

令和 3 年度 修士論文

ドローン搭載型光源を用いた 大気蛍光望遠鏡の光学特性解析



提出者

信州大学 大学院 総合理工学研究科 工学専攻

中澤 新

2021 年 12 月 1 日提出

序論

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

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

Telescope Array (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 箇所のステーションに設置された大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector; FD) と多数の地表検出器の 2 種類の検出器を用いている．FD による宇宙線の正確な測定のためには，FD の光学特性を正確に把握し校正する必要がある．

そこで，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 (空中) の任意の位置に光源を飛行させることができる．このときの光源の飛行位置と FD で検出した光の重心を比較することで光学特性を解析する．これまで Opt-copter では，2018 年の実験データを用いた FD の視野方向解析を報告してきた．本論文では，新たに行った 2019 年の実験データを用いた視野方向解析の再現性の確認と誤差の算出，各 FD で集光してできる実像の解析，視野端の収差解析について報告する．

目次

第 1 章	超高エネルギー宇宙線	1
1.1	エネルギースペクトル	1
1.2	質量組成	2
1.3	到来方向	3
1.4	宇宙線観測と空気シャワー	3
第 2 章	Telescope Array 実験	5
2.1	地表検出器 (SD)	5
2.2	大気蛍光望遠鏡 (FD)	6
2.2.1	光学系	7
2.2.2	PMT カメラ	8
2.2.3	データ収集システム	9
第 3 章	大気蛍光望遠鏡の較正	11
3.1	CRAYS	11
3.2	YAP	12
3.3	Xe-フラッシャー	13
3.4	XY-スキャナー	13
3.5	UV-LED パルサー	14
3.6	CLF	15
第 4 章	ドローン搭載型光源	17
4.1	UAV Unmanned Aerial Vehicle	18
4.2	光源	18
4.2.1	LED	19
4.2.2	ディフューザー	19

4.3	測位用 RTK-GPS モジュール	19
第 5 章	Opt-copter 実験概要と計測データ	22
5.1	実験概要	22
5.2	光源位置	24
5.3	受光重心位置	24
5.4	光源位置の補正	26
第 6 章	視野方向解析の再現性と誤差	29
6.1	視野方向解析	29
6.1.1	解析手法	29
6.1.2	2018 年計測データと解析結果	30
6.2	2019 年計測データを用いた再現性の確認	31
6.3	コマ収差の影響	32
6.4	誤差の検討	34
第 7 章	集光像サイズ解析	37
7.1	解析概念	37
7.2	シミュレーション	39
7.2.1	Opt-copter シミュレーション	45
7.2.2	SSP と曲率半径	45
7.3	現行パラメータのシミュレーションと計測データ	48
7.4	最適値の探索	60
7.5	解析結果	60
第 8 章	集光像の形状比較	78
8.1	星の光による集光像	78
8.2	星による像の再現	79
第 9 章	結論	84
9.1	まとめ	84
9.2	今後の展望	84
第 10 章	謝辞	86

第 1 章

超高エネルギー宇宙線

宇宙線とは宇宙空間を飛び回る高エネルギーの放射線である。主に陽子からなり、そのほかにも様々な原子核が含まれている。宇宙線は 1912 年にオーストリアの物理学者である V.F.Hess によって発見され、現在も様々な実験によって観測や研究が進められている。また、宇宙線はこれまでに $10^8 eV$ から $10^{20} eV$ という幅広いエネルギー領域で観測されており、その到来頻度はエネルギーの 3 乗に比例して小さくなる。その中でも特に、 $10^{18} eV$ より大きなエネルギーを持つ宇宙線を超高エネルギー宇宙線と呼び、到来頻度がとても低い。地球上で観測される宇宙線は、太陽活動によって放出される太陽宇宙線、銀河系内の天体由来の銀河宇宙線、銀河系外由来の超高エネルギー宇宙線の 3 つに分けられる。また、宇宙空間から地球に降ってくる宇宙線そのものを一次宇宙線、一次宇宙線と地球大気が反応してできる二次粒子のことを二次宇宙線という。

1.1 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。このとき、 γ は $10^{15.5} eV$ 付近までは約 2.7、そこから $10^{18.5} eV$ 付近までは約 3.0、そこからは約 2.7 となっている。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宇宙空間における伝播の変化が関係しているのではないかと考えられている。さらに、 $10^{19} eV$ 付近で GZK カットオフと思われる構造が見える。GZK カットオフとは超高エネルギー宇宙線が宇宙背景放射と相互作用することによって急激にエネル

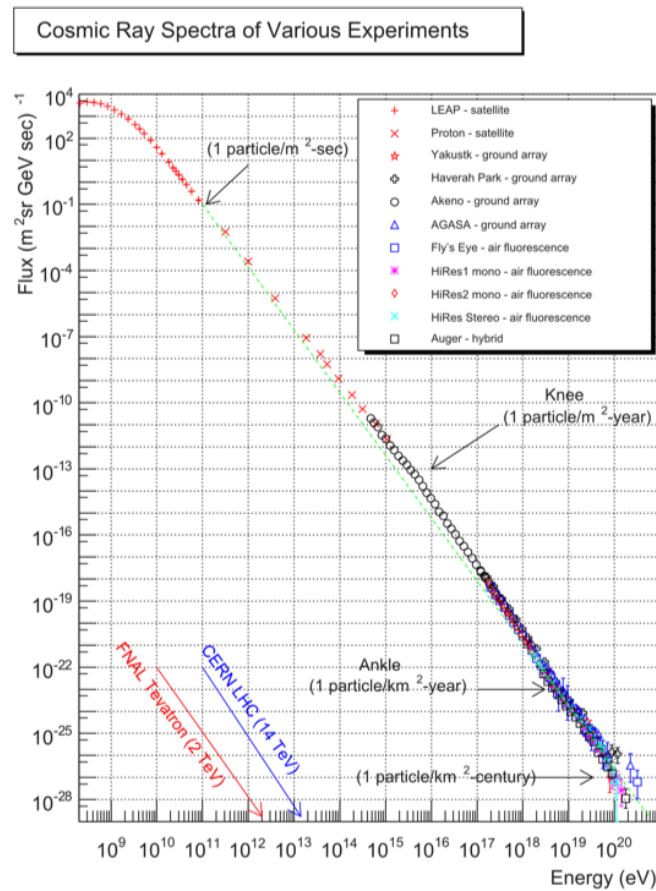


図 1.1: 一次宇宙線のエネルギースペクトル

ギーを失うことで地球への到来頻度が急激に減少することを言い、この現象を指摘した Greisen, Zatsepin, Kuzmin にちなんで名付けられた。ただし、超高エネルギー領域の到来頻度は極めて低く、観測統計量が不足しているため、正確なエネルギースペクトルは定まっていない。

1.2 質量組成

宇宙線の質量組成の違いは、その宇宙線の起源や加速機構、伝播中に衝突した星間物質の違いにより生じると考えられる。また、宇宙線の質量組成は空気シャワーの最大発達点 (X_{max}) の測定によって推定でき、宇宙線の質量が大きければ大きいほど相互作用の断面積が大きくなるため早い段階から空気シャワーの相互作用が進み、X_{max} は小さくなる傾向にある。

1.3 到来方向

宇宙線の化学組成において大部分を占める荷電粒子は、宇宙空間の電磁場によって影響を受ける。このため、銀河宇宙線の到来方向は等方的になり宇宙線の起源や加速機構を特定することは難しい。しかし、 $10^{18}eV$ を超えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線は銀河系内磁場の影響をほぼ受けないため、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。また、宇宙線の到来方向は空気シャワーのベクトルを調べることで明らかにすることができる。

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大気中の原子核と相互作用をおこし、二次粒子を生成する。また、この二次粒子も同様に相互作用をおこす。これが繰り返され、大気中に大量の二次粒子が発生する現象を空気シャワーと呼ぶ。図1.2に空気シャワー現象の模式図を示す。相互作用を繰り返すことによって、宇宙線のエネルギーは次々に生成される二次粒子に移っていき、この過程で二次粒子の数は大気の深さとともに増えていくが、エネルギー分配を続けて一定までエネルギーを失った粒子は電離損失によってエネルギーを失い大気に吸収される。このように大気の深さによって粒子数が増減する様子を空気シャワーの縦方向発達という。そして、粒子数が最も多くなる空気シャワーの最大発達点を X_{max} といい、宇宙線の質量組成の推定に用いられる。また、空気シャワーは軸に対して垂直方向にも広がり、この広がり様子を空気シャワーの横方向発達という。

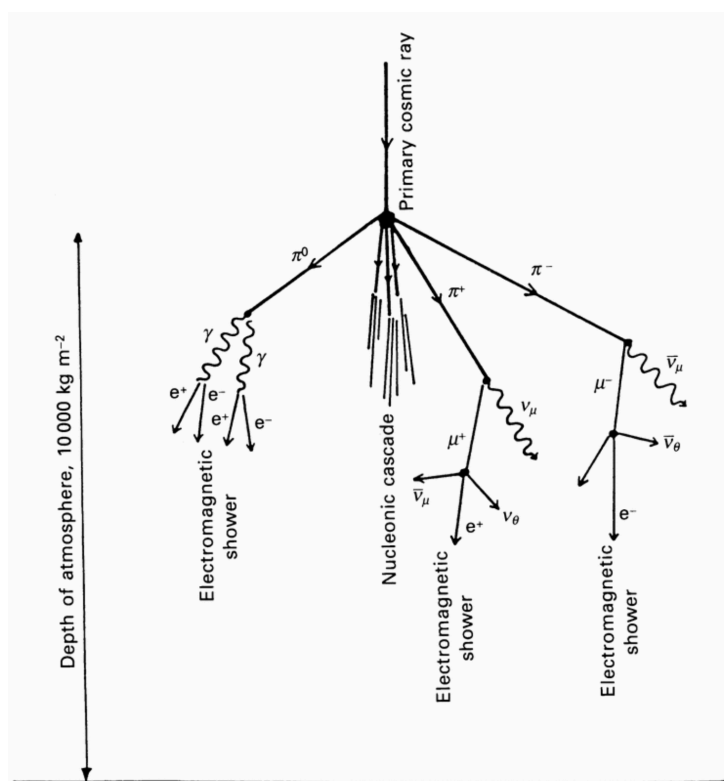


図 1.2: 空気シャワー現象の模式図

第2章

Telescope Array 実験

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

2.1 地表検出器 (SD)

TA 実験の SD はプラスチックシンチレーション検出器である。図 2.2 に SD の外観を示す。SD はプラスチックシンチレーターを 2 層にして使用しており、それによってノイズイベントを減らしている。プラスチックシンチレーターは空気シャワーの二次粒子に反応して発光し、その光を光ファイバーを用いて PMT に誘導している。SD はこれらを収納したシンチレータボックスの他に、エレクトロニクスとバッテリーを収納したステンレスボックスとシンチレーター無線通信用アンテナ

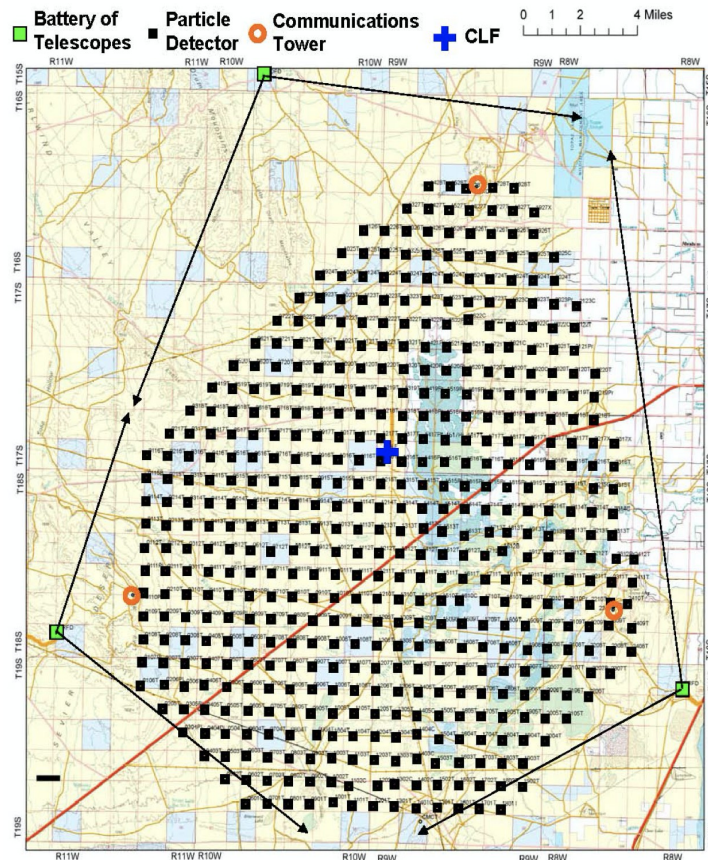


図 2.1: TA 実験における実験装置の配置

ナ、ソーラーパネルで構成されている。図 2.3 にシンチレータボックスの内部構造を示す。また、SD はソーラーパネルとバッテリーを電力源とすることで外部からの供給なしに 24 時間 365 日自立稼働し観測を行うことができ、GPS により時刻情報を取得している。

2.2 大気蛍光望遠鏡 (FD)

TA 実験の FD は空気シャワーによって発生する大気蛍光を複合球面鏡で集光し、それを PMT カメラで撮像観測する装置である。図 2.4 に FD の外観を示す。FD は TA サイト上空をカバーするように 3 箇所の FD ステーションに設置されている。BR と LR にはそれぞれ 12 台の FD が設置され、MD には 14 台の FD が設置されている。なお、MD に設置されている FD は HiRes が使用していたものである。また、観測時間外は FD ステーションのシャッターは閉められており、FD



図 2.2: Surface Detector の外観

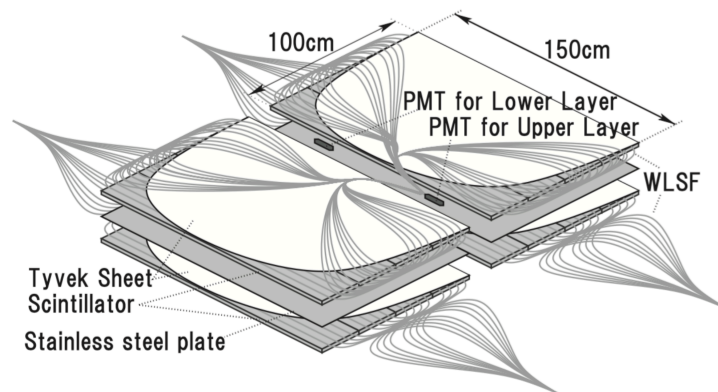


図 2.3: シンチレータボックスの内部構造

を保護している。

2.2.1 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 3.3m、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 30mm 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

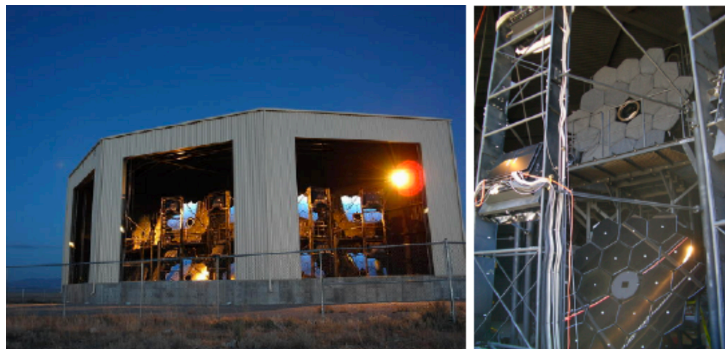


図 2.4: BR ステーションと FD

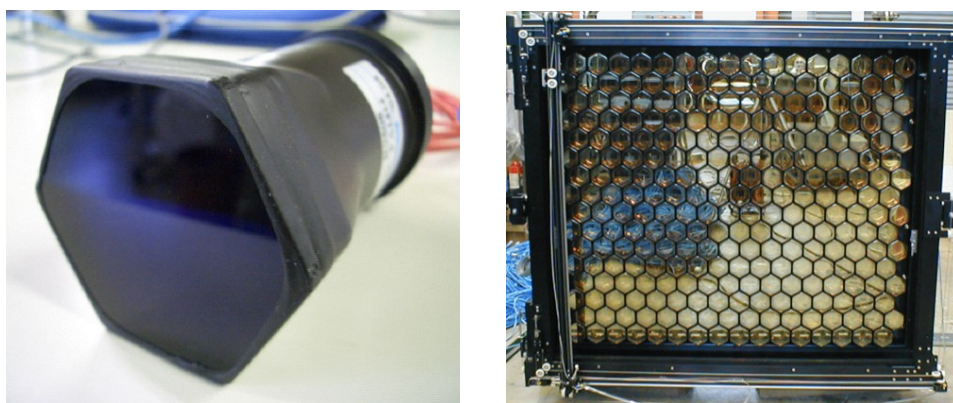


図 2.5: 使用している PMT とカメラボックス

整されている。

2.2.2 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 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 2.5 に示す。また、各 PMT には図 2.6 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 $300 \sim 400\text{nm}$ 以外の光をカットするようになっている。また、PMT1 本あたり約 1×1 度の視野を持っている。

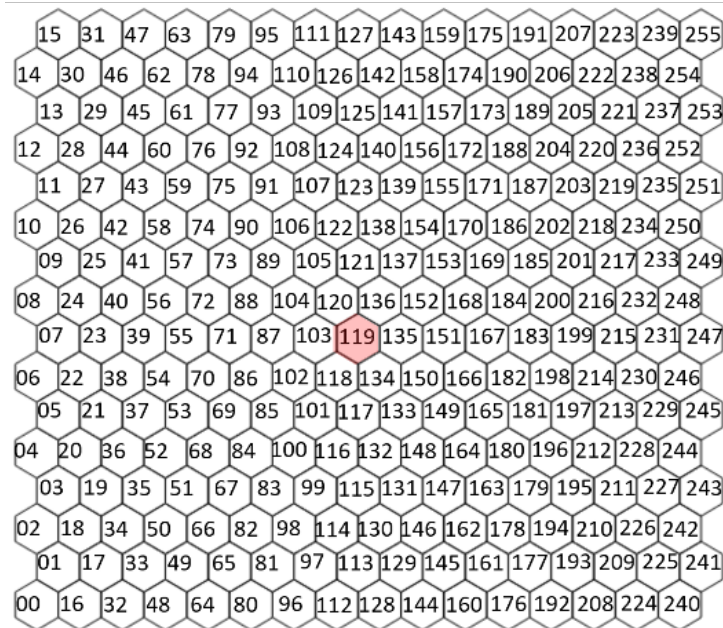


図 2.6: PMT 番号

2.2.3 データ収集システム

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

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 12bit、40MHz でサンプリングを行い、フラッシュ AD コンバーターでデジタル変換を行う。サンプリングされたデータは 4bin(100[ns]) 毎に積分され、12.8 μ s 毎に記録される。記録されたデータ毎に S 比による SN 判定を行い、その判定結果を TF ボードに送信する。SDF ボード一枚には 16ch あり、それぞれ 1 本の PMT の判定をおこなうので、各カメラ毎に 16 枚の SDF が必要である。

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

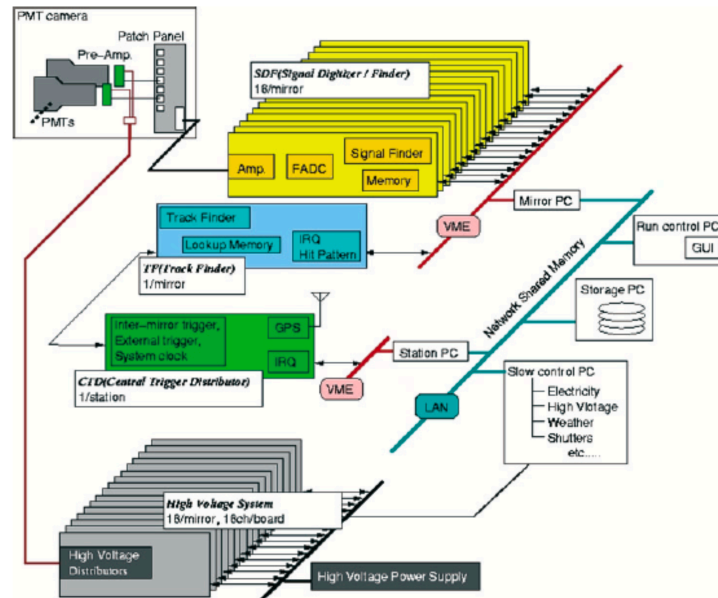


図 2.7: エレクトロニクスの概略図

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 を動悸させるための初期化信号の生成も行う。

FD は空気シャワーからの大気蛍光を測定することで、その発光量や発達過程から 1 次宇宙線のエネルギーや空気シャワーの最大発達深さを知ることができる。

第3章

大気蛍光望遠鏡の較正

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の感度や向いている方向の較正や、大気状態のモニターが重要である。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た待機中の空気シャワーの粒子分布を算出する必要があり、さらに回答の応答や各部の増幅率、量子効率、光学系の反射率、透過率などをあらかじめ把握する必要がある。そのため、TA実験のFDは様々な装置によって較正されている。

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を較正する。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。

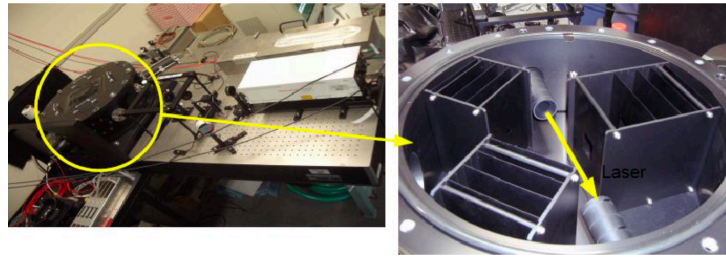


図 3.1: CRAYS の概観

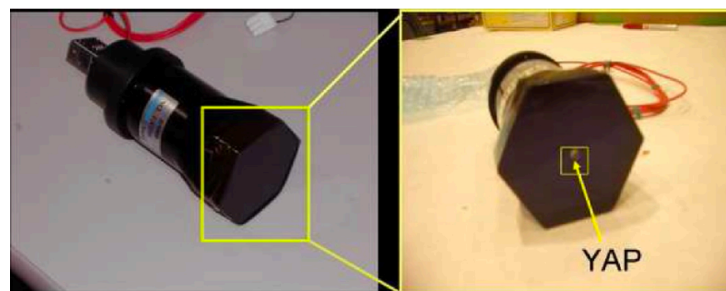


図 3.2: YAP の概観

3.2 YAP

Yttrium Aluminum Perovskite(YAP) は CRAYS によって校正された基準 PMT の光電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 の経年変化を測定している。YAP は $YAlO_3 : Ce$ シンチレーターを窓とする直径 $4mm$ 、高さ $1mm$ の円筒容器内にアメリカシウム-241(^{241}Am) 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 $370nm$ 、パルス幅は約 $20nsec$ 、PMT 光電面で発生する光電子数は約 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 3.3: Xe-フラッシャーの照射イメージ

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のゲイン調整及びモニターを行う。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 $2 \times 10^4 \text{pe/pulse}$ のパルス光を 25Hz 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。

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校正する。この測定によって、 $\text{QE} \times \text{CE} \times \text{PMTgain}$ 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 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

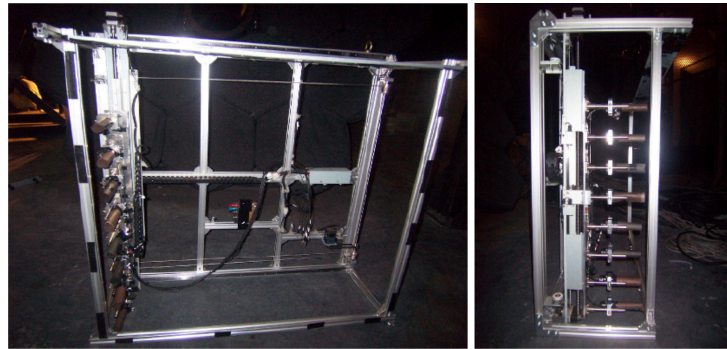


図 3.4: XY-スキャナーの概観

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 $365 \pm 10\text{nm}$ の単色光を発し、そのパルス幅は 400nm 、スポットサイズは $3.83\text{mm}(1.65\sigma, 90\%)$ 、光量は約 1000pe/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 3.4 に示す。

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 521mm 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。

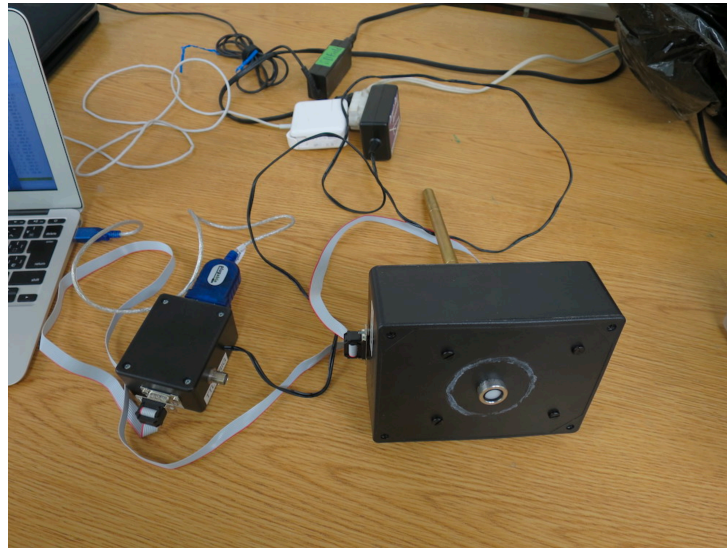


図 3.5: UV-LED パルサーの概観

3.6 CLF

Central Laser 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、大気透明度の測定に使用される。CLF の概観と内部を図 3.6 に示す。YAG レーザー (355nm) 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。

