

令和 3 年度 修士論文

次世代宇宙線観測用望遠鏡の 検出部構成の検討



提出者

信州大学 大学院 総合理工学系研究科 工学専攻
電子情報システム工学分野

窪田悠人

2022 年 1 月 27 日提出

目次

第1章	超高エネルギー宇宙線	1
1.1	宇宙線	1
1.2	空気シャワー現象	1
1.2.1	エネルギースペクトル	2
1.2.2	質量素性	3
1.2.3	到来方向	3
1.3	宇宙線の観測手法	5
1.3.1	地表粒子検出器	6
1.3.2	大気蛍光望遠鏡	7
第2章	フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡	9
2.1	CRAFFT 望遠鏡試作機の構成	9
2.2	CRAFFT 試作機を用いた宇宙線試験観測結果	10
2.3	現行の大気蛍光望遠鏡との比較	11
2.4	CRAFFT 実験の将来計画	12
2.5	CRAFFT の完全自律観測システム	13
2.6	CRAFFT 望遠鏡のレイトレースシミュレーター	14
第3章	レイトレースシミュレータの評価と視野角の見積もり	17
3.1	集光像の撮影	17
3.2	撮影した集光像とシミュレーションの比較	20
3.2.1	実験を再現したシミュレーション	20
3.2.2	大きさの比較	20
3.2.3	光量分布の比較	22
3.3	検出部面積に対する視野角の見積もり	24

第 4 章	紫外光 LED の光量測定試験	26
4.1	試験用の PMT マウントの製作	26
4.2	紫外光 LED を用いた光量測定試験	27
4.2.1	測位用 GPS モジュール	28
4.2.2	Real Sence Depth カメラ	28
4.2.3	試験方法	29
4.3	試験結果	31
第 5 章	光量測定試験の再現シミュレーション	34
5.1	LED と望遠鏡の位置関係	34
5.2	PMT の設置位置	34
5.3	実験を再現したシミュレーション	36
第 6 章	望遠鏡の精度向上のための検出部構成評価	40
6.1	要求される天頂角の決定精度	40
6.2	望遠鏡検出部評価のためのシミュレータ	41
6.3	PMT の形状ごとの比較	42
6.3.1	評価の方法	43
6.3.2	1 イベントでの比較	43
6.3.3	ランダムな 100 イベント分での評価	44
6.4	検出素子数による比較	46
6.4.1	評価を行う関数の変更	46
6.4.2	2 種類の検出部構成での精度の見積もりと仕様決定	47
第 7 章	結論	51
7.1	まとめ	51
7.2	今後の展望	51
	参考文献	53

図目次

1.1	空気シャワー現象の模式図	2
1.2	宇宙線のエネルギースペクトル [1]	4
1.3	宇宙線のエネルギースペクトルにエネルギーの 2.5 乗をかけたグラフ	5
1.4	TA 実験で観測された超高エネルギー宇宙線の組成. 赤線が陽子 100 % の場合, ピンク線が窒素 100 % の場合, 青線が鉄 100 % の場合の理論値.	5
1.5	TA 実験で観測された超高エネルギー宇宙線の到来方向分布 [2]	6
1.6	地表粒子検出器 [3]	7
1.7	大気蛍光望遠鏡 [3]	8
2.1	CRAFFT の外観図	10
2.2	CRAFFT プロトタイプ機の構成図	11
2.3	(左) CRAFFT による観測波形 (右) TA 望遠鏡のイベントディスプレイに CRAFFT の視野を重ねたもの	12
2.4	完全自律観測システムのシステム [4]	14
2.5	電力時給システムの外観. クーラーボックス内にバッテリーとチャージコントローラーが格納されている.	14
2.6	シャッター取り付け後の CRAFFT の外観	15
2.7	自律観測試験時の様子	15
2.8	ROBAST 内に再現したフレネルレンズの 3D モデル. 描画処理の関係で, 溝の数は中心から 100 個までとしている. [5]	16
2.9	ROBAST 内に再現した望遠鏡全体の 3D モデル [5]	16
3.1	スキャナーの外観図	18
3.2	実験時のスキャナーとトレーシングペーパーの外観	18

3.3	スキャナーで撮影した青色 LED のときの集光像	19
3.4	カメラで撮影した青色 LED のときの集光像	19
3.5	スキャナーで撮影した緑色 LED のときの集光像	19
3.6	カメラで撮影した緑色 LED のときの集光像	19
3.7	スキャナーで撮影した赤色 LED のときの集光像	19
3.8	カメラで撮影した赤色 LED のときの集光像	19
3.9	光源波長 450nm のときのシミュレーション結果	21
3.10	光源青色のときの各ピクセルの B 値	21
3.11	光源波長 500nm のときのシミュレーション結果	21
3.12	光源緑色のときの各ピクセルの G 値	21
3.13	光源波長 650nm のときのシミュレーション結果	21
3.14	光源赤色のときの各ピクセルの R 値	21
3.15	測定データにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 光源 LED は青色.	23
3.16	シミュレーションにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 波長は 450nm.	23
3.17	測定データにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 光源 LED は緑色.	23
3.18	シミュレーションにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 波長は 500nm.	23
3.19	測定データにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 光源 LED は赤色.	23
3.20	シミュレーションにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 波長は 650nm.	23
3.21	光源が緑色のときのシミュレーションと測定データの比較. オレンジがシミュレーションの元データ, 赤が畳み込み後のデータ, 緑が測定データを示す.	24
3.22	光源が赤色のときのシミュレーションと測定データの比較.	24
3.23	入射角 4° での出力波形	25
3.24	入射角 6° での出力波形	25
3.25	入射角 8° での出力波形	25
4.1	PMT 固定用のアーム	27
4.2	PMT 固定用のボックス	27

4.3	作成した 4 本分の固定マウント. マウントしているのはプラスチックのダミー.	27
4.4	RTK 測位モジュール piksi	28
4.5	Real Sence LIDAR camera	29
4.6	レンズ前面に設置した LIDAR カメラ	30
4.7	実験で使用した光源. LED の上にディフューザーを取り付けている.	30
4.8	入射角 0° での出力波形	32
4.9	入射角 2° での出力波形	32
4.10	入射角 4° での出力波形	32
4.11	入射角 6° での出力波形	32
4.12	入射角 8° での出力波形	32
4.13	全 PMT の測定波形の積分値の合計に対する, 各角度での積分値の割合	33
5.1	測定したフレームと PMT の位置. z 軸が奥行き方向の距離を示す.	35
5.2	ch1 の PMT のデータ	36
5.3	ch1 のデータからフィットした平面	36
5.4	想定入射角 0° での焦点面でのヒットマップ	38
5.5	想定入射角 2° での焦点面でのヒットマップ	38
5.6	想定入射角 4° での焦点面でのヒットマップ	38
5.7	想定入射角 6° での焦点面でのヒットマップ	38
5.8	想定入射角 8° での焦点面でのヒットマップ	38
5.9	全 PMT で取得した合計光子数に対する各 PMT での入射角ごとの取得光子の割合	39
6.1	PMT の感度マップ	42
6.2	円形の PMT を 9 本使った検出部と到来させた空気シャワーのトラック	42
6.3	望遠鏡から約 10km 地点に天頂角 15°, 方位角 40° の空気シャワーを生成された時の光電子数-時間のグラフ	42
6.4	三角形の PMT を用いた検出部の感度マップ	44
6.5	円形の PMT を用いた検出部の感度マップ	44

