

令和5年度 卒業論文

# 大気蛍光望遠鏡の光学特性と 宇宙線解析におけるその影響



提出者

信州大学 工学部 電気電子システム工学科

佐藤 大輝

2023年1月30日提出

# 序論

宇宙線とは宇宙空間を飛び交っている高エネルギーの放射線である。宇宙線の主な成分は陽子であり、さまざまな原子核を含んでいる。また、宇宙線は地球にも絶えず到来しており、さまざまな観測、実験が行われている。これまで、 $10^8$  eV～ $10^{20}$  eV を超える広い範囲の宇宙線が観測されており、宇宙線の到来頻度はエネルギーの約 3 乗に比例し、エネルギーが高くなるにつれ減少する。その中でも  $10^{18}$  eV を超える宇宙線は、超高エネルギー宇宙線と呼ばれており、銀河系内磁場の影響による偏向が小さいとされており、到来方向と起源天体との相関が見られると期待されている。

Telescope Array(TA) 実験では超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルや質量組成、起源天体の予測を目的として超高エネルギー宇宙線を観測している。観測には 3 箇所に設置された大気蛍光望遠鏡 (FD) と多数の地表検出機 (SD) を用いている。大気蛍光望遠鏡は宇宙線空気シャワーから発生する大気蛍光を観測している。大気蛍光法によって宇宙線空気シャワーをより正確に再構成するには FD の感度較正や大気状態のモニターが重要である。

そこで、FD の光学特性の較正、把握のために Opt-copter が開発された。Opt-copter はドローンに光源を搭載した装置で、FD の視野上の任意の位置に飛行させることができる。これまで、Opt-copter によって FD の正確な視野方向が解析された。本論文ではより正確な FD の視野方向が宇宙線空気シャワーの再構成にどのような影響があるか報告する。

# 目次

|              |                                       |           |
|--------------|---------------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章</b> | <b>宇宙線</b>                            | <b>1</b>  |
| 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         |
| <b>第 2 章</b> | <b>Telescope Array 実験</b>             | <b>4</b>  |
| 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         |
| <b>第 3 章</b> | <b>望遠鏡の較正</b>                         | <b>9</b>  |
| 3.1          | CRAYS . . . . .                       | 9         |
| 3.2          | YAP . . . . .                         | 10        |
| 3.3          | Xe-フラッシャー . . . . .                   | 11        |
| 3.4          | XY-スキャナー . . . . .                    | 11        |
| 3.5          | UV-LED パルサー . . . . .                 | 12        |
| 3.6          | CLF . . . . .                         | 13        |
| <b>第 4 章</b> | <b>ドローン搭載型光源「Opt-copter」</b>          | <b>15</b> |
| 4.1          | Opt-copter 構成 . . . . .               | 16        |
| 4.1.1        | UAV Unmanned Aerial Vehicle . . . . . | 16        |
| 4.1.2        | 光源 . . . . .                          | 16        |
| 4.1.3        | 即位用 RTK-GPS モジュール . . . . .           | 17        |
| 4.2          | TA 実験サイトでの Opt-copter 観測 . . . . .    | 18        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 4.2.1        | 試験概要                                     | 18        |
| 4.2.2        | 光源位置                                     | 20        |
| 4.2.3        | 受光重心位置                                   | 20        |
| 4.3          | 視野方向解析                                   | 22        |
| 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          | 22        |
| 4.3.2        | FD の受光量重心と光源位置による視野方向解析                  | 26        |
| <b>第 5 章</b> | <b>2019 年観測データにおける PMT 輪郭探索による視野方向解析</b> | <b>29</b> |
| 5.1          | PMT 境界での総受光量の減少を用いた視野方向解析手法              | 29        |
| 5.1.1        | PMT の輪郭とスポットサイズの関係                       | 30        |
| 5.1.2        | 視野方向差の定量化                                | 31        |
| 5.2          | 解析結果                                     | 32        |
| <b>第 6 章</b> | <b>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</b>    | <b>34</b> |
| 6.1          | 空気シャワー生成シミュレーション                         | 34        |
| 6.1.1        | 縦方向発達曲線の決定                               | 35        |
| 6.1.2        | 大気蛍光発光                                   | 36        |
| 6.1.3        | チェレンコフ光                                  | 37        |
| 6.1.4        | 散乱チェレンコフ光                                | 37        |
| 6.2          | 検出機シミュレーション                              | 38        |
| 6.3          | イベント再構成ソフトウェア                            | 41        |
| 6.3.1        | 解析に使用する PMT の選別                          | 41        |
| 6.3.2        | 空気シャワー到来方向の再構成                           | 47        |
| 6.3.3        | 縦方向発達再構成 - 逆モンテカルロ法                      | 50        |
| <b>第 7 章</b> | <b>FD の視野方向が与える宇宙線空気シャワー解析への影響</b>       | <b>54</b> |
| 7.1          | 解析手法                                     | 54        |
| 7.1.1        | 解析ソフトウェアでの視野方向                           | 55        |
| 7.1.2        | シミュレーション条件とイベントセレクション                    | 60        |
| 7.1.3        | 解析結果                                     | 61        |
| <b>第 8 章</b> | <b>結論</b>                                | <b>66</b> |
| 8.1          | まとめ                                      | 66        |
| 8.2          | 今後の展望                                    | 66        |

第 9 章 謝辭

67

# 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り、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、 $10^8$  eV から  $10^{20}$  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  $10^{10}$  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、そこから  $\gamma \approx 3.1$  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  $\gamma$  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電波の変化が関係しているのではないかと考えられている。

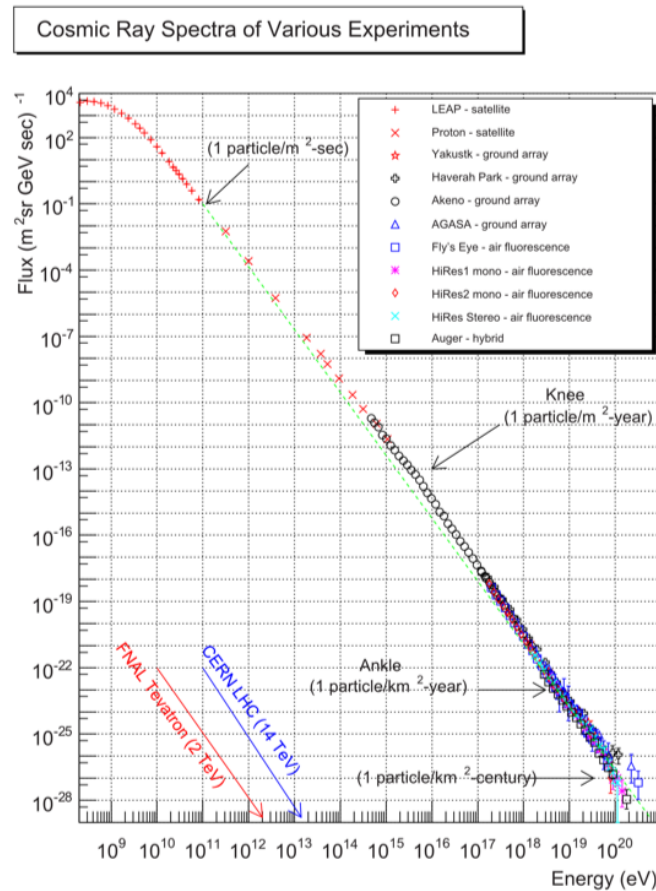


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル

### 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

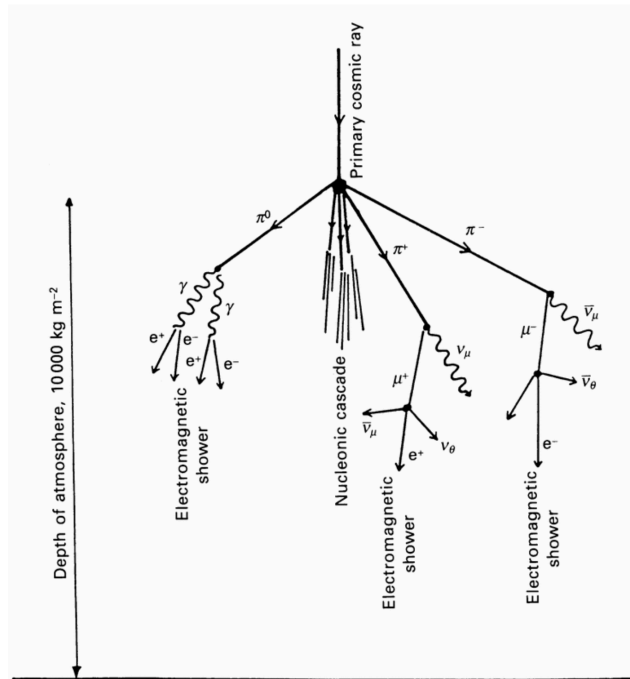


図 1.2: 空気シャワー現象の模式図

宇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、 $10^{14}$  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

# Telescope 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 台の地表検出機 (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軍、北緯 39 度、西経 113 度、平均標高 1400m(大気深さ  $875 \text{ g/cm}^2$ ) 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 間隔であれ以上に配置され、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 つの検出機の宇宙線観測を行うことで、両検出機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家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

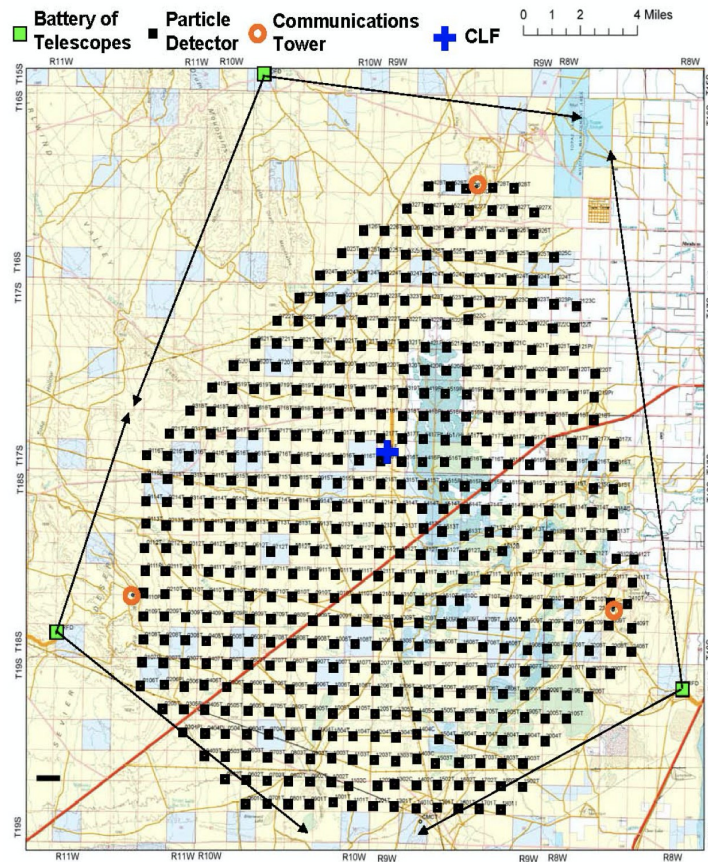


図 2.1: TA 実験における実験装置の配置

ムアレイ状に並んだ PMT カメラに入稿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

BR 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  $Al_2O_3$  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  $16 \times 16$  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  $1 \times 1$  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 2.7 に示す。

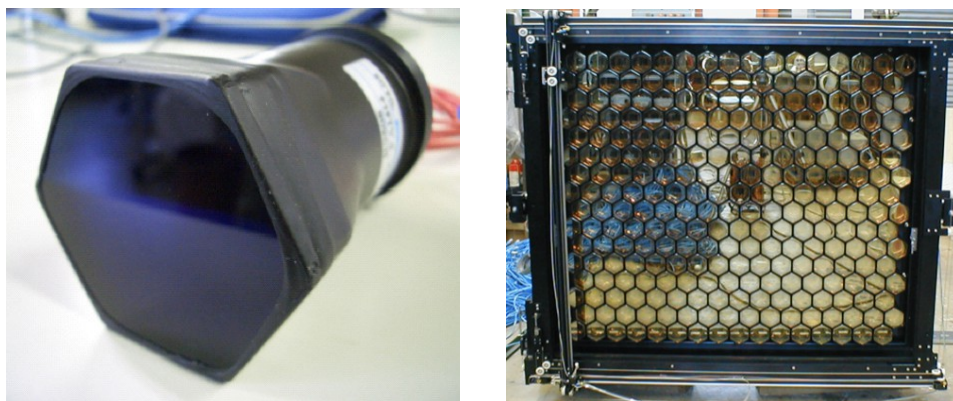


図 2.3: 使用している PMT とカメラボックス

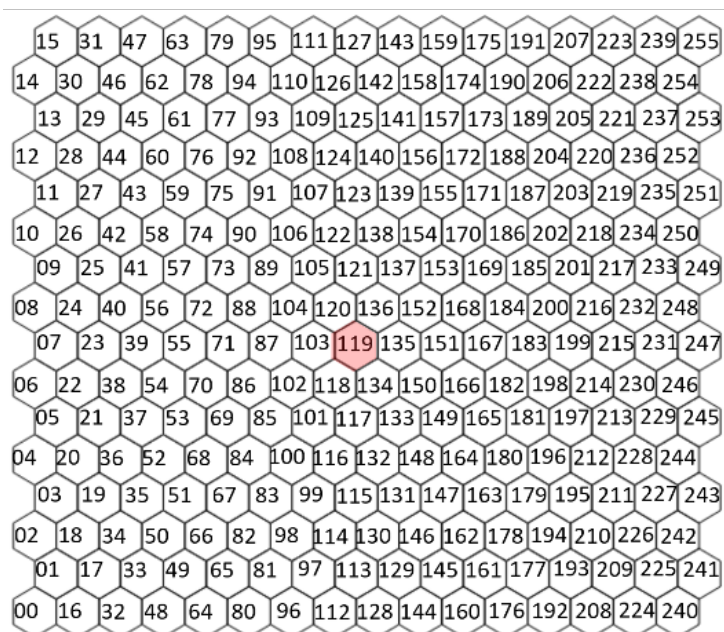


図 2.4: PMT 番号

### 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 bit 40 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

bin(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、飛跡信号が合った場合データ取得信号を生成する。またステーション内、全ての FD を動悸させるための初期化信号の生成も行う。

## 第3章

# 望遠鏡の較正

大気蛍光法を用いた空気シャワー観測によって、一次宇宙線のエネルギーを高い精度で推定するにはFDの感度較正や、大気状態のモニターが重要になる。そのためには、PMTに入射した光子数や、大気蛍光効率を考慮し大気中の空気シャワーの粒子分布を算出する必要があり、さらにエレクトロニクスの応答や各部の増幅率、量子効率、望遠鏡光学系の反射率、透過率などを予め感度良く把握しておかなければならない。そのため、TA実験では以下のような望遠鏡光学系の較正や大気モニターを行っている。

### 3.1 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PMTを構成する。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337.1nm、光量は300nJ/pulse、パルス幅は4 $\mu$ 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 $\pm 5\%$ 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の概観を図3.1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 $\pm 8\%$ と見積もられ

ている。

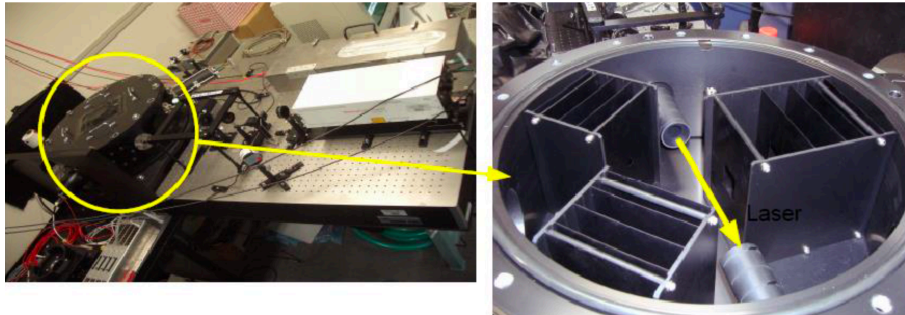


図 3.1: CRAYS の概観

## 3.2 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り、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。YAP は  $YAlO_3:Ce$  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カウム-241( $^{241}Am$ ) $\alpha$  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  $\pm 5\%$  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 の概観を図 3.2 に示す。