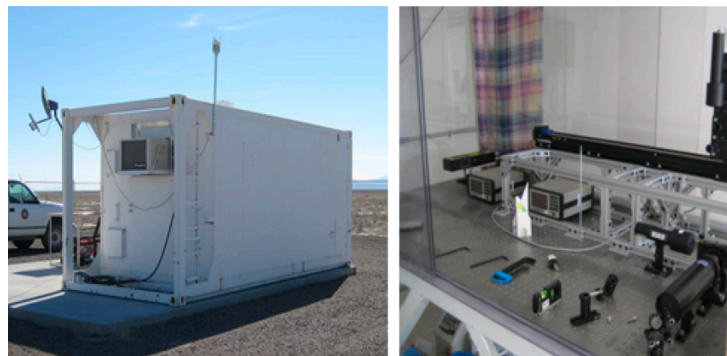


図 3.6: CLF の概観と光学系

第4章

ドローン搭載型光源

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、位置が正確にわかる光源を望遠鏡の視野内に任意に設置できる較正装置として、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を開発している。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。



図 4.1: Opt-copter 外観図

4.1 UAV Unmanned Aerial Vehicle

UAV には DJI 社の S1000+ を用いる。S1000+ の仕様を表 4.1 に示す。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。送信機による手動での操作のほかに、GPS 座標や高度などを設定することで自動飛行も可能である。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。また、飛行時は離着陸時に設置する脚が上がるため光源の邪魔にならないなど、飛行型校正装置として適した UAV である。光源の取り付け場所は本体下の中心となる。

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 $\pm 0.25m$ 、水平方向に $\pm 0.75m$ 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。また、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。

4.2 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。一様性は FD 視野内での Opt-copter の位置と姿勢に光量が依存しないようにするためである。安定性は FD の校正に直接影響する。軽量化は Opt-copter の飛行時間が積載量に依存するためである。また、光源は回転させと場合、少なくとも 10 度から 20 度で均一であるべきである。光源には球体に近似した性能を持たせるために正十二面体の各面に LED を搭載したものを使用する。光源の様子を図 4.2 に示す。また、一様性を高めるために光源はディフューザーで覆われている。

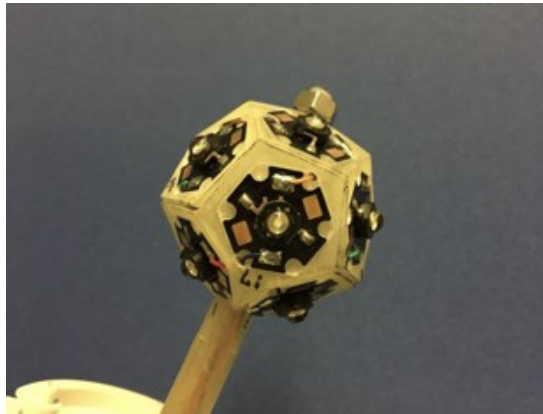


図 4.2: LED を搭載した正十二面体光源

4.2.1 LED

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、この LED はランバート・シリコンレンズで覆われており、 130 度の半値全幅と対称の放射パターンを持つ。

4.2.2 ディフューザー

ディフューザーは光源の一様性を高めるために必要であり、球体であることが望ましい。ただし、UAV に搭載可能な大きさ、重さでなければならない。また、透過率や拡散率も一様であることが望ましい。Opt-copter では市販されている照明に付属している外装をディフューザーとして使用する。ディフューザーの材質はシリコンであり、大きさは半径 $70mm$ である。ディフューザーの概観を図 4.3 に示す。

4.3 測位用 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し、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



図 4.3: 使用しているディフューザー

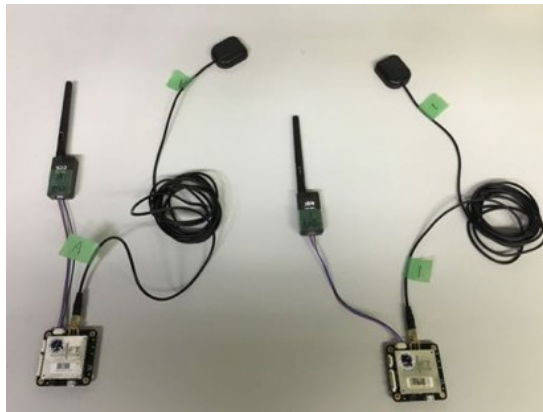


図 4.4: RTK-GPS モジュール piksi

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。また、使用前に校正する必要がある。2つのモジュールの距離を 1m にし 90 分ほど行う。基準局側のモジュールはパソコンに接続し、アプリケーション「Piksi Console」を用いて校正及びデータ取得を行う。取得されたデータにはタイムスタンプが押されるが、UTC と違いうるう秒の補正がされていないためデータ使用時はうるう秒の補正を行う。これまでに精度評価試験が行われており、誤差が 10cm 以内になることを確認している。

表 4.1: S1000+ の仕様

Product	
Diagonal Wheelbase	1045 mm
Specifications	
Frame Arm Length	386 mm
Frame Arm Weight (with Motor, ESC, Propeller)	325 g
Center Frame Diameter	337 mm
Center Frame Weight (with Landing Gear Mounting Base, Servos)	1520 g
Landing Gear Size	460 mm × 511 mm × 305 mm
Motor	
Stator Size	41 × 14 mm
KV	400 rpm/V
Max Power	500 W
Weight(with Cooling Fan)	158 g
ESC	
Current	40 A OPTO
Voltage	6S LiPo
Signal Frequency	30 Hz ~ 450 Hz
Drive PWM Frequency	8 kHz
Weight(with Radiators)	35 g
Foldable	
Material	High strength performance engineered
Propeller (1552/1552R)	
Material	plastics
Size	15 × 5.2 inch
Weight	13 g
Flight	
Takeoff Weight	6.0 kg ~ 11.0 kg
Parameters	
Total Wight	4.4 kg
Power Battery	LiPo (6S, 10000 mAh ~ 20000 mAh, (Min.)15 C)
Max Power Consumption	4000W
Hovering Power Consumption	1500 W (@9.5 Kg Takeoff Weight)
Hover Time	15 min (@15000 mAh & Takeoff Weight 9.5 Kg)

第5章

Opt-copter 実験概要と計測データ

FD の光学的特性の較正を目的として, Opt-copter を飛行させ FD を用いた Opt-copter 光源の撮影実験を行った.

5.1 実験概要

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 μ sec

FD 対象 FD 2018 年 FD00~11, 2019 年 FD04~FD07

撮影頻度 10~30 Hz

実験は図 2.1 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 5.1 に BR ステーションの鳥瞰図を示す. 図 5.1 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

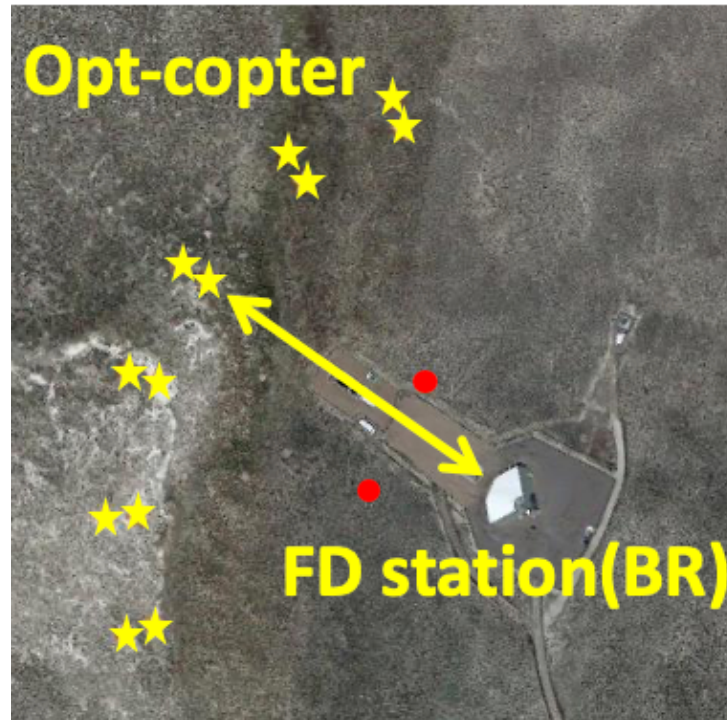


図 5.1: BR ステーションの鳥瞰図

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

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 5.2 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 1 m 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 1 m 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 μ 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 5.2: 実験時のサーベイマーカー付近の様子

5.2 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 5.3 に示す．図 5.3a は 2018 年の計測データ，図 5.3b 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 5.4 と 5.5 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．

5.3 受光重心位置

FD では図 5.6 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 の感度校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 5.1 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

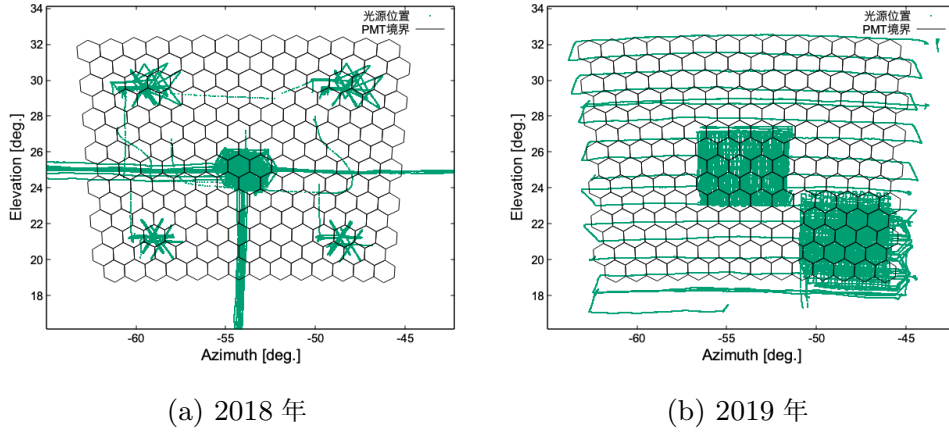


図 5.3: FD1 台分の FD 視野上に投影した光源位置

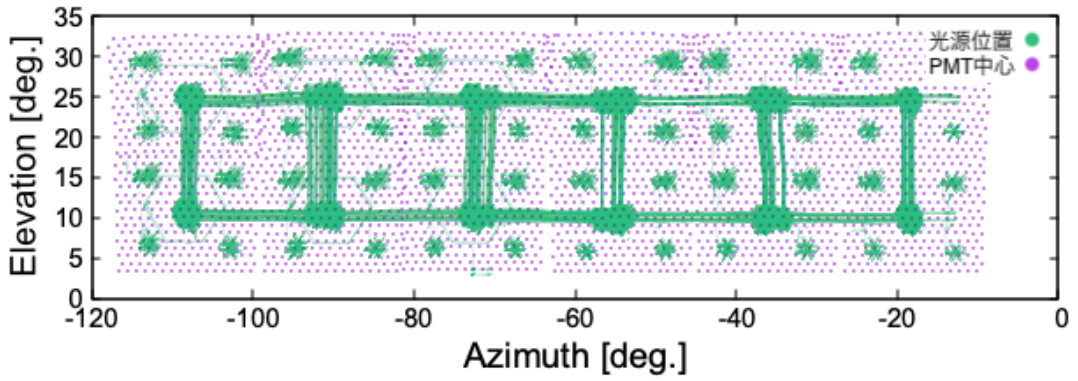


図 5.4: 2018 年の全フライトを FD 視野上に投影した光源位置

と扱う.

$$Azi_{.cog} = \frac{\sum_i N_{pmt_i} Azi_{.pmt_i}}{\sum_i N_{pmt_i}} \quad Ele_{.cog} = \frac{\sum_i N_{pmt_i} Ele_{.pmt_i}}{\sum_i N_{pmt_i}} \quad (5.1)$$

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 5.7 に示す. 図 5.7 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.

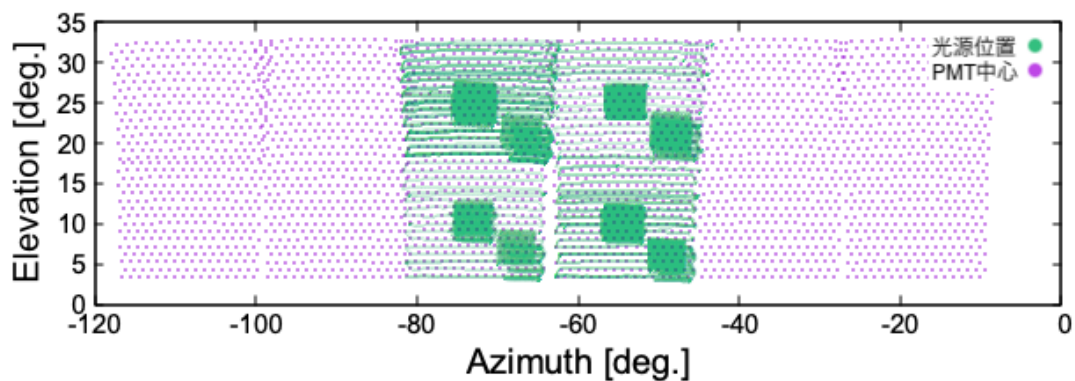


図 5.5: 2019 年のフライトを FD 視野上に投影した光源位置

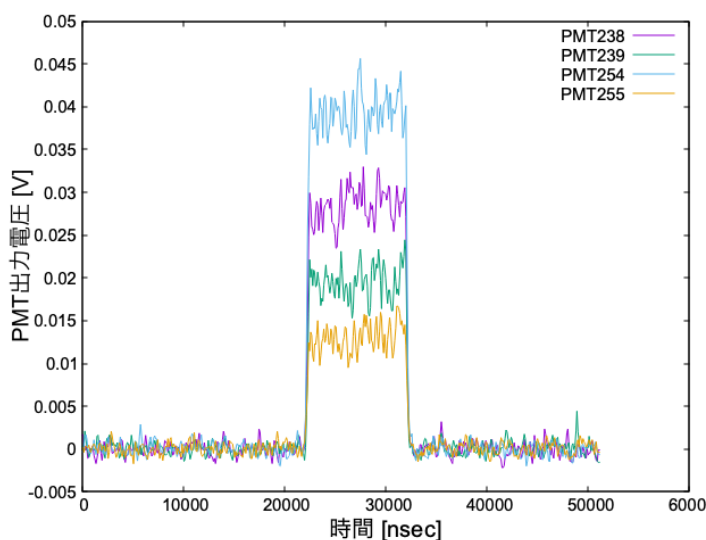


図 5.6: 光源の光を検出した PMT の出力電圧

5.4 光源位置の補正

測位用 RTK-GPS モジュールの計測データは分解能や通信状況によって図 5.8 のように階段状になっていたり，稀にデータ抜けがある．これを補正するために B スプライン補間を使用している．B スプライン補間は領域を区切り，徐々に補間をしていく補間方法の一種である．基本的に制御点を通らず，前後の制御点から滑らかな曲線を生成する．また，一部の制御点を変更しても曲線全体に影響しない特徴がある．なお，B スプライン補間の際には階段状の連続点のうち 3 点目までを使用

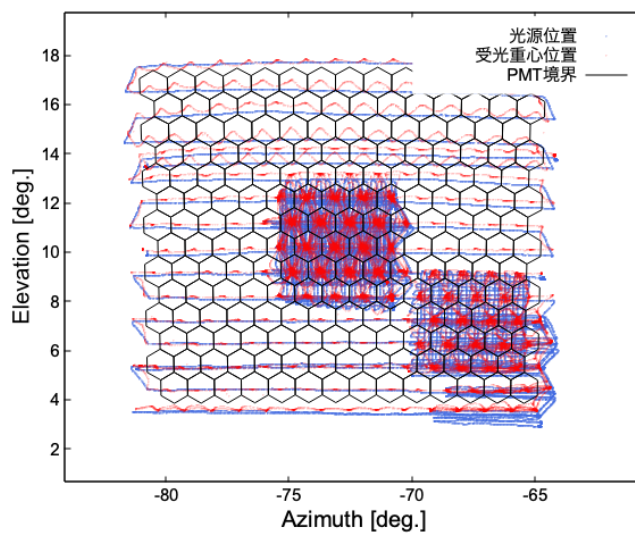


図 5.7: 光源位置と受光重心位置

している。補間前後の計測データを図 5.9 に示す。また、その他に時刻情報が実際よりも 0.3sec 程度遅れているため、時刻を補正している。

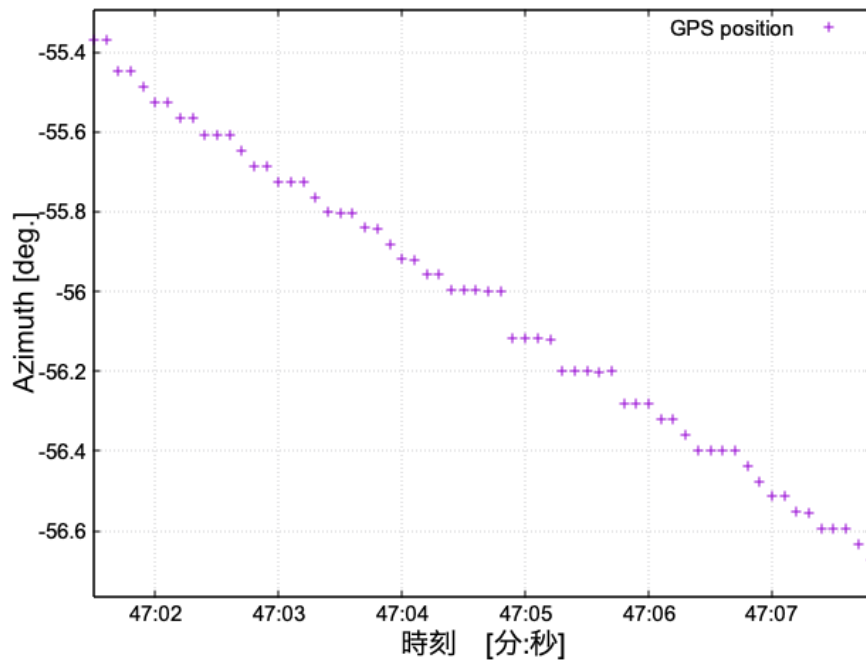


図 5.8: 測位用 RTK-GPS モジュールによる計測データ

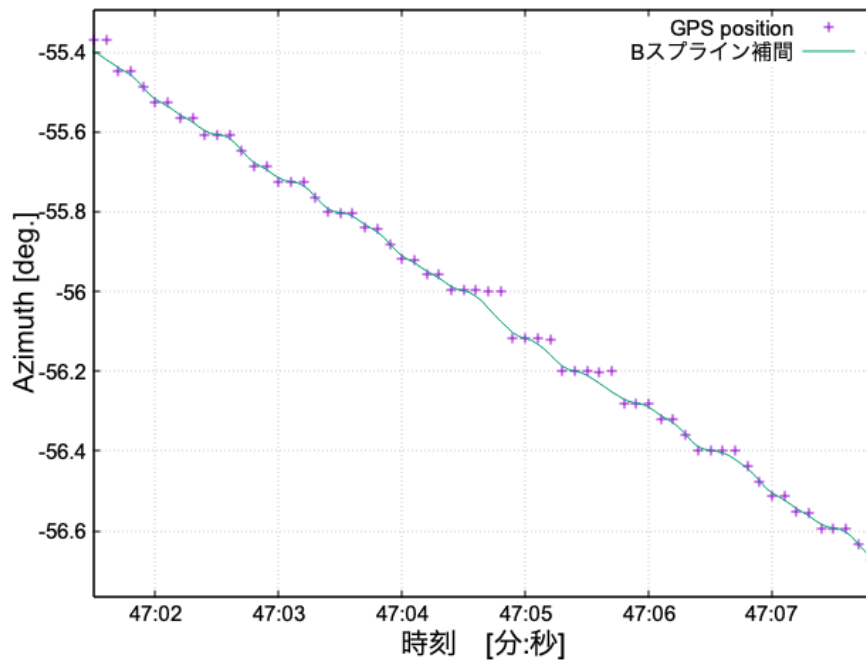


図 5.9: B スプライン補間による計測データの変化

第6章

視野方向解析の再現性と誤差

これまでに Opt-copter では、2018 年の計測実験を基に FD の実際の視野方向と想定 of 視野方向の差を解析してきた。新規に 2019 年に計測実験を行ったため、その際の計測データを用いて同様の手法で実際と想定 of 視野方向の差を解析し、解析結果の再現性の確認と誤差の検討を行った。

6.1 視野方向解析

6.1.1 解析手法

FD の受光位置が一点決まるとき、その瞬間の Opt-copter の光源位置と比較することで実際と想定 of FD 視野方向の差が求められる。この時の FD の受光位置として 5.3 章で述べた受光重心位置を使用する。ここで問題となるのがスポットサイズによる受光重心位置の PMT 中心座標への偏りである。5.3 章でも述べたように、受光重心位置は光源の光を検出した PMT の受光量と中心座標を用いて算出した重心のため、FD 感光面上にできた実像の中心を表すわけではない。よって、ある瞬間の受光重心位置と光源位置一点ずつを直接比較しただけでは、FD の実際の視野方向を求めることはできない。ただし図 6.1a から、受光重心位置 (赤) と光源位置 (青) の全体の傾向として、この FD に関しては受光重心位置に対して光源位置が下にずれていることがわかる。これは、FD の視野方向が想定よりも下を向いているためだと考えられる。したがって、ある一点の記録で偏りがある場合でも統計的に受光重心位置と光源位置を比較することで実際と想定 of FD 視野方向の差が求められる。また、本解析では各 FD の視野中心に最も近い PMT119 を中心として方位角、仰角それぞれ 3° ずつの四角形内に光源位置のある計測データを抽出

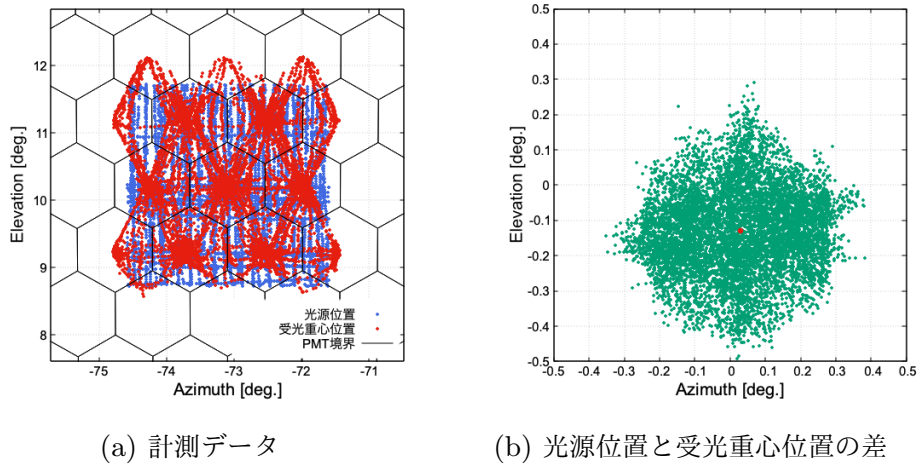


図 6.1: FD05 の計測データと光源位置と受光重心位置の差

し解析している．これは，視野端では収差によって FD 感光面上にできる光源の像が伸びるためである．そして，抽出した計測データに対して式 6.1 のように受光重心位置と光源位置の差分の平均を方位角と仰角それぞれに対して求め，FD の実際の視野方向と想定 of 視野方向の差とした．

$$\Delta Azimuth = \frac{\sum_{i=1}^n Azi_{.ls_i} - Azi_{.cog_i}}{n} \quad \Delta Elevation = \frac{\sum_{i=1}^n Ele_{.ls_i} - Ele_{.cog_i}}{n} \quad (6.1)$$

ここで， $Azi_{.ls}$ と $Ele_{.ls}$ はそれぞれ光源位置の方位角と仰角， $Azi_{.cog}$ と $Ele_{.cog}$ はそれぞれ受光重心位置の方位角と仰角を表す．また，このときの光源位置と受光重心位置の差を図 6.1b に示す．図 6.1b 中の緑の一点一点がとある時刻の光源位置と受光重心位置の差であり，赤の点は緑の点すべての平均である．

6.1.2 2018 年計測データと解析結果

上記の解析が 2018 年の計測データに対して既に行われ報告されている．報告されている想定に対する実際の FD 視野方向ずれを表 6.1 に示す．この表からわかるように方位角に比べ仰角のずれが大きく，FD は想定よりも下を向いていた．また，解析時に抽出された光源位置と受光重心位置の比較，光源位置と受光重心位置の差の分布を図 6.2～6.5 に示す．

表 6.1: 想定に対する実際の FD 視野方向のずれ

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
Δ Azimuth [deg.]	0.05	0.00	0.04	0.04	0.04	0.02	0.01	-0.04	0.01	-0.05	-0.02	0.01
Δ Elevation [deg.]	0.11	-0.04	0.02	-0.03	-0.04	-0.12	-0.05	-0.14	-0.12	-0.19	-0.14	-0.15

