できていることがわかる。



図 3.9: 1st から 4th の全てのセレクション前 (左) とセレクション後 (右) の空気シャワー イベントディスプレイ。ノイズが除去されていることがわかる。

3.3.2 空気シャワー到来方向の再構成

空気シャワー到来方向の再構成では、シャワー軸の傾きやコアの位置といった 空気シャワーのジオメトリを求める。ここでは、1 ステーションの観測データの みを利用して求めるモノジオメトリ再構成について述べる。まず 1 ステーション Shower-Detector Plane(SDP)を求める。

PMT の視野方向

ジオメトリの決定には、光子の入射方向が非常に重要である。つまり各 PMT の 視野を正確に知る必要がある。PMT の視野は、PMT と鏡との位置関係だけでな く、周囲の遮蔽物など望遠鏡全体の構造、PMT 感面での不均一性を考慮する必要 があり、簡単な幾何学計算で求めるのは難しい。よってシミュレータを用いてあら かじめ計算しておく。

シミュレーション自体は簡単で、平行光を FD の球面鏡に入射してレイトレース を行い、各 PMT における入射光子数を見るものである。これにより各 PMT が ある角度に対してどの程度の感度を持っているかがわかる。この方法で得られた PMT の感度分布を図 3.10 に示す。PMT の視野ほおよそ 1[°]程度の広がりを持っ ているが、鏡の球面収差などの影響でその広がり方にはカメラ上の各点で違いがあ ることがわかる。この視野の広がりを常に考慮してジオメトリ再構成を行うのは 大変であり、イベント再構成の計算ではこれを1方向で代表させて扱う。そこで各 PMT に対し、入射光子数の重心方向を PMT の視野方向として定義する。 また PMT ごとの方向による感度分布は、後述する逆モンテカルロ法を高速化する 上で重要である。

モノジオメトリ再構成

モノイベントの場合は、各 PMT の光子の入射時刻情報も用いらなければジオメ トリは求まらない。今、SDP は求まっているものとして、FD ステーションを原点 とする座標系で考える (図 3.11)。コア位置を r*、シャワーがコア位置に達した時 刻を t* とする。またシャワー軸上の r_i の点から時刻 t^P に放出された講師は i 番 目の PMT により時刻 t_i に検出されたとする。

この時

$$t_i = t^P + \frac{1}{c} |r_i|$$
 (3.27)

$$t^{*} = t^{P} + \frac{1}{c} |r^{*} - r_{i}|$$
(3.28)

が成り立つ。ここから t^P を消去すると、

$$t_i - t^* = \frac{1}{c}(|r_i| - |r^* - r_i|) \tag{3.29}$$

となる。各 PMT の視野は既知であるので、光子の発生点 r_i への仰角 α_i も既知である。これを用いて式 3.29 を書き換えると、

$$t_i = t * \frac{1}{c} \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin \psi + \alpha_i} r *$$
(3.30)

ここで ψ はシャワー軸の SDP 内での地表面からの仰角である。再構成ルーチン内 では、光子入射時刻 T_i の測定誤差 σ_i を考慮して、以下の χ^2 を最小にする t*、r*、



図 3.10: 望遠鏡への光子入射方向に対する PMT の感度 (BRM ステーション Camaera00 の例)。上は1カメラの全 PMT についてまとめて描いたもの、下は各 PMT ごと に描いた図であり、望遠鏡視線方向からの相対的な方向を両軸にとっている。数 値はシミュレーション時の入射光子数に対する検出光子数の比である。この方向 ごとの感度分布は後述する逆モンテカルロ再構成で使用される。

 ψ の最確値とする。

$$\chi^{2} = \sum_{i} \left[\frac{\{t_{i} - t * -\frac{1}{c}s_{i}(\psi)r*\}^{2}}{\sigma_{i}^{2}} \right]$$
(3.31)



図 3.11: 1 ステーションのみで観測されたイベントの再構成

ただし、 $s_i(\psi)$ は

$$s_i(\psi) = \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin \psi + \alpha_i} \tag{3.32}$$

である。このようにして、r*と ψ が決まるので、結果としてシャワー軸の方向ベクトルとコア位置の方向ベクトルが求まる。

3.3.3 縦方向発達再構成 - 逆モンテカルロ法

縦方向発達は、観測された光量から大気深さごとの空気シャワー中の電子数を 計算することで決定できる。福田らの開発した Waveform Sum Method は、10 MHz の実行サンプリングレートで記録されている波形から 100 ns ごとの各 PMT の光子数を求め、それを対応する大気深さでのシャワー中電子数に変換し、空気 シャワーの縦方向発達を再構成する方法である。この Waveform Sum Method は 非常に高速にデータ解析をできる長所がある一方で、チェレンコフ光や散乱チェレ ンコフ光が信号中に含まれることを考慮していない、という決定的な短所があっ た。第 3.1 節で述べたようにた一蛍光観測ではジオメトリによってはかなりの割合 でチェレンコフ光やその散乱光が混入するため、全ての大気蛍光からの光として解 析してしまうとエネルギーを過大評価してしまう。そこで、チェレンコフ光とその 散乱を精密に考慮するために「逆モンテカルロ法」を用いた縦方向再構成ルーチン を開発した。以下、その詳細について述べる。 X_{max} 決定

逆モンテカルロ法とは、ジオメトリ再構成で得られたシャワー軸に沿って、繰り 返し空気シャワーをモンテカルロシミュレートし、PMT カメラ面で観測される信 号を計算し、観測された実データを最もよく再現する空気シャワーを選ぶ手法であ る。空気シャワーの縦方向発達曲線は Gaisser-Hillas 関数を使って X_{max} 、 N_{max} をパラメータとしながら繰り返し生成される。実際には X_{max} の最確値を探す。具 体的には、この時 $N_{\text{max}} = 1.0$ と固定しておき、縦方向発達の形が一致するものを 探す。また、Gaisser-Hillas 関数の X_0 は縦方向発達曲線の形を大きく変化させる パラメータではないため $X_0 = 0.0 \text{ g/cm}^2$ と常に固定されている。

与えられた X_{max}、N_{max} からカメラ面での信号を求めるのだが、第 3.1 節で述 ベたイベントシミュレーションと同様に縦方向発達からレイトレースを行うと計算 機の負担が大きすぎるため現実的ではない。そのため、第 3.3.2 節で述べた PMT の視線方向を求めるときにシミュレートした方向ごとの感度分布を利用して計算を 簡略化・高速化する。*i* 番目の PMT で検出される信号 n_i^{pe}(光電子数) は

$$n_i^{\rm pe} = \int_x \int_\lambda N_{x\lambda}^{\rm RayTrace} \times f_i(n_x) d\lambda dx$$
(3.33)

で求めることができる。ここで $N_{x\lambda}^{\text{RayTrace}}$ はイベントシミュレーション同様、深さ xg/cm^2 ごとに大気蛍光、チェレンコフ光、散乱チェレンコフ光の望遠鏡に届く光 子数を計算し、第 3.2 で述べた式 (3.16) の位置に依存しない係数をかけた光子数 である、 $f_i(n_x)$ はある方向 n_x からの平行光が *i* 番目の PMT で検出される割合で あり、図 3.3 の値に相当する。

式 (3.33) を使って計算した信号と観測データをもとに、次の尤度を計算する。

$$L = \sum_{i} \{ n_i^{\text{pe,data}} \log \frac{n_i^{\text{pe}}}{n^{\text{pe,st}}} \}$$
(3.34)

$$n^{\rm pe,st} = \sum_{i} n_i^{\rm pe} \tag{3.35}$$

ここで、 $n^{\text{pe,st}}$ は式 (3.33) のシミュレーションで計算されたステーションでの光 電子数の和であり、 $n_i^{\text{pe,data}}$ は実際のデータから求めた i 番目の光電子数である。 X_{max} を変えながら、式 (npest) の尤度を繰り返し計算し、最大になる X_{max} を最 確値とする。 $N_{\rm max}$ 決定