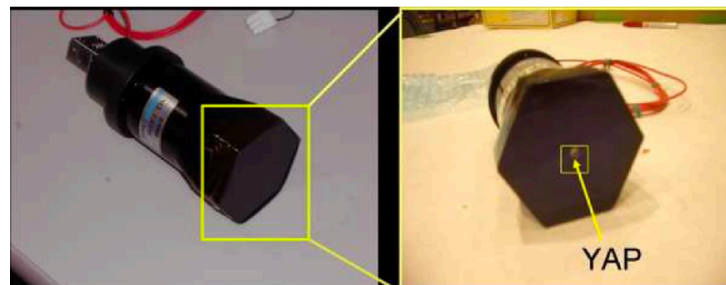


図 3.2: YAP の概観

### 3.3 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 $2\mu\text{sec}$ 、光量 $2 \times 10^4$  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3.3に示す。



図 3.3: Xe-フラッシャーの照射イメージ

### 3.4 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4mm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、 $QE \times CE \times PMT\text{gain}$ 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30mm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61mm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る。XY-スキャナーは実測取り付け制度の系統誤差が  $\pm 2\text{mm}$ 、位置決定精度の系統誤差が  $\pm 0.1\text{mm}$  となる。

この装置に搭載されている UV-LED 光源は波長  $365 \pm 10\text{nm}$  の単色光を発生し、そのパルス幅は  $400\text{nm}$ 、スポットサイズは  $3.83\text{mm}(1.65\sigma, 90\%)$ 、光量は約  $1000\text{pe/pulse}$  である。不均一測定は UV-LED 光源をカメラ有効感度面上を  $4\text{mm}$  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 3.4 に示す。

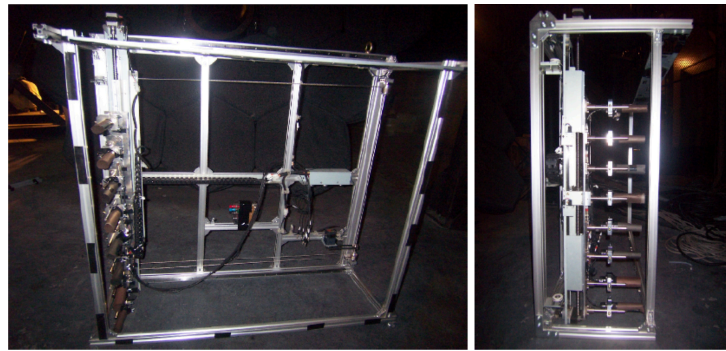


図 3.4: XY-スキャナーの概観

### 3.5 UV-LED パルサー

UV-LED パルサーモジュールは PMT カメラのゲイン較正に用いられ、複合球面鏡中心にある穴にマウントして使用される。マウントには ON/OFF 可能な磁石を用いて固定し、さらに C クランプで固定する。また、取り外し可能な  $521\text{mm}$  の長さの Extension があり、カメラとの距離を 2 種類設定可能である。UV-LED パルサーの外観を図 3.5 に示す。また、UV-LED パルサーは PC からコマンドで操作する。

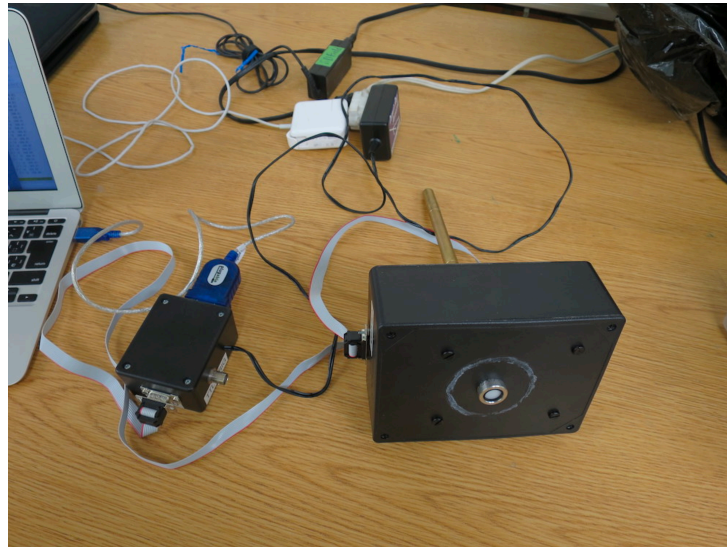


図 3.5: UV-LED パルサーの概観

### 3.6 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 3.6 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  $\alpha_{mie}$  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。

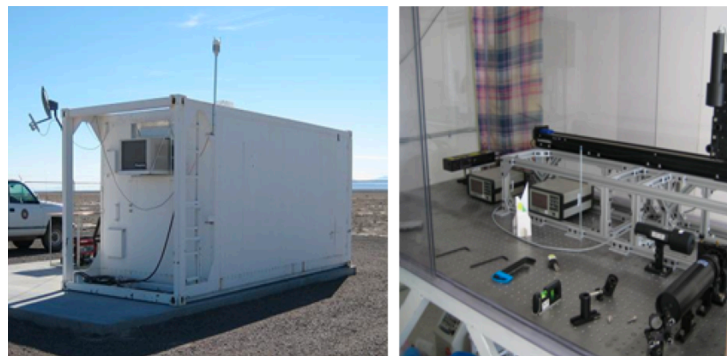


図 3.6: CLF の概観と光学系

## 第4章

# ドローン搭載型光源 「Opt-copter」

TelescopeArray 実験は観測から 10 年以上が経ちより高精度の観測が必要となった。そこで従来より高精度な望遠鏡の較正装置として、位置が正確にわかり、光源を望遠鏡の視野内の任意な位置に設定可能な装置としてドローンに光源と測位 GPS を搭載したドローン搭載型光源が開発された。この飛行型標準光源を我々は「Optics(光学)」と「Octocopter(8 枚羽のマルチコプター)」から「Opt-copter」と呼んでいる。図 4.1 に Opt-copter の外観図を示す。Opt-copter は宇宙線が引き起こす大気蛍光の代わりに、この装置が発する光を望遠鏡から観測することで望遠鏡に視野方向のズレをはじめとした様々な光学特性を把握することができる。

本章では「Opt-copter」の構成および試験、視野方向解析について述べる。



図 4.1: Opt-copter 外観図

## 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 Technik 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  $10\mu sec$  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ュ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。

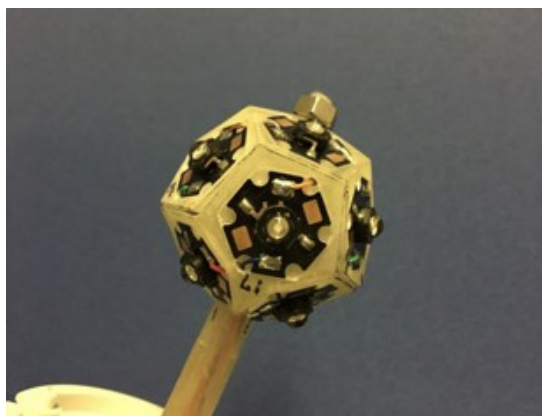


図 4.2: LED を搭載した正十二面体光源



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。

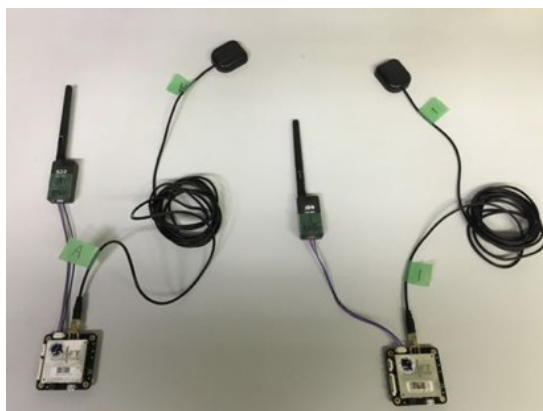


図 4.4: RTK-GPS モジュール piksi

## 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  $\mu$ sec

**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10Hzで位置の測位を続け、光源は発光頻度10~30Hz、パルス幅10 $\mu$ sec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。

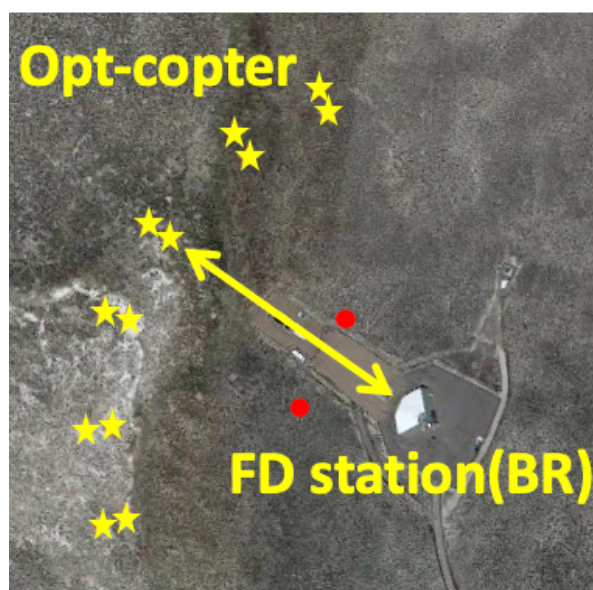


図 4.5: BR ステーションの鳥瞰図

星印はFDから300m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。

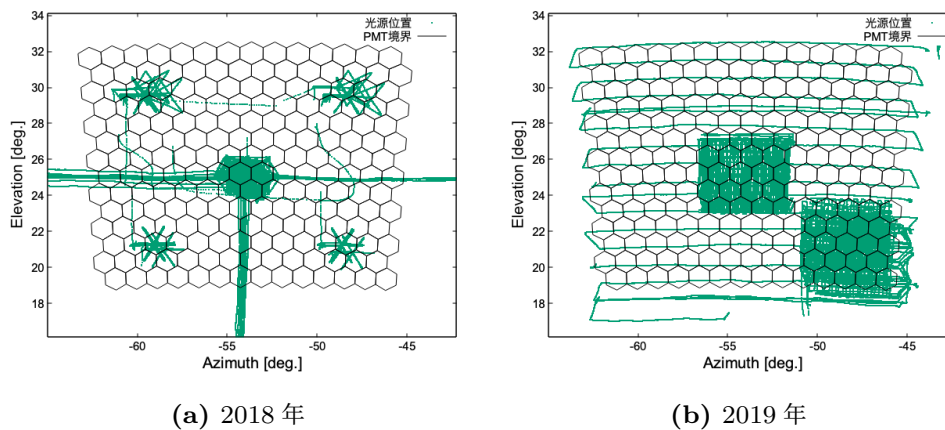


図 4.7: FD1 台分の FD 視野上に投影した光源位置

### 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  $3\sigma$  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。

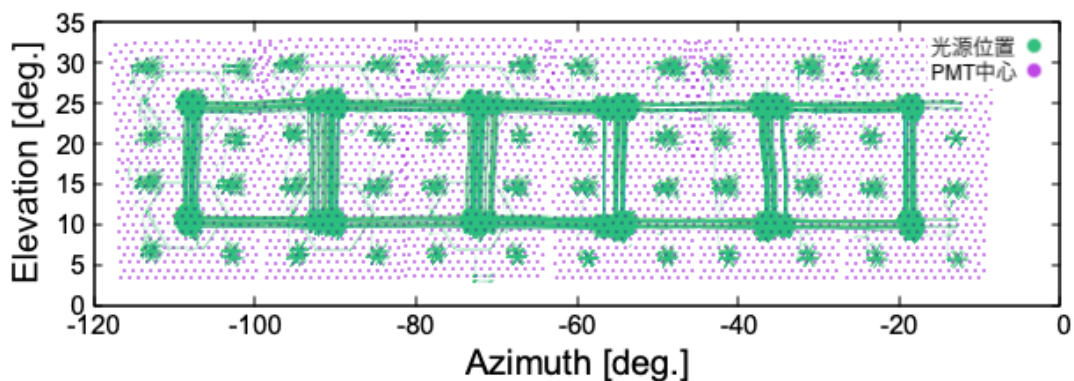


図 4.8: 2018 年の全フライトを FD 視野上に投影した光源位置

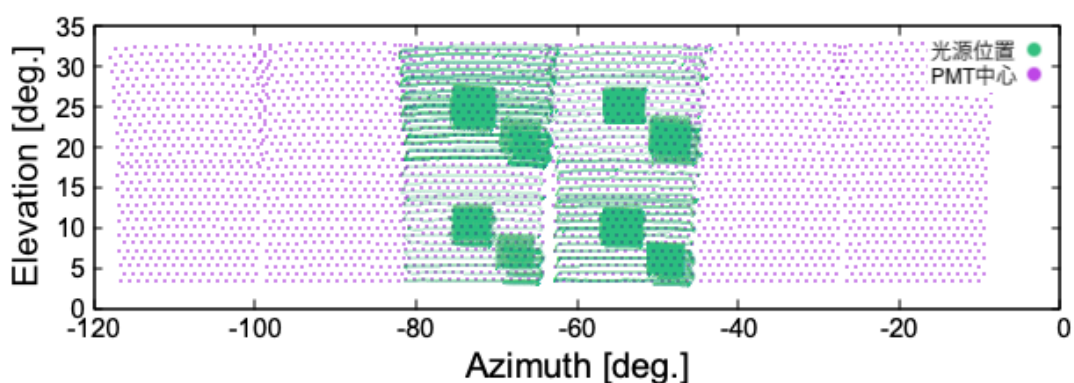


図 4.9: 2019 年のフライトを FD 視野上に投影した光源位置

$$Azi_{.cog} = \frac{\sum_i N_{pmt_i} Azi_{.pmt_i}}{\sum_i N_{pmt_i}} \quad Ele_{.cog} = \frac{\sum_i N_{pmt_i} Ele_{.pmt_i}}{\sum_i N_{pmt_i}} \quad (4.1)$$

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。

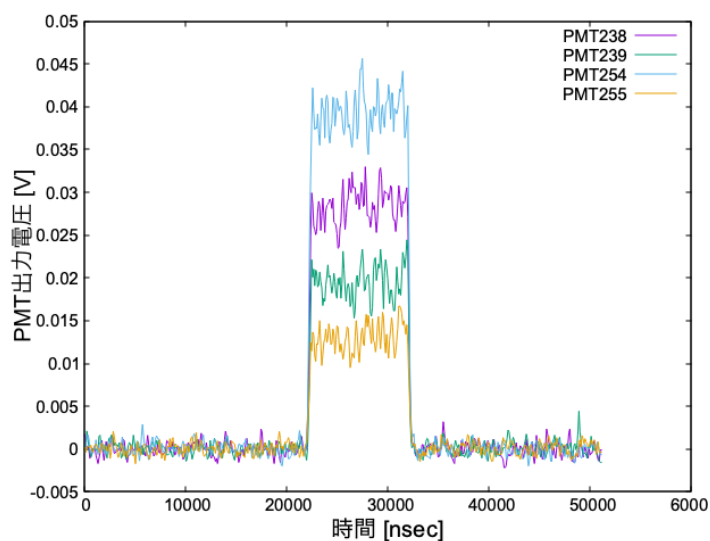


図 4.10: 光源の光を検出した PMT の出力電圧

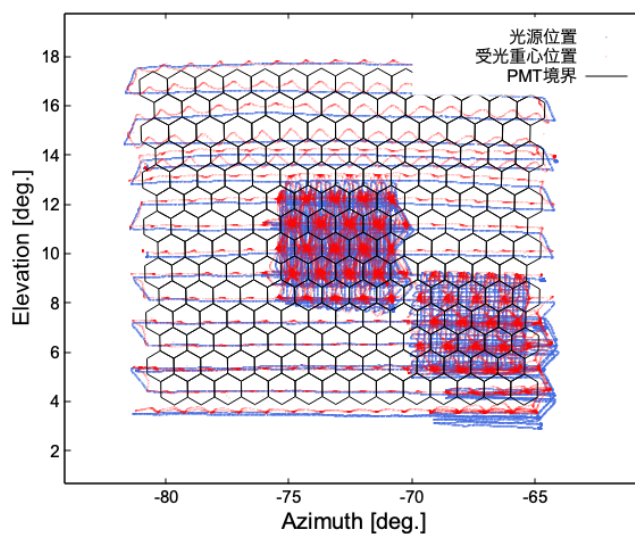


図 4.11: 光源位置と受光重心位置

## 4.3 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

#### 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  $0.01^\circ$  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。