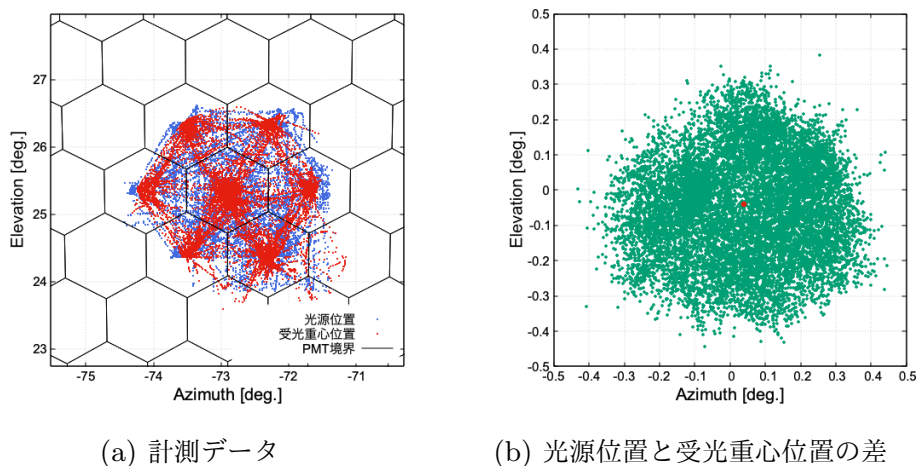


図 6.2: FD04 の 2018 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

6.2 2019 年計測データを用いた再現性の確認

FD の設置角度等は簡単に変化することはないと考えられるため、新規に 2019 年の計測データに対して本章の解析を行い、2018 年計測データの解析結果を再現するか確認した。2018 年と同様に解析時に抽出された光源位置と受光重心位置の比較、光源位置と受光重心位置の差分の分布を図 6.6~6.9 に示す。また、解析により求められた想定に対する実際の FD 視野方向ずれを表 6.2 に示す。期待通り各 FD の解析結果は 2018 年と 2019 年で定性的に一致していることがわかる。また、各年の解析結果の差は最大でも 0.02° であった。この差は、RTK-GPS モジュールの再起動による影響とドローンのフライトコースの変化による影響、計測データの不均一性による影響を含んだ値である。

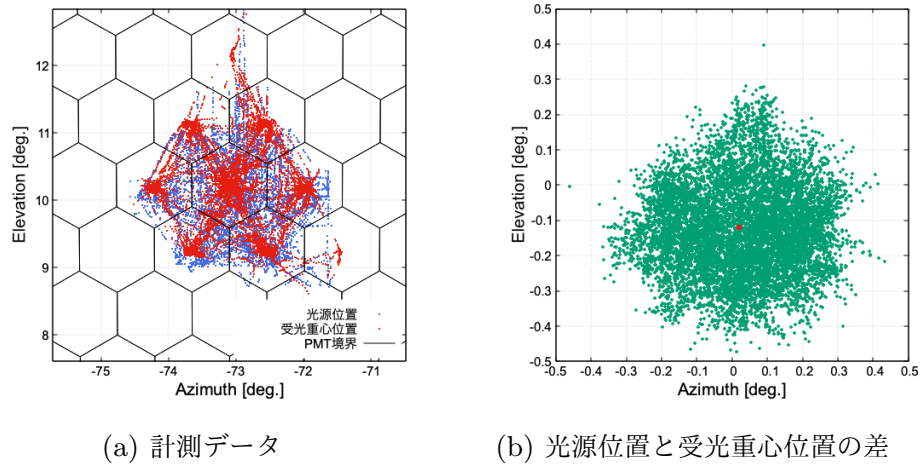


図 6.3: FD05 の 2018 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

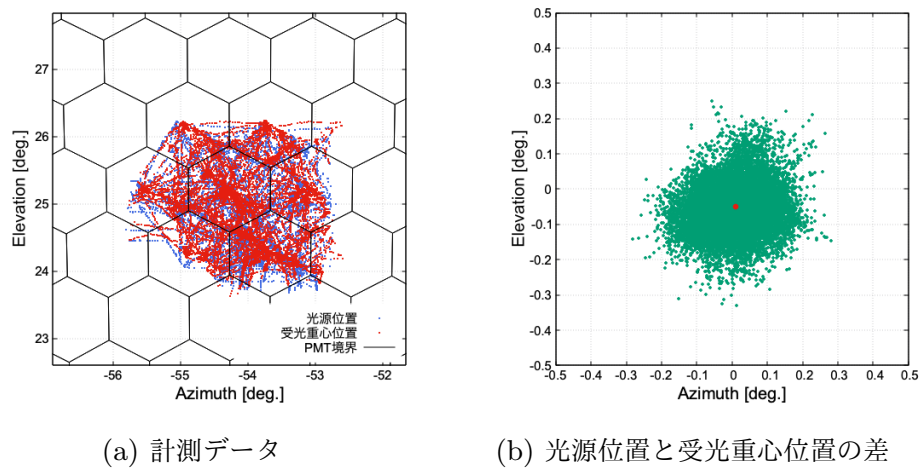


図 6.4: FD06 の 2018 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

6.3 コマ収差の影響

FD のような望遠鏡はレンズやミラーを用いて集光したとき、光軸に対して斜めに入射した光は外側に伸びた像を作る。これをコマ収差といい、光の光軸に対する入射角が大きくなるほど像の伸びは大きくなる。よって、本章の解析はコマ収差の影響がなるべく小さくなるように FD の視野中心で行われる。ただし、完全な視野中心で解析を行うことは不可能であり、わずかにコマ収差の影響を受ける。この影

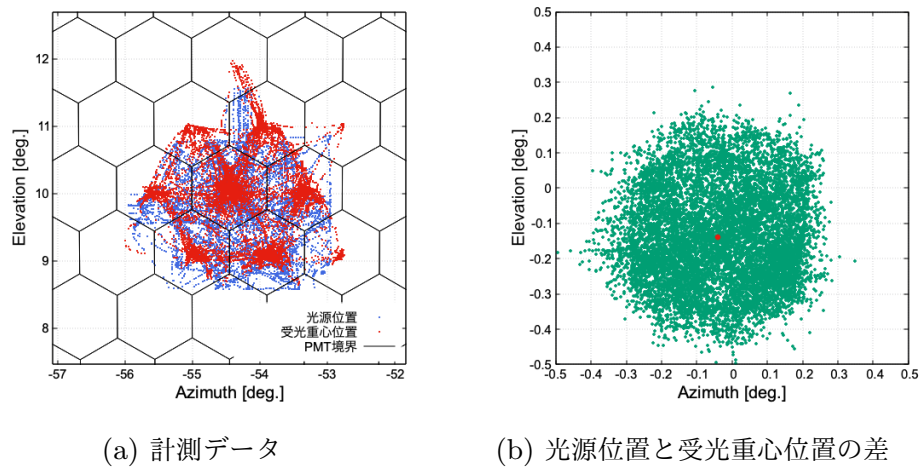


図 6.5: FD07 の 2018 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

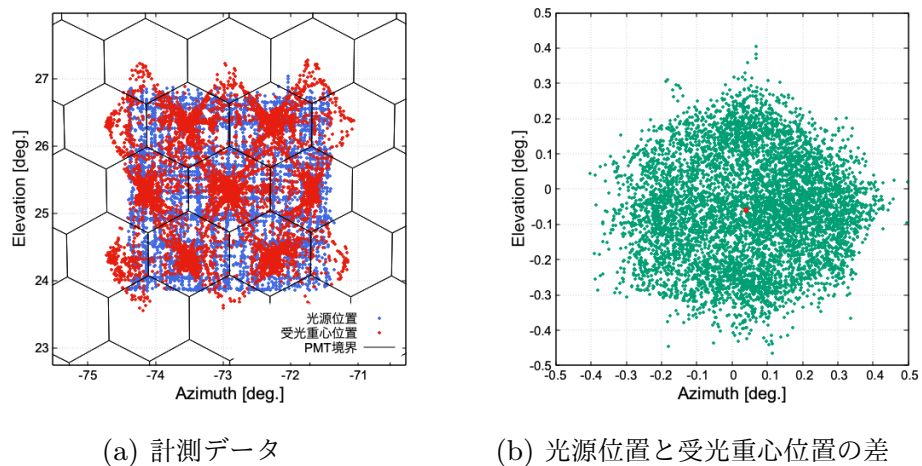


図 6.6: FD04 の 2019 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

響の大きさを見積もるために、PMT119 とそれに隣接する 6 本の PMT を基準にデータを抽出し同様の解析を行った。解析時に抽出した光源位置と受光重心位置の比較を図 6.10 に示す。図中の六角形の PMT 境界のうち、境界線が太い箇所は PMT119 の検出面輪郭を表している。また、解析により求められた想定に対する実際の FD 視野方向ずれを表 6.3 にまとめた。PMT119 を基準に計測データを抽出した場合とその周辺 6 本それぞれの PMT を基準に計測データを抽出した場合の解析結果の差は最大でも 0.02° であった。この差は、コマ収差による影響と計測データの不均一性による影響を含んだ値である。

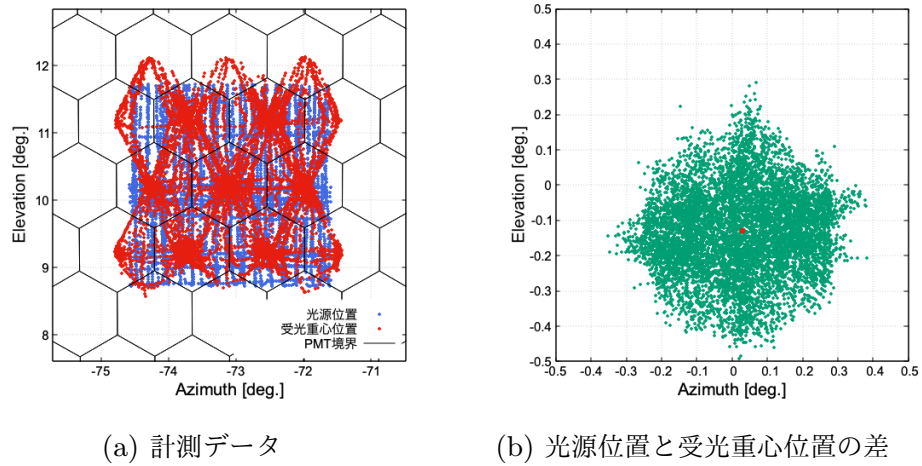


図 6.7: FD05 の 2019 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

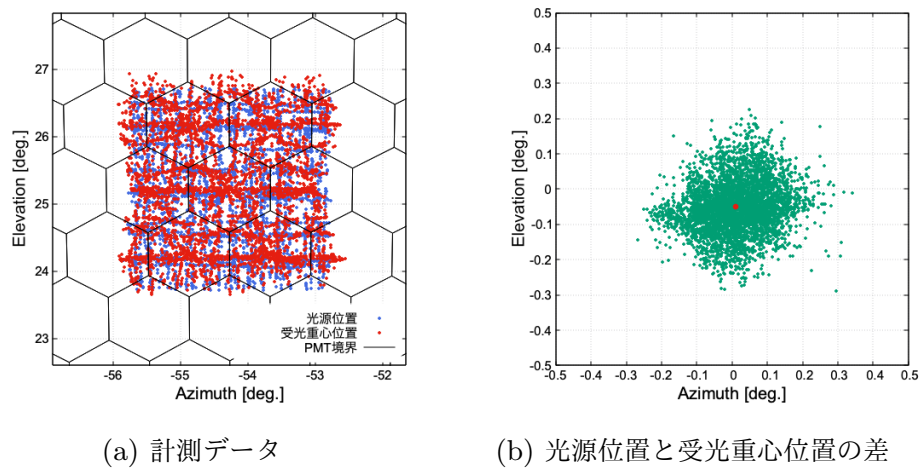


図 6.8: FD06 の 2019 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

6.4 誤差の検討

本章の解析では、平均値を解析結果として計上しているため、統計誤差として標準誤差を使用し、これは 0.001° 程度である。その他に、6.2 章で述べたように 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は 0.02° であり、6.3 章で述べたコマ取差と計測データの不均一性による誤差は 0.02° である。以上から本解析の誤差は 0.03° となる。

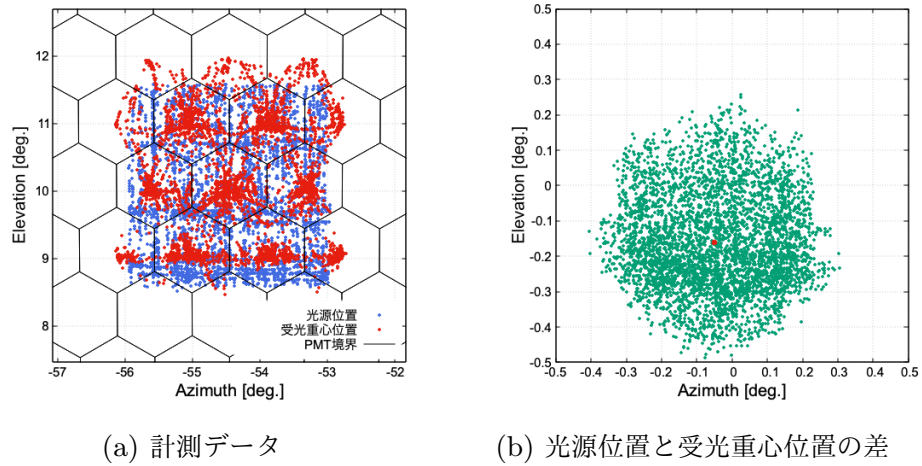


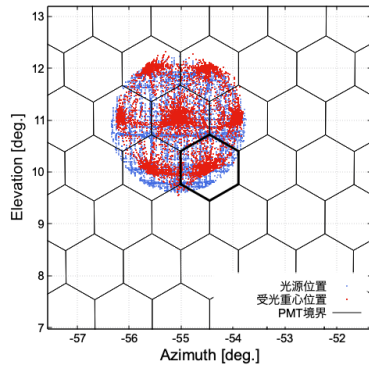
図 6.9: FD07 の 2019 年の計測データと光源位置と受光重心位置の差

表 6.2: 2019 年計測データを使用した解析時の想定に対する実際の FD 視野方向のずれ

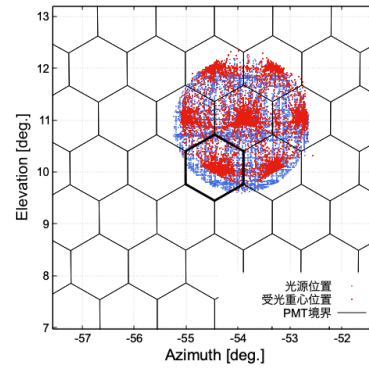
	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
Δ Azimuth [deg.]	-	-	-	-	0.04	0.03	0.01	-0.05	-	-	-	-
Δ Elevation [deg.]	-	-	-	-	-0.06	-0.13	-0.05	-0.16	-	-	-	-

表 6.3: 2019 年の FD07 計測データを使用したデータ抽出基準の変更時の想定に対する実際の FD 視野方向のずれ

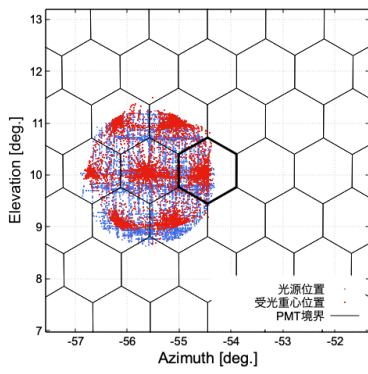
	PMT103	PMT118	PMT119	PMT120	PMT134	PMT135	PMT136
Δ Azimuth [deg.]	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.04
Δ Elevation [deg.]	-0.13	-0.12	-0.14	-0.15	-0.13	-0.14	-0.15



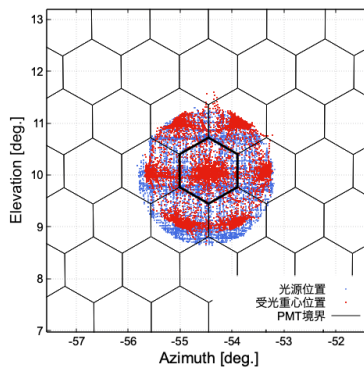
(a) PMT120



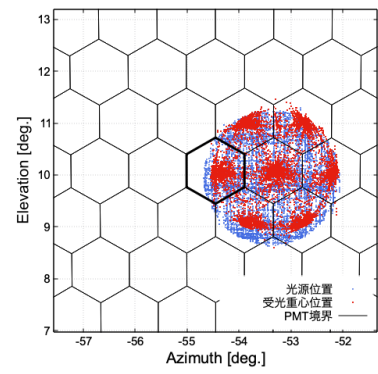
(b) PMT136



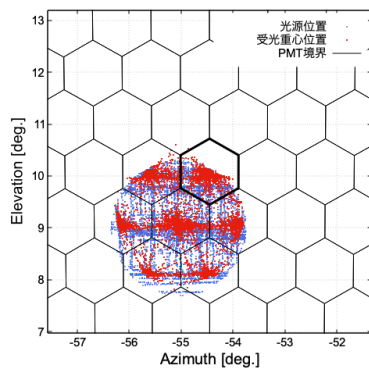
(c) PMT103



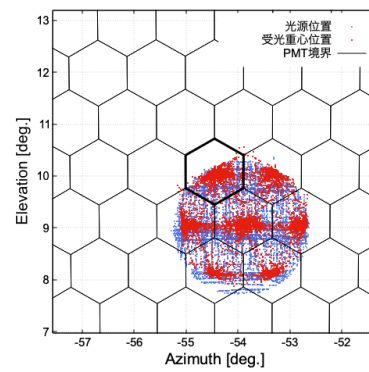
(d) PMT119



(e) PMT135



(f) PMT118



(g) PMT134

図 6.10: FD07 のデータ抽出基準 PMT ごとの光源位置と受光重心位置

第7章

集光像サイズ解析

FDの観測に大きく関わる光学的特性は視野方向と集光の2つが挙げられる。これまで、Opt-copterはFDの視野方向の解析に使用され、 0.03° の精度でのFD視野方向の較正を可能とした。これにより、BRステーションのFD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。そこで次に、FD観測に関わるもう1つの光学的特性である集光の解析をした。FDのような望遠鏡はレンズやミラーを用いて集光したとき、光が光軸に対して水平に入射した場合と光軸に対して斜めに入射した場合には集光像の形状が異なる。光が光軸と水平に入射した場合は点対称な像ができるのに対して、光が光軸に斜めに入射した場合は像の外側にコマ状の尾を引いたような歪みが生じる。これをコマ収差という。この歪みは光軸に対する光の入射角に比例して大きくなる。FDでこの歪みを補正するためにまず、視野中心すなわち光軸に対して水平に光が入射したときの像の形状を正確に把握する必要がある。本章ではFDの視野中心における集光像サイズ解析について述べる。

7.1 解析概念

5.3章で述べたように、我々はFDの受光位置として光を検出したPMTの信号の重心を使用している。このため、PMT感光面上における集光像サイズによって光子を検出するPMTの数が増減し、光源が移動したときの受光重心の移り変わりは異なる。ここで、図7.1のように集光像サイズが極端に大きなきと小さなきを想定する。このときに、図7.2のように光源がPMT境界を横切るように水平に移動する状況を考える。集光像サイズが極端に大きなきは多くのPMTが光を検出することによって、光源位置と受光重心位置が一致する。よって、図7.3のよう

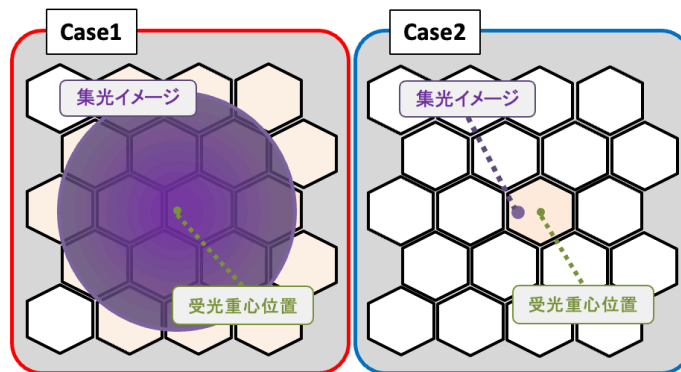


図 7.1: 集光像サイズが極端に大きな場合と極端に小さな場合の集光イメージ

に対象とした PMT 中心からの光源位置と受光重心位置の開き角の関係は、一次関数のようになる。逆に、集光像サイズが極端に小さなときは 1 本の PMT だけが光を検出することによって、光を検出した PMT の中心座標と受光重心位置が一致する。よって、図 7.3 のように対象とした PMT 中心からの光源位置と受光重心位置の開き角の関係は階段状になる。したがって、Opt-copter の光源によってできる集光像が PMT の境界を横切るときの Opt-copter の見かけの視野方向と受光重心の視野方向、この 2 つの値の関係に着目することで集光像サイズを推定することができる。実際の計測データの水平方向における、光源位置と受光重心位置の関係を図 7.4~7.15 の (a) に示す。ただし、図 7.4~7.15 の (a) は図 7.16 の (a) のように光源位置が FD の視野中心の PMT119 の中心から仰角方向に開き角 0.2° 以内の計測データを用いてプロットしている。図 7.4~7.15 の (a) は大きく分けて 2 種類に分けてみることができる。FD00,02,06,08,10 の上視野の多くの FD は直線に近くなっており、下視野の FD01,03,05,07,09,11 と上視野の FD04 は階段に近い形状をしている。この形状の違いが集光像サイズの違いを表している。また、これにより FD04 を除く上視野の FD は FD04 と下視野の FD に比べて主要な部分の集光像サイズが大きい事がわかる。これはこれまでの解析結果や、望遠鏡の建設当時の情報と一致している。図 7.4~7.15 の (a) では計測データの水平方向における関係を示したが、PMT の検出面は六角形になっているため、残りの斜め 2 方向の同様の関係を図 7.4~7.15 の (b) と (c) に示す。斜め 2 方向でも水平方向と同様に FD04 を除く上視野の FD は直線に近くなっており、FD04 と下視野の FD は階段に近い形状をしている。

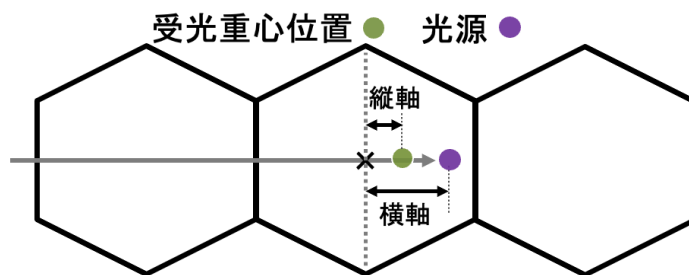


図 7.2: 光源の移動イメージ

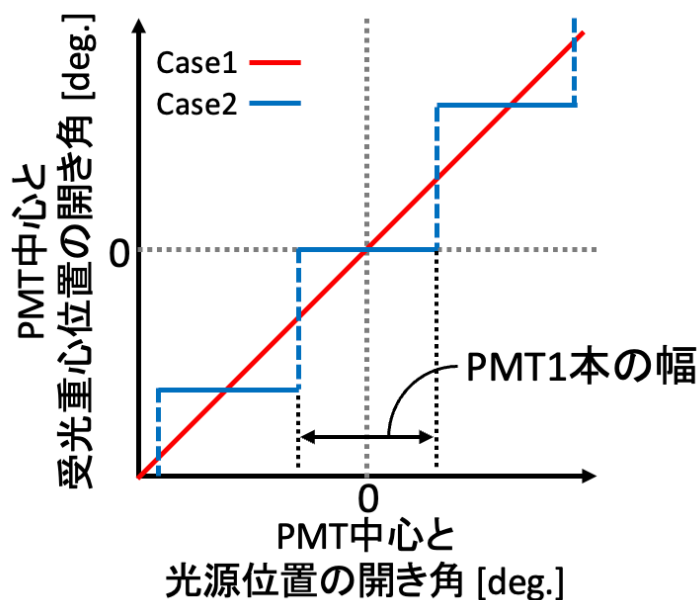


図 7.3: 光源の移動による受光重心の移り変わりイメージ

7.2 シミュレーション

FDのミラーで集光し、PMTの感光面上に結像した像の大きさはミラーとPMTボックスの距離や各セグメントミラーの大きさと設置角度、PMTボックスの設置角度など様々な条件によって決まる。そのため、それらや望遠鏡の支柱などステーションの内部構造を考慮に入れたTA実験のシミュレーターを使用して解析した。図7.17にシミュレーターに実装されているBRステーションの内部構造を示す。TA実験で使用しているシミュレーターはTRUMPとTA-JAVAの二種類がある

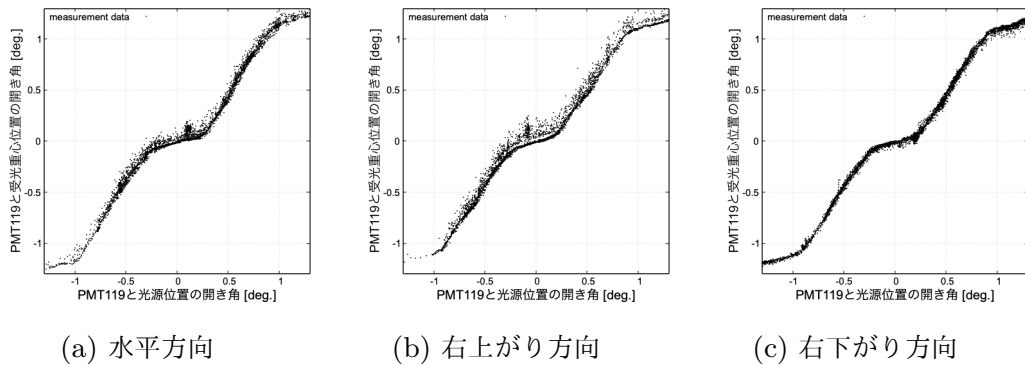


図 7.4: FD00 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

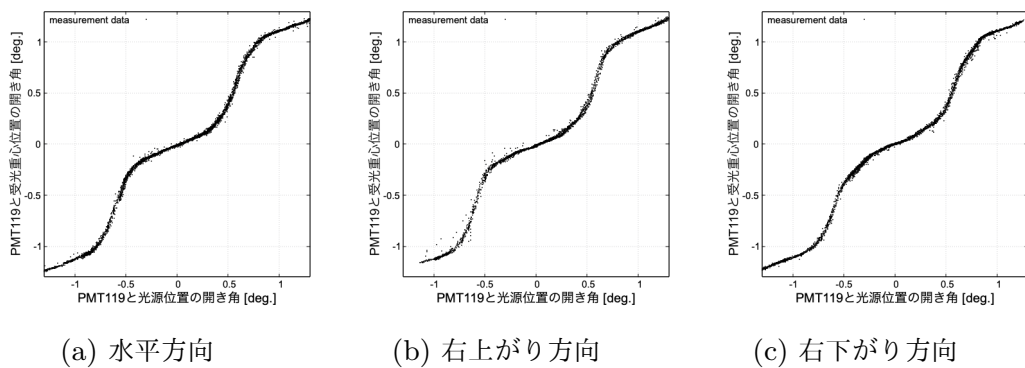


図 7.5: FD01 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

が、そのうちの TA-JAVA を使用した。TA-JAVA はまず、空気シャワーの縦方向発達から FD に入射する光子の情報を計算する。その後、ミラーによって集光し PMT に受光するまでの振る舞いをレイトレーシングによって計算し、各 PMT の出力信号波形が得られる。これらの計算には大気による効果や鏡の反射率、PMT ゲイン、時間依存性なども含まれている。また、シミュレーションの様々な条件は「セッションファイル」を書き換え指定できる。