縦方向発達を求めた後、 N_{max} を求める。式 (3.33) から求まる $N_{\text{max}} = 1.0$ の総 光電子数の比から N_{max} を決定する。すなわち、

$$N_{\max} = \frac{\sum_{i} n_i^{\text{pe,data}}}{\sum_{i} n^{\text{pe}_i}} \tag{3.36}$$

である。図 3.12 は観測されたシャワーイメージと、再構成結果を元に式 (3.33) から計算した PMT で検出される光電子数との比較である。左図は各 PMT で観測された波形データを単位間隔毎に足しあわせ、時刻情報を大気斜め深さ毎に変えたものである。右図は求めた X_{max}、N_{max}の縦方向発達曲線から式 (3.33)を使い、カメラで観測される光電子数を求め、重ね書きした図である。データの立ち上がり、立ち下がりや真ん中に位置するカメラの隙間も含めて観測データをシミュレーションで良く再現できていることが分かる。



図 3.12: 観測データとシミュレーションの比較。左図は実際に観測されたデータであり、 右図は再構成で得られた結果からシミュレートした光電子数を重ね書きしている。 赤色が大気蛍光、青色がチェレンコフ光、紫色がレイリー散乱されたチェレンコ フ光、緑色がエアロゾル散乱されたチェレンコフ光の光電子数を表す。

Energy 決定

一次宇宙線のエネルギーは空気シャワー中の全粒子のエネルギーの合計である。 逆モンテカルロ法で求めた X_{max}、N_{max} を Gaisser-Hillas 関数に代入して積分す ると、電磁成分のエネルギー E_{cal} が求まる。E_{cal} は一次宇宙線のエネルギーでは ないことに注意する。

$$E_{\rm cal} = \frac{\overline{dE}}{dX} \int_{X_1}^{\infty} N_e \left(X, N_{\rm max}, X_{\rm max}, X_0 \right) dX \tag{3.37}$$

ここで \overline{dE}/dX は 1 電子が単位深さ走ったときの平均 energy deposit で $2.2 \,\mathrm{MeV}/(\mathrm{g/cm^2})$ である。ところで、Gaisser-Hillas 関数は

$$t = \frac{X - X_0}{\lambda} \tag{3.38}$$

$$\xi = \frac{X_{\max} - X_0}{\lambda} \tag{3.39}$$

を用いて書き換えると

$$N_e(t) = N_{\max} \left(\frac{e}{\xi}\right)^{\xi} e^{-t} t^{\xi}$$
(3.40)

となる。したがってこの積分である *E*_{cal} はガンマ関数 Γ を用いた以下の式を計算 すれば良い。

$$E_{\rm cal} = \lambda N_{\rm max} \frac{\overline{\mathrm{d}E}}{\mathrm{d}X} \left(\frac{e}{\xi}\right)^{\xi} \Gamma(\xi+1) \tag{3.41}$$

上式からもとまる E_{cal} に式 (3.1) と式 (3.2) の Missing Energy の補正を加えるこ とによって、一次宇宙線のエネルギー E_0 が決定する。

第4章

Opt-copter

TA 実験が観測の対象としている超高エネルギー宇宙線は到来頻度が低く、解析 にはさまざまな装置の較正や大気状態の不定性が乗ることから、少ない統計量で 精度良く解析することは難しいとされている。そのため宇宙線のエネルギーを精 度良く決定するためにはそれぞれの較正が精度良く決定される必要がある。我々 は新たな望遠鏡の較正装置として、視野方向を 0.1 度未満の決定精度で視野方向 の解析ができる、可搬性の高い装置が必要となった。そこで、UAV(Unmanned Aerial Vehicle) に即位用モジュールの RTK-GPS と紫外波長帯の光源を搭載した 飛行型光源を開発した。この装置は「Optics(光学)」と「Octocopter(8 枚羽のマ ルチコプター)」から「Opt-copter」と呼ぶ。図 4.1 に Opt-copter の外観を示す。 Opt-copter を望遠鏡の視野内に飛行させ、UAV に搭載されている光源を FD で撮 像する。UAV に搭載されている RTK-GPS の位置情報と FD が撮像した光源の受 光重心の方向を用い、望遠鏡の視野方向や集光象といった光学特性を解析する。本 章では Opt-copter の構成および試験、解析について述べる。



図 4.1: Opt-copter 外観

4.1 Opt-copter 構成

Opt-copter は UAV に光源と即位 GPS を搭載している。以下に Opt-copter の 構成を説明する。

4.1.1 UAV Unmanned Aerial Vehicle

UAV は DJI 社の S1000+ を用いる。S1000+ の総重量は約 4kg、最大過積載重量は機体を含めて最大 11kg、飛行時間は 17000mAh の 6 セル LiPo バッテリー使用時に約 15 分間である。110cm の円周上に 8 つのモーターが配置されている。全8 本のフレームカーボン素材でできているため軽く、折りたたむことができるため可搬性能が高い。

4.1.2 光源

搭載される光源には一様性と安定性、軽量であることなどが求められる。光源 は球体に近似した性能を持たせるため正十二面体の各面に LED を搭載したものを 使用する。LED は Roithner Laser Tecknik 社の H2A1-H375 を用いる。波長は 375nm、発光量は調整が可能であり、発光タイミングは GPS による、PPS と同 期しており、パルス幅は 10µsec で発光する。また、光源の一様性を高めるために 球体のディフーザーを用いている。光源、ディフューザーの概観を図 4.2、4.3 に 示す。

機体の制御は A3 flight controller を搭載し行なっている. ホバリング精度は垂 直方向に± 0.25m. 水平方向に± 0.75m である. UAV の位置は磁気探知機と気圧 高度計センサー,GPS, 慣性計測装置によって測位されている. 制御用の GPS は一 般的なものを用いているため,GPS 座標の誤差は 2m から 3m, 高度の誤差は 10m ほど生じると考えられるが, 他のデバイスによって位置安定化補正が行われ, 高い 精度での飛行が可能である. アプリケーション litchi を用いることで GPS 座標 や高度, 機首方向, 速度など詳細に設定した自動飛行が可能である. Opt-copter と の通信が途切れた場合でも Opt-copter はあらかじめ設定したプログラムを実行 し, 完了させる. また, 手動飛行時に Opt-copter との通信が 10 秒以上途切れた場 合,Opt-copter は離陸した地点を正確に探し出し,最も安全なルートと高度で帰還 する. 操縦者は危険を察知した場合,Opt-copter に帰還命令を出し進行中のプログ ラムを中断し, 離陸地点へと帰還させることもできる.



図 4.2: LED を搭載した正十二面体光源



図 4.3: 使用しているディフューザー

4.1.3 即位用 RTK-GPS モジュール

Opt-copter の位置情報を高精度で得るために、ドローン制御用の GPS モジュー ルとは別に Swift Navigation 社の Piksi を搭載した. Piksi を図 4.4 に示す。また、 この GPS モジュールは Real Time Kinematic(RTK) 測位を利用している。RTK 測位とは複数台の GPS モジュールを使用し、それぞれが衛星から電波を受信、そ して GPS モジュールがお互いに受信したデータや計算結果などを送受信すること で高精度に複数のモジュール間の相対位置が取得できるというものである。

Opt-copter では、2 つの GPS モジュールを 1 組として使用する。一方を基準局 として地上の正確に測位されたモニュメント上に設置し、もう一方を移動局として Opt-copter に搭載する。2 つのモジュール間は 10Hz で通信を行い、10cm 以内の 誤差でモジュール間の相対的な位置関係を測定することができる。



図 4.4: RTK-GPS モジュール piksi

4.2 TA 実験サイトでの Opt-copter 観測

FD の光学特性の構成を目的として、TA 実験サイトでの Opt-copter のフライトと FD による観測を行った。

4.2.1 試験概要

実験場所 TA 実験サイト BR ステーション 期間 2018 年 8/13~10/18,2019 年 8/26~10/5 フライト日数 2018 年 20 日間,2019 年 13 日間 実験条件 雨が降っておらず風速 5 m/s 以下の,月の出ていない夜間