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

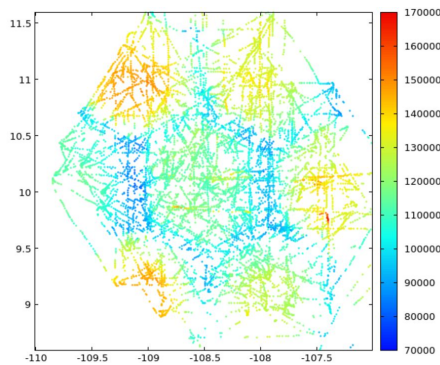


図 4.12: FD01: オリジナル

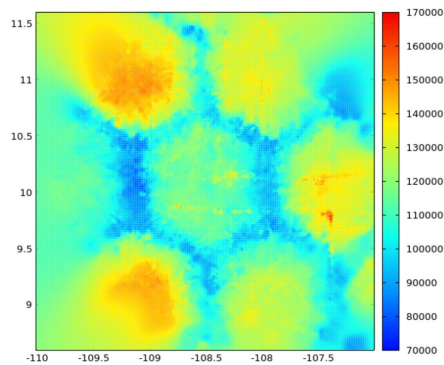


図 4.13: FD01: 補間後

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 で得た格子点を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  $0.01^\circ$  刻みで移動させ元の位置から  $\pm 0.5^\circ$  の範囲を探索した。

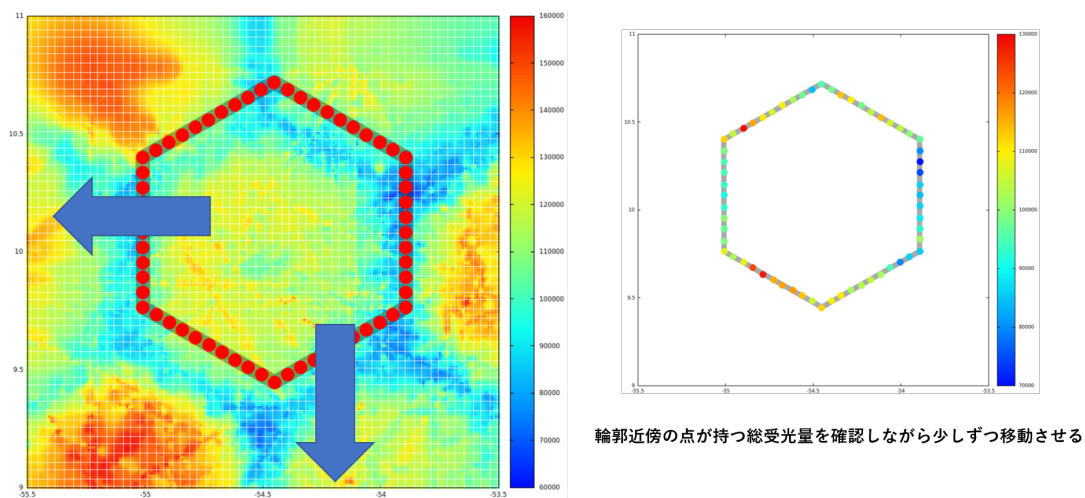


図 4.14: PMT 輪郭が重なる部分の探索

### 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。

| 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

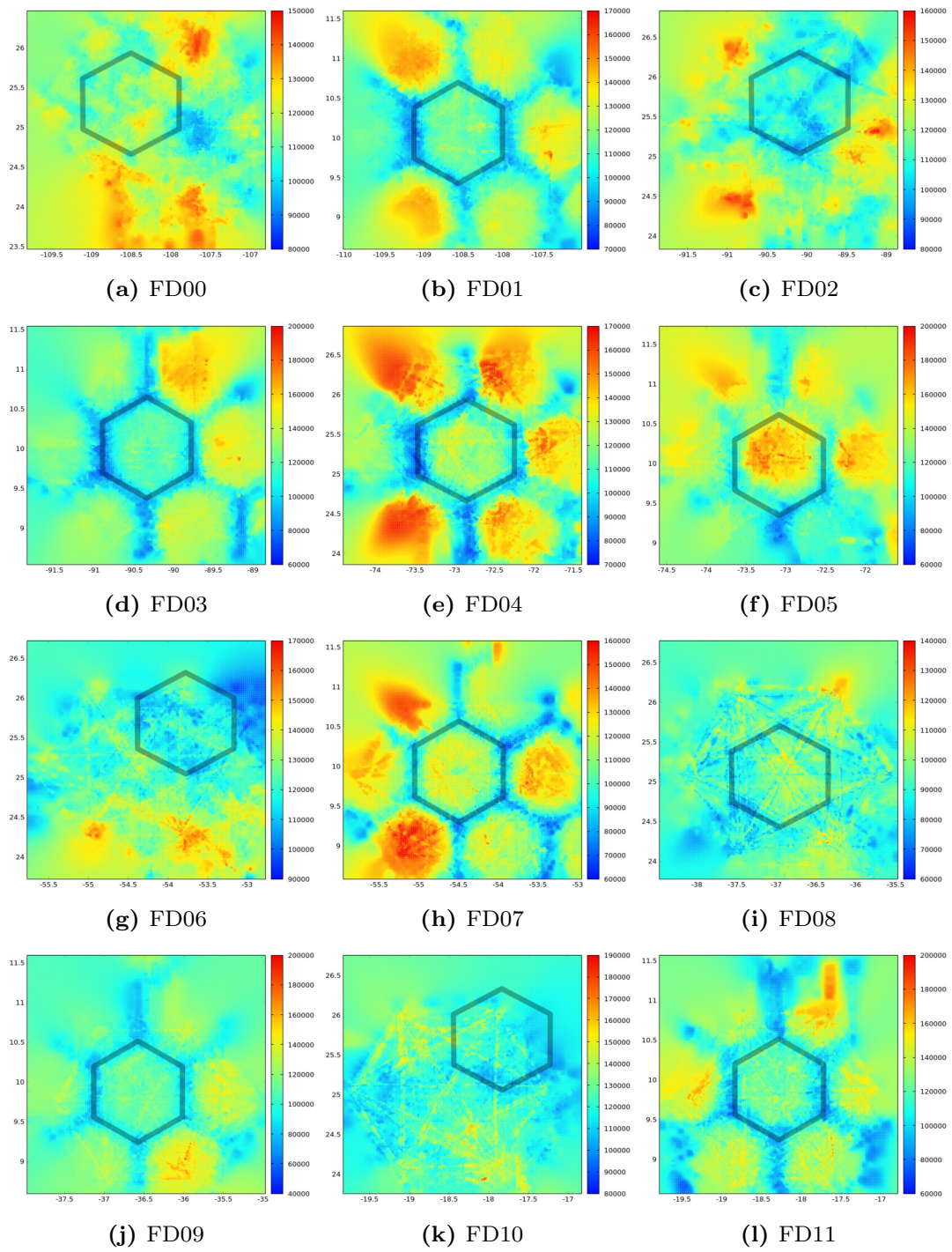


図 4.15: 輪郭探索による実際の視野方向

### 4.3.2 FDの受光量重心と光源位置による視野方向解析

#### 解析手法

FDの受講記録位置とOpt-copterの講義園位置を比較し視野方向のずれを解析する。図4.16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。

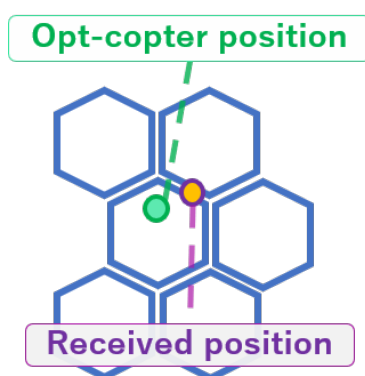


図4.16: 受光位置と光源位置の比較

FDの受光量重心分布にOpt-copterの光源一を重ねると図4.17が得られる。図4.17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想定していることが考えられる。

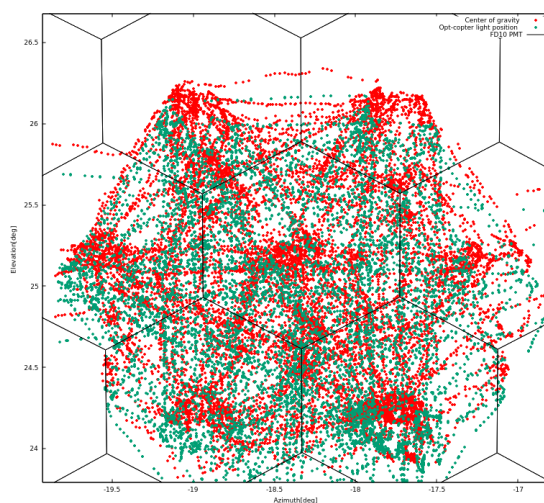


図4.17: FD10 視野中心での受光量重心と光源位置

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照にデータを抽出し、各 Opt-copter の光源位置から同時刻の受光量重心位置を引きさを求めた。図 4.18 は本解析の結果、表 4.2 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。

| 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 4.2: 位置比較解析の誤差



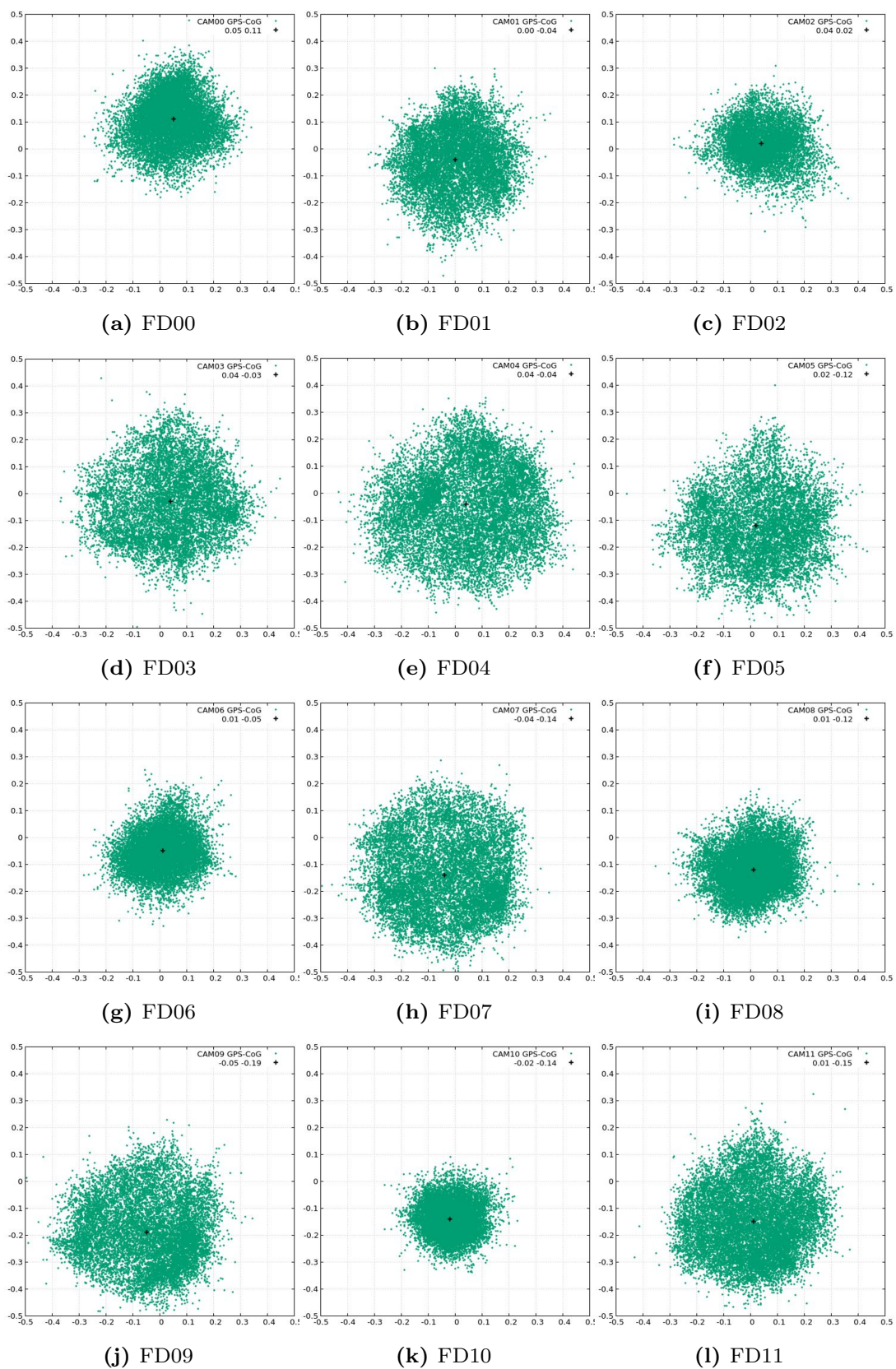


図 4.18: FD の受光量重心と光源位置の差

## 第 5 章

# 2019 年観測データにおける PMT 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 Opt-copter 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を行なった。2019 年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。

## 5.1 PMT 境界での総受光量の減少を用いた視野方向解析手法

解析を行う上で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。そこで、PMT 輪郭での受光量の偏りがわかりやすい FD07 番に対して、コマ収差の影響が低いカメラ中央付近の PMT119 番を拡大したものが、図 5.1d である。縦軸が視野の仰角、横軸が方位角を表している。これを見ると PMT の輪郭である六角形が確認できる。この図 5.1d に現行の視野方向の PMT の輪郭を重ねたものを図 5.2 に示す。これを確認すると我々が想定している PMT の輪郭と Opt-copter で計測した実際の PMT の境界は少しずれていることがわかる。この 2 種類の PMT の位置の差を定量的に見積もることで FD の視野方向が正しく把握できる。