6.6	図 6.4 を検出部構成としたときの，到来位置を変化させた時の $-\ln(L)$ のカラーマップ. z 軸が $-\ln(L)$ の値を示す.	44
6.7	図 6.5 を検出部構成としたときの，到来位置を変化させた時の $-\ln(L)$ のカラーマップ.	44
6.8	空気シャワーを到来させた範囲のイメージ図. 2 カ所の望遠鏡の視野を重ねた三角形の内側に空気シャワーを生成する.	45
6.9	図 6.3 を検出部構成としたときの，100 イベント分の期待値との開き角. 赤線は累積比率を示す.	45
6.10	図 6.4 を検出部構成としたときの，100 イベント分の期待値との開き角.	45
6.11	到来位置を変化させた時の χ^2 のカラーマップ. z 軸が χ^2 の値を示す. 検出部構成は図 6.13 を使用している.	47
6.12	到来方向を変化させた時の χ^2 のカラーマップ.	47
6.13	望遠鏡の設置位置と生成した 5000 イベント分の到来位置. 赤丸がトリガーされたシャワー，黒丸がトリガーされなかったシャワーを示す. また，青線はそれぞれの望遠鏡の視野を示す.	48
6.14	直径 16cm の PMT9 本を 3×3 の正方形に配置した時の感度マップ	49
6.15	直径 13cm の PMT16 本を 4×4 の正方形に配置した時の感度マップ	49
6.16	直径 16cm の PMT9 本を検出部構成としたときの期待値との開き角.	50
6.17	直径 13cm の PMT16 本を検出部構成としたときの期待値との距離の差.	50
6.18	直径 16cm の PMT9 本を検出部構成としたときの期待値との開き角.	50
6.19	直径 13cm の PMT16 本を検出部構成としたときの期待値との距離の差.	50

表目次

2.1	現行大気蛍光望遠鏡と CRAFFT の比較	12
3.1	実験データとシミュレーションの集光像の大きさの比較	22
3.2	入射光子 60% が含まれる中心からの距離	24
5.1	piksi の座標データと 0° 地点を基準とした相対角度	35
5.2	PMT の設置位置と設置角度	36
6.1	生成した空気シャワーの条件	47

第1章

超高エネルギー宇宙線

1.1 宇宙線

宇宙線とは宇宙を飛び交う高エネルギーの粒子である。1912年にオーストリアの物理学者 V.F.Hess が気球を用いた実験を行い、宇宙から降り注ぐ放射線の存在を発見した。これまでの観測から $10^8 \sim 10^{20} eV$ を超える広範囲なエネルギーの宇宙線が観測されている。宇宙線の起源や加速機構は未だに解明されていない部分が多く、特に、エネルギーが $10^{18} eV$ を超える宇宙線は超高エネルギー宇宙線と呼ばれ、その到来頻度の低さから未だにほとんどのことが明らかになっていない。現在では、テレスコープアレイ (TA) 実験、ピエールオージェ (Auger) 実験などの宇宙線観測実験が超高エネルギーの宇宙線観測を行っている。

1.2 空気シャワー現象

宇宙線が大気に突入すると、大気に存在する元素と相互作用を起こし二次粒子を生成する。さらに、生成された二次粒子は大気中の元素と相互作用を起こし再び二次粒子を生成する。これを繰り返し引き起こしながら地表に大量の二次粒子が降り注ぐ現象のことを空気シャワー現象という。図 1.1 に空気シャワー現象の模式図を示す。空気シャワー現象では、ハドロンやミューオン、電子、ガンマ線などが生成される。このうちハドロンと大気との相互作用により π 中間子などの多重生成を起こすものを核カスケード、ガンマ線が電子対生成により電子と陽電子を生成し、その電子と陽電子が制動放射によって再びガンマ線を放射する過程を電磁カスケードと呼ぶ。

宇宙線が空気シャワー現象を起こすと、宇宙線のエネルギーの一部は二次粒子に

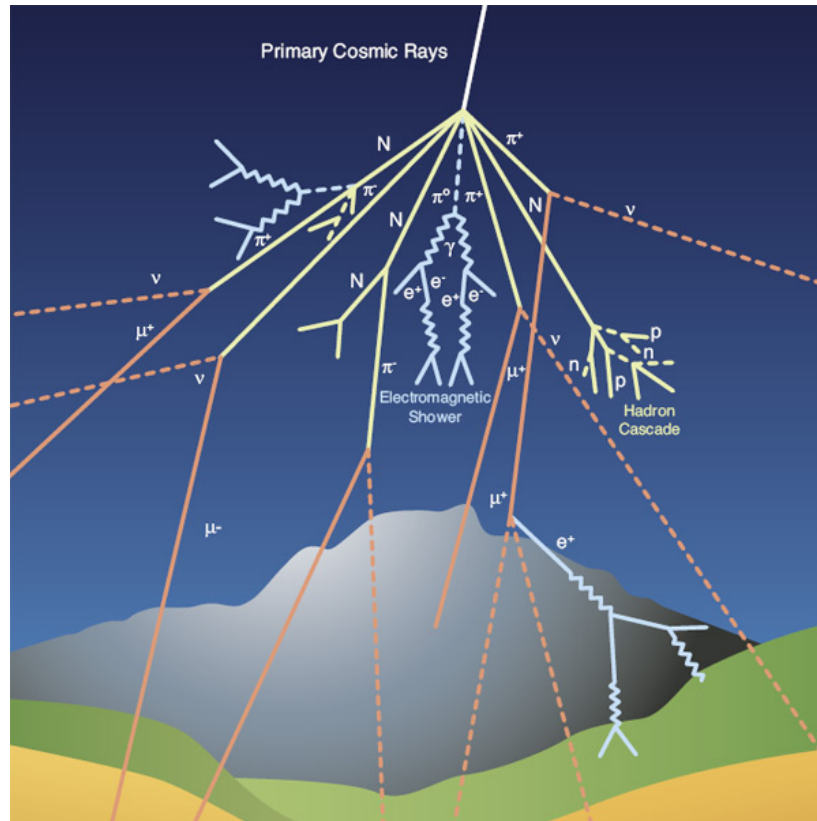


図 1.1: 空気シャワー現象の模式図

移っていく。二次粒子が大気との相互作用で粒子の数を増やしていくとエネルギーも粒子数に応じて分配される。やがて一定までエネルギーを失った粒子は、電離損失によって大気に吸収される。このような大気の深さによって空気シャワーの粒子数が増え、減っていく過程を縦方向発達という。また、このときの粒子数が最大となる大気深さを X_{max} と呼ぶ。 X_{max} は宇宙線のエネルギーと質量組成に依存し、エネルギーが大きほど X_{max} が大きくなる。また、質量組成が重く、多くの原子で構成されているほど X_{max} は小さくなる。したがって、空気シャワーの発達過程を確認し、 X_{max} を調べることで到来した1次宇宙線の構成原子を知ることができる。

1.2.1 エネルギースペクトル

宇宙線のエネルギースペクトルを図 1.2 に示す。宇宙線の到来頻度はエネルギーの3乗に比例して小さくなることが知られている。特に $10^{19}eV$ を超えるエネルギーの粒子に注目すると、 $1km^2$ あたり1年に1個という非常に少ない頻度とな