Opt-copter

飛行位置 各 FD のミラー中心から 300m 付近
飛行速度 1 m/s
位置測位頻度 10 Hz
光源発光頻度 10~30 Hz
光源パルス幅 10 μsec

FD

対象 FD 2018 年 FD00~11, 2019 年 FD04~FD07 撮影頻度 10~30 Hz

実験は図の TA 実験サイトに 3 箇所ある FD ステーションのうち BR ステー ションで行った。また、実験の妨げになる月の出ていない夜間かつ、装置保護と安 全の観点から雨が降っておらず風速 5 m/s 以下の状況で実験を行った。 図 4.5 に BR ステーションの鳥瞰図を示す。図 4.5 中の 2 箇所のサーベイマーカー (赤い点) はそれぞれ位置が正確に測定されており、Opt-copter はこの地点を基準 に位置の測定を行なっている。FD00~05 の左視野をターゲットとしたフライトを 行う際は南のサーベイマーカーを、FD06~11 の右視野をターゲットとしたフライ トを行う際は北のサーベイマーカーをそれぞれ基準とする。また、サーベイマー カー付近にはヘリポートを設置しており、フライトの際にはそれぞれ基準側のヘリ ポートを使用して離着陸を行う。実験時のサーベイマーカー付近の様子を図 4.6 に 示す。測位用 GPS モジュールの基準局アンテナはサーベイマーカー上に設置し、 Opt-copter に設置される移動局との相互通信用アンテナは通信の安定性確保のた め梯子上に設置する。Opt-copter は基準局と移動局それぞれのアンテナ間の距離 が1mになるように設置された離陸用ヘリポートから離陸し、着陸用ヘリポートに 着陸する。そして、離陸の際には再び離陸用ヘリポートに移動させアンテナ間の距 離が1mになっていることを確認したのち離陸させる。離着陸は手動で行い、そ れ以外は事前に設定したコースを自動飛行する。飛行中、Opt-copter は 10 Hz で 位置の測位を続け、光源は発光頻度 10~30 Hz、パルス幅 10 µsec で発光を続ける。 また、光源の発光タイミングで FD にトリガーをかけて撮影を行う。



図 4.5: BR ステーションの鳥瞰図 星印は FD から 300 m 先の Opt-copter 飛行位置であり,赤い点はサーベイマー カーである



図 4.6: 実験時のサーベイマーカー付近の様子

4.2.2 光源位置

測位用 RTK-GPS モジュールの計測データは基準局のアンテナに対する移動局 のアンテナの相対的な位置を南北、東西、高さを記録している。この計測データ とサーベイマーカーの FD に対する相対位置などを用いて、RTK-GPS 位置を各 FD からの見かけの仰角・方位角に変換する。これを以後、光源位置と呼ぶ。そし て、FD 視野上に投影したものを図 4.7 に示す。図 4.7a は 2018 年の計測データ、 図 4.7b は 2019 年の計測データである。また、それぞれの年で BR ステーション の 12 台すべての FD の計測データを 1 つにまとめたものを図 4.8 と 4.9 に示す。 2018 年は視野中心を狙ったものや複数の FD を横切るようなフライトなど、様々 なフライトを 12 台すべての FD に対して行った、2019 年は FD04~07 に狙いを 絞り、視野中心と視野右下の均一で密なフライトを行った。

4.2.3 受光重心位置

FD では図 4.10 のように各 PMT の信号が得られる。この信号は各 PMT の感 度の違い等を含んだ値となっているため、3 章で述べた FD の感度較正装置のデー タを用いて補正を行った後、バックグラウンドに対して 3σ を超える信号強度の PMT を用いて式 4.1 で重心を計算する。この受光重心位置を FD の光源検出位置 と扱う。

$$Azi_{cog} = \frac{\sum_{i} N_{pmt_i} Azi_{pmt_i}}{\sum_{i} N_{pmt_i}} \quad Ele_{cog} = \frac{\sum_{i} N_{pmt_i} Ele_{pmt_i}}{\sum_{i} N_{pmt_i}}$$
(4.1)



図 4.7: FD1 台分の FD 視野上に投影した光源位置



図 4.8: 2018 年の全フライトを FD 視野上に投影した光源位置

ここで、Azi.cog と Ele.cog はそれぞれ受光重心位置の方位角と仰角、 N_{pmt} は PMT の受光量、Azi.pmt と Ele.pmt はそれぞれ PMT 中心の方位角と仰角を表 す。こうして得られた受光重心位置の1例を図 4.11 に示す。図 4.11 より受光重心 位置は光源位置と異なり、各 PMT の中心に偏っていることがわかる。これは、光 源によって感光面上に結像してできる像の主要な部分が1つの PMT に収まって いるため発生する。



図 4.9: 2019 年のフライトを FD 視野上に投影した光源位置



図 4.10: 光源の光を検出した PMT の出力電圧

4.3 望遠鏡視野方向解析

4.3.1 FD の総受光量から得た PMT の輪郭探索による視野方向解析

図 4.12 にドローンに搭載されている光源の位置を望遠鏡の視野角に変換したものに、FD で光源を観測した際の同タイミングの受光量で色付けしたものを示す。 この図から、望遠鏡の PMT の 1 ビットずつの輪郭が確認できる。この輪郭を用い 実際の望遠鏡の視野方向を探索する。



図 4.11: 光源位置と受光重心位置

解析手法

観測によって得られた飛行記録は密度が低く、均一に分布していないため、格 子状の点として推測される光源位置とそれに対応する記録受光量を補完生成した。 元記録と補完記録の例を図 4.12、4.13 に示す。光源位置は仰角方位角それぞれの 方向に 0.01[°]刻みで算出される。対応する総受光量は元データの重み付き平均に よって算出され、重み W は式 4.2 によって与えられる。dx と dy は元の光源の位 置座標と各生成座標との距離である。

$$W = \frac{1}{dx^4 + dy^4}$$
(4.2)



生成した補完記録に対して、想定 PMT を移動させ表れた PMT の輪郭と最もよ く重なる位置を探し、その時の想定 PMT の元の位置からの移動分を想定視野方向 と実際の視野方向の差とする。探索のイメージを図 4.14 に示す。

1. 想定 PMT の輪郭線をいくつかに分割し距離が近い格子点を複数探してくる。

2. 1で得た格子点が持つ総受光量を足し合わせる。

3. 想定 PMT を少しずらす。

4. 1~3を繰り返し2の総受光量の和が最も小さくなる位置を探す。

総受光量の和が最も小さくなった位置が2つの PMT が最も重なったものとして いる。実際には、想定 PMT の各辺から近い 100 点ずつ、計 600 点を取得した。ま た、想定 PMT を仰角方位角各方向に 0.01° 刻みで移動させ元の位置から± 0.5° の範囲を探索した。



図 4.14: PMT 輪郭が重なる部分の探索

解析結果

PMT の輪郭を探索し値が最小になった、実際の視野方向のを図 4.15 に示す。またこの時の想定している PMT の視野方向と実際の視野方向の差である解析された 視野方向のずれを表 4.1 纏める。FD のスポットサイズが大きく PMT の輪郭が確 認できない FD は本解析は適用できない結果となった。



図 4.15: 輪郭探索による実際の視野方向

FD	Azimuth [deg]	Elevation [deg]
00	-	-
01	-0.05°	-0.04°
02	-	-
03	0.01°	-0.03°
04	0.05°	-0.06°
05	0.01°	-0.25°
06	-	-
07	-0.04°	-0.15°
08	-	-
09	-0.10°	-0.22°
10	-	_
11	0.01°	-0.19°

表 4.1: 輪郭探索解析結果

4.3.2 補完なしでの FD の総受光量から得た PMT の輪郭探索による視野方向解析

第 4.3.1 章での PMT 輪郭探索による FD の視野方向解析では 2018 年の Optcopter による観測データを用いており、これはフライトデータが密でなく均一に分 布していなかったためデータを補完し解析が行われた。2019 年度のデータではこ れらが改善されたフライトが行われたため、データの補完を行わない解析が可能と なった。本章では 2019 年の Opt-copter 観測データによる補完を行わない PMT 輪郭探索について述べる。