本解析は 2019 年に Opt-copter によるフライトが行われた BRM の FD04、05、06、07 の PMT119 番を対象に解析を行う。

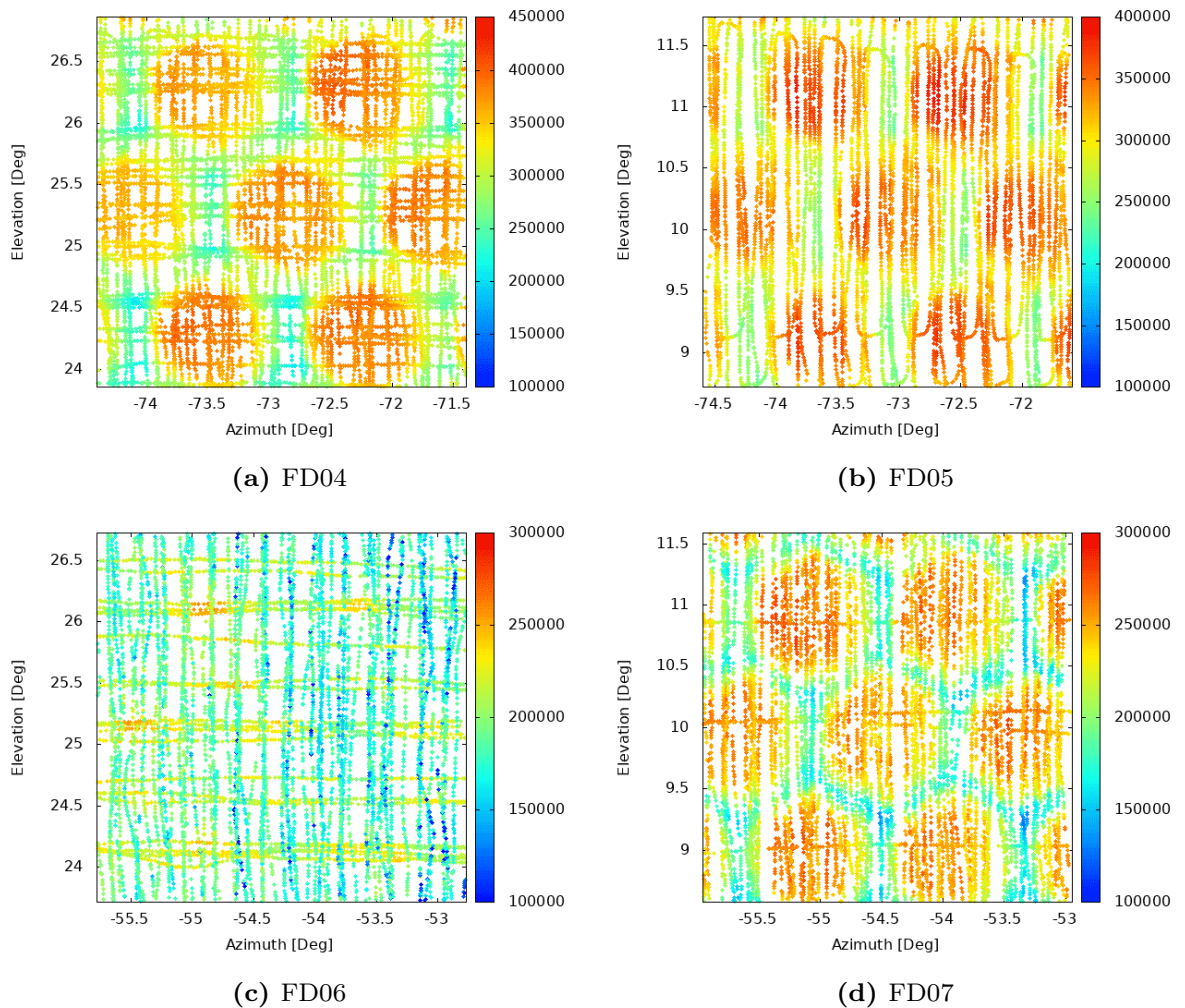


図 5.1: 2019 年の Opt-copter によるフライトでの同時刻の FD が記録していた総受光量で色付けした各 FD。コマ収差の影響が低いカメラ中央付近の PMT119 番を拡大している。

### 5.1.1 PMT の輪郭とスポットサイズの関係

図 5.1c の FD06 の総受光量を色付けした観測データを見ると、PMT の輪郭が確認できない。鏡によって集光された後の PMT カメラ面上でのスポットのサイズが関係しているのだと考える。スポットサイズが大きい場合、スポットサイズが小さい場合に比べて PMT 境界に入る光量の割合は小さくなる。そのため、PMT 境界をまたぐ時の総受光量の減少自体は発生するものの、光源のフライトごとの発光量のふらつきなど他の要因に対して大きな変化ではないのだと考えられる。つまり

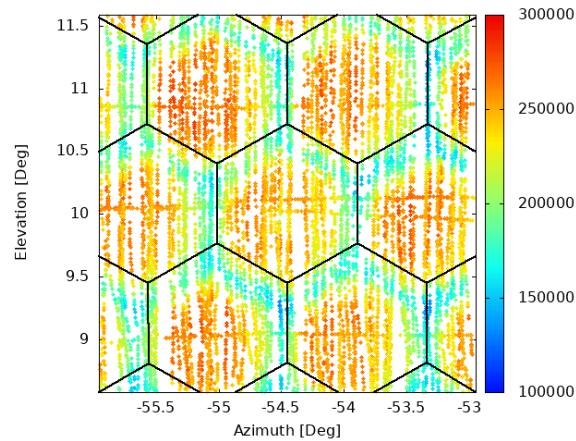


図 5.2: FD07 の想定している PMT の輪郭と 2019 年のフライト記録

PMT 輪郭が確認できない FD は、確認できる FD に対してスポットサイズが大きいのだと推測する。関連して、PMT 輪郭が確認できる FD 群とできない FD 群では設置に関わったメンバーが異なるという背景もある。

### 5.1.2 視野方向差の定量化

想定 PMT を移動させ現れた PMT の輪郭と最も重なる位置を探し、その時の想定 PMT の下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。実際の探索イメージを図 5.3 に示す。この時の PMT 輪郭幅は受光量が最小である部分が必ず入るよう考慮し、幅は  $0.1^\circ$  とする。具体的な手法は以下である。

1. PMT の輪郭幅  $0.1^\circ$  での受光量の合計の平均をとる。
2. 想定 PMT を少しずつずらす
3. 1~2 を繰り返し 1 の総受光量の和の平均が最も小さくなる位置を探す。

総受光量の和の平均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する。また、想定 PMT を仰角方位角各方向に  $0.01^\circ$  刻みで移動させ元の位置から  $\pm 0.5^\circ$  の範囲を探索した。

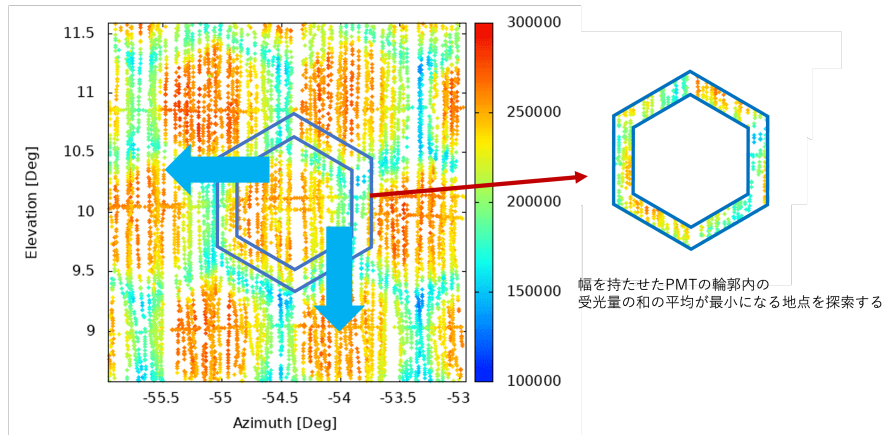


図 5.3: PMT 輪郭が重なる部分の探索

## 5.2 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 5.4 である。FD07 を例にとると方位角方向に $-0.03^\circ$ 、仰角方向に $-0.16^\circ$  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 5.1 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 5.1: 2019 輪郭探索解析結果

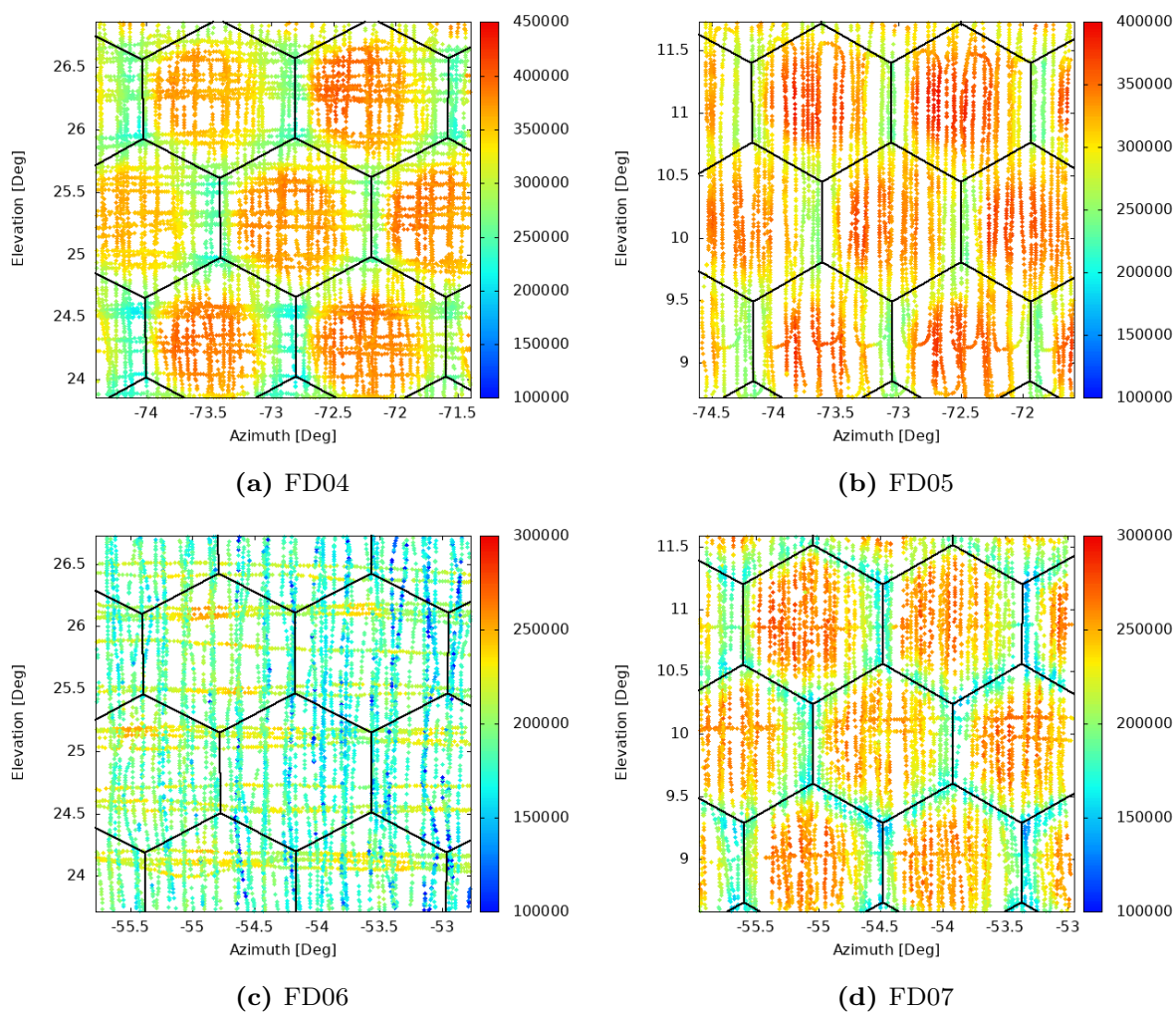


図 5.4: 解析された実際の視野方向の PMT 輪郭を重ねた解析結果

## 第6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

イベント再構成し、FD の光学特性が空気シャワー解析に与える影響を見積もるためには、シミュレーションによって疑似的な空気シャワーイベントの生成が必要である。この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莖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機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。

### 6.1 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、初期条件として一時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約 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  $E_0$
- 初期発達深さ  $X_0$
- 最大発達深さ  $X_{\max}$

- 到来方向
- コア位置

### 6.1.1 縦方向発達曲線の決定

一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、式 ( ) で示された 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、 $E_{\text{miss}}$  を引いたエネルギー  $E_{\text{cal}}$  を求める。

$$E_{\text{cal}} = E_0 - E_{\text{miss}} \quad (6.1)$$

ただし CORSIKA による空気シャワーシミュレーションから

$$\frac{E_{\text{cal}}}{E_0} = A - B \left( \frac{E_{\text{cal}}}{10^{18}\text{eV}} \right)^{-C} \quad (6.2)$$

の関係が成り立つことがわかっているため、この式から  $E_{\text{cal}}$  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  $45^\circ$  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めるエネルギー

$$E_0^1 = \frac{dE(s)}{dX} \int_{X_0}^{\infty} N_e(X, N_{\max}, X_0) dX \quad (6.3)$$

を使用し、

$$N_{\max} = \frac{E_{\text{cal}}}{E_0^1} \quad (6.4)$$

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  $X_0$  を Gaisser-Hillas 関数に代入して、任意の大気斜め大気深さ  $X/\text{mg}/\text{cm}^2$  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  $1/\text{mg}/\text{cm}^2$  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。

### 6.1.2 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 6.1)

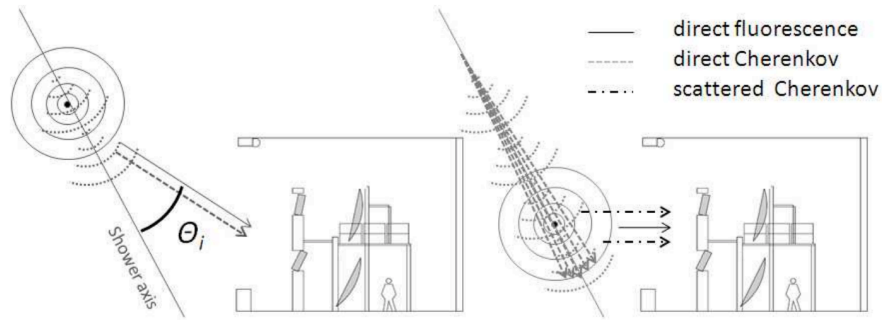


図 6.1: 空気シャワーから望遠鏡に入射する光子。発生点から直進して望遠鏡に入射する大気蛍光 (direct fluorescence) とチェレンコフ光 (direct Cherenkov) に加えて、大気に散乱されて入射するチェレンコフ光 (scattered Cherenkov) が考慮される。

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  $\lambda$  ごとに求める。

$$N_{i\lambda}^{Fl} = N_{e,i} \frac{dE(s_i)}{dX} Y_{i\lambda}^{Fl}(H_i) S_{\lambda}^{Fl}(H_i) dl_i \quad (6.5)$$

$i$  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

$$N_{i\lambda}^{Fl, tel} = N_{i\lambda}^{Fl} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Aerosol}}(r_i) \frac{A_i}{4\pi r_i^2} \quad (6.6)$$

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  $\lambda$  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。

### 6.1.3 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

$$N_{i\lambda}^C = N_{e,i} \frac{dE(s_i)}{dX} Y_{i\lambda}^C(H_i, s_i) S_{i\lambda}^C(H_i, s_i) dl_i \quad (6.7)$$

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。

$$D_i^C(\theta_i) = \frac{1}{\theta_0} \exp\left(-\frac{\theta_i}{\theta_0}\right) \quad (6.8)$$

ここで  $\theta_i$  はシャワー軸と放射方向のなす、 $\theta_0$  はチェレンコフ光を発する閾値  $E_{\text{thr}}^C$  から求まるパラメータで  $\theta_0 = aE_{\text{thr}}^C^{-b}$ 、 $(a, b) = (0.83, 0.67)$  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  $N_{i\lambda}^{C, \text{tel}}$  は

$$N_{i\lambda}^{C, \text{tel}} = N_{i\lambda}^C T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(r_i) \frac{2}{\sin \theta_i} \frac{A_i}{4\pi r_i^2} D_i^C(\theta_i) \quad (6.9)$$

から計算する。

### 6.1.4 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と呼ぶことにする。

あるセグメントにおける散乱チェレンコフ光の光量は、シャワー軸状に沿って大気頂上からその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  $N^{\text{CTotal}}$  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、

$$N_{i\lambda}^{C\text{ Total}} = N_{i\lambda}^C + N_{i-1}^{C\text{ pass}} \quad (6.10)$$

である。  $N_{i\lambda}^{C\text{ Total}}$  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  $N_{i\lambda}^{C\text{ pass}}$  を求める。

$$N_{i\lambda}^{C\text{ pass}} = N_{i\lambda}^{C\text{ Total}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(dl_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(dl_i) \quad (6.11)$$

$$N_{i\lambda}^{\text{RayC}} = N_{i\lambda}^{C\text{ Total}} [1 - T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(dl_i)] T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(dl_i) \quad (6.12)$$

$$N_{i\lambda}^{\text{MieC}} = N_{i\lambda}^{C\text{ Total}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(dl_i) [1 - T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(dl_i)] \quad (6.13)$$