る。スペクトルの構造を見るため、エネルギースペクトルにエネルギーのべき乗をかけたものを図 1.3 に示す。エネルギーが $10^{15}eV$ までの宇宙線は銀河系内が起源と考えられており、その上に”knee”と呼ばれるエネルギースペクトルが急勾配になる領域が確認できる。これは $10^{15}eV$ を超えるエネルギーの宇宙線が銀河磁場を振り切り、銀河系外に漏れだす可能性があること、超新星爆発で供給できるエネルギーの最大が $10^{15}eV$ であることなどが原因として考えられている。エネルギーが $5 \times 10^{18}eV$ 付近は”ankle”と呼ばれ、スペクトルの勾配が緩やかになる。これは銀河系内が起源の宇宙線と銀河系外が起源の宇宙線が混ざることにより発生していると考えられているが、詳しくは分かっていない。エネルギーが $10^{19}eV$ を超える付近では再びエネルギースペクトルが急勾配になっていることが確認できる。これは $4 \sim 6 \times 10^{19}eV$ を超える宇宙線が宇宙空間に存在する光子との相互作用によりエネルギーを失うため、到来頻度が急激に減少する GZK カットオフという機構ではないかと予想されている。ただし、GZK カットオフと断定するためには、宇宙線の組成を決定しその組成の宇宙線から予想されるカットオフの位置と観測されたカットオフの位置が無矛盾である必要がある。

1.2.2 質量素性

超高エネルギー宇宙線の質量組成は前述の「空気シャワー現象」における二次粒子数が最大となる深さ、 X_{max} によって決定される。先述したように、 X_{max} はエネルギーの大きい宇宙線の方が大きくなる。また、同一のエネルギーの宇宙線であれば、一次宇宙線の組成がより重い原子核であるほど X_{max} が小さくなる傾向にある。これは、構成粒子が多くなるほど、大気の原子核との相互作用断面積が大きくなり、より高いところで相互作用を起こすため X_{max} が小さくなる。また、粒子数が多くなるほど相互作用時に分裂する粒子が増え、エネルギーの分配がより早く進行するためと考えられる。GZK カットオフは宇宙線の組成によって位置が決定されるため、エネルギースペクトルの折れ曲がりも GZK カットオフと断定するためには宇宙線の組成を明らかにする必要がある。TA 実験による宇宙線の質量組成の解析結果を図 1.4 に示す。

1.2.3 到来方向

宇宙線の起源は活動銀河核や超新星爆発など様々な候補が考えられているが、未だ解明されていない。宇宙線の到来方向がわかれば発生源の特定を行える可能性がある。しかし、荷電粒子は銀河磁場の影響を受け曲がってしまうため、地球

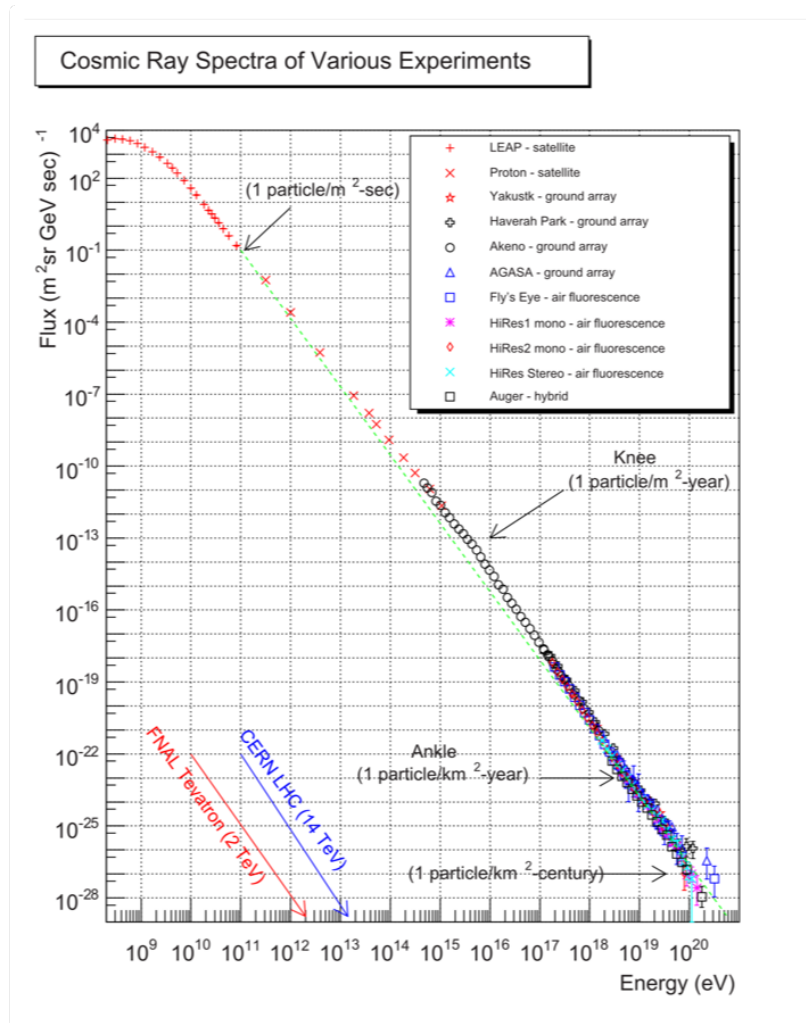


図 1.2: 宇宙線のエネルギースペクトル [1]

に到来するまでにベクトル情報をほとんど失ってしまう。したがって 10^{15} eV 以下のエネルギーの低い荷電粒子の宇宙線は等方的に到来する。一方で、高エネルギーの宇宙線は銀河磁場の影響が少なくベクトル情報を保持したまま地球に到来すると考えられており、一定の方向性が見えるのではないかと期待される。図 1.5 は $5.7 \times 10^{19} \text{ eV}$ 以上の宇宙線を対象とした異方性解析結果である。解析結果からホットスポットと呼ばれる超高エネルギー宇宙線が密集して到来している領域が見つっている。また、図に示す灰色の線は超銀河面と呼ばれる銀河が密集している領域で、ホットスポットが超銀河面付近に見える。今後の観測で統計量を増やすことで異方性の証明が期待されている。