解析手法

図 4.16 に視野上に投影した各光源位置に対して、同時刻の FD が記録した総受 光量を色付けしたものを示す。FD04,05,07 から PMT の輪郭部の感度が低い場所 や、PMT の二次元不均一性から PMT の輪郭が現れていることがわかる。また FD06 ではこの傾向が見られない。これは集光象が大きくなり輪郭部の感度の減少 が現れにくいためである。輪郭が見られる FD に対し PMT の輪郭部の受光量が 減少することを用い、望遠鏡の視野方向を解析する。解析手法を以下に示す。 1. 望遠鏡視野中心の PMT(119 番) の輪郭を視野角に変換し、±0.05° の幅 を持たせる。

2. 幅を持った PMT 輪郭の内側にある、データの受光量の合計の平均を算 出する。

3. PMT の輪郭をずらす。

4. 2~3 を繰り返し1の総受光量の平均が最も小さくなる位置を星解析に よる視野方向から仰角方位角各方向に 0.01°刻みで移動させ元の位置から ±0.5°の範囲を探索する。

模式図を図 4.17 に示す。



図 4.16: 2019 年の Opt-copter によるフライトでの同時刻の FD が記録していた総受光量 で色付けした各 FD。コマ収差の影響が低いカメラ中央付近の PMT119 番を拡大 している。



図 4.17: PMT 輪郭が重なる部分の探索

解析結果

各 FD で解析した PMT 輪郭の受光量の最小値になった位置分だけ、想定 PMT を移動させるたが、図 4.18 である。FD07 を例に取ると方位角方向に-0.03[°]、仰 角方向に-0.16[°]動かした時 PMT 輪郭の総受光和の平均が最小となった。これが、 想定している視野方向と実際の視野方向との差となる。2019 年にフライトが行わ れた FD について得られた値を表 4.2 に纏める。

FD	Azimuth [deg]	Elevation [deg]
04	0.1	-0.06
05	0.04	-0.1
06	-	-
07	-0.03	-0.16

表 4.2: 2019 輪郭探索解析結果

4.3.3 FD の受光量重心と光源位置による視野方向解析

PMT 輪郭探索での視野方向解析では集光が悪い望遠鏡では受光量に差が出づら く解析ができない。そのため、それに依存しない解析が必要であった。本解析で は、ドローンに搭載されている光源の位置情報と FD でトリガーされた受光重心と を比較することで視野方向を解析する。



図 4.18: 解析された実際の視野方向の PMT 輪郭を重ねた解析結果

解析手法

FD の受講記録位置と Opt-copter の光源位置を比較し視野方向のずれを解析する。図 4.19 のように、FD の受光位置が一点に定まる場合、その時刻の Opt-copter の位置と比較することで、実際と想定の FD 視野方向の差を求める。



図 4.19: 受光位置と光源位置の比較

FD の受光量重心分布に Opt-copter の光源一を重ねると図 4.20 が得られる。図 4.20 の赤点が受光量重心分布であり、緑点が光源位置である。この FD では、受光 量重心に対して、全体的に Opt-copter の光源位置が下側に位置している。これら より、この FD の実際の視野方向は下を向いていることが考えられる。



図 **4.20:** FD10 視野中心での受光量重心と光源位置 赤: FD による受光量重心 緑: Opt-copter の光源位置

解析結果

上記の解析手法をもとに、FD 視野中心付近から対称にデータを抽出し、各 Opt-copter の光源位置から同時刻の受光量重心位置を引き差を求めた。図 4.21 は 本解析の結果、表 4.3 は解析結果の平均である。本解析では差の平均値を視野方向 のずれの代表値とする。本解析の誤差は RTK-GPS モジュールの再起動とドロー ンのフライトコースの変化、計測データの不均一性による誤差とコマ収差と計測 データの不均一性による誤差で±0.03°である。

FD	Azimuth	Elevation	Azim の標準偏差	Elev の標準偏差	データ個数
00	0.05°	0.11°	0.09	0.09	11967
01	0°	-0.04°	0.11	0.11	10962
02	0.04°	0.02°	0.09	0.07	8267
03	0.04°	-0.03°	0.14	0.13	10058
04	0.04°	-0.04°	0.16	0.14	13448
05	0.02°	-0.12°	0.14	0.13	10293
06	0.01°	-0.05°	0.08	0.07	11745
07	-0.04°	-0.14°	0.15	0.14	12813
08	0.01°	-0.12°	0.09	0.08	15513
09	-0.05°	-0.19°	0.14	0.12	11874
10	-0.02°	-0.14°	0.06	0.06	13840
11	0.01°	-0.15°	0.13	0.13	14547

表 4.3: 位置比較解析の誤差





第5章

mono 解析による視野方向影響 解析

Opt-cotper によって望遠鏡視野方向は 0.03 度で決定できるようになり、従来 の解析手法である星解析より決定精度は 1 桁向上した。また、星解析による視野 方向の不定性より大きなズレを持った望遠鏡があることが Opt-copter による視野 方向解析によってわかった。そのため、本章では新たに新たに解析された copter geometory を望遠鏡に適用し従来の star geometry を使用した宇宙線再構成との 影響を見積もる。本章では FD 単眼 (mono) 解析での影響を見積もる。

5.1 解析ソフトウェアでの視野方向

本解析では第3章で述べた TA 実験標準のシミュレーションとイベント再構成 ソフトウェアを用いる。Opt-copter を用いた視野方向解析では望遠鏡1台ずつに 現行用いている星解析による視野方向からのずれを求めた。そのため望遠鏡にそれ ぞれのずれを適用し、新たに望遠鏡の視野方向を1台ごとに更新する必要がある。 また、視野方向のずれは第4.3.3章で述べた、受光重心と光源位置による視野方向 解析を用いる。表 5.1 に星解析での望遠鏡の視野方向 (star geometry)、表 5.2 に Opt-copter 解析での視野方向 (copter geometry) を示す。

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
Azimuth [deg.]	198.001	198.227	180.051	180.064	162.590	162.813	143.966	144.1690	126.6690	126.1930	108.0270	108.0050
Zenith [deg.]	64.558	79.404	64.1855	79.460	64.1645	79.275	64.300	79.4185	64.248	79.4050	64.268	79.4370
Ę	表 5.1:	現行I	'A 実験	で用い	られてる	5星解析	による	望遠鏡視	野方向			

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
Azimuth [deg.]	197.951	198.227	180.011	180.024	162.550	162.803	144.006	144.1590	126.6590	126.2430	108.0470	107.9950
Zenith [deg.]	64.448	79.444	64.1655	79.490	64.2045	79.395	64.350	79.5585	64.368	79.5950	64.408	79.5870

表 5.2: Opt-cotper を用いて解析された望遠鏡視野方向

解析ソフトウェアでは PMT1 本ずつに視野方向があり、望遠鏡の幾何構造を考 慮して計算されるものと、PMT の感度が一番高い場所を PMT の代表の視野方向 とするものの 2 種類ある。前者では PMT と鏡の位置関係やカメラの回転角など の望遠鏡構造を考慮し幾何計算で決定されるが、後者は PMT の周囲の遮蔽物など 望遠鏡ステーション全体の構造、PMT 感面の不均一性を考慮し感度が一番高い場 所を視野方向とする。3.3.2 で述べたとおり、PMT の感度が一番高い場所を視野 方向とする場合、PMT の視野方向をあらかじめレイトレースシミュレーションで 計算する必要がある。図 5.1、5.2 にレイトレースシミュレーションで作成した望 遠鏡の PMT のそれぞれの視野方向を示す。



図 **5.1**: 再構成時に使用された BRM ステーションの PMT の視野方向, 青: 現行で使用している PMT の視野方向, 赤:Opt-cpter によって変更した PMT の視野方向