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、

$$N_{i\lambda}^{\text{RayC, tel}} = N_{i\lambda}^{\text{RayC}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(r_i) \frac{A_i}{4\pi r_i^2} D_i^{\text{RayC}}(\theta_i) \quad (6.14)$$

$$N_{i\lambda}^{\text{MieC, tel}} = N_{i\lambda}^{\text{MieC}} T_{i\lambda}^{\text{Rayleigh}}(r_i) T_{i\lambda}^{\text{Mie}}(r_i) \frac{A_i}{4\pi r_i^2} D_i^{\text{MieC}}(\theta_i) \quad (6.15)$$

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。

## 6.2 検出機シミュレーション

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 6.2 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。

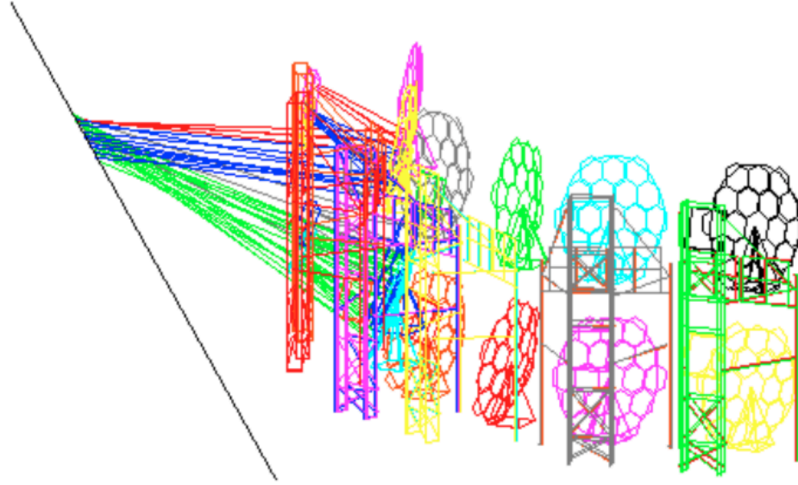


図 6.2: ソフトウェア中に再現された FD ステーションの内部構造。左の直線 (仮想的シャワー軸) の上から望遠鏡に向かって行ったレイトレースの軌跡も表示している。

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光透過フィルターの透過率など入射位置に依存しない計数をかけて光子数を減らしておく。具体定期には鏡の反射率、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  $N_i^{\text{RayTrace}}$  は PMT カメラ面に到達する光子数である。

$$N_i^{\text{RayTrace}} = \int N_{i\lambda}^{\text{p, tel}} R_{i\lambda}^{\text{mirror}} \tau_{i\lambda}^{\text{para}} \tau_{i\lambda}^{\text{BG3}} Q_{i\lambda} d\lambda \quad (6.16)$$

$N_{i\lambda}^{\text{p, tel}}$  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  $N_{i\lambda}^{\text{p, tel}}$  回繰り返す。

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 6.3 の上図の係数をかける。

図 6.3 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 6.3 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。

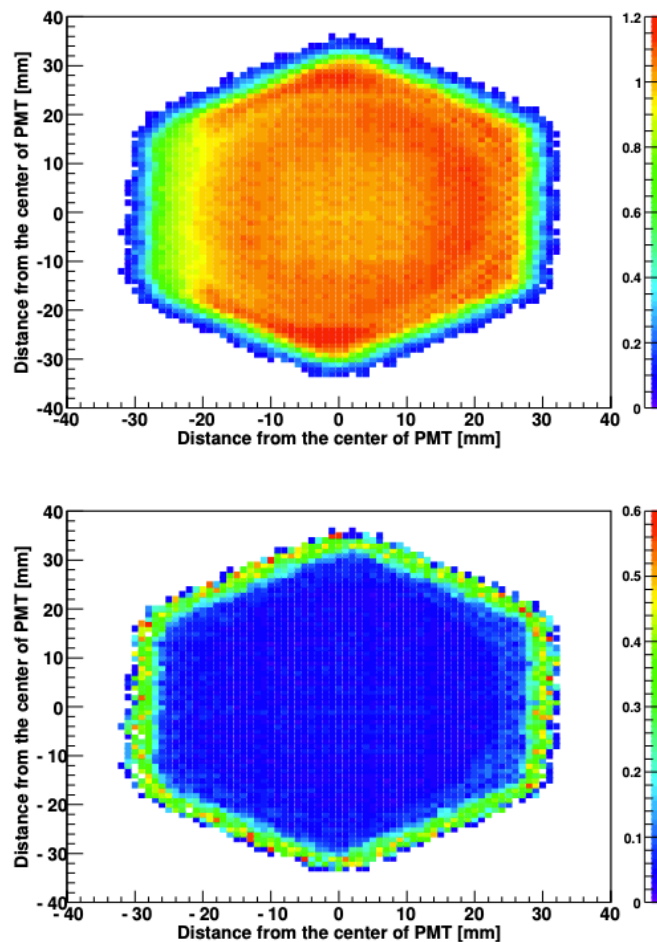


図 6.3: BRM/LR ステーションの PMT カソードの不均一性 (上)、不均一性の (標準偏差/平均値) の分布 (下)。

## 6.3 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。

### 6.3.1 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  $256 \times 12$  あるいは  $256 \times 12$  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かどうか判定する。また、再構成に必要な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 6.4 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 6.5 のように、波形のピーク位置  $p$  と幅  $\omega$  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  $\omega, p$  を求める。

$$\sigma(\omega, p) = \frac{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} F_{\text{sub}}(i)W(i)}{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} P_{\text{rms}}(i)W(i)} \quad (6.17)$$

$$W(i) = \omega - |p - i| \tag{6.18}$$

$F_{\text{sub}}(i)$  はペDESTAL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、 $P_{\text{rms}}(i)$  は  $i$  番目のビンのペDESTALのゆらぎである。ペDESTALの平均やゆらぎは SDF によって記録される。 $\omega$  の探索範囲は 0 から 30 である

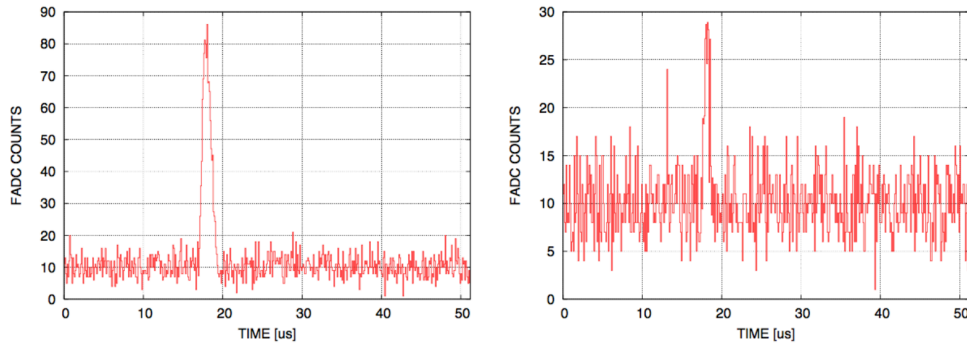


図 6.4: シミュレーションによる波形

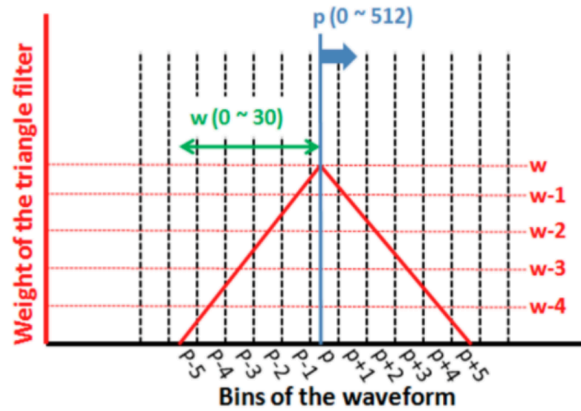


図 6.5: 重みを表しているトライアングルフィルターの概略図

有意度分布を図 6.6 に示す。空気シャワーの信号がない場合の有意度 (図 6.6(左)) はほぼ  $6\sigma$  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??(右)) は  $6\sigma$  以上の領域にテールを持つ。このことから、 $6\sigma$  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。 $6\sigma$  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  $w$  のペアが見つかったとき、タイミング  $T$  とその誤差  $\sigma_T$

を以下の式によって計算する。

$$rT = \frac{\sum_{i=p-\omega}^p i \times F_{\text{sub}}(i)}{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} F_{\text{sub}}(i)} \times 100 \text{ ns} \quad (6.19)$$

$$\sigma_T^2 = \frac{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} (T - i)^2 \times F_{\text{sub}}(i)}{\sum_{i=p-\omega}^{p+\omega} F_{\text{sub}}(i)} \times 100 \text{ ns} \quad (6.20)$$

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  $\omega$  内での重心であることに注意する。現在は PMT 信号幅が 30 ビンと求めた場合は、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。

$$N_{\text{pe}} = \text{Gain} \times \sum_{i=p-3\omega}^{p+3\omega} F_{\text{sub}}(i) \quad (6.21)$$

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。

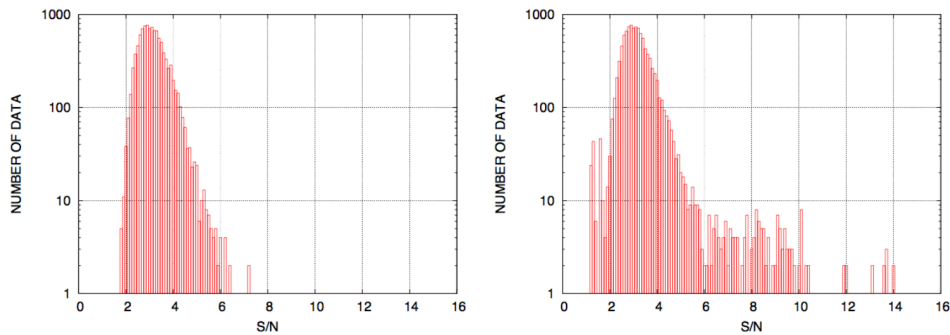


図 6.6: 観測で得られた波形の最大有意度の分布。空気シャワーの信号を含まない場合 (左) と含む場合 (右)

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。

## 2st 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 ( $\beta$  とする) を求め、 $\beta$  が大きい PMT はノイズ信号として除外する。しかし、 $\beta$  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。

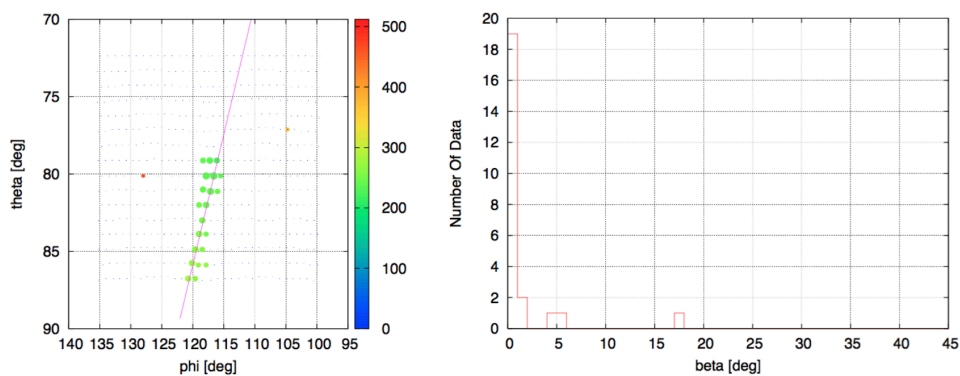


図 6.7: シャワートラック (左) と離角  $\beta$  の分布空気シャワーによるデータは離角小さい部分に集中するのに対して、そこから外れたデータはノイズと考えられる

### 3st 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 6.3.2 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  $\psi$ ,  $i$  番目の

PMT の方向ベクトルがなす角  $\alpha_i$  とすると、PMT への光子入射時刻  $t_i$  は

$$t_i = t_* + \frac{1}{c} \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin(\psi + \alpha_i)} r_0 \quad (6.22)$$

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、 $\alpha$  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  $\alpha_i$  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  $n_i^{\text{proj}}$  から次式で決まる。

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left( n_i^{\text{proj}} \cdot n_c \right) \quad (6.23)$$

各 PMT における  $\alpha_i$  と 1st セレクションで求めた  $T_i$  を式 (6.22) 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。

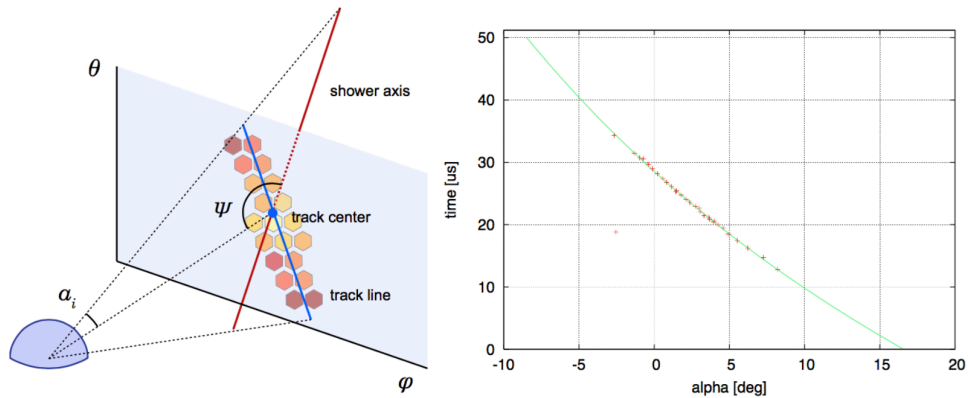


図 6.8: シャワートラック (左) とノイズ選別のためのタイミングフィット (右)。右図ではフィッティング曲線から大きく外れた点 ( $-2.5^\circ, 19 \mu\text{s}$ ) があり、これはノイズ信号である。

#### 4st 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  $6\sigma$  以上の有意度を持った PMT だけが選定される。ここでは、 $6\sigma$  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 6.3.2 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  $\chi^2$ 、SDP からの離角  $\beta_i$  を、全ての PMT に対して計算する。

$$R_i = |f(\alpha_i) - T_i| \quad (6.24)$$

$$\chi^2 = \left( \frac{R_i}{\sigma_{T_i}} \right)^2 \quad (6.25)$$

$$\beta_i = \vec{P}_i \cdot \vec{V}_{\text{SDP}} \quad (6.26)$$

ここで、 $\alpha_i$  は SDP へ投影された  $i$  番目の PMT の仰角、 $f(\alpha_i)$  は  $\alpha_i$  でのフィット関数から得られるタイミング、 $\sigma_{T_i}$  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、 $\vec{V}_{\text{SDP}}$  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 6.1 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                |
|-----------|---------------------|---------------------|
| $R_i$     | $< 1.2 \mu\text{s}$ | $< 0.8 \mu\text{s}$ |
| $\chi^2$  | $< 20$              | $< 15$              |
| $\beta_i$ | $< 4^\circ$         | $< 2^\circ$         |

表 6.1: 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  $5^\circ$  以内と時間差が  $5 \mu\text{s}$  以内の基準で選ばれた、隣接した PMT との  $\alpha_i$  と  $T_i$  の “Linear” フィット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  $R_{\text{linear}}$ 、擬似  $\chi_{\text{linear}}^2$ 、使用される PMT 数  $N_{\text{linear}}$  が判定に使用される。表 6.2 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 6.9 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         |
|--------------------------|-------------------|
| $N_{\text{linear}}$      | $> 3$             |
| $R_{\text{linear}}$      | $1.2 \mu\text{s}$ |
| $\chi_{\text{linear}}^2$ | $20 \mu\text{s}$  |