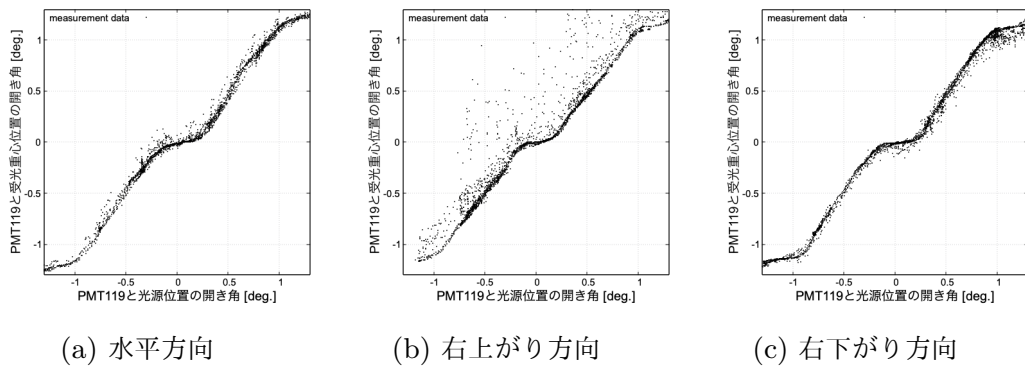


図 7.6: FD02 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

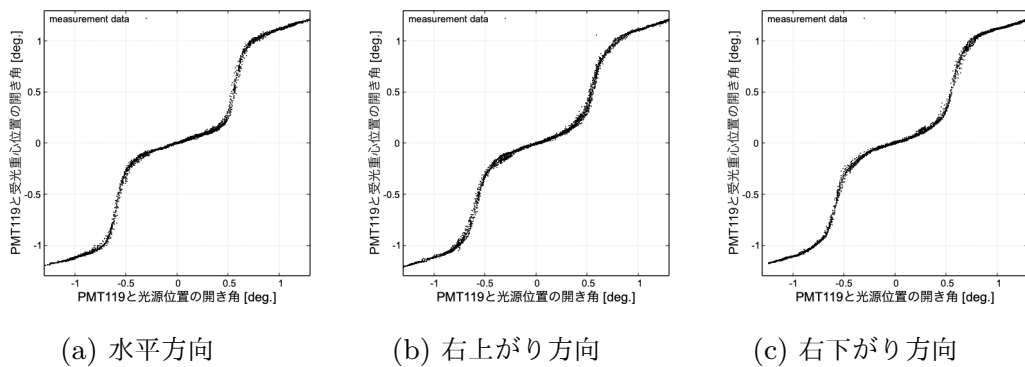


図 7.7: FD03 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

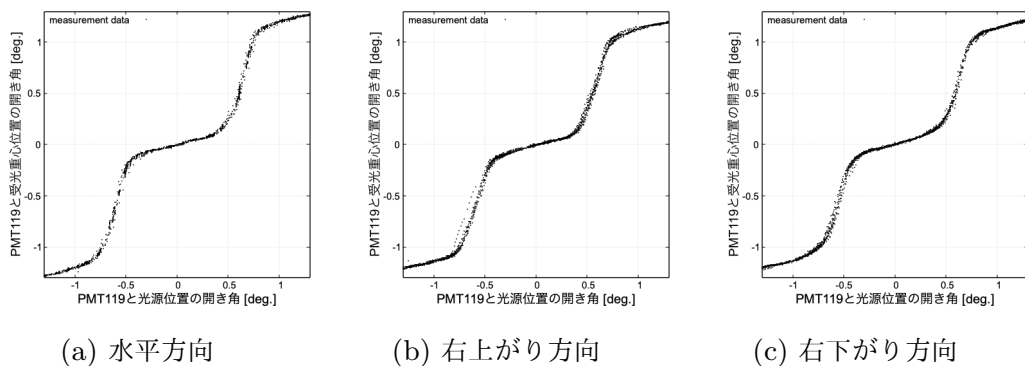


図 7.8: FD04 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

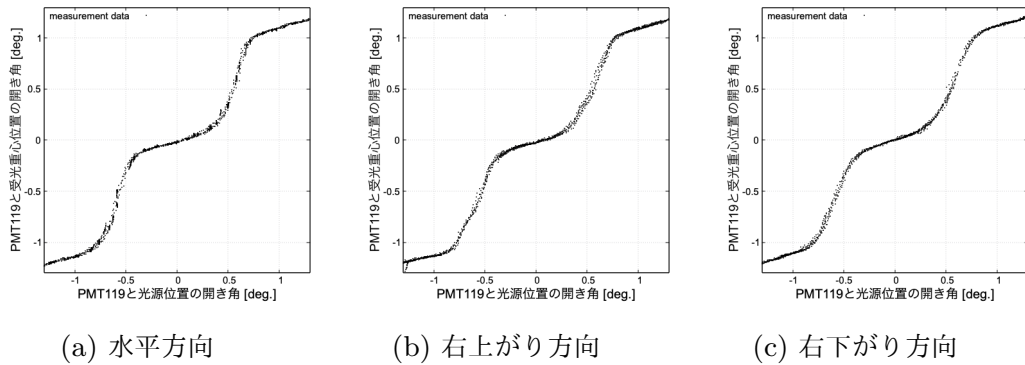


図 7.9: FD05 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

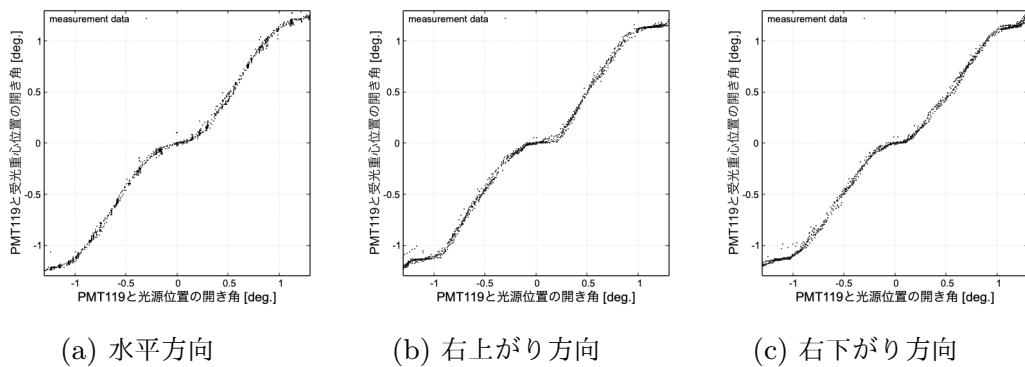


図 7.10: FD06 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

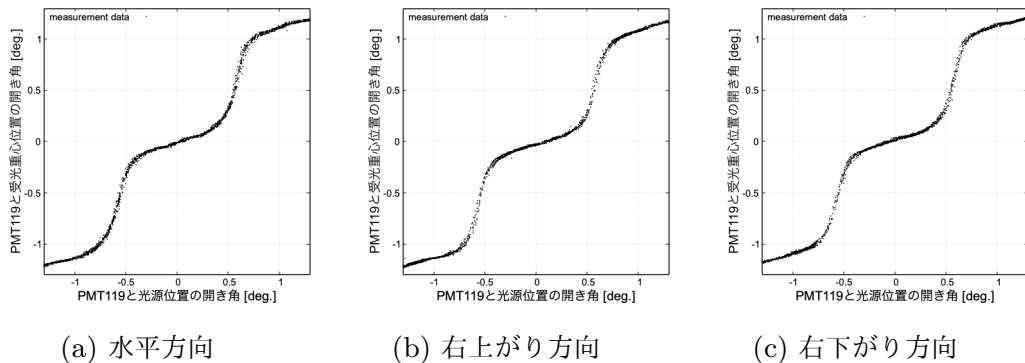


図 7.11: FD07 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

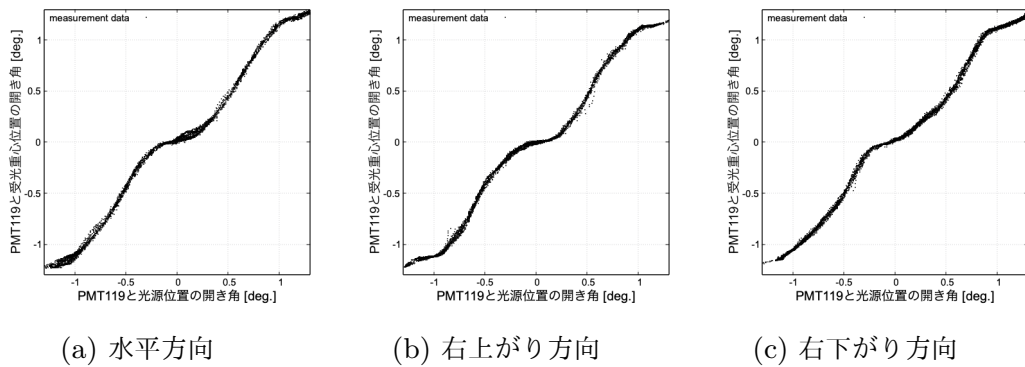


図 7.12: FD08 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

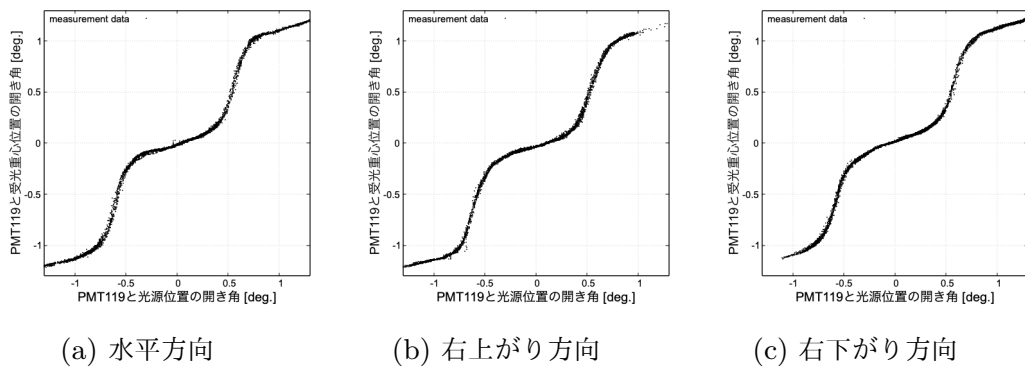


図 7.13: FD09 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

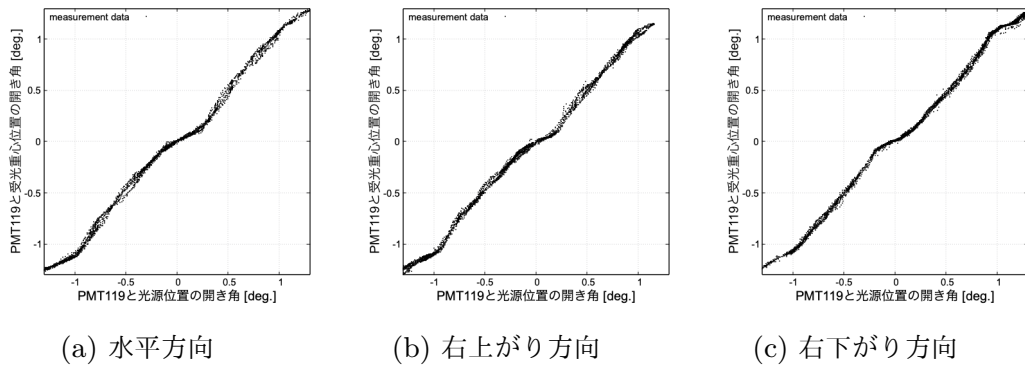
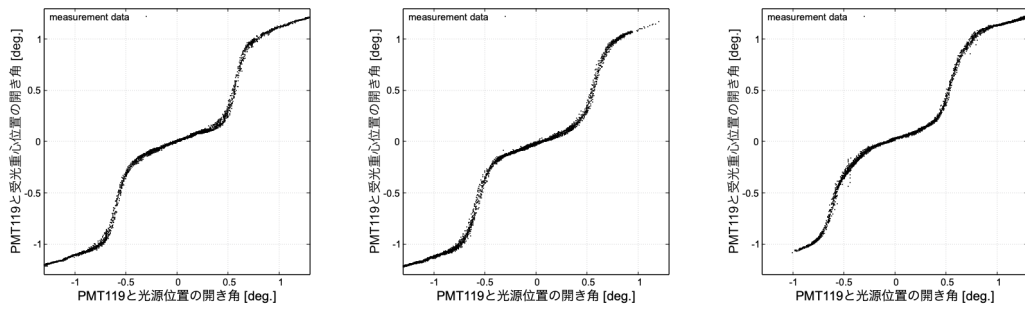


図 7.14: FD10 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係

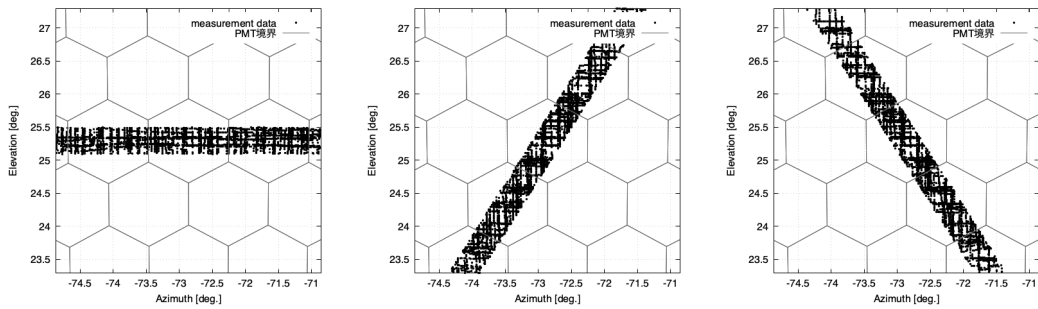


(a) 水平方向

(b) 右上がり方向

(c) 右下がり方向

図 7.15: FD11 の視野中心における光源位置と受光重心位置の PMT119 に対する関係



(a) 水平方向

(b) 右上がり方向

(c) 右下がり方向

図 7.16: 解析時に抽出した計測データ

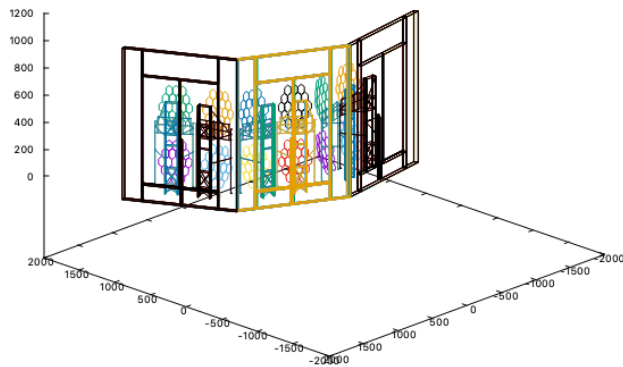


図 7.17: シミュレーターに実装された BR ステーションの内部構造

7.2.1 Opt-copter シミュレーション

TA-JAVA は通常，空気シャワー現象による大気蛍光をレイトレーシングしているが，今回は本解析用に 5.1 章で述べた Opt-copter を用いた計測実験を再現するように改良した．光源は直径 14 cm の球の等方一様光源を仮定する．光源のパルス幅は $10 \mu\text{sec}$ ，波長依存性は図 7.18 に示したように 375 nm 付近にピークを持つ．また，光源位置の指定は方位角・仰角で行い，指定した方向の 300 m 先に光源が設置される．そして，最終的に図 7.19 のような PMT の出力信号が得られる．さらに，実際の計測データと同様に 5.3 章で述べたように受光重心位置を計算し，光源位置に対する受光重心位置が得られる．また，シミュレーションでは図 7.20 のような PMT 感光面上にできる集光像も得られる．図のカラーバーは光子数を表している．

7.2.2 SSP と曲率半径

本解析では，図 7.20 のような PMT 感光面上にできる集光像の形状によって，図 7.4~7.15 に示したような光源位置と受光重心位置の関係が変化することに着目している．そして，集光像の形状はシミュレーション上の SSP と曲率半径に依存する．SSP は FD の複合球面鏡を構成する 18 枚のセグメントミラーそれぞれによっ

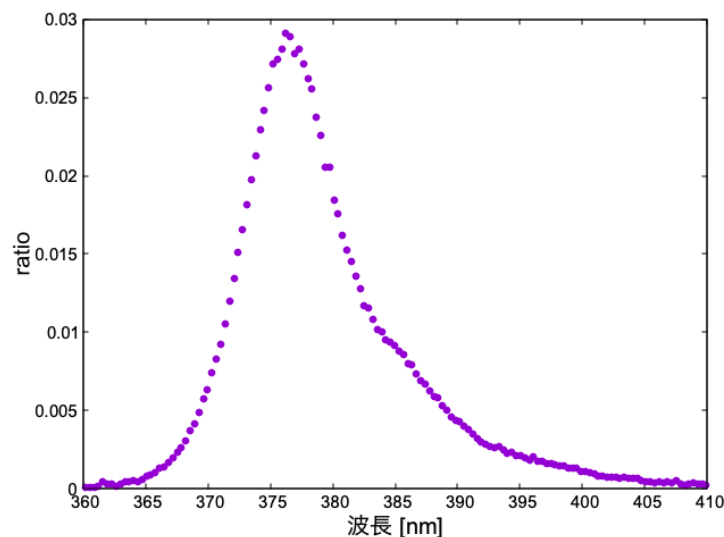


図 7.18: 光源の波長依存性

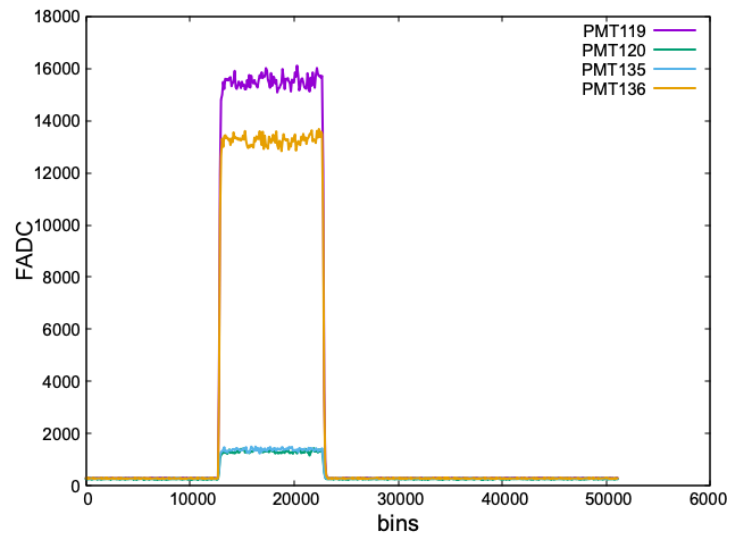


図 7.19: シミュレーションによって得られた光を検出した各 PMT の出力信号

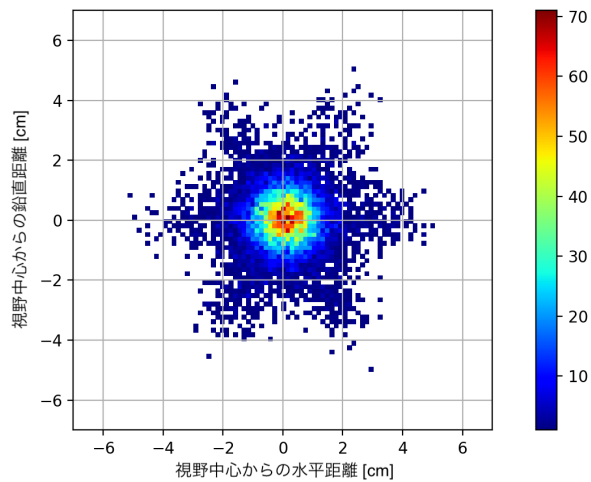


図 7.20: シミュレーションによって得られた PMT 感光面上にできる集光像

てできる集光の広がりを表す角度である。曲率半径は図 7.21 に示すように複合球面鏡の中心から 18 枚のセグメントミラーの光軸の交点までの距離であり、2.2.1 章で述べた各セグメントミラーの設置位置を表す曲率半径とは別のパラメーターである。すなわち、ここでの曲率半径を変更することでセグメントミラーの設置角度を変更可能である。このとき、各セグメントミラーの設置位置やミラーと PMT ボックスの距離は変化しない。

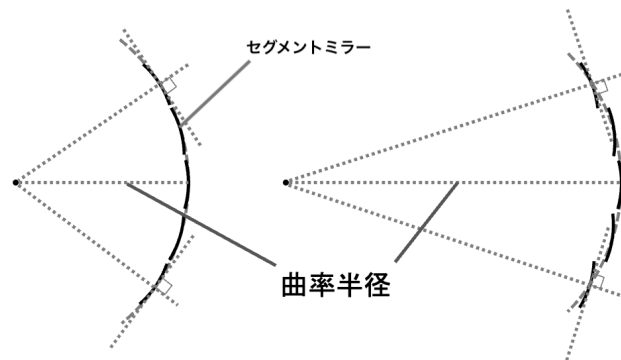


図 7.21: 曲率半径の調整イメージ

SSP と曲率半径によってどの程度、視野中心の像の形状が変化するかを確認した。SSP を $0.01 \sim 0.20^\circ$ の範囲で 0.01° ずつ変更し、曲率半径を $6.000 \sim 6.200$ m の範囲で 0.002 m ずつ変更したときの像の 68% 区間と 95% 区間の大きさを調べた。その結果を図 7.22 と 7.23 に示す。また、図中①～④の SSP と曲率半径の組み合わせのときの像の形状を図 7.24～7.27 に示す。SSP が大きくなるほど同一の曲率半径において 68% 区間と 95% 区間ともに大きくなる。SSP が小さいときは図 7.24 や 7.26 のようにセグメントミラーによる構造があらわれているが、SSP が大きくなると図 7.25 や 7.27 のようにセグメントミラーによる構造が見えなくなっている。曲率半径は 6.070 m 程度の時、同一の SSP において 68% 区間は小さくなり、 6.110 m 程度の時 95% 区間は小さくなる。

7.3 現行パラメータのシミュレーションと計測データ

現在 TA 実験が想定しており、シミュレーション中で使用している SSP と曲率半径を表 7.1 に示す。表 7.1 の値を用いてシミュレーションを行い、描いた光源の見かけの視野方向と受光重心の視野方向の関係を図 7.28～7.39 に示す。図 7.28～7.39 のグレーの点は図 7.4～7.15 に示した実際の計測データにおける関係と同様のものである。これにより、実際の計測データとシミュレーションは BR ステーションの全 FD で定性的に一致していることがわかった。すなわち、現在 TA 実験の想定している FD は実際の FD をよく再現していることがわかった。また、シミュレーションにおける PMT 感光面上の集光像を図 7.40～7.51 に示す。これらの集光像の大きさを表 7.2 にまとめた。光源位置と受光重心位置の関係は大きく二種類に分けられたが、集光像も同じく二種類に分けられた。光源位置と受光重心位

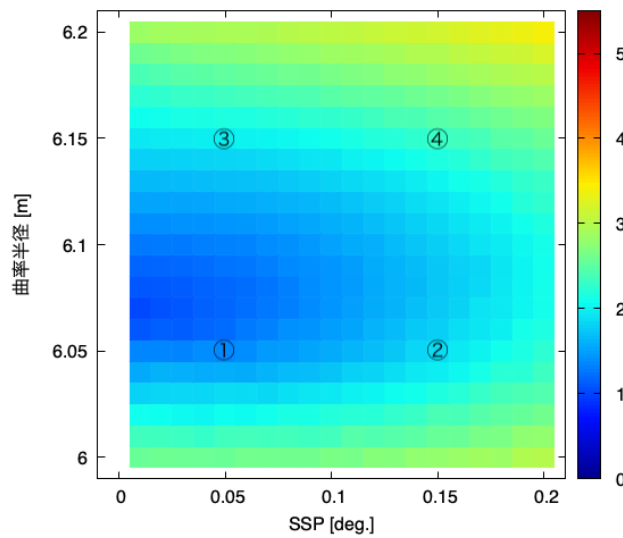


図 7.22: SSP と曲率半径による像の 68% 区間の変化

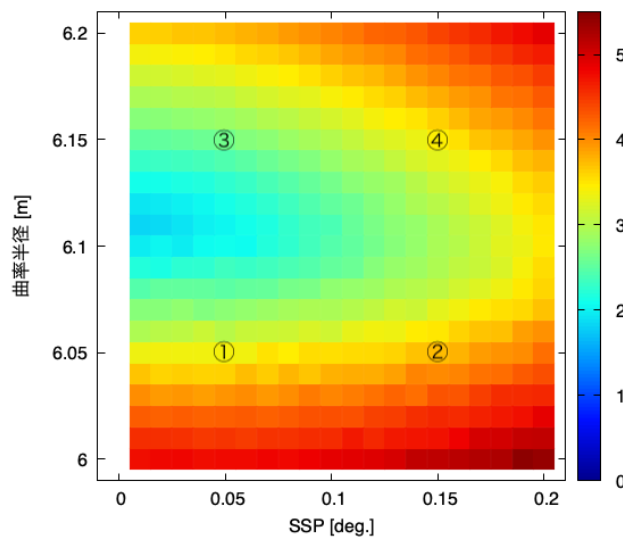


図 7.23: SSP と曲率半径による像の 95% 区間の変化

置の関係が階段状になっている FD04 と下視野の FD と比べ、光源位置と受光重心位置の関係が直線に近い FD04 を除く上視野の FD はピークが複数に分かれており、68% 区間が広がっていた。ピークが複数に分かれているのは、FD の 18 枚のセグメントミラーによる構造が表れているためである。95% 区間はあまり差がなかった。