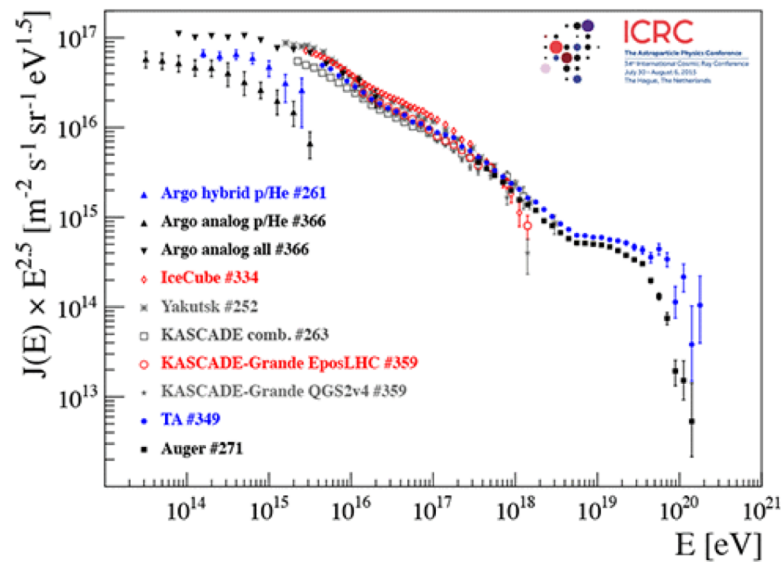


図 1.3: 宇宙線のエネルギースペクトルにエネルギーの 2.5 乗をかけたグラフ

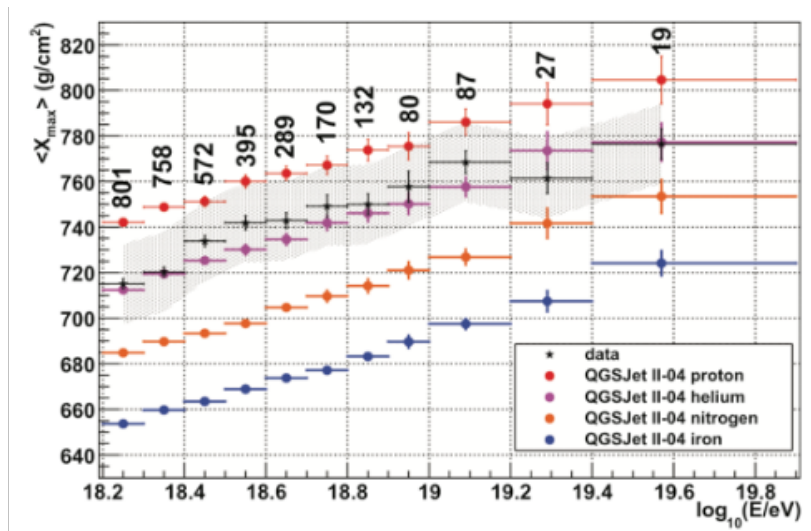


図 1.4: TA 実験で観測された超高エネルギー宇宙線の組成. 赤線が陽子 100 % の場合, ピンク線が窒素 100 % の場合, 青線が鉄 100 % の場合の理論値.

1.3 宇宙線の観測手法

超高エネルギー宇宙線は到来頻度が低く一次粒子を直接観測するのは現実的でないため, 空気シャワーから生じる二次粒子を観測している. 観測方法は主に 2 つあり, 1 つは地表粒子検出器を用いて二次粒子を直接地表で観測する方法, もう一つ

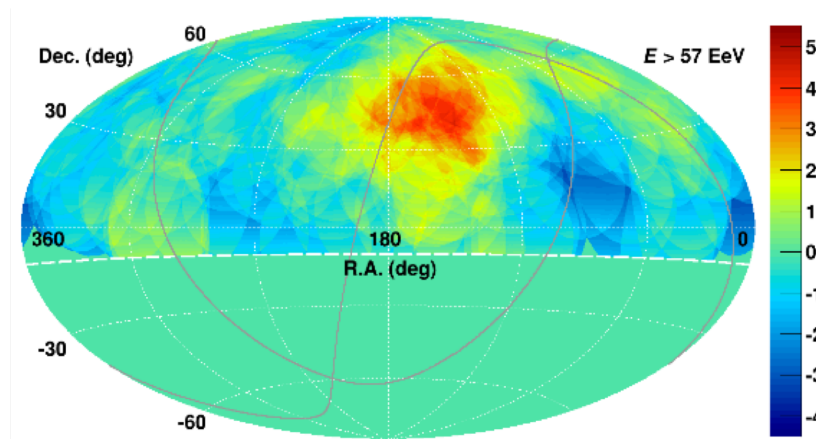


図 1.5: TA 実験で観測された超高エネルギー宇宙線の到来方向分布 [2]

は大気蛍光望遠鏡を用いて空気シャワーの粒子による蛍光を観測する方法である。現在、超高エネルギー宇宙線観測は TA 実験, Auger 実験で行われており, 共に 2 種類の検出器を用いたハイブリット観測が行われている。

1.3.1 地表粒子検出器

地表にアレイ状に設置して, 空気シャワー現象で発生した二次粒子を観測する検出器を地表粒子検出器と呼ぶ。地表粒子検出器は内部にプラスチックシンチレータが設置されており, 空気シャワーの二次粒子がプラスチックシンチレータを通過するとシンチレーション光を発生させる。そのシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) で測定することで宇宙線を検出する。空気シャワーの粒子は電子, 陽電子などの電磁成分, ミューオン成分, ハドロン成分などである。特にミューオン成分のみを取り出すため, 金属でシールドされた粒子検出器を用いて観測を行う場合もある。

空気シャワー現象で発生した二次粒子はシャワーの軸に対して面上に到来する。そのため軸の傾きに応じて, アレイ状に設置された各検出器の観測に時間差が生じる。この時間差からシャワーの軸を計算し一次宇宙線の到来方向を推定できる。また, 一次宇宙線のエネルギーは検出された粒子密度と空気シャワーの横方向の広がりから, 全粒子数を推定しシミュレーションと比較することで求めることができる。

図 1.6 に TA 実験で用いられている地表粒子検出器の外観を示す。TA 実験では 500 台の地表検出器を 1.2km 間隔でアレイ状に設置することで 700km^2 の検出範囲を実現している。地表検出器の利点としては, 検出器 1 台のコストが低いため自



図 1.6: 地表粒子検出器 [3]

動で観測ができる点，昼夜問わず観測が行えるためほぼ 100 %の稼働率を維持できる点などが挙げられる．一方で，大気中での粒子の発達を観測できないため，質量組成の推定は難しいのが現状である．

1.3.2 大気蛍光望遠鏡

空気シャワー現象により発生した荷電粒子が大気中を通過すると，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蛍光を発生させる．この蛍光を望遠鏡で観測することを大気蛍光法と呼ぶ．発生する蛍光は一次宇宙線のエネルギーが大きくなるにつれて強くなる．そのため大気蛍光量とエネルギー損失の関係を測定することで，検出した蛍光から一次宇宙線のエネルギーを推定できる．また，大気蛍光望遠鏡の受光部には光電子増倍管がアレイ状に設置されている．望遠鏡の視野中心と光源との開き角に応じて，受光面の中心から受光点までの距離が変化するため，設置されたどの光電子増倍管で受光したかによって光源の二次元的な位置を把握できる．二次元的な位置を把握できるということは，視野内における空気シャワーの縦方向発達や X_{max} を観測でき，質量組成の推定が行える．ただし，1 台の望遠鏡で奥行き方向の位置を推定することは難しいため，精度よく観測するためには，望遠鏡を二カ所以上に設置しステレオ観測する必要がある．

図 1.7 に TA 実験で用いられている大気蛍光望遠鏡の外観を示す．TA 実験では



図 1.7: 大気蛍光望遠鏡 [3]

18 枚の鏡で構成された口径 3m の反射鏡と 256 本の光電子増倍管で構成された大気蛍光望遠鏡が 1 ステーションにつき 12 台設置されている。ステーションは複数あるためステレオ観測が行える。大気蛍光望遠鏡の利点は、前述の通り、空気シャワーの縦方向発達から質量組成を推定できる点である。一方で、背景光の影響をできる限り少なくするため、月のない晴れた夜間しか観測を行えなえず、稼働率は 10% ほどである。また、1 台あたりの製造コストが約 2000 万円と高価であり、人による観測作業が必須ため、製造費および人件費共に高価である。

第2章

フレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡

第1章で述べたように、超高エネルギー宇宙線の観測において宇宙線の質量組成の推定には大気蛍光望遠鏡が有用である。また、超高エネルギーは到来頻度が低く、大気蛍光望遠鏡の稼働率も低いため、統計量が足りていないのが現状である。今後、質量組成の推定を行うためには、大気蛍光望遠鏡の観測領域を拡大して観測統計量を増やし、大統計での解析を行う必要がある。しかし、大気蛍光望遠鏡は地表粒子検出器に比べて高コストであり、現行の望遠鏡を大規模に配置して観測を行うことは難しい。また、高価な望遠鏡は人の手による運用が必須であり、人件費の観点でも大規模化は現実的ではない。そこで我々は検出器そのものを低コストで設計し、かつ完全自動観測を行うことで人件費を削減できる新型の大気蛍光望遠鏡として CRAFFT (Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope) の開発している。本章では、我々が開発している大気蛍光望遠鏡について説明する。