表 6.2: 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。

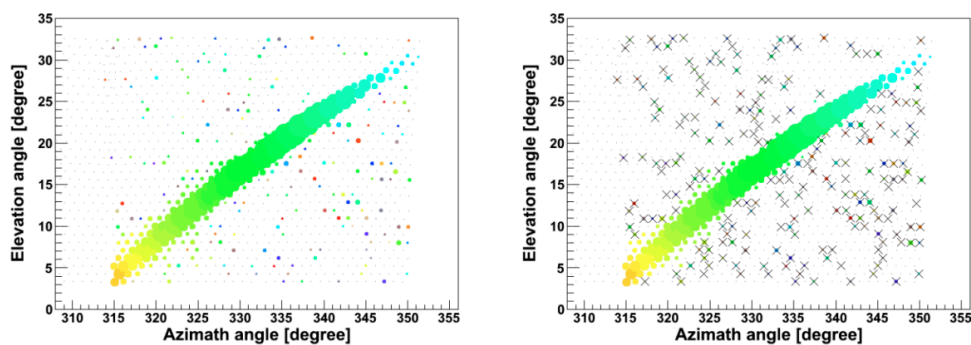


図 6.9: 1st から 4th の全てのセレクション前 (左) とセレクション後 (右) の空気シャワーイベントディスプレイ。ノイズが除去されていることがわかる。

### 6.3.2 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6.10に示す。PMTの視野はおよそ $1^\circ$ 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れ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6.11)。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 $t^P$ に放出された光子は $i$ 番目のPMTにより時刻 $t_i$ に検出されたとする。

この時

$$t_i = t^P + \frac{1}{c}|r_i| \quad (6.27)$$

$$t^* = t^P + \frac{1}{c}|r^* - r_i| \quad (6.28)$$

が成り立つ。ここから $t^P$ を消去すると、

$$t_i - t^* = \frac{1}{c}(|r_i| - |r^* - r_i|) \quad (6.29)$$

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 $\alpha_i$ も既知である。これを用いて式6.29を書き換えると、

$$t_i = t^* + \frac{1}{c} \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin \psi + \alpha_i} r^* \quad (6.30)$$

ここで $\psi$ 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 $\sigma_i$ を考慮して、以下の $\chi^2$ を最小にする $t^*$ 、 $r^*$ 、

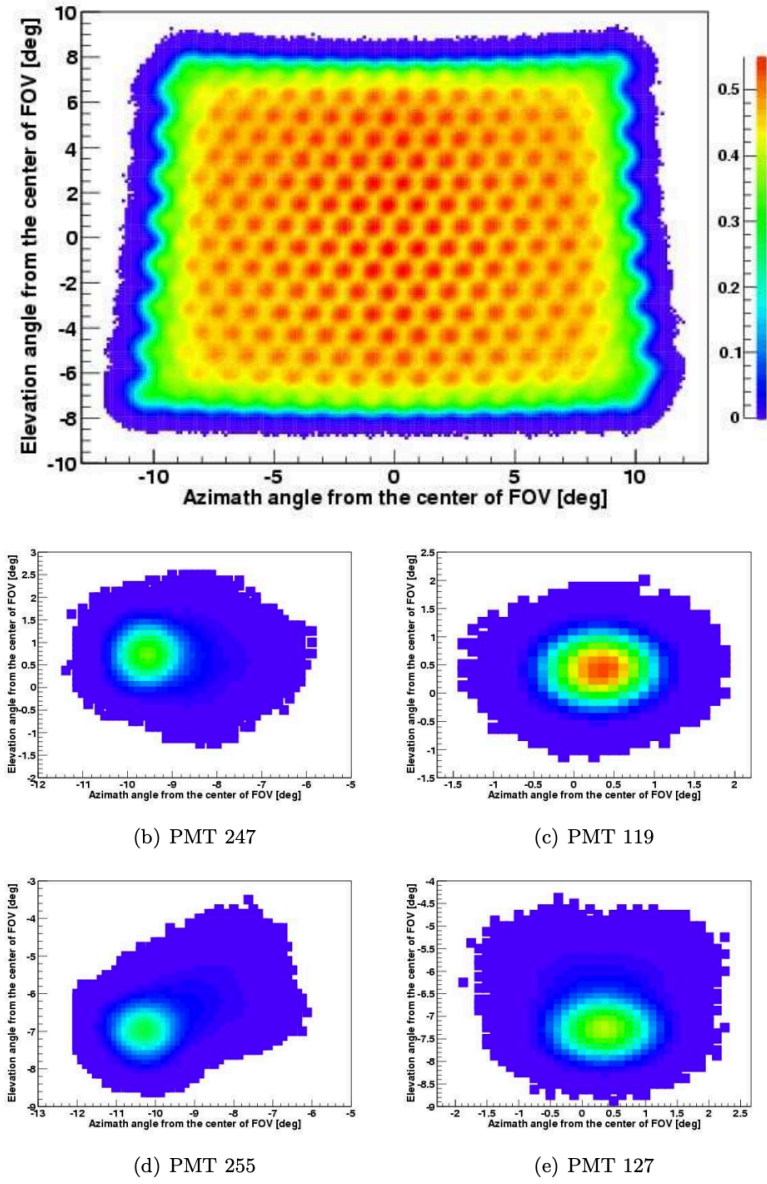


図 6.10: 望遠鏡への光子入射方向に対する PMT の感度 (BRM ステーション Cmaera00 の例)。上は 1 カメラの全 PMT についてまとめて描いたもの、下は各 PMT ごとに描いた図であり、望遠鏡視線方向からの相対的な方向を両軸にとっている。数値はシミュレーション時の入射光子数に対する検出光子数の比である。この方向ごとの感度分布は後述する逆モンテカルロ再構成で使用される。

$\psi$  の最確値とする。

$$\chi^2 = \sum_i \left[ \frac{\{t_i - t^* - \frac{1}{c} s_i(\psi) r^*\}^2}{\sigma_i^2} \right] \quad (6.31)$$

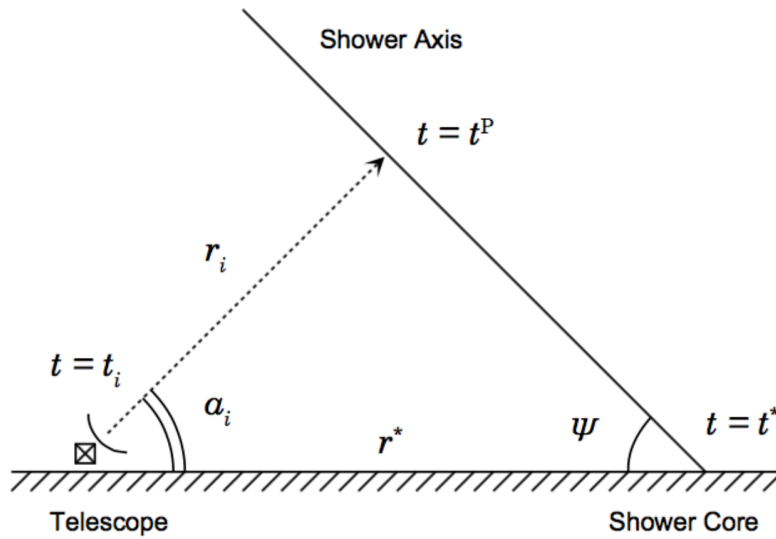


図 6.11: 1 ステーションのみで観測されたイベントの再構成

ただし、 $s_i(\psi)$  は

$$s_i(\psi) = \frac{\sin \psi - \sin \alpha_i}{\sin \psi + \alpha_i} \quad (6.32)$$

である。このようにして、 $r^*$  と  $\psi$  が決まるので、結果としてシャワー軸の方向ベクトルとこ愛知の方向ベクトルが求まる。

### 6.3.3 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 6.1 節で述べたように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  $N_{\max} = 1.0$  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 6.1 節で述べ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 6.3.2 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  $n_i^{\text{pe}}$  (光電子数) は

$$n_i^{\text{pe}} = \int_x \int_\lambda N_{x\lambda}^{\text{RayTrace}} \times f_i(n_x) d\lambda dx \quad (6.33)$$

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  $x \text{ g/cm}^2$  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 6.2 で述べた式 (6.16) 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 6.3 の値に相当する。

式 (6.33) 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。

$$L = \sum_i \left\{ n_i^{\text{pe,data}} \log \frac{n_i^{\text{pe}}}{n_i^{\text{pe,st}}} \right\} \quad (6.34)$$

$$n_i^{\text{pe,st}} = \sum_i n_i^{\text{pe}} \quad (6.35)$$

ここで、 $n_i^{\text{pe,st}}$  は式 (6.33) 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 (npst) 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。



### $N_{\max}$ 決定

縦方向発達を求めた後、 $N_{\max}$  を求める。式 (6.33) から求まる  $N_{\max} = 1.0$  の総光電子数の比から  $N_{\max}$  を決定する。すなわち、

$$N_{\max} = \frac{\sum_i n_i^{\text{pe,data}}}{\sum_i n^{\text{pe}_i}} \quad (6.36)$$

である。図 6.12 は観測されたシャワーイメージと、再構成結果を元に式 (6.33) 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 (6.33) 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間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。

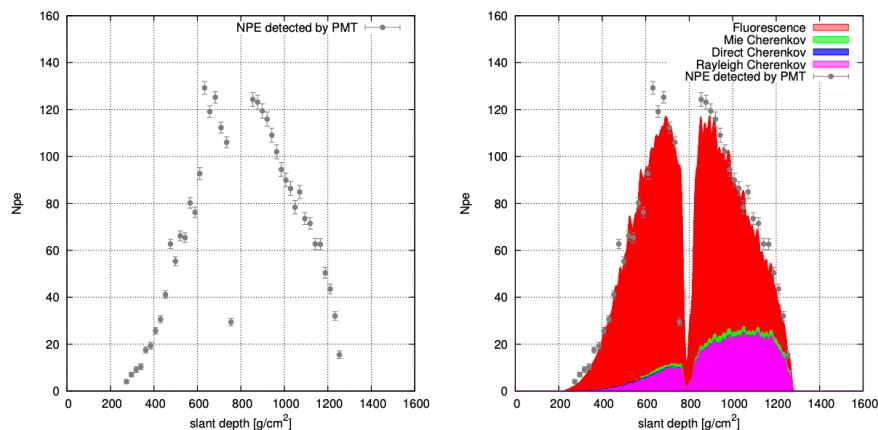


図 6.12: 観測データとシミュレーションの比較。左図は実際に観測されたデータであり、右図は再構成で得られた結果からシミュレートした光電子数を重ね書きしている。赤色が大気蛍光、青色がチェレンコフ光、紫色がレイリー散乱されたチェレンコフ光、緑色がエアロゾル散乱されたチェレンコフ光の光電子数を表す。

### 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  $E_{\text{cal}}$  が求まる。 $E_{\text{cal}}$  は一次宇宙線のエネルギーでは

ないことに注意する。

$$E_{\text{cal}} = \frac{\overline{dE}}{dX} \int_{X_1}^{\infty} N_e(X, N_{\text{max}}, X_{\text{max}}, X_0) dX \quad (6.37)$$

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  $2.2 \text{ MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2)$  である。ところで、Gaisser-Hillas 関数は

$$t = \frac{X - X_0}{\lambda} \quad (6.38)$$

$$\xi = \frac{X_{\text{max}} - X_0}{\lambda} \quad (6.39)$$

を用いて書き換えると

$$N_e(t) = N_{\text{max}} \left( \frac{e}{\xi} \right)^{\xi} e^{-t\xi} \quad (6.40)$$

となる。したがってこの積分である  $E_{\text{cal}}$  はガンマ関数  $\Gamma$  を用いた以下の式を計算すれば良い。

$$E_{\text{cal}} = \lambda N_{\text{max}} \frac{\overline{dE}}{dX} \left( \frac{e}{\xi} \right)^{\xi} \Gamma(\xi + 1) \quad (6.41)$$

上式からもとまる  $E_{\text{cal}}$  に式 (6.1) と式 (6.2) 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7章

# FDの視野方向が与える宇宙線空気シャワー解析への影響

大気蛍光望遠鏡を用い宇宙線空気シャワーを再構成するには正確なFDの幾何や大気状態、発光効率などを把握しておく必要がある。また、TA実験の開始から10年以上が経ち、より高い精度での望遠鏡の較正が必要となった。そこで、第4章で述べたように、ドローンに光源と即位GPSを搭載した「Opt-copter」が開発された。これまで、FDによる「Opt-copter」の観測実験が行われ、FDの視野方向が $0.03^\circ$ の精度で較正が可能となった。これにより、BRMステーションのFDの視野方向は全体的に想定していた視野方向よりも下を向いていることがわかった。そこで、得られた視野方向解析結果を宇宙線空気シャワー再構成時のFD視野方向に適用すると宇宙線再構成のパラメータにどの程度変化があるのか確認する必要がある。

本章では、BRMステーションの視野方向をOpt-copterによって計測された視野方向に変更することで、宇宙線空気シャワー再構成にどの程度影響があるか見積もった。

### 7.1 解析手法

BRMステーションの視野方向をOpt-copterによって計測された視野方向に変更した際に宇宙線空気シャワー再構成で得られるパラメータがどの程度影響があるかを評価する。Opt-copterによって解析された視野方向は、第4.3.2章で述べたFDの受光重心と光源位置による視野方向解析結果を用いる。またOpt-copterによって解析した視野方向を宇宙線解析に適用した際の影響を評価するため、Opt-

copter によって変更した視野方向でイベント生成を行い、現行で使用している視野方向と Opt-copter によって変更した視野方向の二つを用い宇宙線再構成を行う。イベント生成の視野方向では実際の望遠鏡の視野方向により近い Opt-copter によって変更した視野方向を用いた。また、同一の空気シャワーを比較するために、生成したイベントに対してどちらの視野方向でも再構成できたもののみを今回の影響解析に使用する。解析手法の模式図を、図 7.1 に示す。

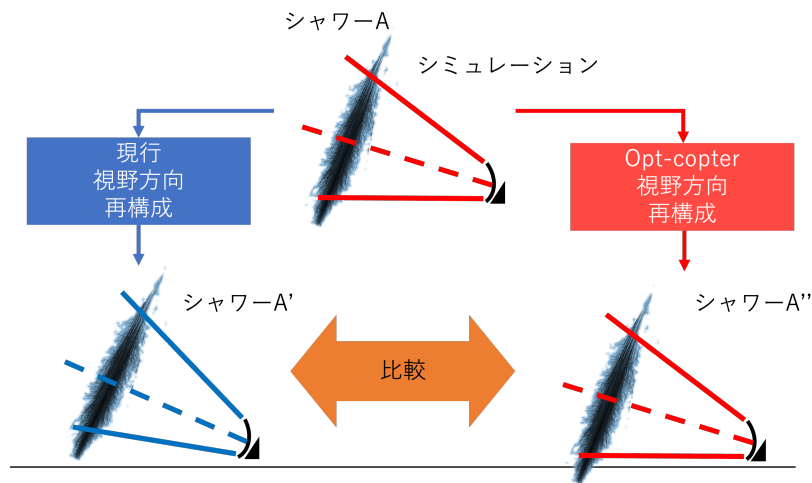


図 7.1: 解析手法模式図

### 7.1.1 解析ソフトウェアでの視野方向

Opt-copter による望遠鏡の視野方向を、第 6 章で述べた TA 実験標準のシミュレーション、イベント再構成ソフトウェアに適用する際、ソフトウェア内の望遠鏡の視野方向に関するパラメータを変更し、PMT の視野方向を新たに生成を行う。表 7.1、7.2 に BRM ステーションの現行で使用している視野方向と Opt-copter よって解析された視野方向を示す。

|                         | FD00    | FD01    | FD02    | FD03    | FD04    | FD05    | FD06    | FD07     | FD08     | FD09     | FD10     | FD11     |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta$ 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 |
| $\Delta$ 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  |