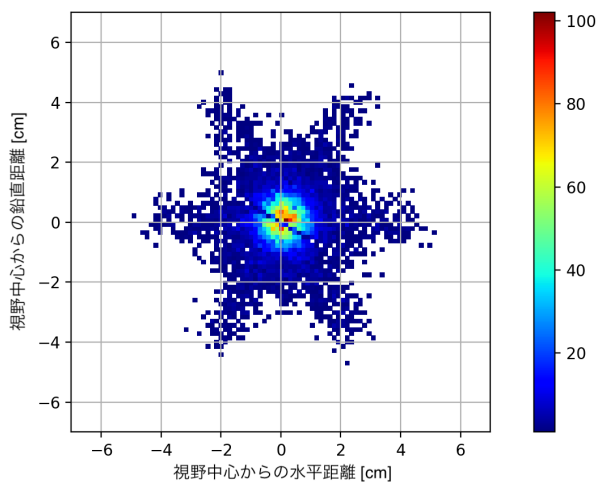


図 7.24: ①の SSP0.05 と曲率半径 6.050 の組み合わせにおける像の形状

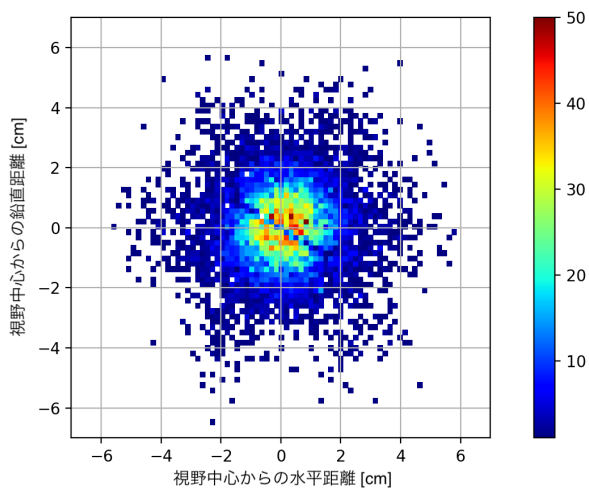


図 7.25: ②の SSP0.15 と曲率半径 6.050 の組み合わせにおける像の形状

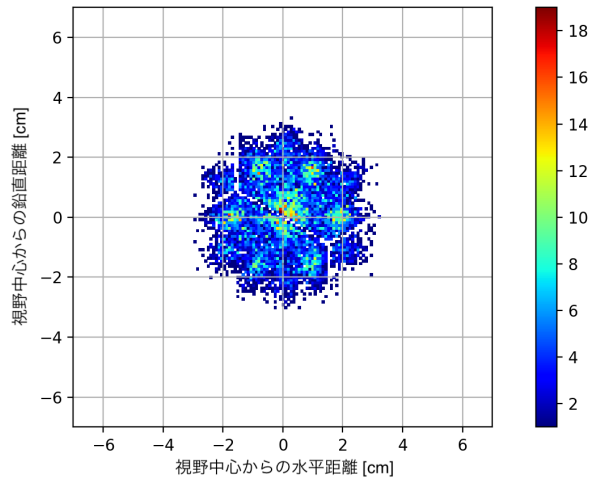


図 7.26: ③の SSP0.05 と曲率半径 6.15 の組み合わせにおける像の形状

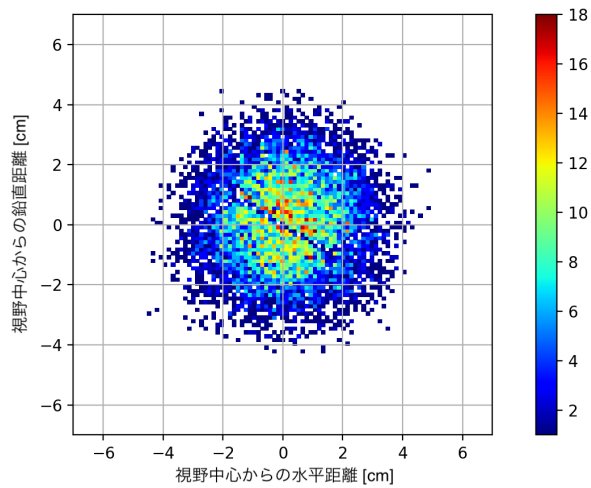


図 7.27: ④の SSP0.15 と曲率半径 6.150 の組み合わせにおける像の形状

表 7.1: 現行シミュレーションにおける BR ステーションの各 FD の SSP と曲率半径

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
SSP [deg.]	0.032	0.094	0.031	0.103	0.082	0.147	0.050	0.083	0.050	0.088	0.079	0.050
曲率半径 [m]	6.165	6.067	6.165	6.067	6.067	6.067	6.165	6.067	6.165	6.067	6.165	6.067

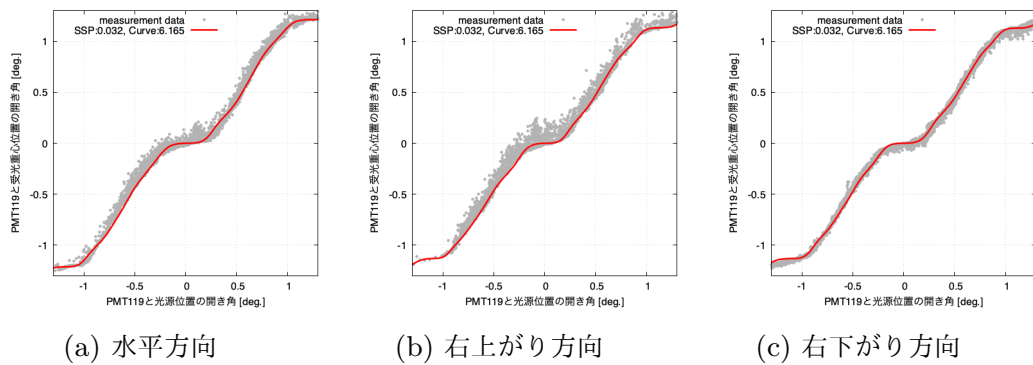


図 7.28: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較FD00

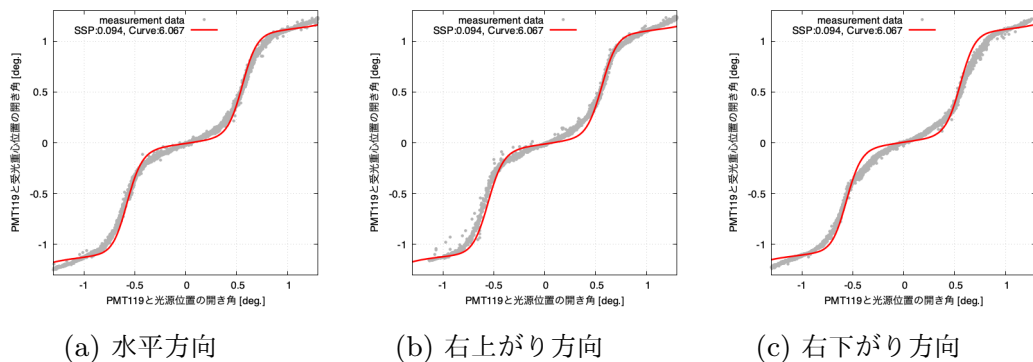


図 7.29: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較FD01

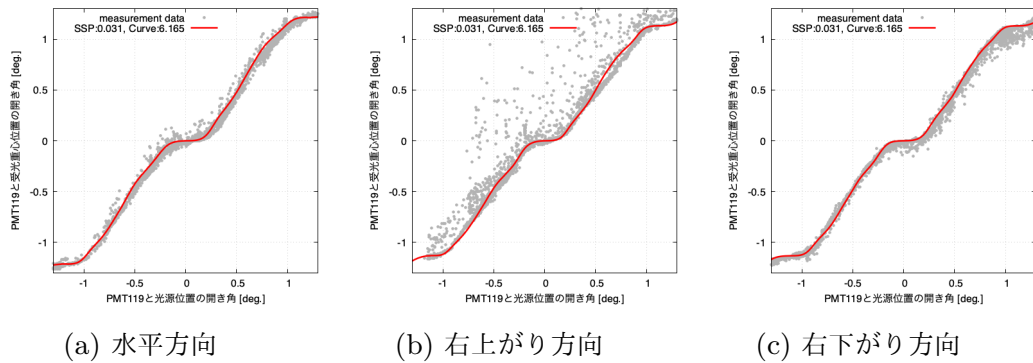


図 7.30: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD02

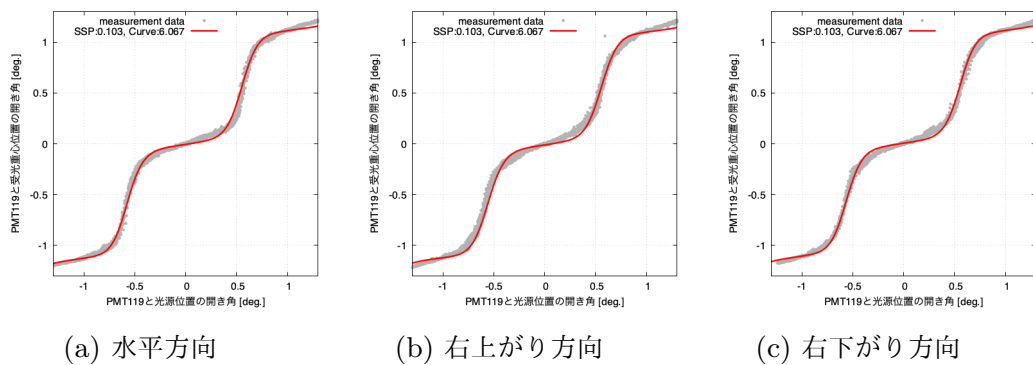


図 7.31: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD03

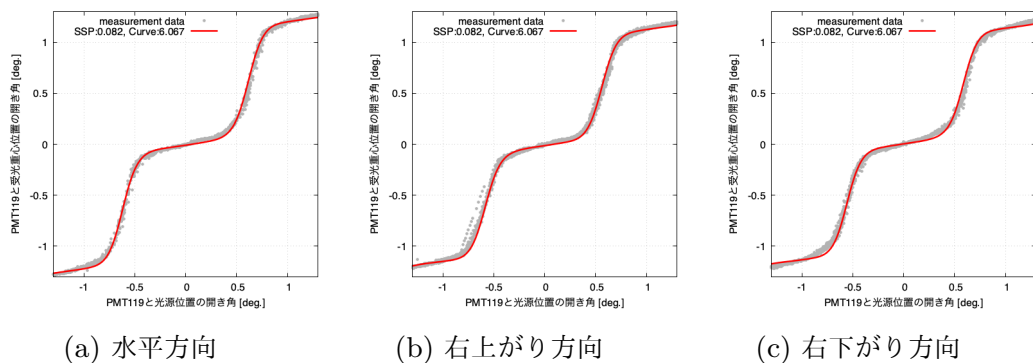


図 7.32: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD04

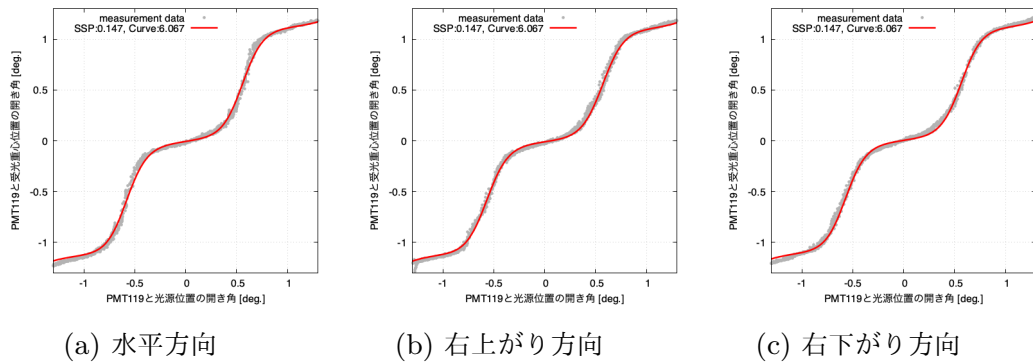


図 7.33: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD05

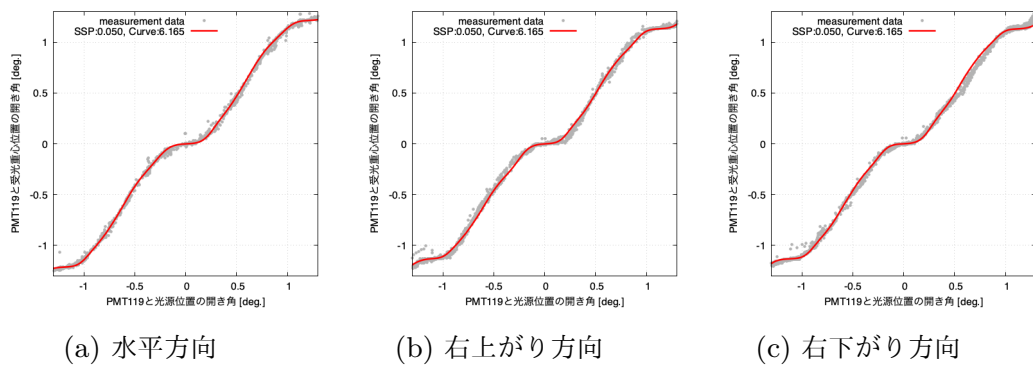


図 7.34: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD06

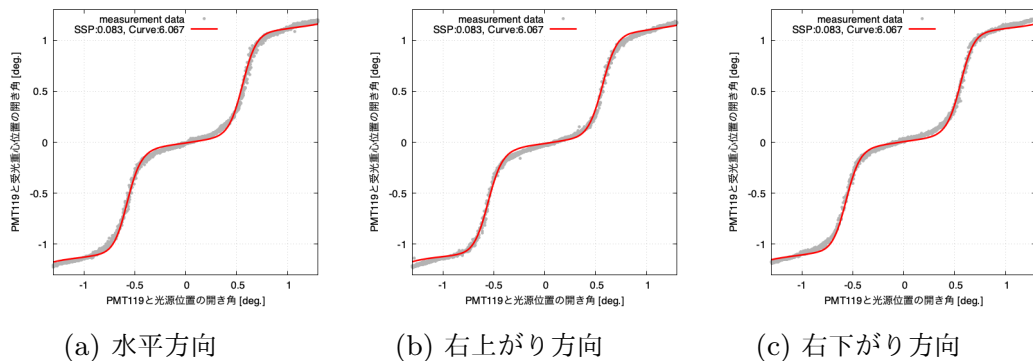


図 7.35: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD07

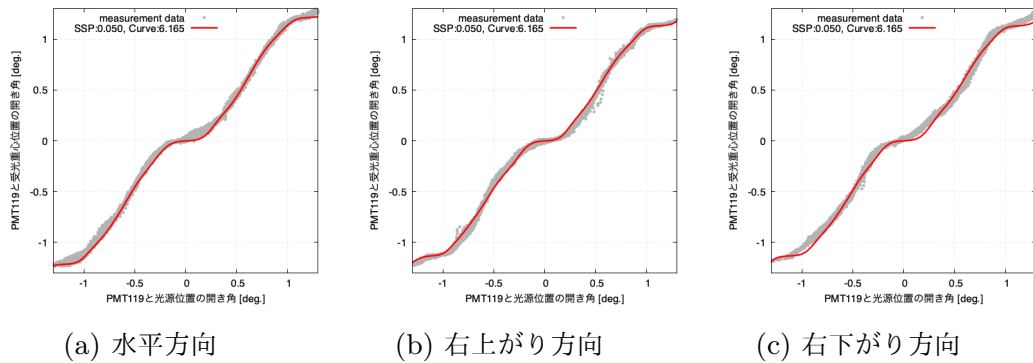


図 7.36: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD08

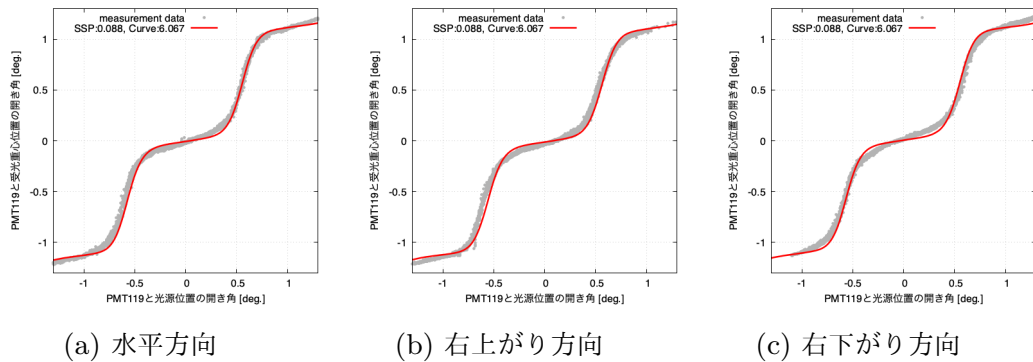


図 7.37: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD09

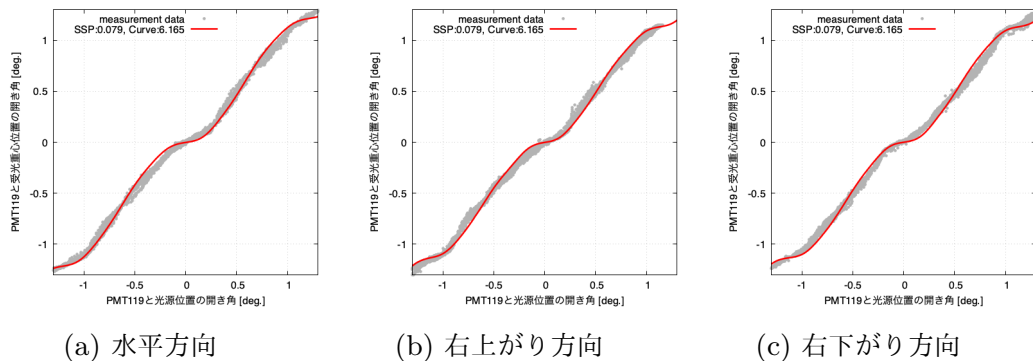


図 7.38: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較 FD10

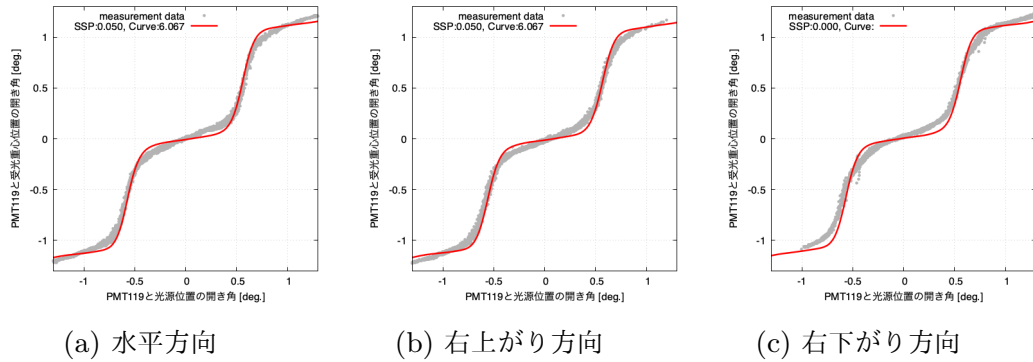


図 7.39: 現在 TA の想定する SSP と曲率半径でのシミュレーションと計測データの比較FD11

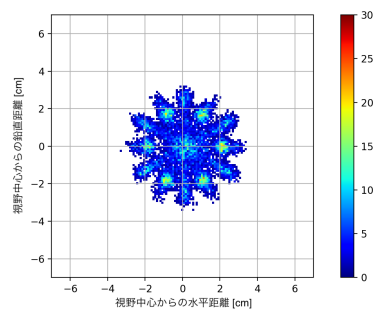


図 7.40: シミュレーションの FD00 視野中心における PMT 感光面上の集光像

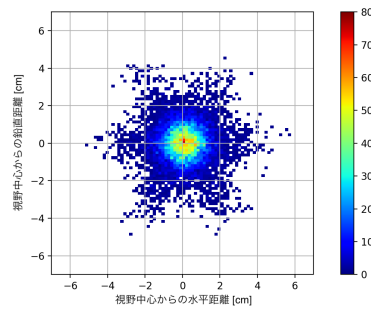


図 7.41: シミュレーションの FD01 視野中心における PMT 感光面上の集光像

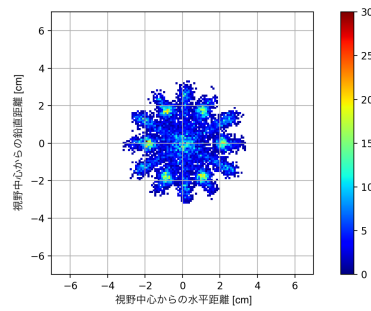


図 7.42: シミュレーションの FD02 視野中心における PMT 感光面上の集光像

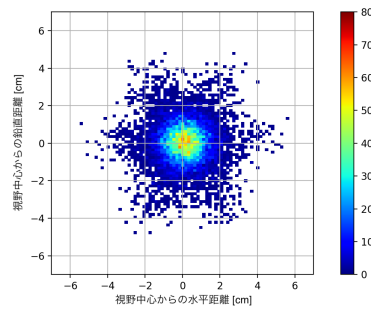


図 7.43: シミュレーションの FD03 視野中心における PMT 感光面上の集光像

表 7.2: 現行シミュレーションにおける集光像サイズ

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
68% 区間 [cm]	2.20	1.36	2.18	1.41	1.26	1.72	2.24	1.30	2.23	1.32	2.29	1.14
95% 区間 [cm]	2.84	2.95	2.85	3.08	2.93	3.30	2.94	3.03	2.95	2.96	3.10	2.87

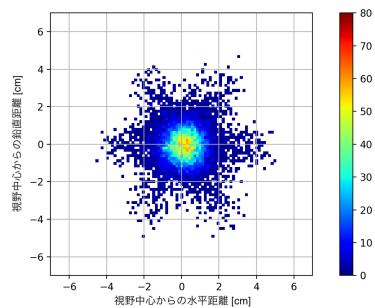


図 7.44: シミュレーションの FD04 視野中心における PMT 感光面上の集光像

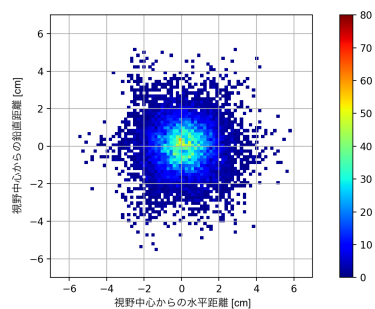


図 7.45: シミュレーションの FD05 視野中心における PMT 感光面上の集光像

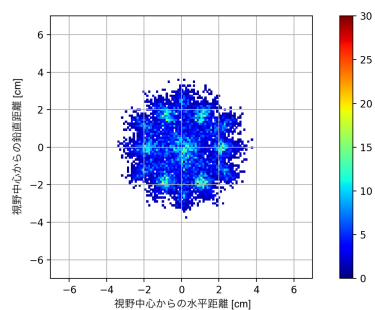


図 7.46: シミュレーションの FD06 視野中心における PMT 感光面上の集光像

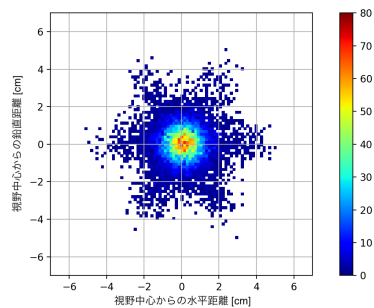


図 7.47: シミュレーションの FD07 視野中心における PMT 感光面上の集光像

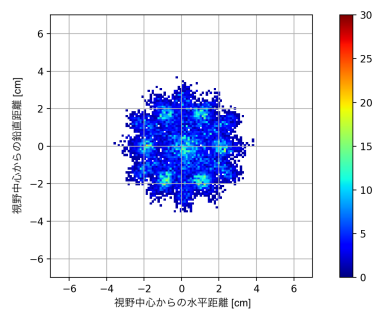


図 7.48: シミュレーションの FD08 視野中心における PMT 感光面上の集光像

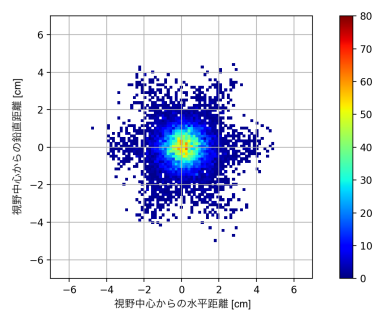


図 7.49: シミュレーションの FD09 視野中心における PMT 感光面上の集光像

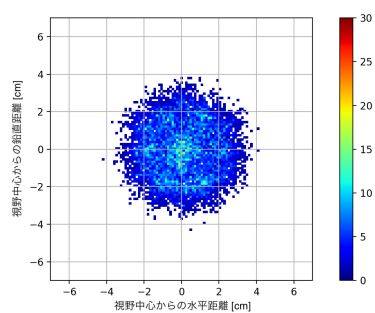


図 7.50: シミュレーションの FD10 視野中心における PMT 感光面上の集光像

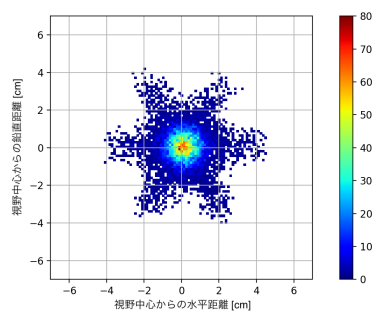


図 7.51: シミュレーションの FD11 視野中心における PMT 感光面上の集光像

7.4 最適値の探索

図 7.28～7.39 に示したように BR ステーションの全 FD で計測データとシミュレーションは定性的に一致している。しかし、FD09 の折り曲がりのようにシミュレーションが計測データを再現しきれていない部分が存在する。これがどの程度、一次宇宙線解析に影響するのが現在は不明だが、SSP と曲率半径を調整することで、より計測データを再現することが期待される。この調整を水平方向と右上がり方向、右下がり方向それぞれに対して定量的に行った。定量化の手順を以下に示す。