2.1 CRAFFT 望遠鏡試作機の構成

CRAFFT 望遠鏡の試作機の外観を図 2.1 に、構成図を図 2.2 に示す。CRAFFT 望遠鏡の前面には大きさ $1.05 \times 1.4\text{m}$ のフレネルレンズが設置されており、このレンズで大気蛍光を集光する。フレネルレンズとはアクリル樹脂などの素材に同心円状の溝を刻むことで、焦点がレンズの内側に来るような短い焦点距離のレンズを薄く軽量に再現したものである。フレネルレンズを用いることで大型のレンズでありながら焦点距離を短くし、望遠鏡全体を小さく保つことができる。焦点面には紫外光透過フィルタを設置しノイズを除去する。大気蛍光は非常に微弱な光であり、



図 2.1: CRAFFT の外観図

夜間は月明かりなどの背景光もレンズによって集光されてしまうので、大気蛍光の主たる紫外光以外の光をフィルタで除去することでノイズを軽減する効果がある。検出面には直径 203mm の光電子増倍管を設置し、入射光を電気信号に変換する。これら全体をアルミフレームを骨組みとして外側をガルバリウム鋼板で覆うことで CRAFFT 望遠鏡を構成している。加えて、望遠鏡の外にエレクトロニクスとして光電子増倍管に高電圧を印加するための高圧電源、出力された信号を増幅するためのアンプ、信号を記録するための FADC ボードなどを配備している。これらすべてを市販の既製品を使用することでコストを抑えて、1 台約 150 万円という低コストを実現している。

2.2 CRAFFT 試作機を用いた宇宙線試験観測結果

2.1 章の構成で宇宙線を検出可能であるか確かめるために、2017 年 11 月にアメリカ合衆国ユタ州にある TA 実験サイトにおいて宇宙線の試験観測が行われた。望遠鏡の組み立ては安全性を考慮し部品を現地に輸送後、3 人作業で 2 日に 1 台のペースで合計 4 台製作され、1 日かけて設置された。この試験観測では、観測した信号と TA 実験の大気蛍光望遠鏡で観測した信号との比較を行うため、TA 望遠鏡の視野と重なるように CRAFFT 望遠鏡を合計 4 台設置し、TA 望遠鏡から取得したトリガーによって信号を記録した。同時刻に取得した両者の信号を比較することで、CRAFFT での宇宙線検出が可能かどうか確かめた。観測は、試験期間 10

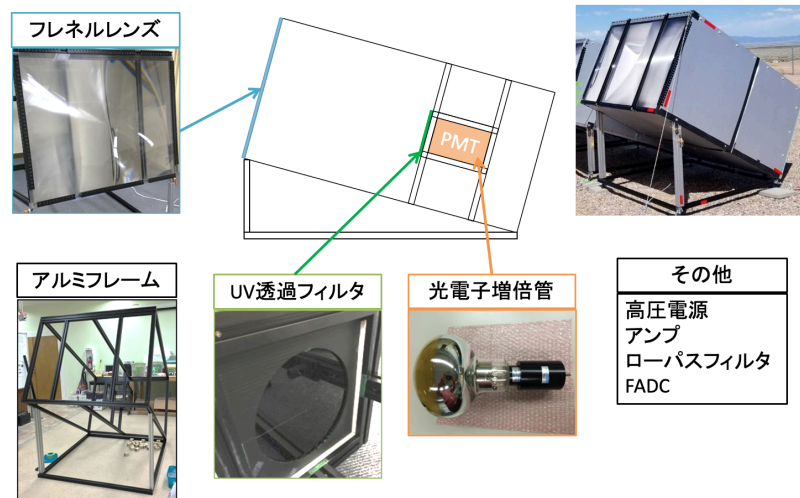


図 2.2: CRAFFT プロトタイプ機の構成図

日間のうち日没後の月の出ていない夜間である 63.5 時間の間観測が行われた。実際に CRAFFT で観測された信号と対応する TA 望遠鏡イベントディスプレイに CRAFFT の視野を重ねたものを図 2.3 に示す。イベントディスプレイは TA 望遠鏡の視野が四角形の枠で、CRAFFT4 台分の視野がそれぞれ赤、青、黒、黄色の 4 つの円で描かれている。CRAFFT の観測波形を見ると青と黒の信号が順番に立ち上がっている様子が確認できる。同時刻のイベントディスプレイにおいても上から到来した空気シャワーが青と黒の望遠鏡の視野を縦に通過する様子が確認できる。10 日間の観測でこの事象を含め全 10 事象で同様の様子が確認し、CRAFFT で宇宙線が検出が可能であることが確認された。また、TA 望遠鏡の解析から観測できた宇宙線は 10^{18} eV 程度のエネルギーであることがわかった。

2.3 現行の大気蛍光望遠鏡との比較

CRAFFT 試作機の構成を現行の大気蛍光望遠鏡と比較する。それぞれの性能を比較しまとめたものを表 2.1 に示す。現行の大気蛍光望遠鏡は口径 6.8m^2 の複合球面鏡で集光する反射型望遠鏡である。受光部には 60mm の光電子増倍管を 256 本アレイ状に配置し、1 つの光電子増倍管に $1^\circ \times 1^\circ$ の視野角を割り当てている。そのため空間分解能が高く、単体の望遠鏡で宇宙線の幾何学情報の解析が行える。1 台あたりのコストはおよそ 2000 万円でこれを複数台設置して観測を行っている。一方 CRAFFT では、集光部に口径 1.4m^2 のフレネルレンズを用いて大気蛍光を集光し、受光部に 203mm の光電子増倍管を 1 本設置して大気蛍光を検出する。こ

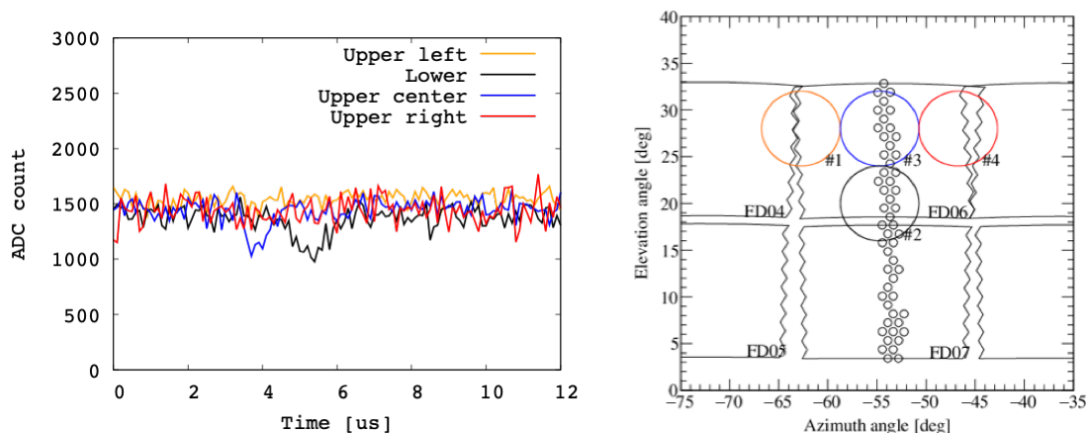


図 2.3: (左) CRAFTT による観測波形 (右) TA 望遠鏡のイベントディスプレイに CRAFTT の視野を重ねたもの

表 2.1: 現行大気蛍光望遠鏡と CRAFTT の比較

	現行大気蛍光望遠鏡	新型大気蛍光望遠鏡 (CRAFTT)
集光部	複合球面鏡：口径 $6.8m^2$	フレネルレンズ：口径 $1.4m^2$
受光部	60mm 光電子増倍管 256 本	203mm 光電子増倍管 1 本
構造	鉄骨	アルミフレーム
建屋	あり	なし
コスト	約 2000 万円	約 150 万円