図 5.2: 再構成時に使用された BRM ステーションの望遠鏡一台ごとの PMT の視野方向, 青: 現行で使用している PMT の視野方向, 赤:Opt-cpter によって変更した PMT の視野方向

5.2 mono 解析による視野方向影響評価

5.2.1 影響解析手法

本解析では FD の視野方向が FD のみを用いた再構成で宇宙線パラメータへの 影響を見積もる。宇宙線観測シミュレーションを行い、同一のシミュレーションで 以下の2種類の再構成を行う。

- Opt-copter 解析での視野方向 (copter geometry) を用いた再構成
- 星解析での視野方向 (star geometry) を用いた再構成 (従来)

得られた2種類の再構成結果を比較し視野方向を変化させた際の影響を評価する。 また、宇宙線シミュレーションでは Opt-copter 解析による視野方向を用いる。こ れは、より精度の良い視野方向であるため実際の望遠鏡での観測に近づけるためで ある。解析には同一の空気シャワーイベントを解析することで、片方のみの解析で 再構成できなかったイベントによるバイアスを減らす。そのため二つの視野方向ど ちらでも再構成できた空気シャワーイベントを用いる。図 5.3 に本解析の概要図を 示す。また、一イベントごとの影響を評価するため二つの再構成できたイベント同 士を以下のように差分をとる。

$$\Delta P = P_{copter} - P_{star} \tag{5.1}$$

またエネルギーは以下のように対数変化率をとる。

$$R_E = \ln E_0^{copter} / E_0^{star} \tag{5.2}$$



図 5.3: 解析手法模式図

再構成が十分に行われないイベントはバイアスとなるためイベントセレクション を行う。以下にシミュレーション、再構成条件とイベントセレクションを示す。

シミュレーション、再構成条件

- 一次宇宙線の粒子種:陽子、鉄
- 一次宇宙線のエネルギー $E_0: 10^{18.5}, 10^{19}, 10^{19.5}, 10^{20.0} \text{eV}$
- イベント数:各エネルギーごとに 100000 イベント
- 到来方向(天頂角): 0-65 度の範囲でランダム
- 到来方向 (方位角): 0-360 度の範囲でランダム
- 観測シミュレーションでの FD 視野方向: Opt-copter 解析
- 望遠鏡ステーション: BRM ステーション
- ハドロン相互作用モデル: QGSJET II-04

イベントセレクション

• 空気シャワージオメトリ、縦方向発達が収束している

- Xmax が FD の視野内
- track length $> 10^{\circ}$
- time extent > 2 μ s
- number of PMT > 10
- 天頂角 < 55°
- $\chi^2/n.d.f. < 100$

5.2.2 影響解析結果

図 5.4~5.11 に再構成された各エネルギー、粒子種の Xmax を示す。図の左、 橙色のヒストグラムは copter geometry、右の図の緑色のヒストグラムは star geometry を用いて再構成された Xmax である。また、それらの平均と標準誤差 をまとめたものを図 5.12、表 5.3 に示す。エネルギー、粒子種ごとで全て copter geomtery を用いた再構成の Xmax の方が値が大きくなっていることがわかる。図 5.13、5.14 は一イベントの影響を見るために同一イベントの再構成結果ごとに差 分を取り、それらをヒストグラムにしたものである。またそれぞれの平均と標準 誤差をまとめたものを図 5.15、表 5.4 に示す。ΔXmax は各エネルギー、粒子種 で copter geometry で再構成した Xmax で大きくなることがわかる。またエネル ギーが大きくなると Xmax への影響が大きくなることがわかる。これは、エネル ギーが大きくなったことで観測範囲が広くなったことで視野方向の影響がより大き く Xmax に出たためだと考えられる。



図 5.4: 陽子、10^{18.5}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.5: 陽子、10^{19.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.6: 陽子、10^{19.5}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.7: 陽子、10^{20.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.8: 鉄、10^{18.5} eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.9: 鉄、10^{19.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.10: 鉄、10^{19.5}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.11: 鉄、10^{20.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.12: FD 単眼解析によって再構成された Xmax 平均. 塗りつぶされた三角形は Optcopter 解析による視野方向を用いた再構成, 塗りつぶされていない三角形は星解 析による視野方向を用いた再構成
Proton	$10^{18.5} {\rm ~eV}$	$10^{19.0} {\rm ~eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm ~eV}$
Xmax copter $[g/cm^2]$	768.3 ± 1.2	781.3 ± 1.0	786.1 ± 1.0	799.6 ± 1.3
Xmax star $[g/cm^2]$	764.5 ± 1.2	774.2 ± 1.0	778.1 ± 1.0	788.8 ± 1.3
Iron				
Xmax copter $[g/cm^2]$	675.3 ± 0.9	703.9 ± 0.8	720.9 ± 0.8	742.3 ± 0.9
Xmax star $[g/cm^2]$	672.8 ± 0.9	696.9 ± 0.8	712.0 ± 0.8	730.0 ± 0.9

表 5	5.3:	再構成された	Xmax 平均	1、標準誤差
表 5	5.3:	冉構成された	Xmax 半均	1、標準誤》



図 5.13: 陽子、1 イベントごとの再構成された Xmax の差分の分布



図 5.14: 鉄、1 イベントごとの再構成された Xmax の差分の分布



図 5.15: 二つの視野方向で再構成した Xmax の差分の平均の平均

	$10^{18.5} {\rm ~eV}$	$10^{19.0} {\rm ~eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm ~eV}$	
Δ Xmax proton [g/cm ²]	$+4.1\pm0.3$	$+7.0\pm0.2$	$+8.1\pm0.2$	$+10.7\pm0.2$	
Δ Xmax iron [g/cm ²]	$+2.6\pm0.3$	$+7.2\pm0.2$	$+9.0\pm0.2$	$+12.3\pm0.2$	

表 5.4: 二つの視野方向で再構成した Xmax の差分の平均、標準誤差.

図 5.16~5.23 に再構成された各エネルギー、粒子種のエネルギーを示す。図の 左、橙色のヒストグラムは copter geometry を用いて再構成したエネルギー、図の 右の緑のヒストグラムは star geometry を用いて再構成したエネルギーである。各 エネルギー、粒子種で比較すると、大きく変化ないことがわかる。図 5.24,5.25,5.26 はそれぞれ、陽子のエネルギー変化率、鉄のエネルギー変化率、それらの平均と標 準誤差をまとめたものである。これらから、視野方向はエネルギーに約 1% の影響 がある。



図 5.16: 陽子、10^{18.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.17: 陽子、10^{19.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.18: 陽子、10^{19.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.19: 陽子、10^{20.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.20: 鉄、10^{18.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.21: 鉄、10^{19.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.22: 鉄、10^{19.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.23: 鉄、10^{20.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 5.24: 陽子、1 イベントごとの再構成されたエネルギーの変化率分布



図 5.25: 鉄、1 イベントごとの再構成されたエネルギーの変化率分布



図 5.26: 二つの視野方向で再構成したエネルギーの変化率の平均

	$10^{18.5} {\rm ~eV}$	$10^{19.0} {\rm ~eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm ~eV}$
Ratio E_0 proton	$-1.2\pm0\%$	$-1.0\pm0\%$	$-0.7\pm0\%$	$-0.4\pm0\%$
Ratio E_0 iron	$-1.3\pm0\%$	$-1.4\pm0\%$	$-1.2\pm0\%$	$-1.0\pm0\%$
表 5.5: 二つの視	標準誤差.			