1. SSP を 0.01～0.20 まで 0.01 刻み、曲率半径を 6.000～6.200 まで 0.010 刻みでそれぞれ変更し、シミュレーションをする。
2. -1.125～1.125 まで 0.05 刻みの範囲で計測データの平均 ($\bar{\theta}_i, \bar{\phi}_i$) と標準偏差 s_{ϕ_i} を計算し、平均を計測データの代表値とする。
3. 光源の PMT 中心に対する開き角が対応する計測データの代表値とシミュレーション値を用いて、式 7.1 の計算を行い評価値 χ^2 を求める。
4. 手順 3 で評価値が最小となった SSP と曲率半径の周辺で曲率半径を 0.002 刻みでシミュレーションを行い、再度手順 3 の計算を行う。そして、最終的に最も評価値の小さかった SSP と曲率半径の組み合わせを最適値とする。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(\bar{\phi}_i - E_{\phi_i})^2}{s_{\phi_i}^2} \quad (7.1)$$

ここで、 θ は PMT119 と光源位置の開き角、 ϕ は PMT119 と受光重心位置の開き角、 E_{ϕ_i} はシミュレーションの PMT119 と受光重心位置の開き角を表す。

7.5 解析結果

手順 2 で計算した計測データの代表値を図 7.52～7.63 に示す。ただし FD11 の右下がり方向のみ、一部データが足りなかったため代表値の算出はしていない。また、FD00 と 02 はデータの主要な部分からなる曲線から外れるデータを含んでおり、他の FD に比べ標準偏差が大きくなっている。SSP と曲率半径の組み合わせごとに手順 3 で計算した評価値を図 7.64～7.64 に示す。なお、図中ピンク色のばつ印はこれまでの SSP と曲率半径、十字は水平方向における最適値、三角形は右上

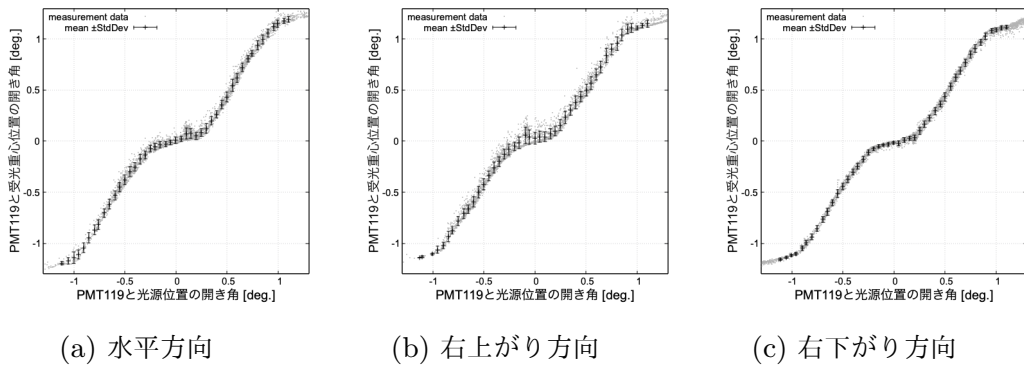


図 7.52: 手順 2 で計算した FD00 の計測データの代表値

表 7.3: 水平方向において最も計測データを再現する SSP と曲率半径の組み合わせ

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
SSP [deg.]	0.20	0.08	0.07	0.01	0.07	0.06	0.09	0.06	0.06	0.05	0.09	0.02
曲率半径 [m]	6.040	6.020	6.164	6.032	6.040	6.032	6.164	6.032	6.164	6.032	6.176	6.024

がり方向における最適値，ダイヤモンド形は右下がり方向における最適値を表す。次に最適値を方向ごとに表 7.3～7.5 に示す。また，最適値を使用したシミュレーションと計測データの比較を図 7.76～7.87 に，最適値を使用したシミュレーションの集光像を図 7.88～7.99 に示す。なお，集光像を描く際のシミュレーションでは水平方向で最適値となった SSP と曲率半径の組み合わせを使用している。さらに，表 7.6 に集光像の大きさをまとめた。多くの FD では現行のシミュレーションに比べ，より計測データを再現するようになった。水平方向と右上がり方向，右下がり方向で最適値が異なるのは像の歪みによるものと考えられる。シミュレーションでは各セグメントミラーの光軸が一点で交わるが，実際には一点で交わらず像が歪むためである。また，FD00 の水平方向や FD08 の右下がり方向で SSP が極端に大きく，曲率半径が小さい組み合わせを最適値として算出している。この原因は，上視野の FD では特に実際の像の歪みが大きいことだと考えられる。シミュレーションでは各セグメントミラーの光軸が一点で交わるようになっているが，現実ではセグメントミラー一枚一枚の方向はわずかにずれている。これによって，像の歪みが発生していると考えられる。

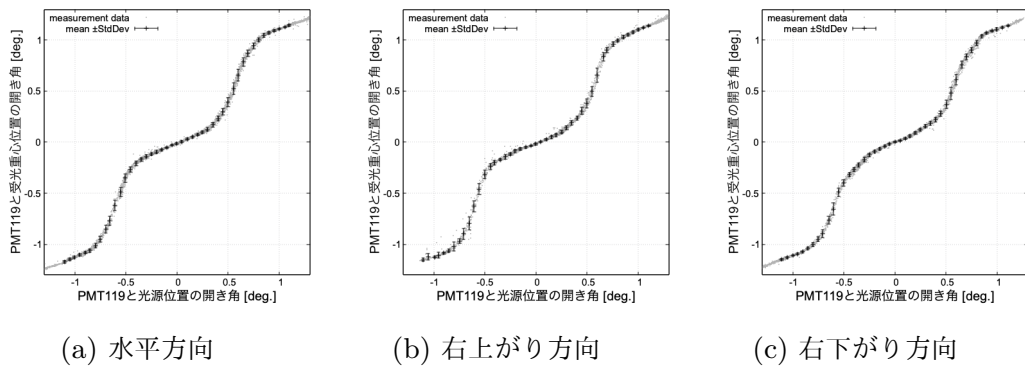


図 7.53: 手順 2 で計算した FD01 の計測データの代表値

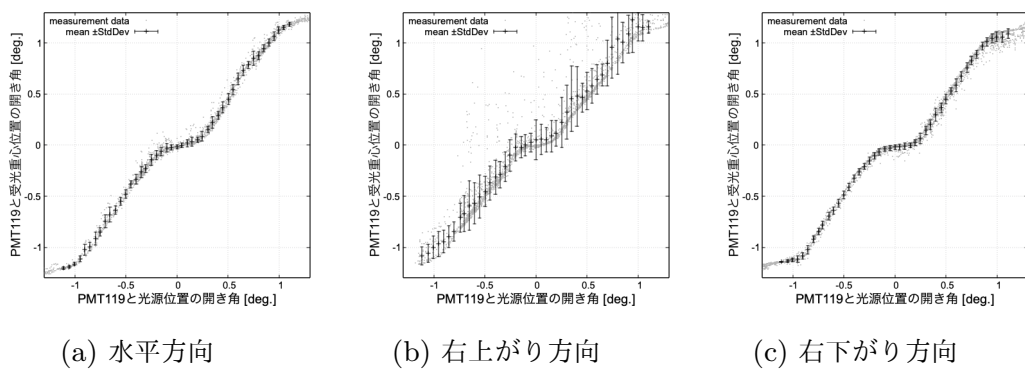


図 7.54: 手順 2 で計算した FD02 の計測データの代表値

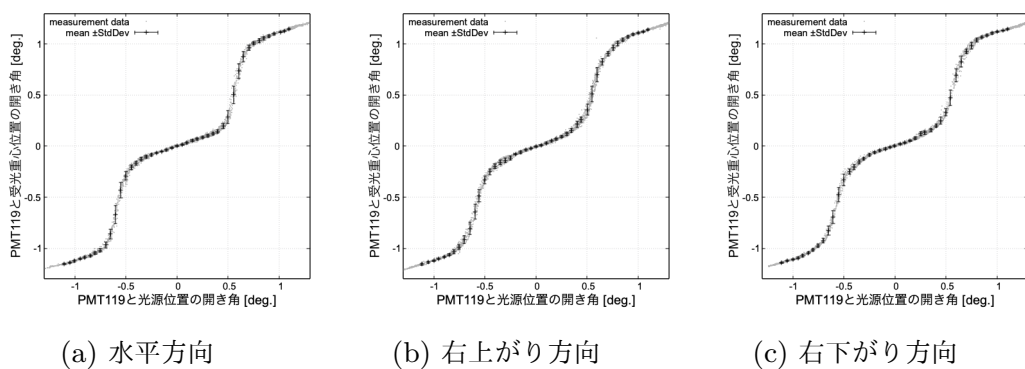


図 7.55: 手順 2 で計算した FD03 の計測データの代表値

表 7.4: 右上がり方向において最も計測データを再現する SSP と曲率半径の組み合わせ

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
SSP [deg.]	0.07	0.07	0.06	0.07	0.12	0.10	0.07	0.04	0.07	0.05	0.07	0.06
曲率半径 [m]	6.162	6.020	6.172	6.026	6.060	6.034	6.160	6.032	6.156	6.028	6.178	6.024

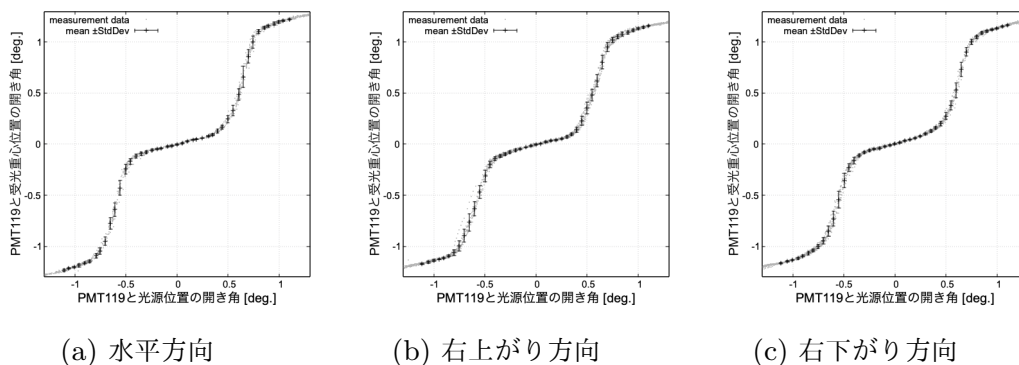


図 7.56: 手順 2 で計算した FD04 の計測データの代表値

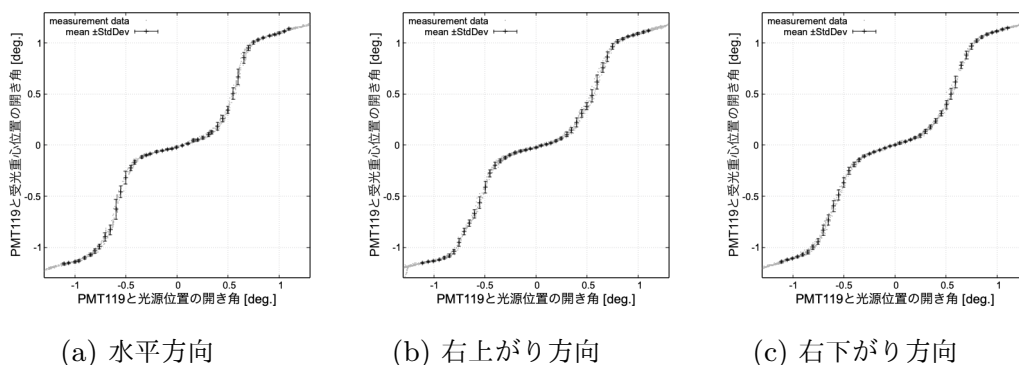


図 7.57: 手順 2 で計算した FD05 の計測データの代表値

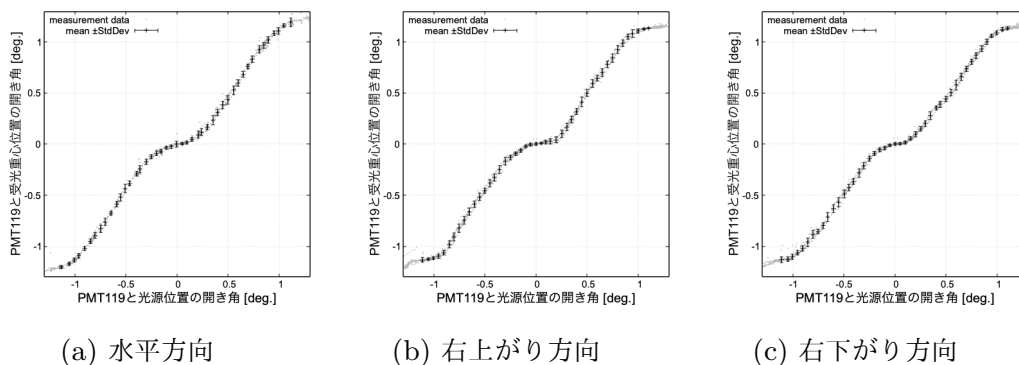


図 7.58: 手順 2 で計算した FD06 の計測データの代表値

表 7.5: 右下がり方向において最も計測データを再現する SSP と曲率半径の組み合わせ

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
SSP [deg.]	0.08	0.06	0.05	0.05	0.07	0.10	0.06	0.04	0.20	0.05	0.06	-
曲率半径 [m]	6.158	6.010	6.162	6.024	6.038	6.028	6.170	6.032	6.006	6.022	6.180	-