の構造で 1 台あたりおよそ 150 万円で現行大気蛍光望遠鏡の 10 分の 1 程度の値段で作成できる。集光率は口径の 2 乗に比例するため新型は現行型の 10% ほどであり、空間分解能も低く単体での宇宙線の幾何学情報の再構成は難しい。しかし、望遠鏡の台数を増やし、2 箇所以上のステレオ観測を行うことで、このデメリットをカバーできると考えている。

2.4 CRAFTT 実験の将来計画

CRAFTT 実験では最終的に、40 万 km^2 規模の領域に望遠鏡を展開し、宇宙線観測を行う実験を目指している。そのために、望遠鏡開発の計画を 3 段階に分けて開発を進めている。

フェーズ 1 では、フレネルレンズを用いた低コスト望遠鏡として検出器概念の確

立を行う。既に宇宙線の試験観測によって、低コストなフレネルレンズ型望遠鏡として宇宙線の検出を行えることを確認している。現在は完全自律観測システムの開発と望遠鏡の検出部構成の最適化を進めている。これらが完成し、望遠鏡単体が完成次第フェーズ2への移行を予定している。

フェーズ2では、観測方法の確立を行う。CRAFFTは望遠鏡単体での空間分解能が低いので、一つの空気シャワーを二ヶ所以上の観測所で観測するステレオ観測を前提に開発を進めている。そのため、ステレオでの観測試験や宇宙線幾何学情報の再構成、各観測所をつなぐネットワークの確率などが開発項目としてあげられる。

フェーズ3では、目標とする10万 km^2 を超える規模で望遠鏡を展開し、宇宙線観測を行う。展開を見据えて、望遠鏡の量産化や設置方法、複数の望遠鏡を一箇所にまとめて360°観測を行える観測所の確立が必要となる。

現在はフェーズ1の最終段階に到達しており、完全自動観測システムの構築や検出面の最適化などを進め、CRAFFT望遠鏡の検出器概念が確立しつつある。

2.5 CRAFFTの完全自律観測システム

現行の大気蛍光望遠鏡は製造コストが高いため、安全面の観点から、観測時は人によるオペレーションが必要になる。一方でCRAFFT望遠鏡は、今後の大規模な展開を考えると、全ての望遠鏡を人の手で動かすのは人員の確保や運用コスト面で現実的ではない。そこで観測を完全自動化し、人の手を必要としないシステム開発が行われている。完全自律観測システムは電力供給システム、自動観測システム、望遠鏡保護システムの3つに区分される。図2.4に完全自律観測システムのシステム図を示す。

電力供給システムはソーラーパネルとバッテリーを用いて太陽光で望遠鏡が稼働できるシステムが組み立てられており、3日間充電ができない状況でも観測が行えるように設計されている。図2.5に電力供給システムの外観を示す。

自動観測システムは、ラズベリーパイを用いて降雨計など各種センサーからの情報を用いた観測判断や観測時間の計算、PMTへのHVの印加など観測に必要な望遠鏡の制御を一括して行っている。

望遠鏡保護システムは、常時屋外に設置されている望遠鏡を太陽光や砂などから保護する目的で製作されている。フレネルレンズの前面にシャッターを取り付けて、望遠鏡を保護し、観測時にはシャッターを開けて観測を行う。これらの開閉や電力供給も前述の電力供給・自動観測システムによって制御されている。

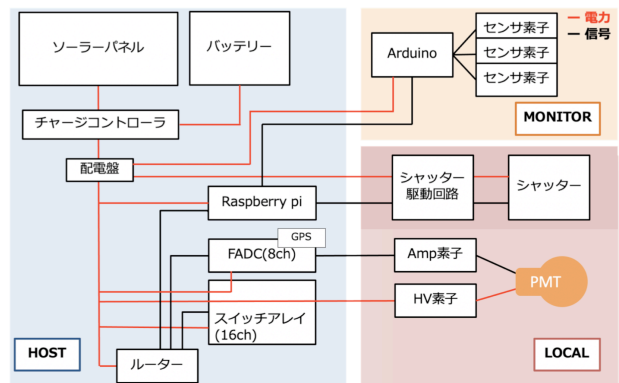


図 2.4: 完全自律観測システムのシステム [4]

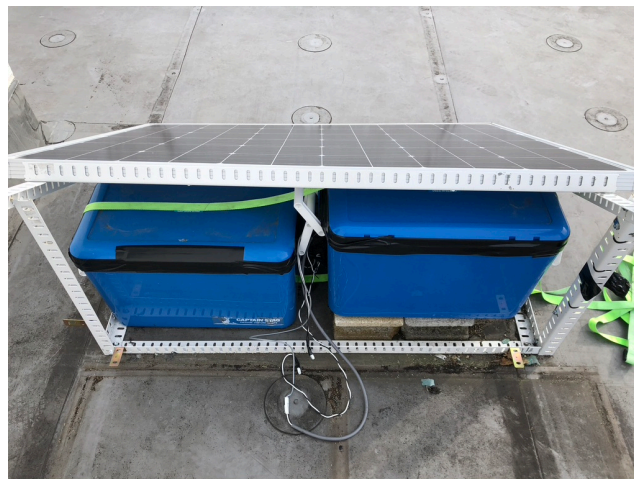


図 2.5: 電力時給システムの外観. クーラーボックス内にバッテリーとチャージコントローラーが格納されている.

CRAFFT 望遠鏡に取り付けたシャッターの外観を図 2.6 に示す.

2020 年 3 月から 11 月にかけて, 3 つのシステムの統合試験が行われた. 試験は信州大学情報工学科棟の屋上で行われた. 試験ではソーラーパネルでの電力供給や観測時間に合わせたシャッターの開閉, PMT への HV の印加などをシステム全体の試験を行い, 約 6 ヶ月間の連続稼働を確認した. 試験時の様子を図 2.7 に示す.