表 7.1: 現行使用している BRM ステーションの FD 視野方向

|                         | FD00    | FD01    | FD02    | FD03    | FD04    | FD05    | FD06    | FD07     | FD08     | FD09     | FD10     | FD11     |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| $\Delta$ 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 |
| $\Delta$ 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 7.2: Opt-copter によって計測された BRM ステーションの FD 視野方向

また、望遠鏡の視野方向を変更する際、望遠鏡のカメラの向いている方向も同様に変更しなければならない。TA 実験標準のソフトウェアではカメラの向いている方向を回転行列で表している。現行で使用しているものと Opt-copter によって変更した視野方向によって計算したものをそれぞれ、表 7.3、7.4 に示す。これらカメラそれぞれの 1 行目はカメラ面の x 軸、2 行目はカメラ面の y 軸、3 行目はカメラの向いている方向である。

望遠鏡の視野方向を変更させることで、第 6.3.2 章で述べた再構成に使用する PMT の視野方向を変更しなければならない。Opt-copter によって得られた視野方向に変更させ、PMT の視野方向をレイトレスシミュレーションにより計算を行う。その時の、現行で使用している PMT の視野方向と Opt-copter によって変更した PMT の視野方向を重ねたものを、図 7.2、7.4 に示す。

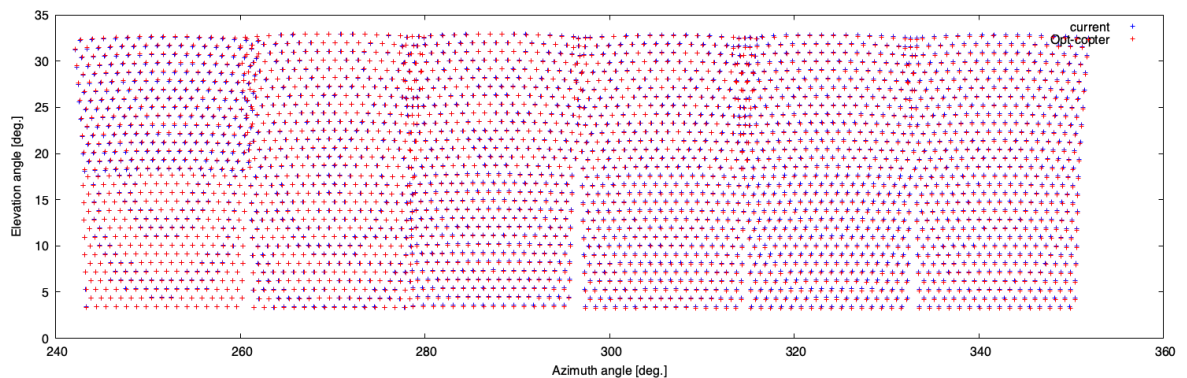


図 7.2: 再構成時に使用された BRM ステーションの PMT の視野方向

青: 現行で使用している PMT の視野方向

赤: Opt-copter によって変更した PMT の視野方向

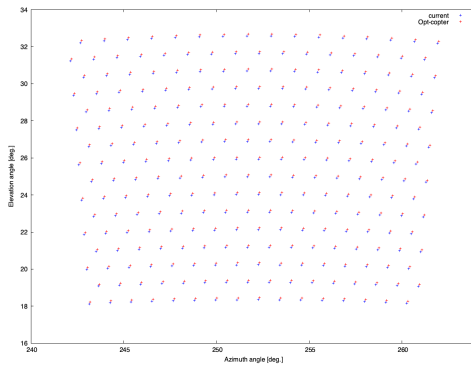
|       |           |           |           |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| cam00 | -0.309200 | 0.950997  | 0.000000  |
|       | -0.408546 | -0.132831 | -0.903021 |
|       | -0.858770 | -0.279214 | 0.429597  |
| cam01 | -0.312783 | 0.949825  | 0.000000  |
|       | -0.174656 | -0.057515 | -0.982948 |
|       | -0.933629 | -0.307449 | 0.183883  |
| cam02 | -0.000890 | 1.000000  | 0.000000  |
|       | -0.435459 | -0.000388 | -0.900209 |
|       | -0.900208 | -0.000801 | 0.435459  |
| cam03 | -0.001117 | 0.999999  | 0.000000  |
|       | -0.182922 | -0.000204 | -0.983127 |
|       | -0.983127 | -0.001098 | 0.182922  |
| cam04 | 0.299207  | 0.954188  | 0.000000  |
|       | -0.415825 | 0.130391  | -0.900049 |
|       | -0.858816 | 0.269301  | 0.435789  |
| cam05 | 0.295491  | 0.955345  | 0.000000  |
|       | -0.177785 | 0.054990  | -0.982532 |
|       | -0.938657 | 0.290330  | 0.186095  |
| cam06 | 0.588265  | 0.808668  | 0.000000  |
|       | -0.350686 | 0.255107  | -0.901077 |
|       | -0.728672 | 0.530072  | 0.433659  |
| cam07 | 0.585396  | 0.810747  | 0.000000  |
|       | -0.148881 | 0.107499  | -0.982995 |
|       | -0.796960 | 0.575442  | 0.183634  |
| cam08 | 0.802099  | 0.597191  | 0.000000  |
|       | -0.259466 | 0.348493  | -0.900683 |
|       | -0.537880 | 0.722437  | 0.434477  |
| cam09 | 0.807032  | 0.590507  | 0.000000  |
|       | -0.108574 | 0.148385  | -0.982951 |
|       | -0.580440 | 0.793274  | 0.183866  |
| cam10 | 0.950911  | 0.309465  | 0.000000  |
|       | -0.134356 | 0.412842  | -0.900838 |
|       | -0.278778 | 0.856617  | 0.434154  |
| cam11 | 0.951030  | 0.309100  | 0.000000  |
|       | -0.056663 | 0.174339  | -0.983054 |
|       | -0.303862 | 0.934913  | 0.183317  |

**表 7.3:** 現行で使用している望遠鏡の視野方向をカメラの方向に変換する回転行列。  
1 行目はカメラ面の x 軸方向、2 行目はカメラ面の y 軸方向、3 行目はカメラの向  
いている方向である。

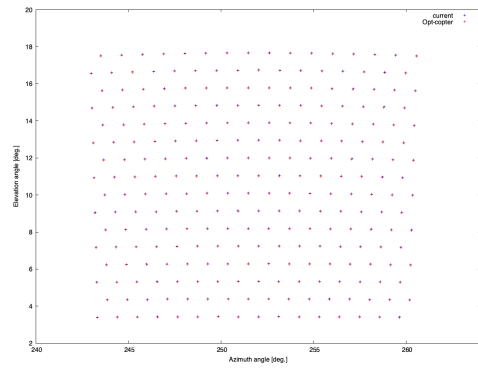
|       |           |            |           |
|-------|-----------|------------|-----------|
| cam00 | -0.308204 | 0.951320   | 0.000000  |
|       | -0.410333 | -0.132937  | -0.902194 |
|       | -0.858276 | -0.278059  | 0.431330  |
| cam01 | -0.312783 | 0.949825   | 0.000000  |
|       | -0.174005 | -0.057301  | -0.983076 |
|       | -0.933750 | -0.307489  | 0.183196  |
| cam02 | -0.000192 | 1.000000   | 0.000000  |
|       | -0.435773 | -0.000084  | -0.900057 |
|       | -0.900057 | -0.000173  | 0.435773  |
| cam03 | -0.000419 | 1.000000   | 0.000000  |
|       | -0.182407 | -0.000076  | -0.983223 |
|       | -0.983223 | -0.000412  | 0.182407  |
| cam04 | 0.299873  | 0.953979   | 0.000000  |
|       | -0.415134 | 0.130493   | -0.900353 |
|       | -0.858918 | 0.269992   | 0.435160  |
| cam05 | 0.295658  | 0.955294   | 0.000000  |
|       | -0.175810 | 0.054412   | -0.982919 |
|       | -0.938977 | 0.290608   | 0.184037  |
| cam06 | 0.587701  | 0.809079   | 0.000000  |
|       | -0.350228 | 0.254399   | -0.901455 |
|       | -0.729348 | 0.529786   | 0.432873  |
| cam07 | 0.585538  | 0.810645   | 0.000000  |
|       | -0.146914 | 0.106118   | -0.983440 |
|       | -0.797221 | 0.575842   | 0.181232  |
| cam08 | 0.802203  | 0.597051   | 0.000000  |
|       | -0.258278 | 0.347025   | -0.901591 |
|       | -0.538296 | 0.723259   | 0.432589  |
| cam09 | 0.806517  | 0.591211   | 0.000000  |
|       | -0.106776 | 0.14566096 | -0.983556 |
|       | -0.581489 | 0.793254   | 0.180605  |
| cam10 | 0.950803  | 0.309797   | 0.000000  |
|       | -0.133817 | 0.410701   | -0.901897 |
|       | -0.279405 | 0.857526   | 0.431952  |
| cam11 | 0.951083  | 0.308934   | 0.000000  |
|       | -0.055837 | 0.171901   | -0.983530 |
|       | -0.303846 | 0.935420   | 0.180742  |

表 7.4: Opt-copter で変更した望遠鏡の視野方向をカメラの方向に変換する回転行列。

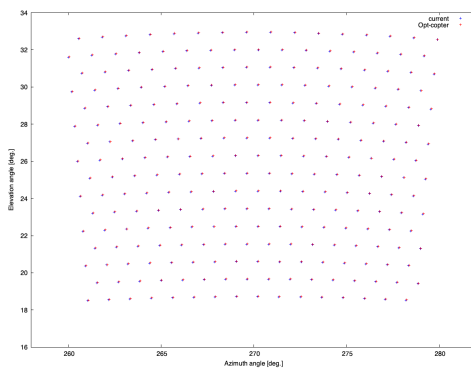
1 行目はカメラ面の  $x$  軸方向、2 行目はカメラ面の  $y$  軸方向、3 行目はカメラの向いている方向である。



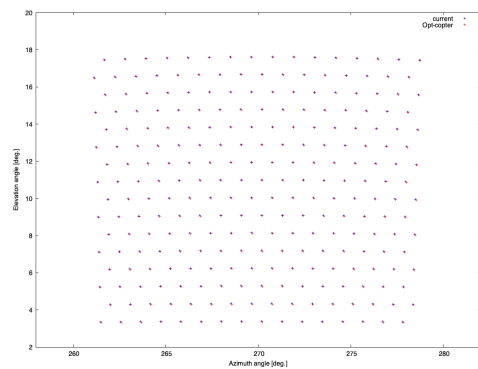
(a) camera00



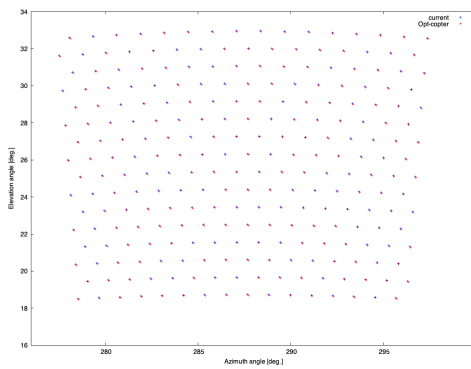
(b) camera01



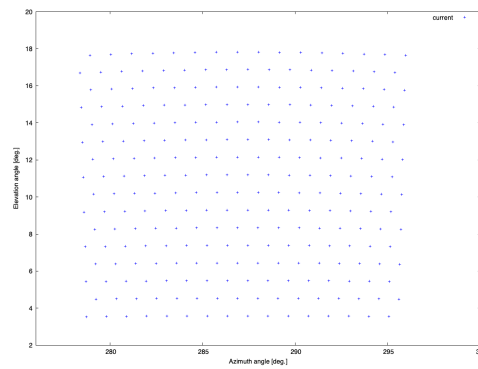
(c) camera02



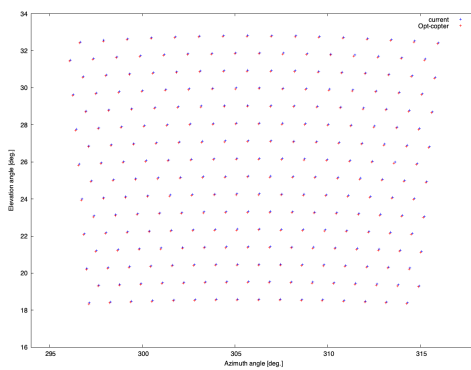
(d) camera03



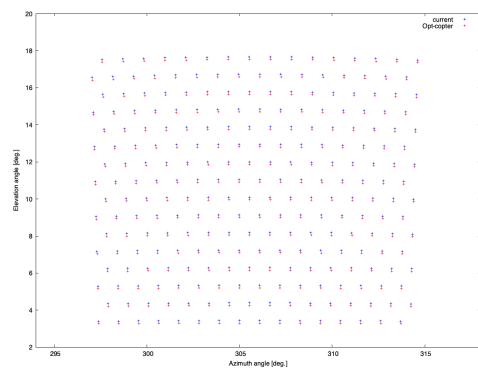
(e) camera04



(f) camera05



(g) camera06



(h) camera07



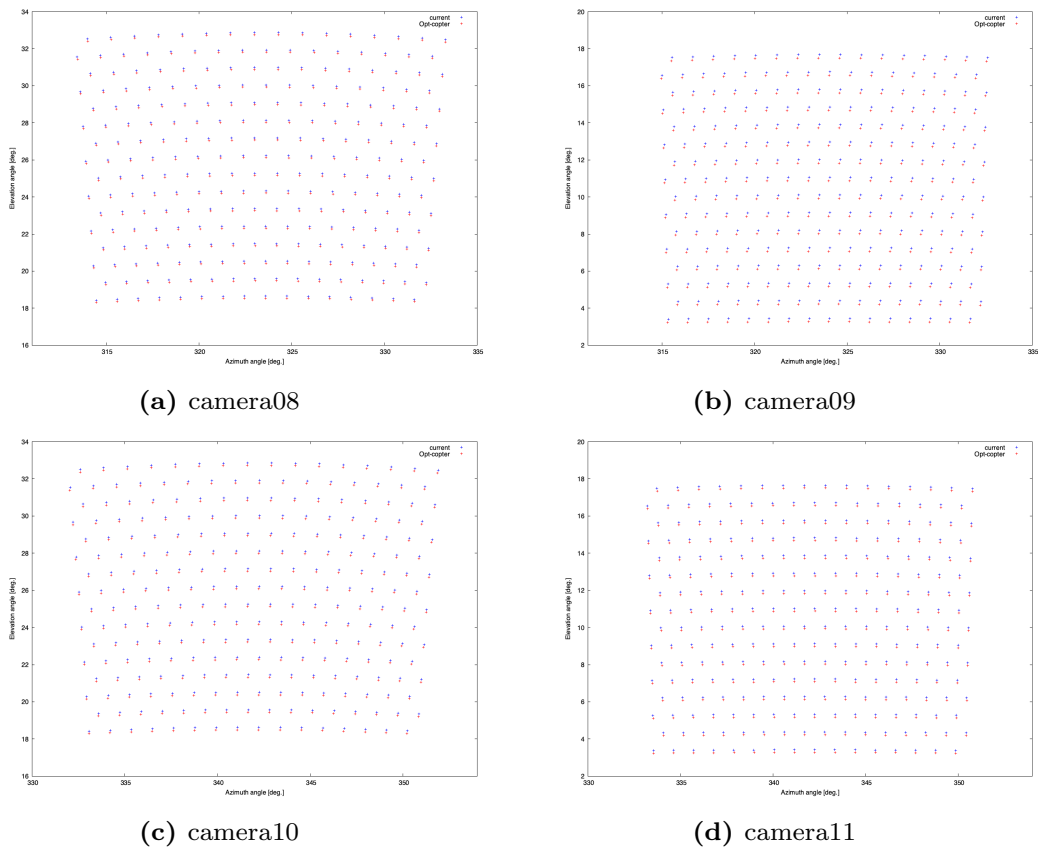


図 7.4: 再構成時に使用された BRM ステーションの望遠鏡一台ごとの PMT の視野方向  
 青: 現行で使用している PMT の視野方向  
 赤: Opt-copter によって変更した PMT の視野方向