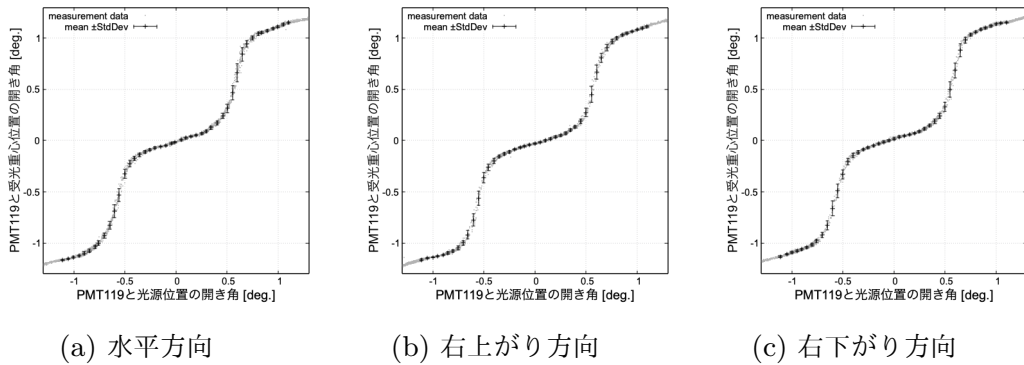


図 7.59: 手順 2 で計算した FD07 の計測データの代表値

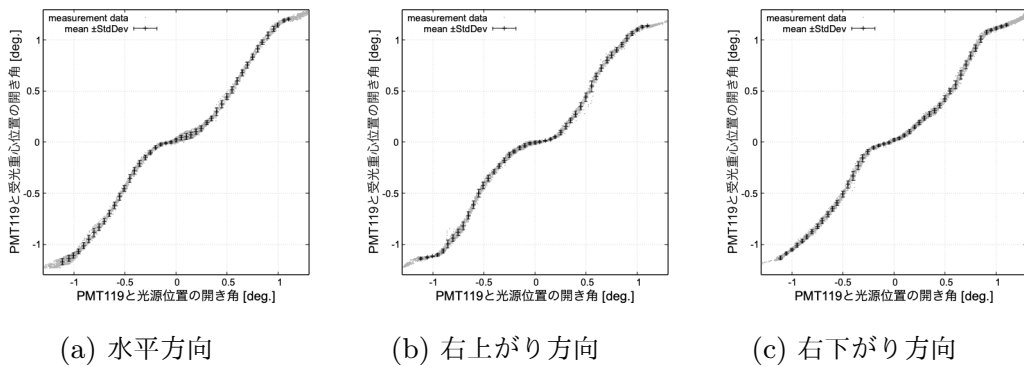


図 7.60: 手順 2 で計算した FD08 の計測データの代表値

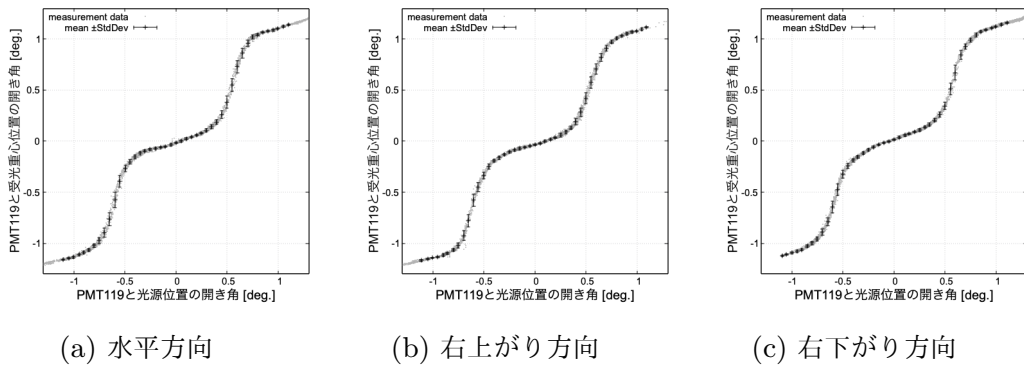


図 7.61: 手順 2 で計算した FD09 の計測データの代表値

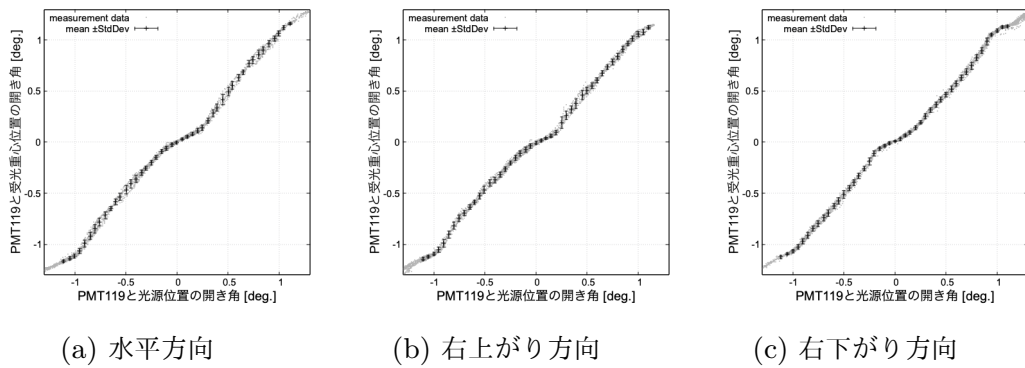


図 7.62: 手順 2 で計算した FD10 の計測データの代表値

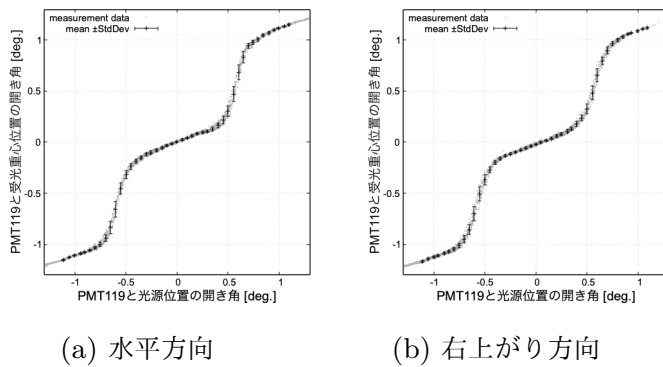


図 7.63: 手順 2 で計算した FD11 の計測データの代表値

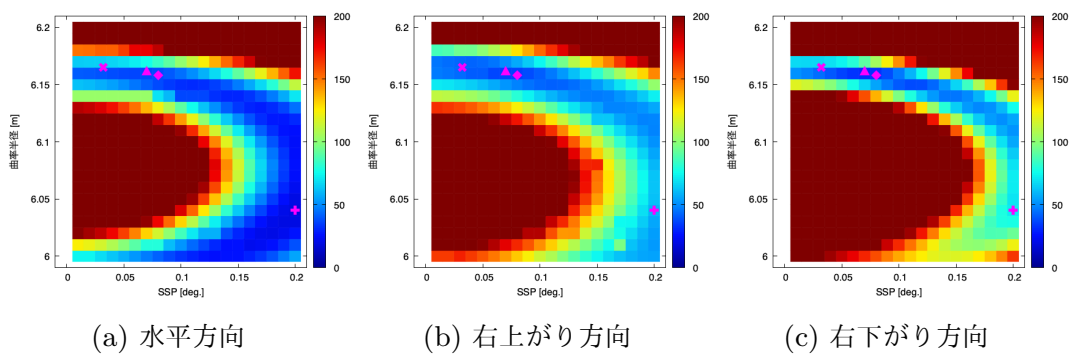


図 7.64: 手順 3 で計算した FD00 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

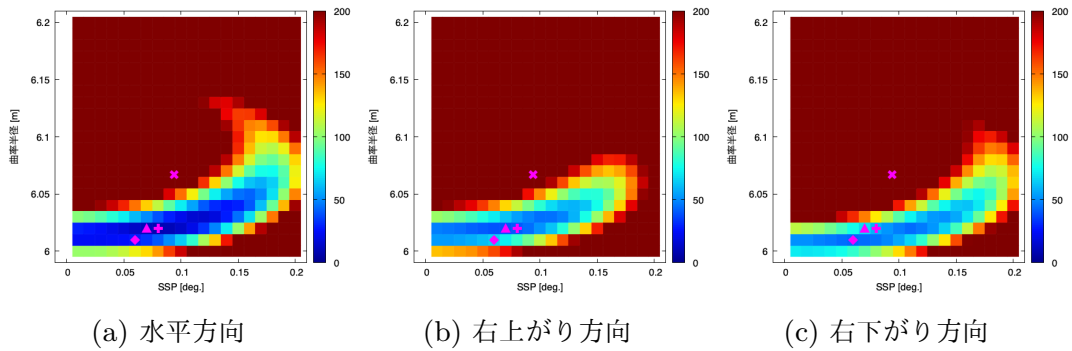


図 7.65: 手順 3 で計算した FD01 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

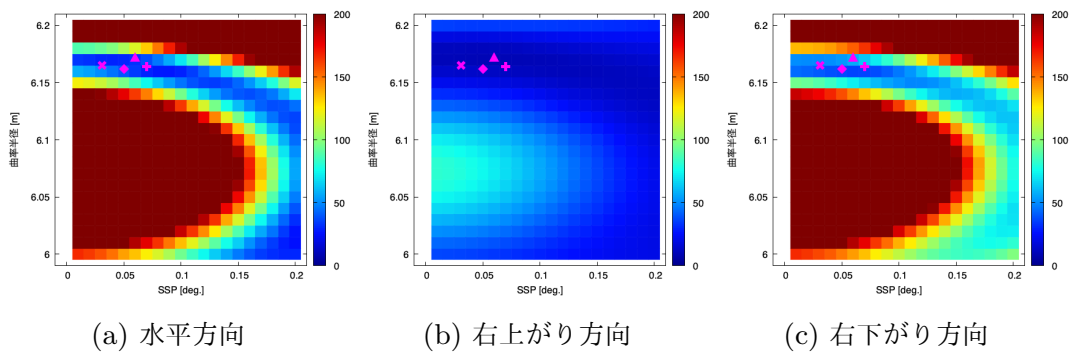


図 7.66: 手順 3 で計算した FD02 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

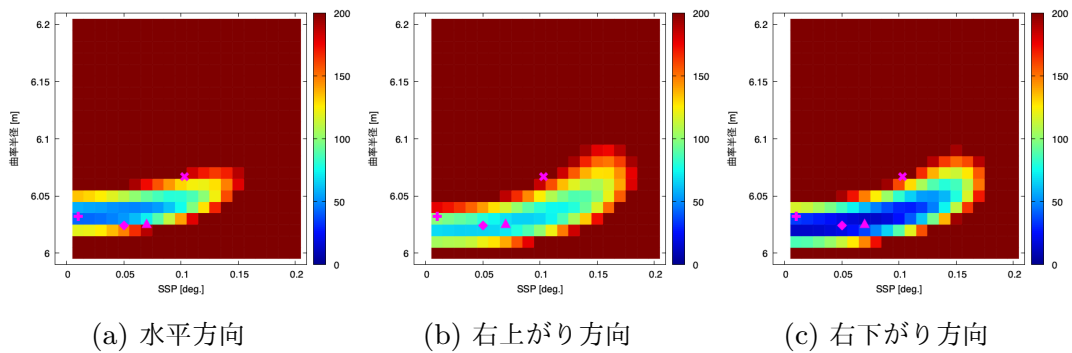


図 7.67: 手順 3 で計算した FD03 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

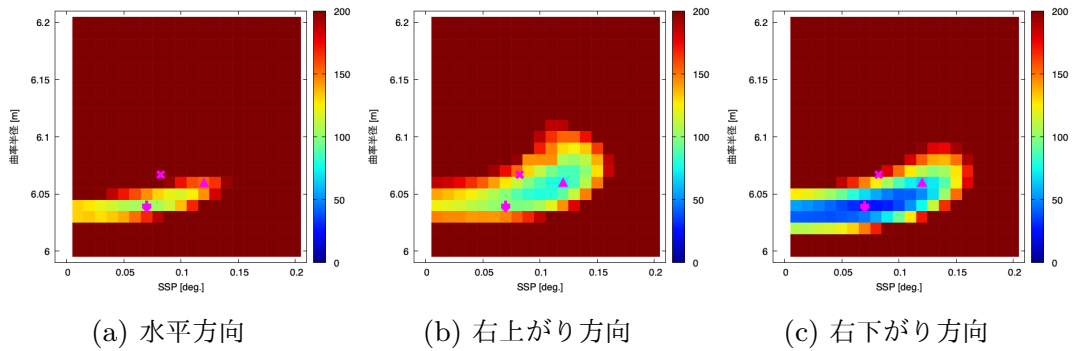


図 7.68: 手順 3 で計算した FD04 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

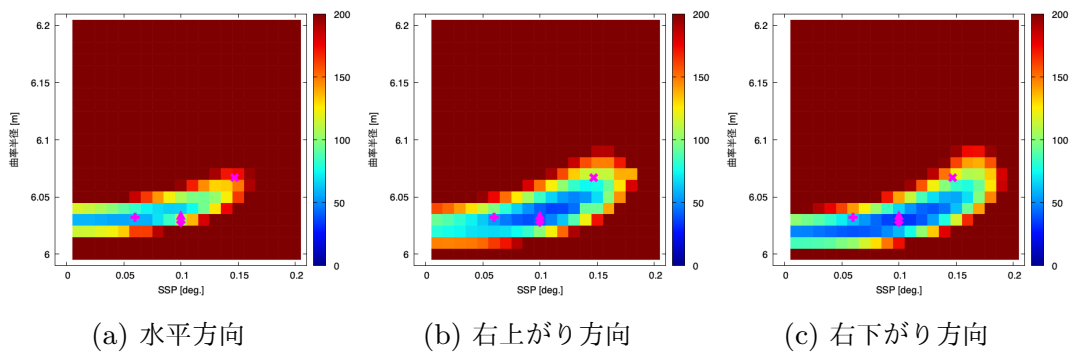


図 7.69: 手順 3 で計算した FD05 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

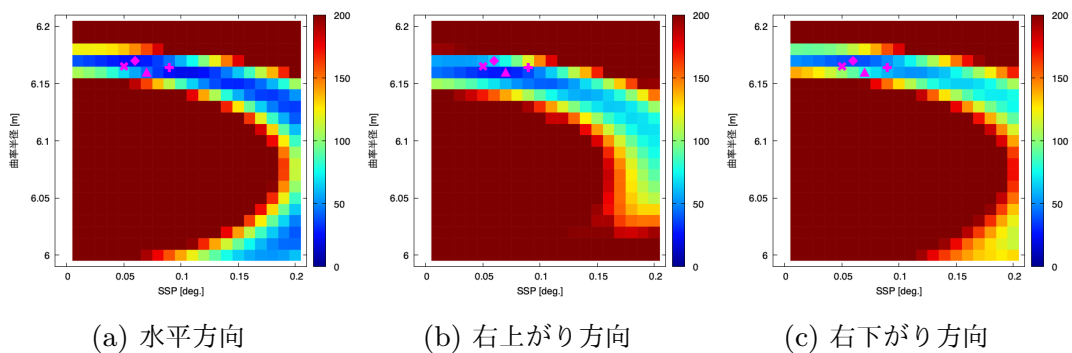


図 7.70: 手順 3 で計算した FD06 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

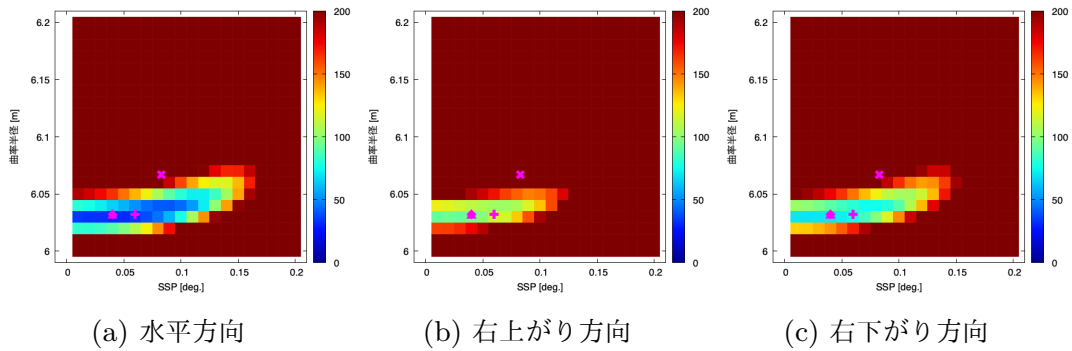


図 7.71: 手順 3 で計算した FD07 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

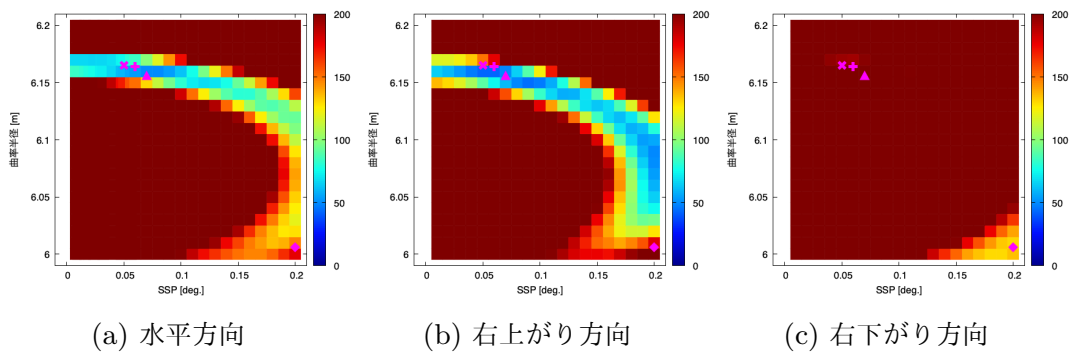


図 7.72: 手順 3 で計算した FD08 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

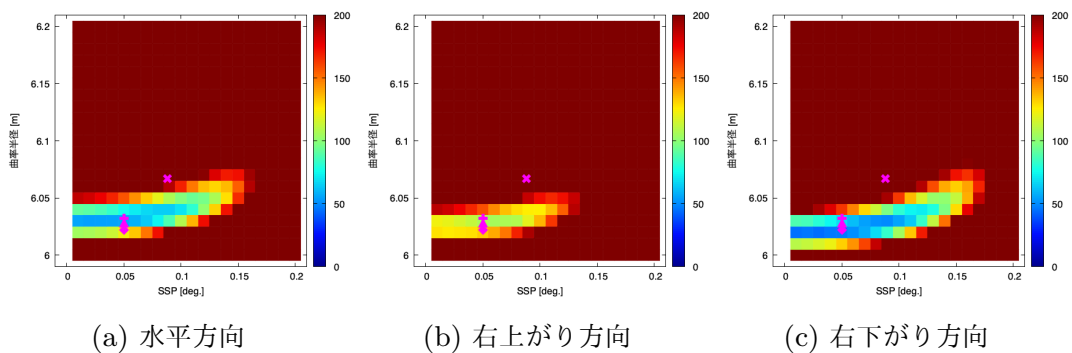


図 7.73: 手順 3 で計算した FD09 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

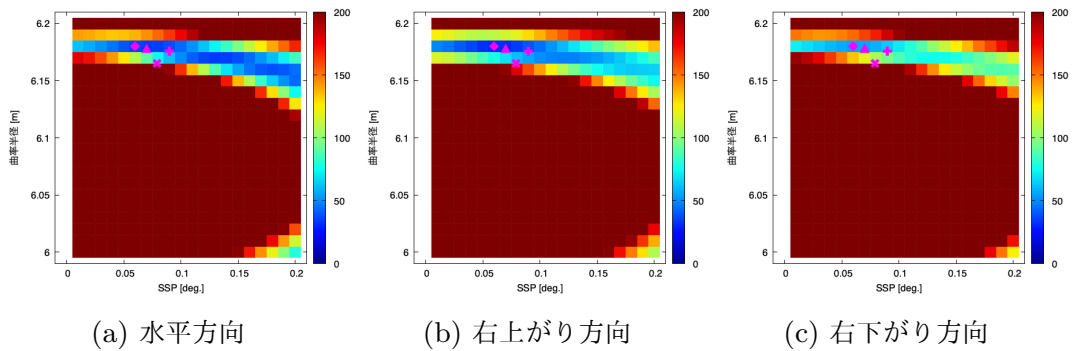


図 7.74: 手順 3 で計算した FD10 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

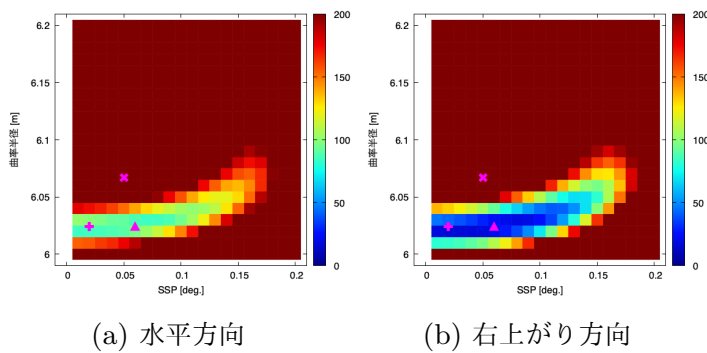


図 7.75: 手順 3 で計算した FD11 の SSP と曲率半径の組み合わせごとの評価値のヒートマップ

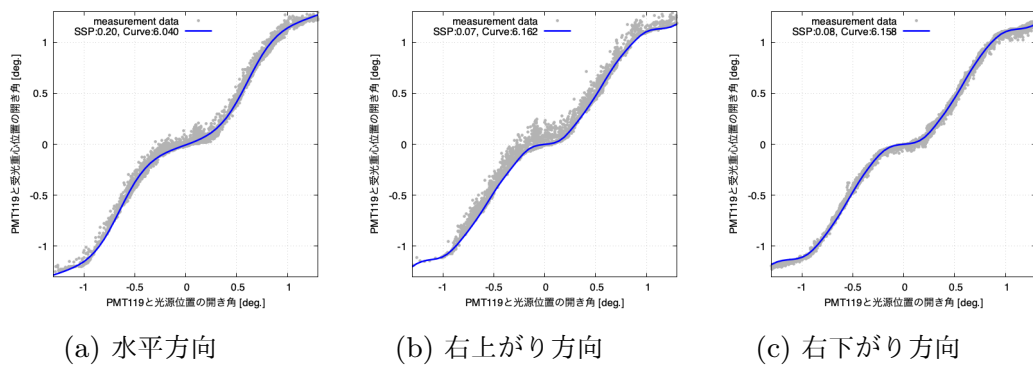


図 7.76: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD00

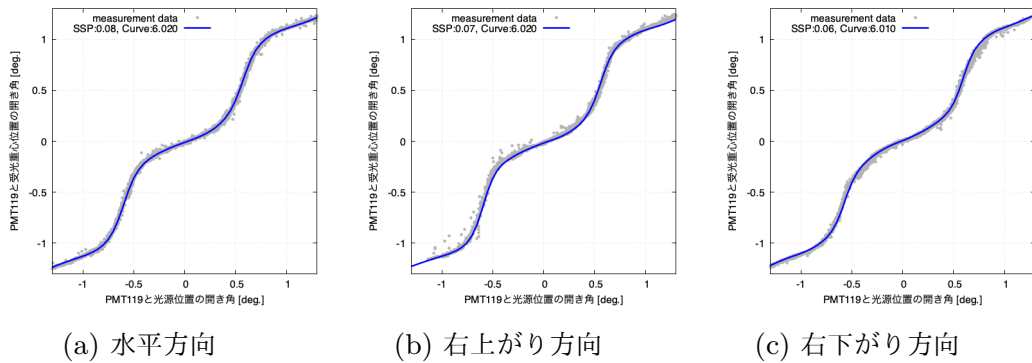


図 7.77: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD01

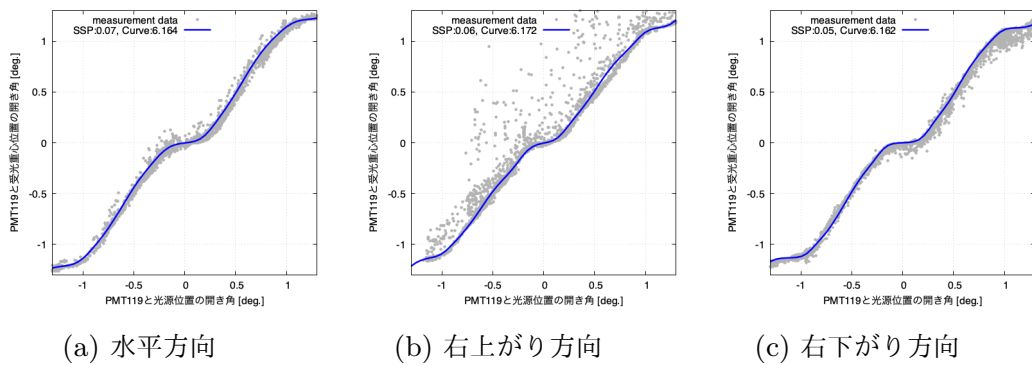


図 7.78: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD02

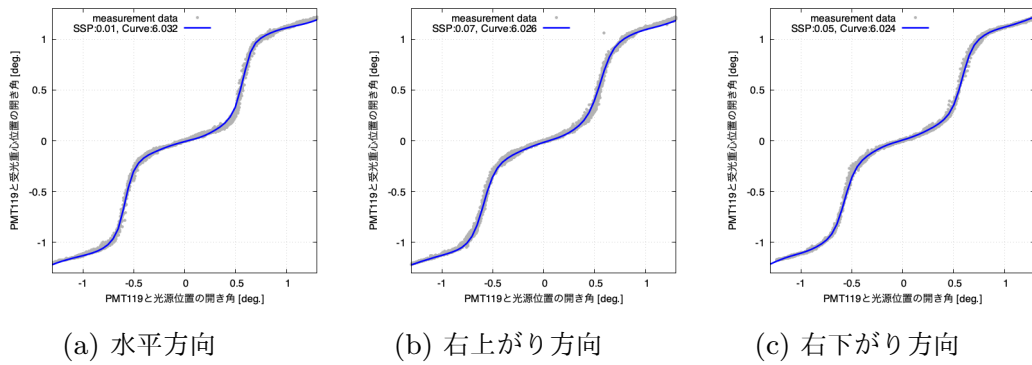


図 7.79: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD03

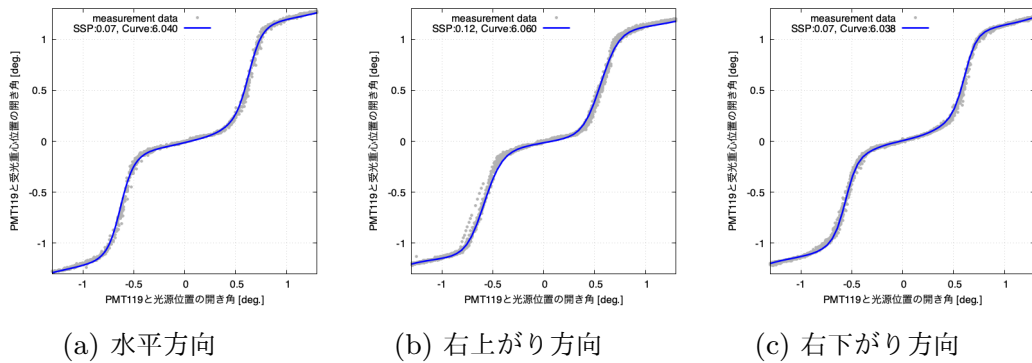


図 7.80: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD04

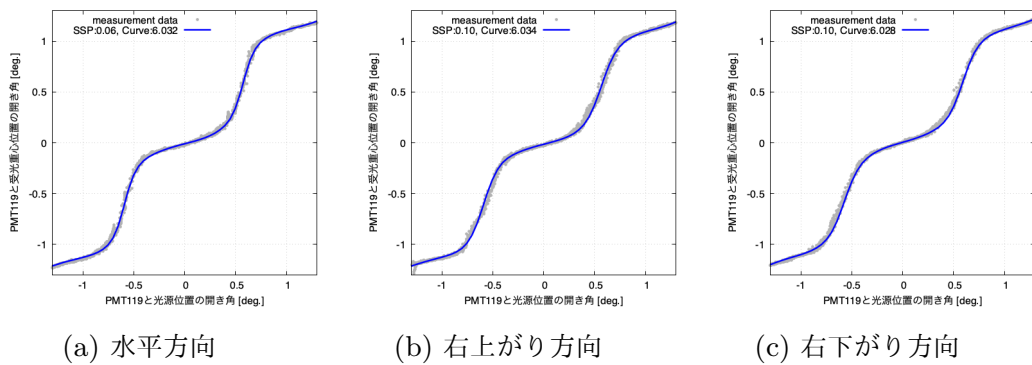


図 7.81: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD05

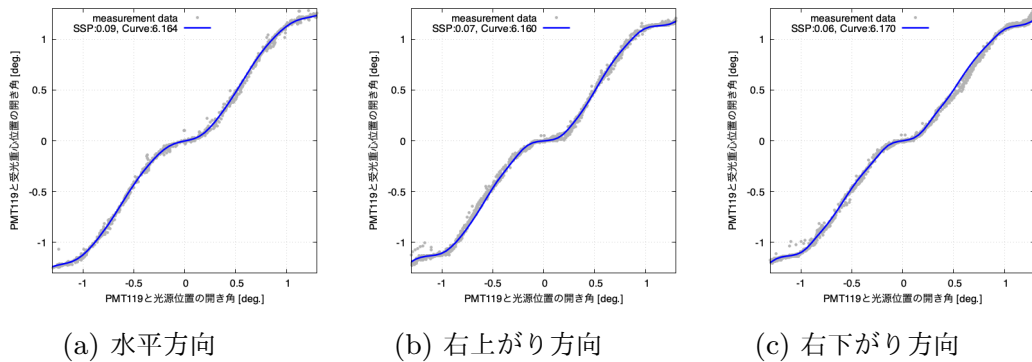


図 7.82: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD06

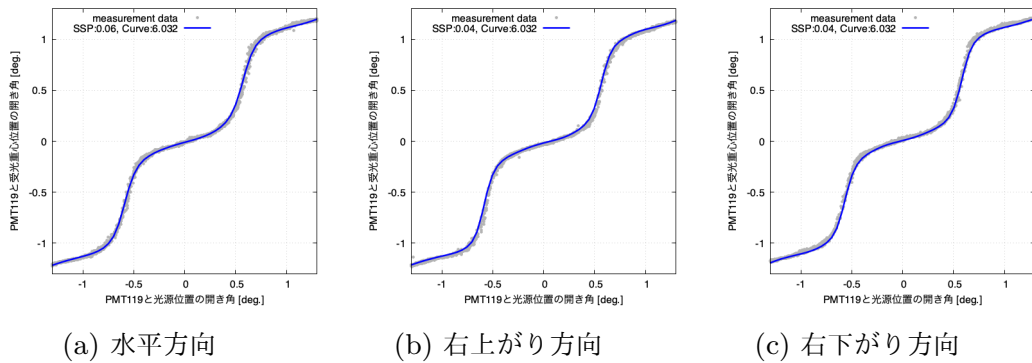


図 7.83: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD07

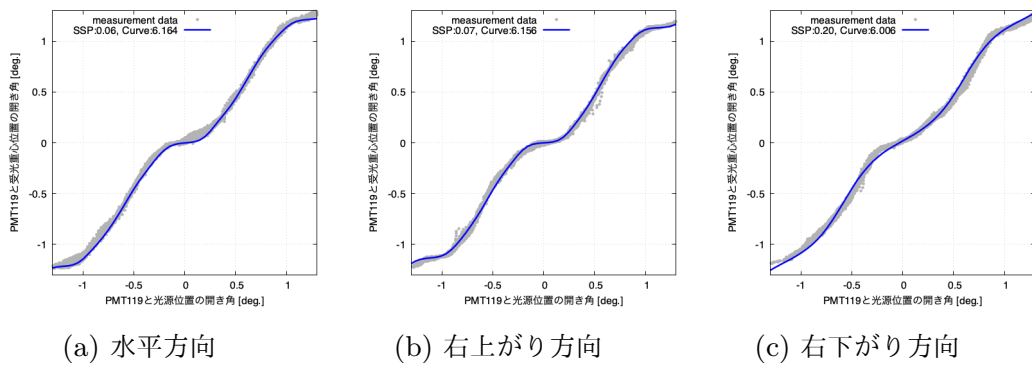


図 7.84: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD08

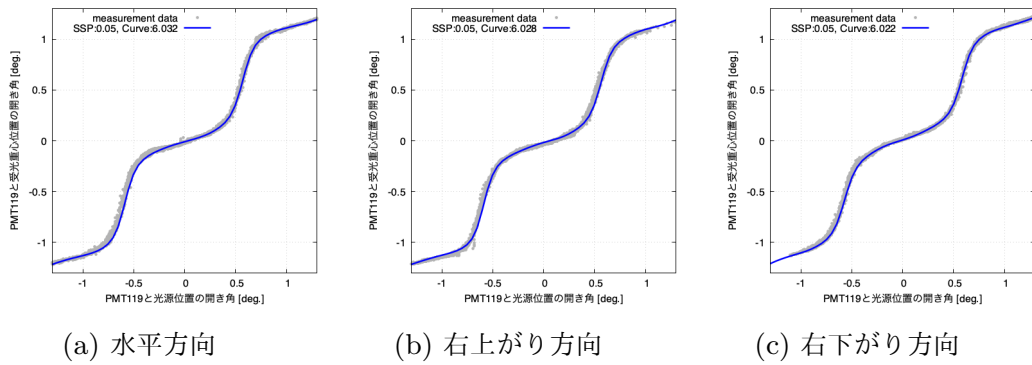


図 7.85: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD09

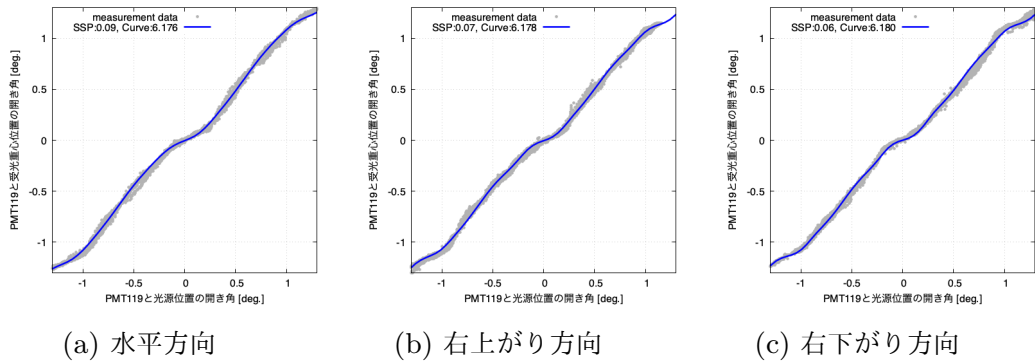


図 7.86: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD10

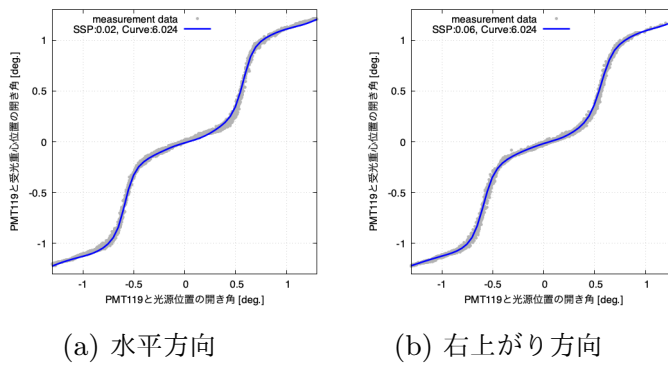


図 7.87: 最適値を用いたシミュレーションと計測データの比較FD11

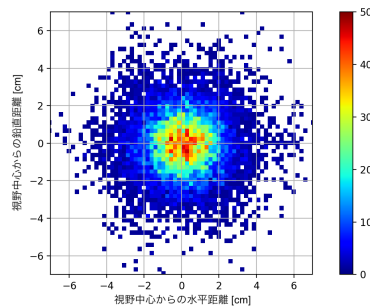


図 7.88: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD00 視野中心における集光像

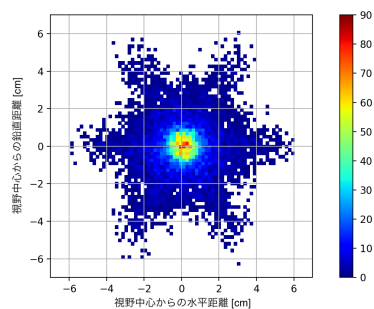


図 7.89: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD01 視野中心における集光像

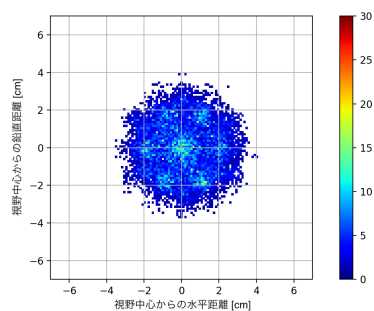


図 7.90: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD02 視野中心における集光像

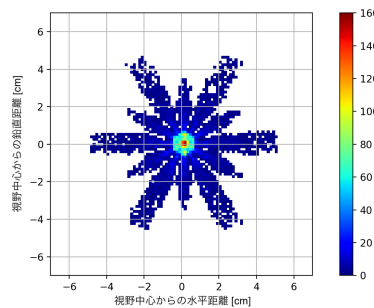


図 7.91: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD03 視野中心における集光像

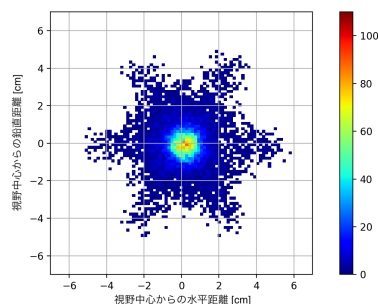


図 7.92: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD04 視野中心における集光像

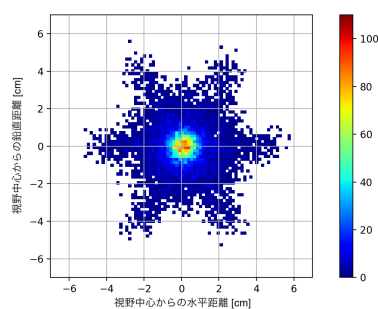


図 7.93: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD05 視野中心における集光像

表 7.6: 水平方向における最適値のシミュレーション集光像サイズ

	FD00	FD01	FD02	FD03	FD04	FD05	FD06	FD07	FD08	FD09	FD10	FD11
68% 区間 [cm]	2.27	2.06	2.25	1.68	1.47	1.73	2.31	1.74	2.24	1.73	2.50	1.88
95% 区間 [cm]	4.32	4.22	3.04	3.85	3.58	3.87	3.15	3.85	2.95	3.87	3.41	4.05