2.6 CRAFFT 望遠鏡のレイトレースシミュレーター

望遠鏡の検出部構成を再設計することを見据えて, 望遠鏡に入射した光がどのようにふるまうか計算するレイトレーシングシミュレータが開発された. シミュレータは ROOT のライブラリである ROBAST(ROOT-based simulator for ray



図 2.6: シャッター取り付け後の CRAFT の外観



図 2.7: 自律観測試験時の様子

tracing) を用いて開発された。ROBAST は任意の空間図形を定義し、それらを光学系に見立てて、光子が衝突した際の反射や屈折、吸収を計算するライブラリである。

シミュレータには集光機であるフレネルレンズや紫外光透過フィルタなど、プロトタイプ CRAFT の構成が再現されている。特に、レイトレースで重要となるフレネルレンズは、定義した空間図形を足し引きできる機能を利用して、複数の円錐から円柱を切り出すことでレンズの溝を再現した。ピッチごとの溝の角度は、フレネルレンズを製造している日本特殊光学樹脂からデータを提供してもらい、実際の

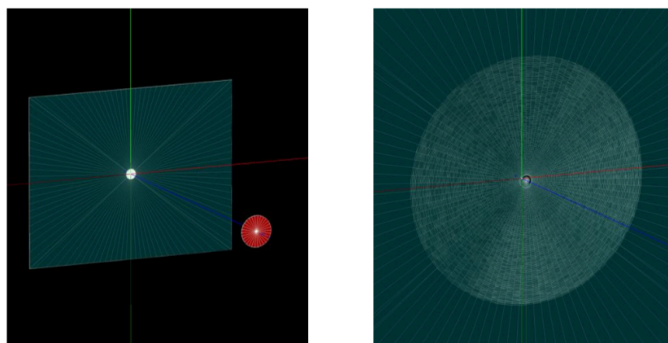


図 2.8: ROBAST 内に再現したフレネルレンズの 3D モデル. 描画処理の関係で, 溝の数は中心から 100 個までとしている. [5]

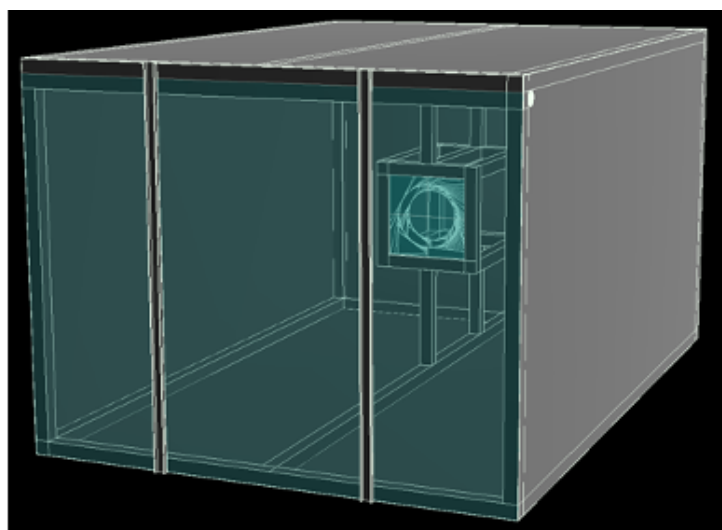


図 2.9: ROBAST 内に再現した望遠鏡全体の 3D モデル [5]

レンズに合わせて作成した. 最終的に, ピッチに平板を組み合わせることで, 実際のフレネルレンズと同じ厚みになるように実装されている. 再現したフレネルレンズの 3D モデルを図 2.8 に, 望遠鏡全体の 3D モデルを図 2.9 に示す.

第3章

レイトレースシミュレータの評価と視野角の見積もり

2017年の宇宙線観測試験によってフレネルレンズを用いた大気蛍光望遠鏡による宇宙線の検出が確認された。しかし、現状のPMT1本による検出部構成では解析性能に限界があり、宇宙線観測用の望遠鏡として運用することは難しい。そのため、検出部に搭載する検出素子数や配置を見直し、宇宙線の到来方向や質量組成などの情報を解析できる構成に作り直す必要がある。一方で、光検出素子数の増加は望遠鏡製造コストの高騰に直結する。よって、より安価に実現できる検出部構成が好ましい。これらを満たす構成を見つけ、検出部の設計を行うためには、レイトレースシミュレータを用いて光子の収集効率などを検証する必要がある。2.6章で説明した通り、既にCRAFFTのフレネルレンズを再現したレイトレースシミュレータが開発されている。一方で、定量的な評価は行われておらず、より正確なシミュレータの評価が必要である。本章では、レイトレースシミュレータの評価と検出部面積に対する視野角について述べる。

3.1 集光像の撮影

シミュレーションと比較を行うため、実際のフレネルレンズを用いて焦点面での集光像を撮影する実験を行った。実験は、LEDライトを光源としてフレネルレンズに光を入射し、焦点面での像を撮影する。LEDはフレネルレンズから49m離れた地点に設置し、赤、青、緑の三色の可視光で測定した。撮影は、フレネルレンズから1.2m離れた地点に、EPSON製のスキャナーGT-S650を設置し、スキャンによる撮影と、スマートフォンのカメラを用いた撮影の2種類で行った。使用した

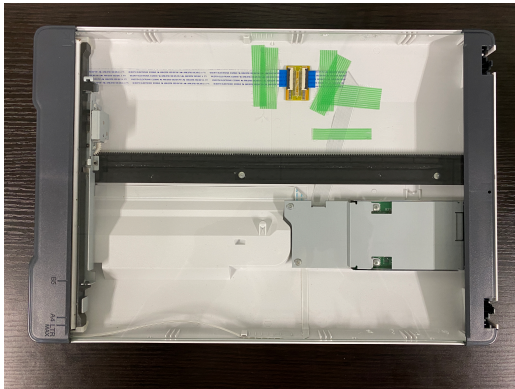


図 3.1: スキャナーの外観図

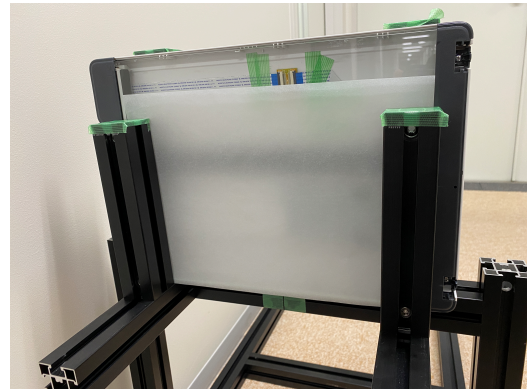


図 3.2: 実験時のスキャナーとトレーシングペーパーの外観

スキャナーの外観を図 3.1 に示す。

通常のスキャナーは、スキャンの際にスキャナー内部から LED 光を照射し、紙に反射した光をセンサーで取り込み画像化する。今回の実験では、スキャナーの LED がノイズになってしまうため、ケーブルを切断し、LED が点灯しないように改造している。また、集光した光がスキャナーのセンサーに直接入射すると、光量が大きすぎて正しい像が取得できなかった。そのため、スキャナーの前面にトレーシングペーパーを設置し、トレーシングペーパーに投影された像を撮影した。実験時のスキャナーとトレーシングペーパーの外観を図 3.2 に示す。通常、スキャンを行う際はガンマ補正を行い、記録した明度から人間の知覚しやすい値に変換されて保存される。しかし、今回は集光像の光の強度をリニアに記録するため、ガンマ補正を 1 とし、光量をそのまま記録した。

カメラでの撮影時は、同じトレーシングペーパーでスクリーンを作成し、それに投影された像を撮影した。トレーシングペーパーには 5mm 四方で線を描画してある。各色 LED を光源に設置した際にスキャナーで撮影したスキャン画像と、カメラで撮影した画像をそれぞれ図 3.3~3.8 にそれぞれ示す。どちらも十字状に集光している様子が確認できる。また、十字の上の部分に別の集光が見られる。これは光源からの光が床に反射した反射光が集光したものである。