第6章

hybrid 解析における視野方向影響 解析

TA 実験では FD と SD が同じタイミングで検出された宇宙線空気シャワーイベ ントを 2 種類の検出器の情報を用い、精度の良い解析をすることができる。本解析 では TA 実験で用いられている、hybrid 解析で Opt-copter 解析による視野方向を 適用する。本章では、hybrid 解析で star geometry から copter geometry に変更 した際の影響、copter geometry を用いた際の宇宙線解析のバイアス、Opt-copter 解析による視野方向の不定性が与える宇宙線解析への影響について述べる。

6.1 影響解析

Opt-copter によって望遠鏡の視野方向が従来の解析手法より精度良く解析され た。望遠鏡の視野方向を変更した場合、現在 TA 実験で使用している星解析による 望遠鏡視野方向を用いた宇宙線解析から再構成される空気シャワーのパラメータが 変わることが考えられる。望遠鏡の視野方向のずれには個体差があるため、バイア スとして現在の解析に乗せることは難しい。さらに、従来の手法での誤差より大き いズレがある望遠鏡も Opt-copter を用いた視野方向解析によってわかった。その ため、望遠鏡の視野方向を変更しこれまでの宇宙線観測データを再解析しなければ ならない。本節では望遠鏡の視野方向を変更させた際の宇宙線再構成の影響を見積 もる。

6.1.1 解析手法

星解析による視野方向から Opt-copter 解析による視野方向に変更した際の影響 を見積もる。解析ソフトウェアでの視野方向は第 5.1 章と同様に変更させる。宇宙 線解析、観測シミュレーションは FD+SD を用いた hybrid シミュレーション、再 構成を用いる。また、解析のフローは、図 5.3 と同様に行う。以下にシミュレー ション条件、再構成条件とイベントセレクションを示す。

シミュレーション、再構成条件

- 一次宇宙線の粒子種:陽子、鉄
- 一次宇宙線のエネルギー $E_0: 10^{18.5}, 10^{19}, 10^{19.5}, 10^{20.0} \text{eV}$
- 到来方向 (天頂角): 0-70 度の範囲でランダム
- 到来方向 (方位角): 0-360 度の範囲でランダム
- 観測シミュレーションでの FD 視野方向: Opt-copter 解析
- 望遠鏡ステーション: BRM ステーション
- ハドロン相互作用モデル: QGSJET II-04

イベントセレクション

- 空気シャワージオメトリ、縦方向発達が収束している
- Xmax が FD の視野内
- number of PMT > 20
- 天頂角 < 55°

6.2 解析結果

図 6.1~6.8 に再構成された各エネルギー、粒子種の Xmax を示す。図の左、 橙色のヒストグラムは copter geometry、右の図の緑色のヒストグラムは star geometry で再構成された Xmax である。また、それらの平均と標準誤差をまとめ たものを図 6.9、表 6.1 に示す。Xmax の平均はいずれの、エネルギー、粒子種で も copter geometry で再構成した Xmax が深くなっている。超高エネルギー宇宙 線で想定されている粒子種で一番軽いものは陽子、重いものは鉄であるとされてい るため、どの粒子種の宇宙線でも Xmax は深くなることが考えられる。そのため、 実際の観測でも Xmax は深くなると考えられる。一イベントの影響を見るためそ れぞれのエネルギー、粒子種でイベントごとに差分を取ったものを、図 6.10、6.11 に示す。ヒストグラムの平均と標準誤差をまとめたものを図 6.12、表 6.2 に示す。 hybrid 解析で 10^{18.5} ~10^{20.0}eV の範囲では Xmax に +1.2~+3.5g/cm² の影響 がある。また、ΔXmax はエネルギーが大きくなると大きくなることがわかる。図 6.13 にシミュレーションで用いた空気シャワーコアポジションに ΔXmax で色付 けしたものを示す。この図から、観測される距離が遠いほど Xmax の影響が大き いことがわかる。また Opt-copter 解析による望遠鏡視野方向のそれぞれのずれが ΔXmax での影響の違いとして確認できる。

図 6.14~6.21 に再構成された各エネルギー、粒子種での一次宇宙線のエネルギー を示す。また、一イベントごとの変化率のヒストグラムにしたものを図 6.22,6.23、 6.24 に示す。それぞれ再構成されたエネルギーの平均では star geometry と copter geometry の 2 つの再構成に影響は見られない。一イベントでの変化率で見 ると、おおよそ変化率は 0% であり影響は大きくない。そのため、今回適用させた Opt-copter 解析による視野方向と、従来の星解析による視野方向で再構成される エネルギーの影響はほとんどない。



図 6.1: 陽子、10^{18.5}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.2: 陽子、10^{19.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.3: 陽子、10^{19.5}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.4: 陽子、10^{20.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野 方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.5: 鉄、10^{18.5} eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.6: 鉄、10^{19.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.7: 鉄、10^{19.5} eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.8: 鉄、10^{20.0}eV での再構成された Xmax 分布. 左図:Opt-copter 解析による視野方 向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.9: hybrid 解析によって再構成された Xmax 平均. 塗りつぶされた 3 角形は Optcopter 解析による視野方向を用いた再構成, 塗りつぶされていない 3 角形は星解析 による視野方向を用いた再構成

Proto	n	$10^{18.5}~{\rm eV}$	$10^{19.0} {\rm ~eV}$	$10^{19.5}~{\rm eV}$	$10^{20.0}~{\rm eV}$
Xmax copter $[g/cm^2]$	2]	751.8 ± 0.6	777.5 ± 0.4	799 ± 0.3	822.3 ± 0.3
$X max star [g/cm^2]$	2]	750.5 ± 0.6	775.1 ± 0.4	795.8 ± 0.3	818.8 ± 0.3
Iro	n				
Xmax copter $[g/cm^2]$	2]	666 ± 0.4	687.1 ± 0.2	715.5 ± 0.2	733.7 ± 0.2
$Xmax star [g/cm^2]$	2]	664.8 ± 0.4	684.9 ± 0.2	712.4 ± 0.2	730.5 ± 0.2

表 6	.1:	再構成された	Xmax 平均、	標準誤差



図 6.10: 陽子、1 イベントごとの再構成された Xmax の差分の分布



図 6.11: 鉄、1 イベントごとの再構成された Xmax の差分の分布



83

0

 $^{-10}$

	$10^{18.5} {\rm eV}$	$10^{19.0}~{\rm eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm ~eV}$
Proton $\Delta \text{ Xmax } [\text{g/cm}^2]$	$+1.3\pm0.1$	$+2.4\pm0.0$	$+3.3\pm0.0$	$+3.5\pm0.0$
Iron Δ Xmax [g/cm ²]	$+1.2 \pm 0.1$	$+2.2\pm0.0$	$+3.1\pm0.0$	$+3.2\pm0.0$

表 6.2: 二つの視野方向で再構成した Xmax の差分の平均、標準誤差.





- 5.0

- 2.5

0

-10

図 6.13: シミュレーションで使用された宇宙線のコアポジションに ΔXmax で色付けした プロット

5.0

2.5

0.0



図 6.14: 陽子、10^{18.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.15: 陽子、10^{19.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.16: 陽子、10^{19.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.17: 陽子、10^{20.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による 視野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.18: 鉄、10^{18.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.19: 鉄、10^{19.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.20: 鉄、10^{19.5}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.21: 鉄、10^{20.0}eV での再構成されたエネルギー分布. 左図:Opt-copter 解析による視 野方向を用いた再構成、右図: 星解析による視野方向を用いた再構成



図 6.22: 陽子、1 イベントごとの再構成されたエネルギーの変化率分布



図 6.23:鉄、1 イベントごとの再構成されたエネルギーの変化率分布



図 6.24: 二つの視野方向で再構成したエネルギーの変化率の平均

	$10^{18.5} {\rm ~eV}$	$10^{19.0}~{\rm eV}$	$10^{19.5}~{\rm eV}$	$10^{20.0}~{\rm eV}$
Ratio E_0 proton	$-0.1\pm0\%$	$-0\pm0\%$	$0.2\pm0\%$	$0.2\pm0\%$
Ratio E_0 iron	$-0.1\pm0\%$	$0\pm0\%$	$0.1\pm0\%$	$0.2\pm0\%$
表 6.3: 二つの視野	方向で再構成し†	モエネルギーの	変化率の平均	、標準誤差.