## 7.1.2 シミュレーション条件とイベントセレクション

Opt-copter の視野方向が宇宙線空気シャワー再構成にどのような影響があるか評価する。前述したように、実際の望遠鏡の視野方向に近づけるために Opt-copter によって計測された視野方向によりシミュレーションを行う。また、エネルギーごとの影響を見るため 3 種類のエネルギーについてシミュレーションを行う。モノ解析での FD の視野方向が与える影響について以下の条件でシミュレーションを行った。

### シミュレーション条件

- 一次宇宙線のエネルギー  $E_0$ :  $10^{18.5}\text{eV}$ ,  $10^{19}\text{eV}$ ,  $10^{19.5}\text{eV}$  の 3 種類のエネルギー

- 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): 0-60 度の範囲で等方的
- 到来方向 (方位角): 0-360 度の範囲で等方的
- FD の観測視野方向: Opt-copter によって変更した視野方向
- 望遠鏡ステーション: BRM ステーション
- コアポジション: BRM ステーションから半径 60km の範囲で等方的
- 縦方向発達の生成: Gaisser-Hillas 関数

### イベント再構成

生成したイベントに対して、現行の視野方向での再構成と Opt-copter による再構成の2つの再構成を行い、再構成された結果を比較した。また、同一のイベントを比較するためどちらの視野方向でも再構成できたもののみを解析に用いる。

再構成されたイベントに対して、さらに再構成精度のよいイベントだけを抽出するために、次の条件でイベントセレクションを行った。

- 空気シャワージオメトリ、縦方向発達が収束している
- $X_{\max}$  が FD の視野内かどうか
- track length  $> 10^\circ$
- time extend  $> 2 \mu s$
- number of PMT  $> 10$
- 天頂角  $< 55^\circ$
- $\chi^2/n.d.f. < 100$
- minimum View Angel  $> 15^\circ$

イベントセレクションを行った後、1 イベントごとでの影響を解析するため、方位角、天頂角、Rp、Psi Angle、望遠鏡ステーションからのコアポジションの距離、 $X_{\max}$  に対して、Opt-copter によって変更した視野方向で再構成したパラメータから現行の視野方向で再構成したパラメータの差分を取り、エネルギーは対数変化率を計算し影響を評価する。

### 7.1.3 解析結果

以上の条件のもと、解析した結果を表 7.5、図 7.5、7.6、7.7、7.8、7.9、7.11、図 7.10、7.12 である。

|                                       | $10^{18.5}$ eV   | $10^{19.0}$ eV   | $10^{19.5}$ eV   |
|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| $\Delta$ Azimuth angle [deg.]         | $-0.28 \pm 0.09$ | $-0.11 \pm 0.06$ | $-0.06 \pm 0.05$ |
| $\Delta$ Zenith angle [deg.]          | $-0.37 \pm 0.07$ | $-0.27 \pm 0.03$ | $-0.22 \pm 0.02$ |
| $\Delta R_p$ [km]                     | $-0.08 \pm 0.01$ | $-0.10 \pm 0.01$ | $-0.12 \pm 0.01$ |
| $\Delta$ Psi angle [deg.]             | $-0.44 \pm 0.06$ | $-0.42 \pm 0.04$ | $-0.38 \pm 0.03$ |
| $\Delta$ coreR [km]                   | $-0.14 \pm 0.01$ | $-0.16 \pm 0.01$ | $-0.16 \pm 0.01$ |
| $\Delta X_{max}$ [g/cm <sup>2</sup> ] | $+3.6 \pm 0.6$   | $+6.9 \pm 0.5$   | $+7.6 \pm 0.4$   |
| $E_0$ ratio [%]                       | $-1.0 \pm 0.1$   | $-0.7 \pm 0.1$   | $-0.2 \pm 0.1$   |

表 7.5: 2つの視野方向により再構成された差分により得られたそれぞれのパラメータ

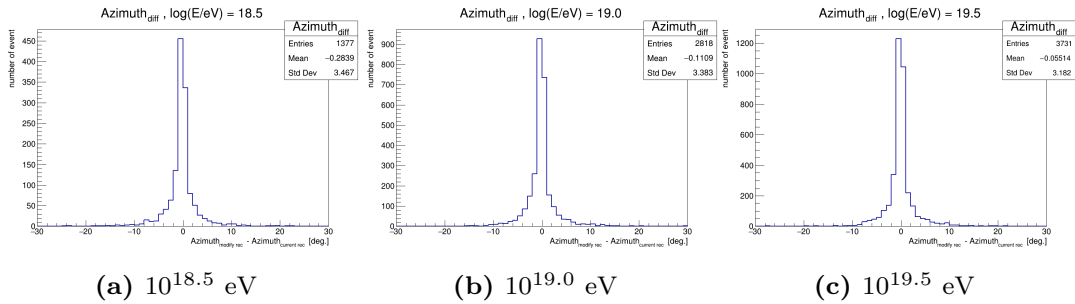


図 7.5: 2つ視野方向の再構成から得られた方位角の差分

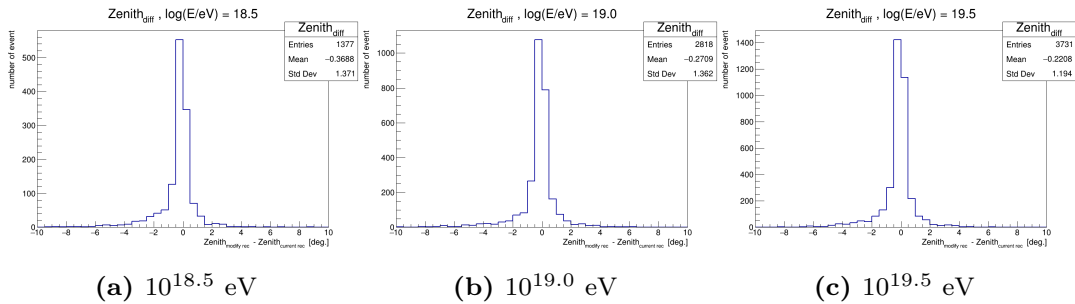


図 7.6: 2つ視野方向の再構成から得られた天頂角の差分

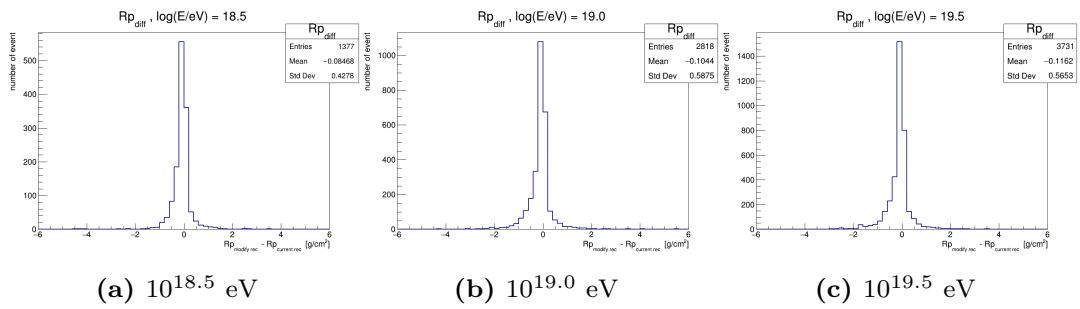


図 7.7: 2つ視野方向の再構成から得られた  $Rp$  の差分

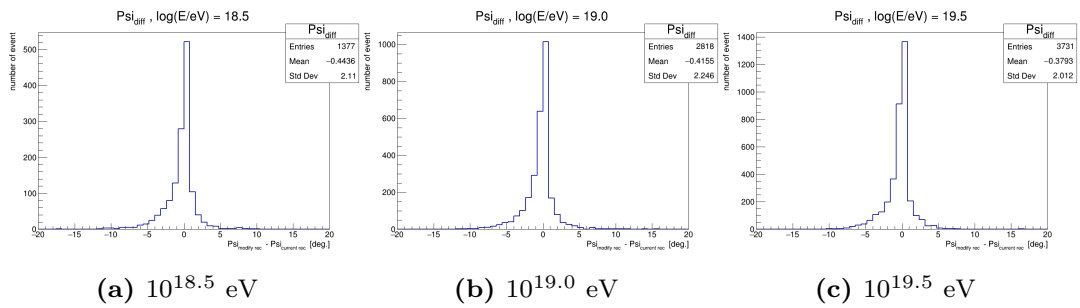


図 7.8: 2つ視野方向の再構成から得られた Psi angle の差分

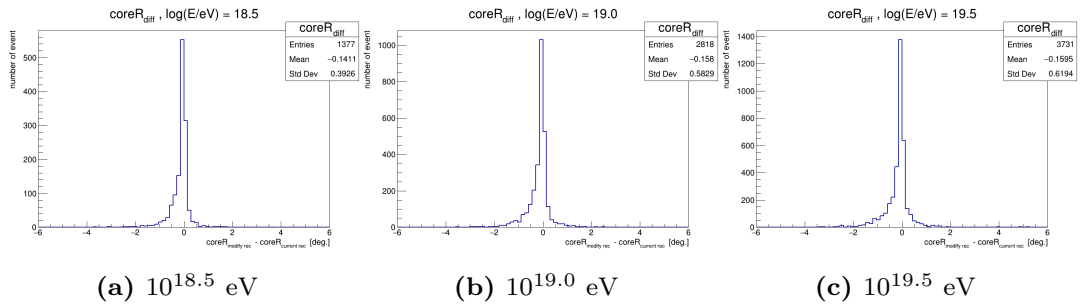


図 7.9: 2つ視野方向の再構成から得られた BRM ステーションからのコアポジションの距離の差分

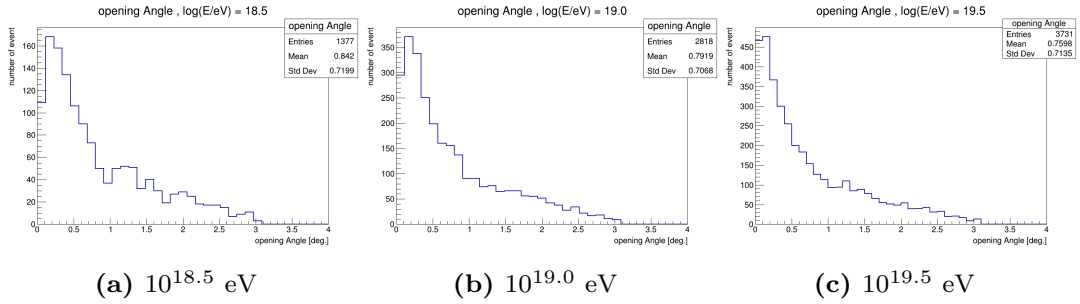


図 7.10: Opt-copter によって変更した視野方向での再構成と現行視野方向の再構成の空気シャワーの opening angle

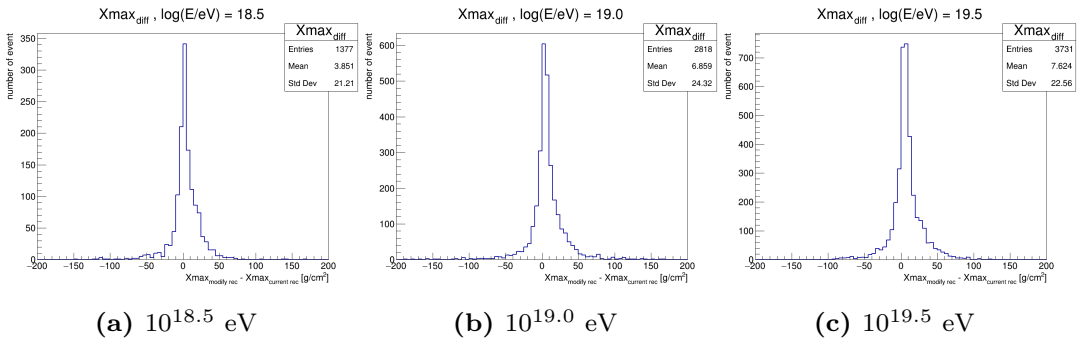


図 7.11: 2つ視野方向の再構成から得られた Xmax の差分

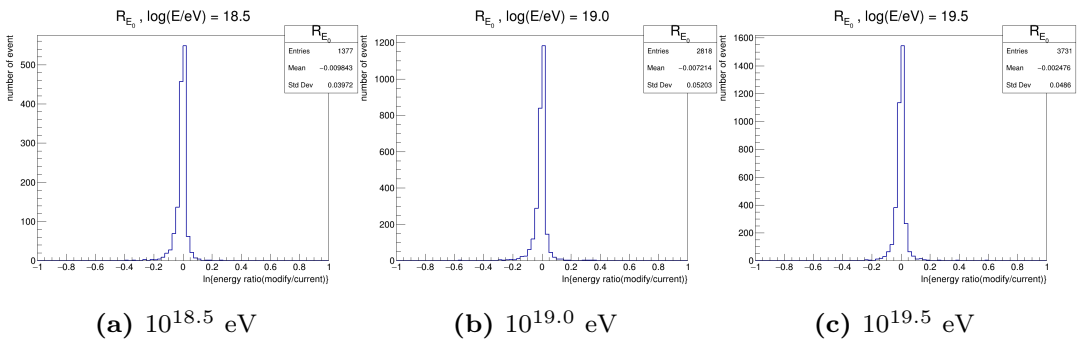


図 7.12: 2つ視野方向の再構成から得られたエネルギーの対数変化率

結果を見ると、Xmax に関して Opt-copter によって変更された視野方向で再構成された方が全てのしたエネルギーでは深くなった。また、生成する空気シャワーのエネルギーが大きいほど再構成する Xmax への影響が大きくなった。エネルギーに関して結果が Opt-copter によって変更した視野方向でのエネルギーの方が小さくなる結果となった。また、生成する空気シャワーのエネルギーを大きくす

るほど 2 つの再構成により得られるエネルギー比は小さくなった。視野方向を変更したことで空気シャワーのジオメトリ決定にも影響があった。

## 第 8 章

# 結論

### 8.1 まとめ

大気蛍光望遠鏡の光学特性を較正する装置として Opt-copter が開発され、TA 実験サイトの BRM ステーションの FD の視野方向が解析された。また、2019 年のフライトデータでの PMT 輪郭探索における視野方向解析を行った。

2018 年のフライトデータより解析された BRM ステーションすべての望遠鏡を用い、望遠鏡の視野方向が与える宇宙線空気シャワー解析への影響を見積もった。Xmax は、 $E_0 = 10^{18.5}$  eV の時  $+3.6 \pm 0.6$  [g/cm<sup>2</sup>]、 $E_0 = 10^{19.0}$  eV の時  $+6.9 \pm 0.5$  [g/cm<sup>2</sup>]、 $E_0 = 10^{19.5}$  eV の時  $+7.6 \pm 0.4$  [g/cm<sup>2</sup>] となった。

### 8.2 今後の展望

本解析ではモノ解析を用いて宇宙線再構成への影響を評価をしたが、地表検出機と大気蛍光望遠鏡を視野方したハイブリッド解析を用いより決定精度の高い解析方法での影響を見積る必要がある。

Opt-copter によって FD の収差も解析されており、この収差が与える宇宙線再構成への影響も見積もる。

TA 実験は BRM ステーション以外に 2 つのステーションがあり TA 実験全体で望遠鏡の光学特性をより把握するために、Opt-copter でのフライト実験が行われていない LR ステーション、MD ステーションで行い、光学特性を解析する必要がある。

## 第9章

# 謝辞

研究活動にあたり日頃から御指導いただきました富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。Opt-copter グループとして様々な御指導、ご協力してくださった日比亮佑氏、上野愛莉氏に深く感謝いたします。研究室のメンバーとして多くの時間を共にした齊藤亮介氏、阿部泰明氏、當波孝明氏、水野航太氏、宮下航平氏に深く感謝いたします。研究施設の利用やインターミーティングで様々なご指導をしてくださった TA コラボレーターの皆様に深く感謝します。