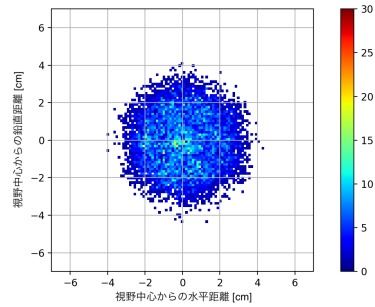


図 7.94: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD06 視野中心における集光像

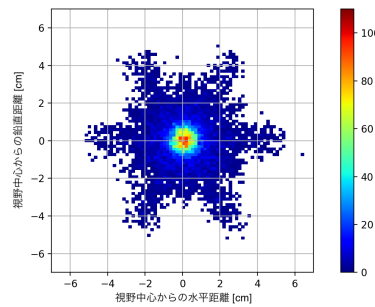


図 7.95: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD07 視野中心における集光像

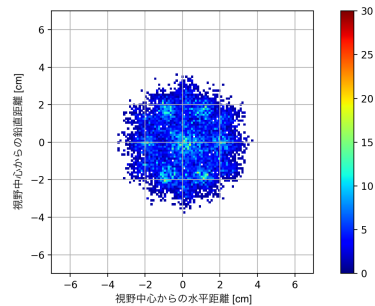


図 7.96: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD08 視野中心における集光像

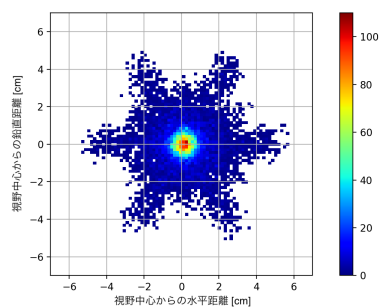


図 7.97: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD09 視野中心における集光像

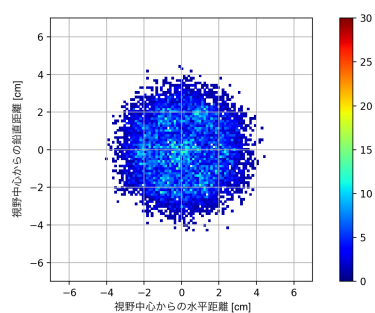


図 7.98: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD10 視野中心における集光像

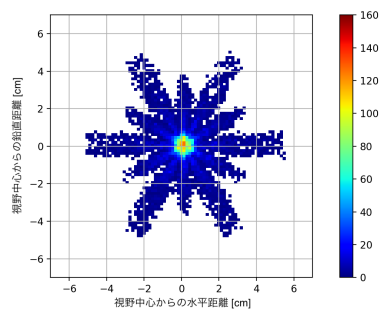


図 7.99: 水平方向の最適値を使用したシミュレーションの FD11 視野中心における集光像

第 8 章

集光像の形状比較

前章では最も視野中心の計測データを再現する SSP と曲率半径を算出した。このとき、視野端でも計測データを再現しているか確認した。

8.1 星の光による集光像

2012 年に星の光によってできる集光像の写真が撮影されている。PMT 感光面上にスクリーンを貼り、そのスクリーン上にできた集光像を露光時間 30 sec で撮影している。撮影された星を表 8.1 にまとめた。また、撮影された星の光による集光像の写真を図 8.1～8.3 に示す。

表 8.1: 星の光による集光像を撮影した星の座標や撮影時刻

星	赤道座標	視野 FD	観測開始日時 (UTC)
Saturn \hbar	13h30m14.58s/ $-6^{\circ} 33' 32.4''$	FD01	2012-05-30 08:39:51
Spica α	13h25m50.91s/ $-11^{\circ} 13' 32.3''$	FD01	2012-05-30 08:39:51
Pollux β	7h46m4.41s/ $+27^{\circ} 59' 41.8''$	FD04	2012-05-31 04:06:37
Castor α	7h35m23.28s/ $+31^{\circ} 51' 35.5''$	FD04	2012-05-31 04:06:37
UMa α	11h04m29.11s/ $+61^{\circ} 51' 04.5''$	FD08	2012-05-31 09:39:39
UMa β	11h02m35.00s/ $+56^{\circ} 18' 56.4''$	FD08	2012-05-31 09:39:39
UMa γ	11h54m28.75s/ $+53^{\circ} 37' 33.2''$	FD08	2012-05-31 09:39:39
UMa δ	12h16m2.03s/ $+56^{\circ} 57' 50.4''$	FD08	2012-05-31 09:39:39
UMa ϵ	12h54m34.36s/ $+55^{\circ} 53' 34.5''$	FD08	2012-05-31 09:39:39

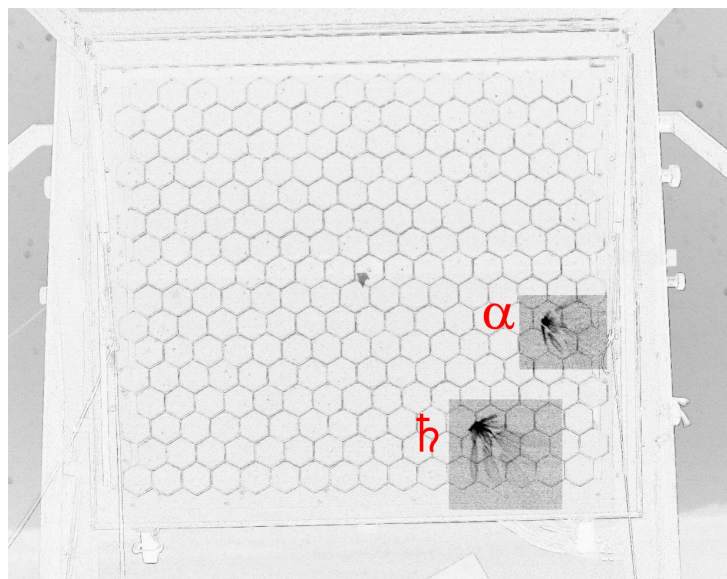


図 8.1: FD01 の PMT 感光面上で撮影された星の光による集光像の写真

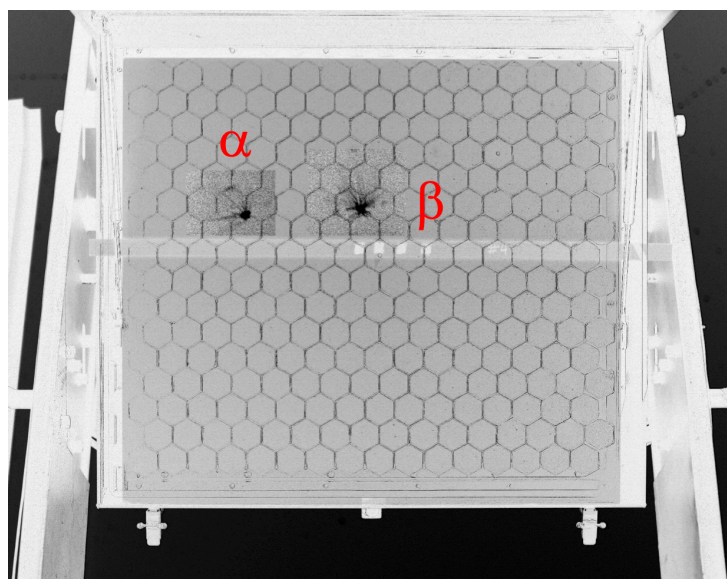


図 8.2: FD04 の PMT 感光面上で撮影された星の光による集光像の写真

8.2 星による像の再現

表 8.1 の赤道座標から地平座標に変換した位置に光源を設置してシミュレーションを行った。その際には 7 章で述べた SSP と曲率半径を現行の値と、水平方向に

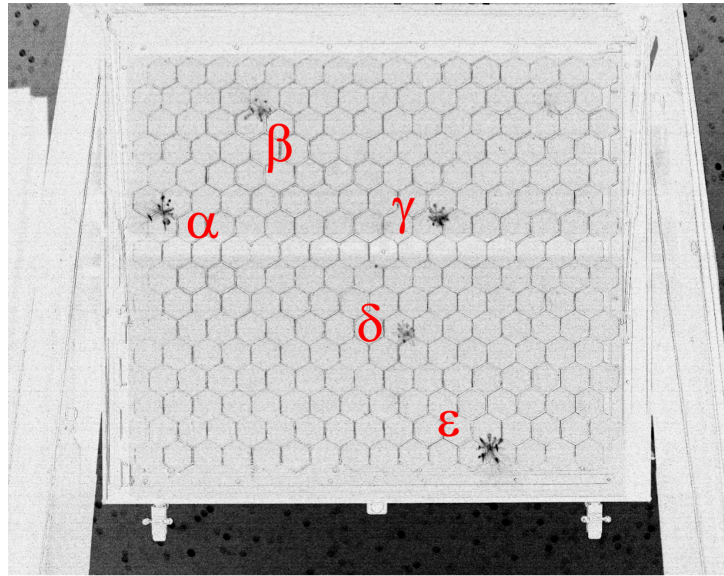


図 8.3: FD08 の PMT 感光面上で撮影された星の光による集光像の写真

おける最適値それぞれを使用してシミュレーションした。また、30 sec の露光時間に星は FD 視野上で 0.02° 移動する。そのため、シミュレーション開始から終了までに光源位置を 0.02° 移動させた。星の光による集光像の写真とシミュレーションの像の比較を図 8.4~8.12 に示す。現行の SSP と曲率半径を使用したシミュレーションの像に比べ、最適値を使用したシミュレーションの像の方が星の光による集光像をよく再現している。FD01 や FD04 は最適値シミュレーションの方が現行シミュレーションよりもピークが強調されており、ハロ部分のセグメントミラーによる構造が目立つ。また、ハロ部分の広がりも最適値シミュレーションの方が外側へ広い。これらの特徴は星の光による集光像と一致している。FD08 の最適値は現行の値と非常に近いため、図 8.8~8.12 の集光像も非常に近い形状をしている。FD08 の星の光による集光像とシミュレーション集光像は複数のピークを持っていることが共通している。また、図 8.8 や 8.12 など視野端でのピークの偏り方も非常に近い。これにより、視野中心の計測データを再現するように調整することで、視野端でも計測データを再現することがわかった。

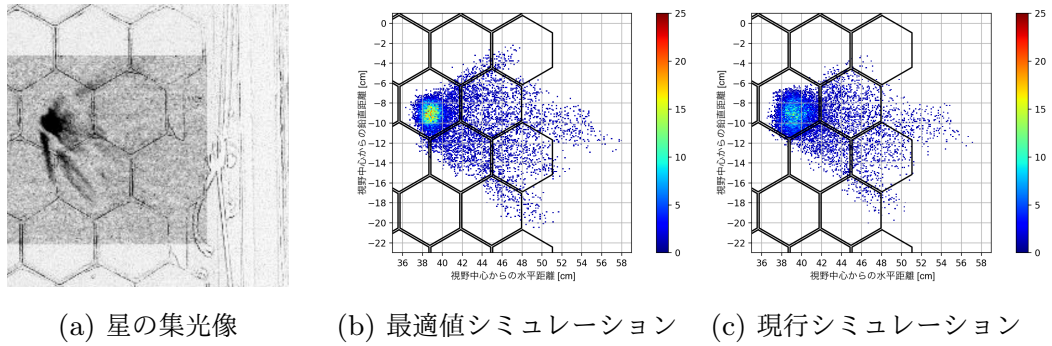


図 8.4: FD01 での像の比較 spica

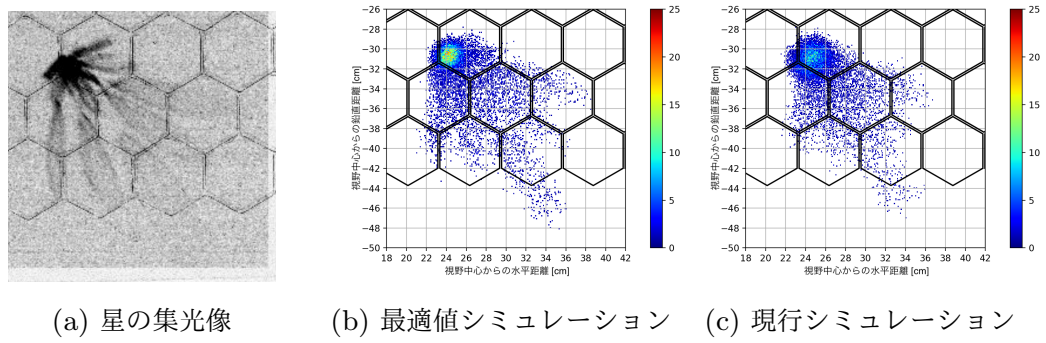


図 8.5: FD01 での像の比較 saturn

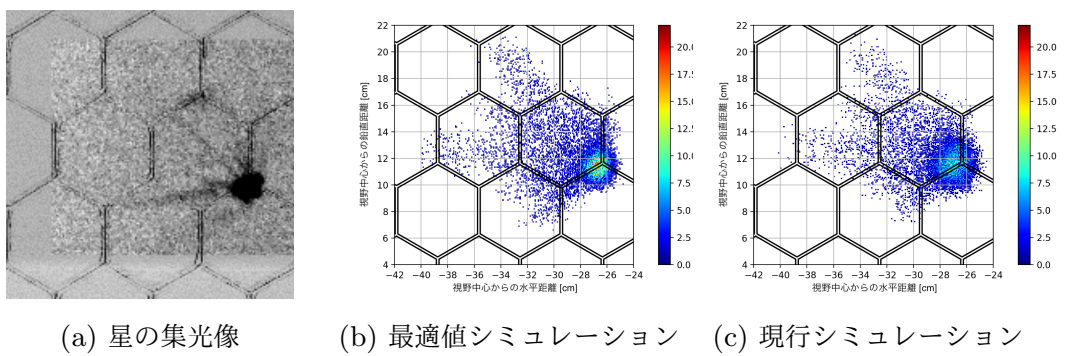


図 8.6: FD04 での像の比較 castor

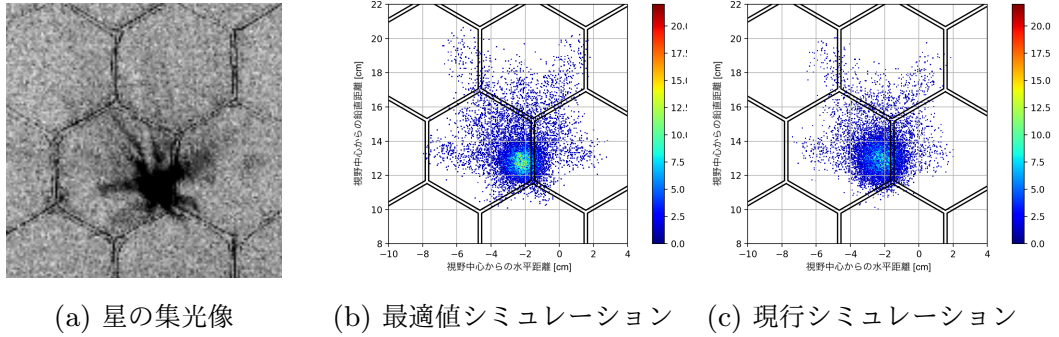


図 8.7: FD04 での像の比較 pollux

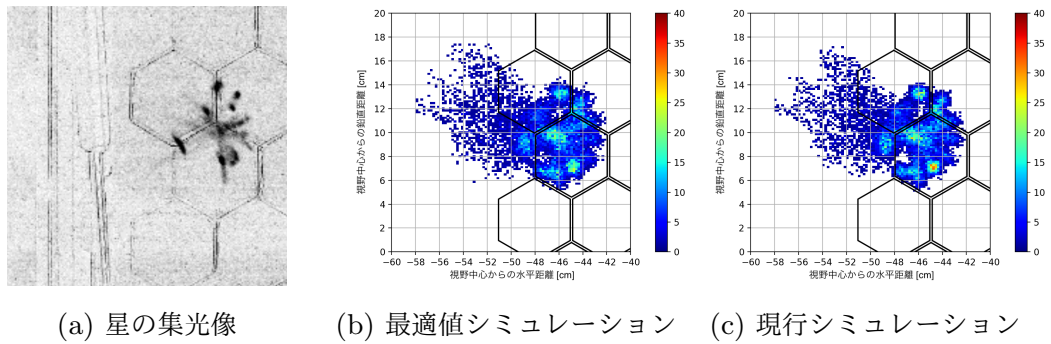


図 8.8: FD08 での像の比較 α

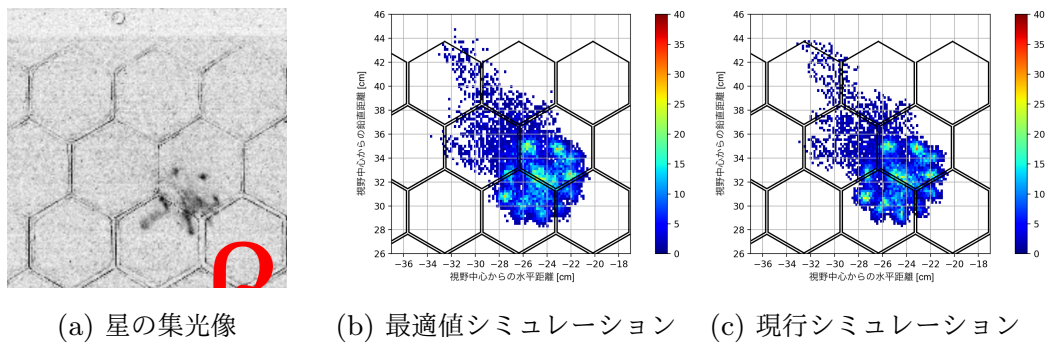


図 8.9: FD08 での像の比較 β

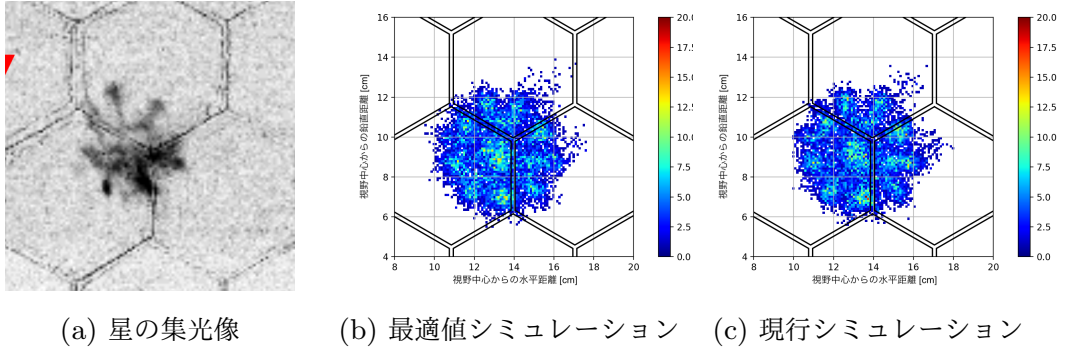


図 8.10: FD08 での像の比較 γ

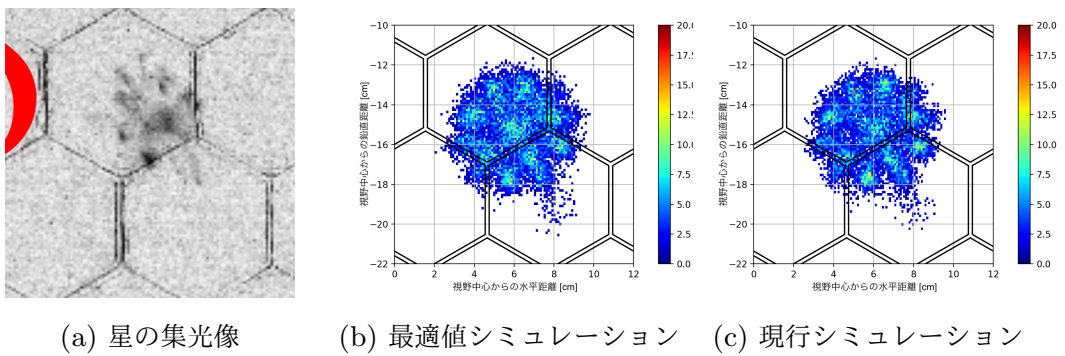


図 8.11: FD08 での像の比較 δ

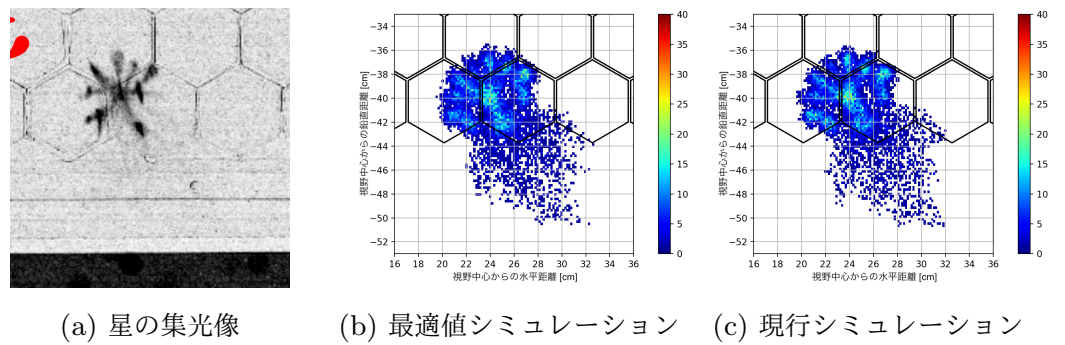


図 8.12: FD08 での像の比較 ϵ

第9章

結論

9.1 まとめ

FDの光学的特性の校正装置として、Opt-copterが開発された。2018年と2019年にTA実験のBRステーションで計測実験が行われ、FDの視野方向と集光像サイズの解析が進められている。FDの視野方向解析は2018年の計測データを用いた解析結果と2019年の計測データを用いた解析結果との間で再現性が確認された。FDの視野方向解析は測位用RTK-GPSモジュールの分解能や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、コマ収差による影響を受け、 0.03° の誤差を持つ。これはOpt-copterの目標としていた 0.1° の校正精度よりも一桁低い校正精度を達成することができた。視野中心における光源位置と受光重心位置の関係に着目し、集光像サイズ解析を行った。光源位置と受光重心位置の関係はFDのセグメントミラー一枚一枚の集光の広がりや設置角度の影響を受ける。現在TA実験で使用されているシミュレーターを本解析用に改良して使用し、計測データを最も再現するSSP(集光の広がり)と曲率半径(設置角度)の組み合わせを算出した。また、これによって各FDの視野中心における像の形状がわかった。今回、視野中心の計測データをもとに算出したSSPと曲率半径の組み合わせを使用したシミュレーションでできる像の形状は星によってできた像の形状をよく再現した。星による像の形状の再現は視野中心付近だけでなく、視野端でも再現された。

9.2 今後の展望

FDの視野方向解析によって求められた実際のFD視野方向を宇宙線解析に適用し、どの程度の影響があるかを見積もる必要がある。また、Opt-copterを用いた

計測実験は BR ステーションでしか行われていないが，TA 実験ではその他にも多くの FD を用いて宇宙線の観測を行なってる．今後，それら全ての FD に対して視野方向解析を適用することで，さらに高精度な宇宙線解析が期待される．集光像サイズ解析について，視野端での像の形状の再現度を定量的に算出する必要がある．現状では，3 方向それぞれで最適な SSP と曲率半径があるが，3 方向の評価値の合計から各 FD で唯一の最適な SSP と曲率半径を算出する．これに向けて，現在シミュレーション中である．また，視野方向解析と同様に宇宙線解析に集光像サイズ解析の結果を適用し，どの程度の影響があるのか見積もる必要がある．

第 10 章

謝辞

研究活動において日頃から熱心なご指導をしてくださった指導教員の富田孝幸助教に深く感謝いたします。毎週の Opt-copter ミーティングや計測実験等で様々なご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講師に深く感謝いたします。Opt-copter グループとして様々なご指導，ご協力してくださった稲富大地氏，佐野賢吾氏，奥悠弥氏，日比亮佑氏，甲斐仁武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上濱孝文氏，岩倉広和氏，宇都宮成弥，中村雄也氏，切中拓矢氏，曾根直宙氏，窪田悠人氏，中村智行氏，柴崎悠馬氏，齊藤亮介氏，西本大輝氏，高桑宏輔氏，阿部泰明氏に深く感謝いたします。研究施設の利用やインナ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。