6.3 バイアス

宇宙線空気シャワー解析で得られる宇宙線パラメータにはシミュレーションで得 られる宇宙線パラメータの真値とのバイアスがある。バイアスは検出器受入バイア スと再構成バイアスの2種類ある。検出器受入バイアスはトリガーアルゴリズムや 物理的な検出器の設計、応答により影響を受ける。再構成バイアスは検出器の動作 条件、クオリティカット、質量組成、ハドロンモデルの依存性、モンテカルロ法に よる検出器と空気シャワーのモデル化に影響されるバイアスである。Opt-copter では FD の光学特性を更新した。そのため、宇宙線解析でのバイアスが変化する可 能性があるため copter geometry を用いた際のバイアスについて検討する。本節 では hybrid 解析での Opt-copter による望遠鏡光学特性を用いた際の宇宙線シャ ワーへのバイアスについて述べる。

6.3.1 解析手法

宇宙線解析のバイアスを求めるために、あらかじめわかっている宇宙線シミュ レーションのパラメータと再構成されたパラメータとの比較をする。空気シャワー シミュレーションを再構成し、再構成されたイベントに対し、X_{recon} – X_{simu} を行 う。またエネルギーについては、(E_{recon} – E_{simu})/E_{simu} を行う。X_{recon} は再構成 された空気シャワーのパラメータで、X_{recon} はモンテカルロシミュレーションで 得られた空気シャワーの真値である。また、得られた値の分布の平均をバイアス、 標準偏差を分解能とする。以上のことについて 3 種類の解析を行う。概念図を図 6.25 に示す。

- 1. Opt-copter 解析による望遠鏡の視野方向を用いた観測シミュレーション Opt-copter 解析による望遠鏡の視野方向を用いた宇宙線再構成
- 2. Opt-copter 解析による望遠鏡の視野方向を用いた観測シミュレーション -星解析による望遠鏡の視野方向を用いた宇宙線再構成

3. 星解析による望遠鏡の視野方向を用いた観測シミュレーション 星解析による望遠鏡の視野方向を用いた宇宙線再構成

1 は実際の観測データを Opt-copter geometry を用いて再構成する際に使用する バイアスで、2 は実際の観測データを star geometry を用いて再構成する際に使用 するバイアス、3 は現在用いているバイアスである。またシミュレーション、再構 成条件、クオリティカットは 6.1.1 同様に行う。



図 6.25: バイアス解析模式図

6.3.2 結果

図 6.26~6.33 に各粒子種、エネルギーでの Xmax の決定精度を示す。これらは 上記の手法 1~3 で再構成された結果を示しており、図の左列は手法 1 のシミュ レーションと再構成に copter geometry、中央列は手法 2 のシミュレーションに copter geometry、再構成に star geometry、右列は手法 3 のシミュレーションと 再構成に star geometry を用いたものである。図 6.34 は以上のバイアスを、表 6.4 はバイアスと分解能をまとめたものを示す。手法の 1 と 3 での比較は現行用いて いるバイアスと新たに使用するバイアスとの違いを示す。本解析で用いた視野方 向が異なる宇宙線解析のバイアスは顕著な差異がないことがわかる。手法の2と3 での比較では現行用いているバイアスと、現在行われている再構成に乗せなければ いけないバイアスとの比較である。星解析の視野方向を用いた際のバイアスは現在 採用している手法3のバイアスより大きくなり、Xmax は実際より浅く見積もっ ている。図 6.35~6.42 に各粒子種、エネルギーでの一次宇宙線のエネルギーの決 定精度を示す。また図 6.43 は以上のバイアスを、表 6.5 はバイアスと分解能をま とめたものを示す。本解析で用いた手法 1~3 ではエネルギーのバイアスは違いが ないことがわかる。これは star geometry と copter geometry での再構成にエネ ルギーバイアスの差はないことを示す。



図 6.26: 陽子、10^{18.5}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.27: 陽子、10^{19.0}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.28: 陽子、10^{19.5}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.29: 陽子、10^{20.0}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.30: 鉄、10^{18.5}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.31: 鉄、10^{19.0}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.32: 鉄、10^{19.5}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.33: 鉄、10^{20.0}eV での Xmax バイアス. 左図から手法 1,2,3 の Xmax バイアスである.



図 6.34: 視野方向を変化させた際の Xmax のバイアス

Proton	$10^{18.5} {\rm ~eV}$	$10^{19.0}~{\rm eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm ~eV}$
$Xmax_{copter}^{rec} - Xmax_{copter}^{sim} [g/cm^2]$	-0.3 ± 29.4	-1.0 ± 29.1	-5.1 ± 30.9	-14.1 ± 38.2
$\rm Xmax^{rec}_{copter} - \rm Xmax^{sim}_{star} \ [g/cm^2]$	-1.6 ± 30.1	-3.5 ± 29.4	-8.4 ± 30.7	-17.6 ± 37.7
$Xmax_{star}^{rec} - Xmax_{star}^{sim} [g/cm^2]$	-0.8 ± 29.3	-1.0 ± 29.2	-5.0 ± 30.8	-14.0 ± 38.3
Iron				
$Xmax_{copter}^{rec} - Xmax_{copter}^{sim} [g/cm^2]$	-3.6 ± 27.1	-6.6 ± 26.4	-9.5 ± 27.8	-14.5 ± 33.2
$\rm Xmax^{rec}_{copter} - \rm Xmax^{sim}_{star} \ [g/cm^2]$	-4.7 ± 27.7	-8.8 ± 26.7	-12.6 ± 27.7	-17.7 ± 32.3
$\rm Xmax_{star}^{rec} - \rm Xmax_{star}^{sim} \ [g/cm^2]$	-2.8 ± 27.7	-6.3 ± 26.4	-9.4 ± 28.1	-14.3 ± 33.2

表 6.4: 視野方向を変化させた際の Xmax のバイアス、分解能



図 6.35: 陽子、10^{18.5}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイ アスである.



図 6.36: 陽子、10^{19.0}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイ アスである.



図 6.37: 陽子、10^{19.5}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイ アスである.



図 6.38: 陽子、10^{20.0}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイ アスである.



図 6.39: 鉄、10^{18.5}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイア スである.



図 6.40: 鉄、10^{19.0}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイア スである.



図 6.41: 鉄、10^{19.5}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイア スである.



図 6.42: 鉄、10^{20.0}eV でのエネルギーバイアス. 左図から手法 1,2,3 のエネルギーバイア スである.



図 6.43: 視野方向を変化させた際のエネルギーのバイアス

Proton	$10^{18.5} {\rm ~eV}$	$10^{19.0} {\rm ~eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm eV}$
$\operatorname{Sim}_{\operatorname{Copter}}, \operatorname{Rec}_{\operatorname{Copter}}$	$+2.0 \pm 8.8\%$	$+0.4\pm8.1\%$	$-2.2\pm9.7\%$	$-5.5\pm13.9\%$
$\mathrm{Sim}_{\mathrm{Copter}}, \mathrm{Rec}_{\mathrm{Star}}$	$+2.2 \pm 8.9\%$	$+0.3\pm8.0\%$	$-2.3\pm9.7\%$	$-5.8\pm13.8\%$
$\mathrm{Sim}_{\mathrm{Star}}, \mathrm{Rec}_{\mathrm{Star}}$	$+2.1 \pm 8.8\%$	$+0.5\pm0.8\%$	$-2.1\pm9.7\%$	$-5.4\pm13.7\%$
Iron				
$\operatorname{Sim}_{\operatorname{Copter}}, \operatorname{Rec}_{\operatorname{Copter}}$	$-7.3\pm7.3\%$	$-7.3\pm6.5\%$	$-7.7\pm8.2\%$	$-9.6\pm12.1\%$
$\mathrm{Sim}_{\mathrm{Copter}}, \mathrm{Rec}_{\mathrm{Star}}$	$-7.3\pm7.3\%$	$-7.4\pm6.5\%$	$-7.8\pm8.1\%$	$-9.8\pm12.0\%$
$\mathrm{Sim}_{\mathrm{Star}}, \mathrm{Rec}_{\mathrm{Star}}$	$-7.5\pm7.4\%$	$-7.3\pm6.6\%$	$-7.6\pm8.1\%$	$-9.4\pm11.9\%$

表 6.5: 視野方向を変化させた際のエネルギーのバイアス、分解能

6.4 不定性

宇宙線解析の不定性は、装置のモデリング、大気状態、蛍光効率の較正や再構成 アルゴリズムにより生じる。第4.3.3 章で述べた通り、Opt-coprter により視野方 向解析の決定精度が±0.03 度となった。そのため、Opt-copter を用いた視野方向 解析の不定性が与える宇宙線解析への不定性を見積もる。

6.4.1 解析手法

Opt-copter を用いた望遠鏡視野方向解析の不定性 (±0.03°) が与える宇宙線解 析への不定性を見積もる。解析は宇宙線観測シミュレーションを copter geometry で再構成したものと copter geometory に解析の不定性を加えたものでの再構成を 行う。その概要図を、図 6.44 に示す。視野方向の不定性は +0.03° 加えたものと、 -0.03° を加えた 2 種類を用いる。望遠鏡視野方向は天頂角、方位角で表されるた め、不定性に +0.03° を適用させた際、望遠鏡視野は下がり、-0.03° を適用させた 際、望遠鏡視野は上がる。不定性を含めていない coptger geometry と望遠鏡視野 方向に不定性を加えたものの、どちらも再構成できたイベントを解析に用い、一イ ベントごとの差分をヒストグラムにし不定性を見積もる。またシミュレーション、 再構成条件、クオリティカットは 6.1.1 同様に行う。



図 6.44: 視野方向不定性が与える宇宙線解析への不定性解析模式図

6.4.2 結果

図 6.45~6.52 に各粒子種、エネルギーでの Xmax の不定性を示す。図の左列は 視野方向の不定性の影響を表しており、望遠鏡視野方向の不定性に +0.03°を適 用し解析したもの、右列は -0.03°を適用したものである。また各粒子種、エネル ギーでまとめたものを図 6.53、表 6.6 を示す。視野方向の不定性に +0.03°適用さ せたときは望遠鏡の視野は下がり、Xmax は深くなる傾向が見られる。一方で、不 定性に +0.03°適用させたときは視野の仰角は上がり、Xmax は浅くなる傾向が示 された。望遠鏡視野方向の不定性である ±0.03° での Xmax の不定性は 10^{18.5}~ 10^{20.0} eV を用いた際 ±0.9~±1.5 g/cm² である。図 6.54~6.61 に各粒子種、エ ネルギーでの一次宇宙線のエネルギーの不定性を示す。図の左列は望遠鏡視野方向 の不定性に +0.03°を適用し解析したもの、右列は -0.03°を適用したものである。 視野方向の不定性が与える一次宇宙線のエネルギーへ与える影響は小さく、結果と してエネルギーの不定性は 0% である。



図 6.45: 陽子、10^{18.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.46: 陽子、10^{19.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.47: 陽子、10^{19.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.48: 陽子、10^{20.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.49: 鉄、10^{18.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の 不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用さ せたものである.



図 6.50: 鉄、10^{19.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の 不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用さ せたものである.



図 6.51: 鉄、10^{19.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の 不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用さ せたものである.



図 6.52: 鉄、10^{20.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性. 左図は視野方向の 不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用さ せたものである.


図 6.53: 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性

Proton	$10^{18.5} {\rm eV}$	$10^{19.0}~{\rm eV}$	$10^{19.5} {\rm ~eV}$	$10^{20.0} {\rm eV}$
$\Delta X max_{copter+0.03} [g/cm^2]$	$+1.0\pm0.0$	$+1.2\pm0.0$	$+1.4\pm0.0$	$+1.5\pm0.0$
$\Delta Xmax_{copter-0.03} \ [g/cm^2]$	-1.0 ± 0.0	-1.2 ± 0.0	-1.4 ± 0.0	-1.5 ± 0.0
Iron				
$\Delta X max_{copter+0.03} [g/cm^2]$	$+0.9\pm0.0$	$+1.1\pm0.0$	$+1.3\pm0.0$	$+1.4\pm0.0$
$\Delta X max_{copter-0.03} [g/cm^2]$	-0.9 ± 0.0	-1.2 ± 0.0	-1.3 ± 0.0	-1.4 ± 0.0

表 6.6: 望遠鏡視野方向の不定性要因の Xmax 不定性、標準誤差



図 6.54: 陽子、10^{18.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用させたものである.



図 6.55: 陽子、10^{19.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用させたものである.



図 6.56: 陽子、10^{19.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03°適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03°適用させたものである.



図 6.57: 陽子、10^{20.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用させたものである.



図 6.58: 鉄、10^{18.5}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.59: 鉄、10^{19.0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.60: 鉄、10^{19.5} eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用 させたものである.



図 6.61: 鉄、10^{20.5¥0}eV, 望遠鏡視野方向の不定性要因のエネルギー不定性. 左図は視野方向の不定性に +0.03° 適用させたもので、右図は視野方向の不定性に -0.03° 適用させたものである.

第7章

結論

7.1 まとめ

大気蛍光望遠鏡 (FD) の光学特性の較正装置として、ドローンに光源と即位用 GPS モジュールを搭載した Opt-copter が開発され、望遠鏡の視野方向が ±0.03° の決定精度で解析された。宇宙線解析に Opt-copter によって解析された視野方向 適用した。mono 解析では現行用いている星解析による視野方向を用いた再構成か ら Opt-copter による視野方向に変更した際の影響の見積もった。シミュレーショ ンで用いたエネルギーが $10^{18.5} \sim 10^{20.0}$ eV の時、Xmax に $+2.6 \sim +12.3$ g/cm²、 エネルギーに約1 % の影響がある。hybrid 解析では現行用いている星解析による 視野方向を用いた再構成から Opt-copter による視野方向に変更した際の影響は、 $10^{18.5} \sim 10^{20.0}$ eV の時、Xmax に $+1.2 \sim +3.5$ g/cm²、エネルギーの影響は程んど ない。また視野方向を変化させた際の宇宙線解析でのバイアスと望遠鏡視野方向 の不定性が与える宇宙線解析への不定性を見積もった。望遠鏡視野方向の不定性 が与える宇宙線解析への不定性は $10^{18.5} \sim 10^{20.0}$ eV の時、Xmax に $\pm 0.9 \sim \pm 1.5$ g/cm²、エネルギーは 0% である。

7.2 展望

Opt-copter を用いた光学特性解析では集光に関するパラメータである SSP とミ ラーの曲率半径も解析されている。この二つを含めた宇宙線解析への影響を見積も る必要がある。現在 Opt-copter を用いた実験は TA サイトの全ての望遠鏡で行な われており、BRM と LR の望遠鏡は解析が行なわれている。そのため、望遠鏡ス テーション間での解析の系統誤差を新たに見積もる必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、数多くのご助言、ご支援いただきました全ての方々に 感謝いたします。研究活動にあたり日頃から熱心に御指導いただきました冨田孝幸 助教に深く感謝いたします。毎週の Opt-copter ミーティングで様々な御指導をし てくださった大阪電気通信大学の多米田裕一郎准教授に深く感謝いたします。東京 大学宇宙線研究所の藤田慧太郎研究員には研究の丁寧な指導やユタでの生活や仕事 を教えていただきました。大阪公立大学の Fraser William Bradfield 氏には英語 を教えていただいたり、学会や出張で楽しい思い出を作れました。同期の水野航太 氏にはいろいろなことを教えてもらいました。やりたくないことや行きたくないと ころも、こうたがいたからやろうと思えることもありました。Opt-copter グルー プとして松澤碧くんにはユタでの実験や研究の議論で切磋琢磨しました。フィール ド実験ではとても頼りになりました。これからも頑張ってください。研究室の、小 磯光氏、小松晃一氏、中山翼氏、斎藤温氏、服部拓彦氏、高山太志氏、高原直希氏 には楽しい研究室ライフを送れました。TA 実験のコラボレーターの皆様にはイン ナーミーティングでの指導や実験の手伝いをしていただきました。心から感謝致し ます。最後に、ここまで支えてくださった家族に深く感謝いたします。