撮影は各 LED の色に対してスキャン、カメラでの撮影、ともに 5 回ずつ行った。

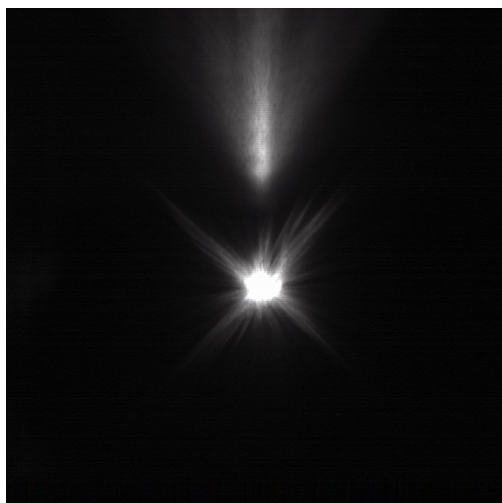


図 3.3: スキャナーで撮影した青色 LED のときの集光像

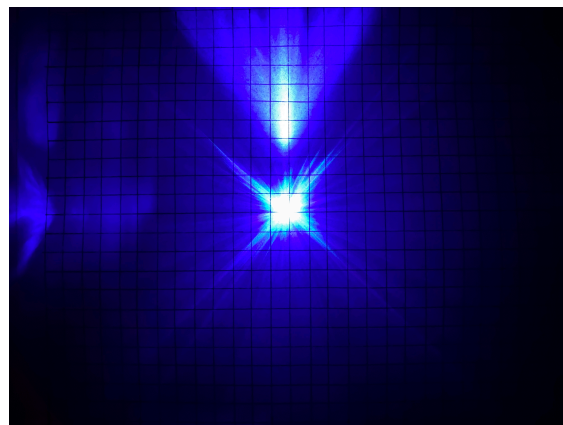


図 3.4: カメラで撮影した青色 LED のときの集光像

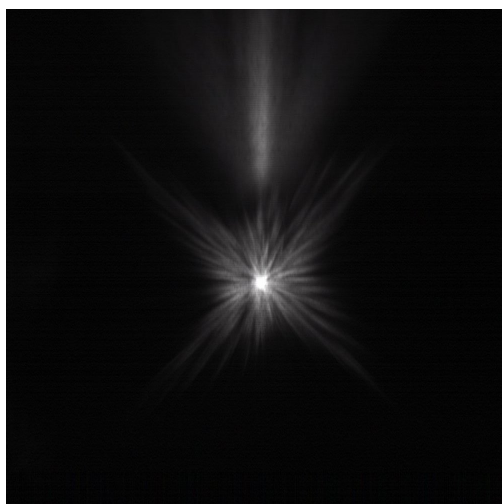


図 3.5: スキャナーで撮影した緑色 LED のときの集光像

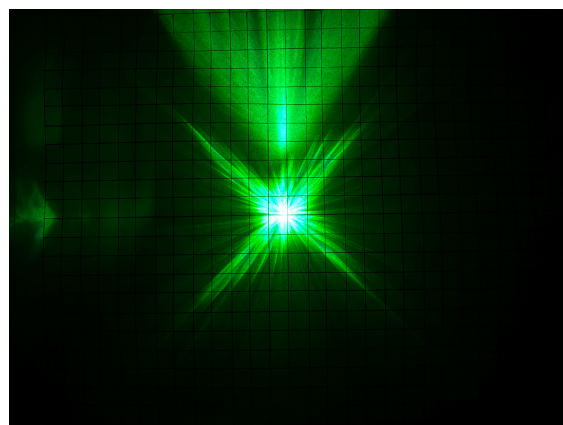


図 3.6: カメラで撮影した緑色 LED のときの集光像

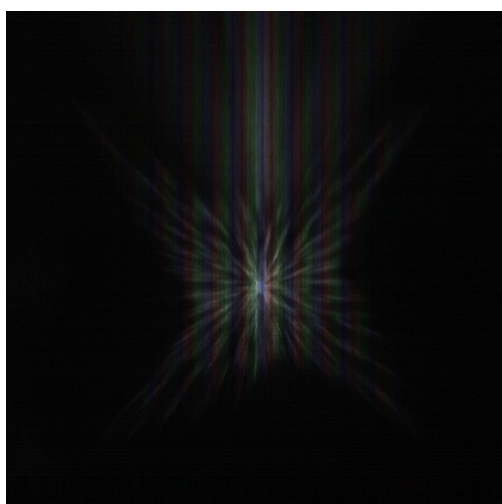


図 3.7: スキャナーで撮影した赤色 LED のときの集光像

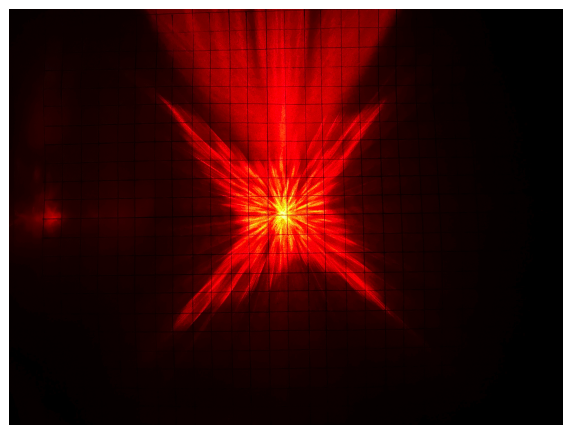


図 3.8: カメラで撮影した赤色 LED のときの集光像

3.2 撮影した集光像とシミュレーションの比較

3.2.1 実験を再現したシミュレーション

撮影した画像と比較するため、レイトレースシミュレータを用いて実験を再現したシミュレーションを行った。シミュレータ内には任意の場所に光源を設置し、光源からフレネルレンズを通過し焦点面に設置したスクリーンまでのレイトレーシングを行うことができる。実験時と同様にレンズから 49m 先の地点に光源を設置し、波長を 450nm, 500nm, 650nm の 3 種類に設定した。また、49m 先の LED からの拡散光は、レンズに入射する時点で完全な平行光になっていない。そこで、点光源から円錐状に光線を射出し、49m 地点からの拡散光を再現した。シミュレーションでは焦点面に到達した光子の座標を記録している。

3.2.2 大きさの比較

得られたデータからシミュレーションとの比較を行う。まず、集光した像の大きさの比較を行った。

実験で得られたスキャン画像をテキストデータに変換し、各ピクセルの RGB 値を取り出した。図 3.9~3.14 に光源の波長を 450nm, 500nm, 650nm に設定したときのシミュレーション結果と測定データをカラーマップで示す。シミュレーションは、焦点面において光子が衝突した座標から各 bin 内に積算した数をヒストグラムで示している。測定データは、各ピクセルの RGB 値から光源と同じ色の値を取り出し、プロットしている。また、縦軸、横軸は、スキャン時の解像度とピクセルの数から mm 単位に変換している。カラーマップから撮影画像、シミュレーション共に、十字状に集光している様子が確認できる。このデータから集光した十字の像の大きさを見積もった。また、カメラで撮影した画像からも同様に 5mm 四方の目盛りから大きさを見積もった。スキャンデータ、カメラでの撮影画像、シミュレーション結果から見積もった集光像の大きさを表 3.1 に示す。

表から、波長が大きくなるにつれて像が大きくなっていることがわかる。これは、色収差の影響で、波長ごとに焦点距離が異なり、焦点面での像が変化するためである。また、赤色 LED のときのスキャンデータとシミュレーションデータに差が見られる。これは、像が大きくなり光が伸びてしまったため、十字の端の部分の光量が落ちて、スキャナーのセンサーで感知できなかったためと考えられる。一方で、カメラ画像はシミュレーションと近く、他の色での大きさもほぼ一致していること

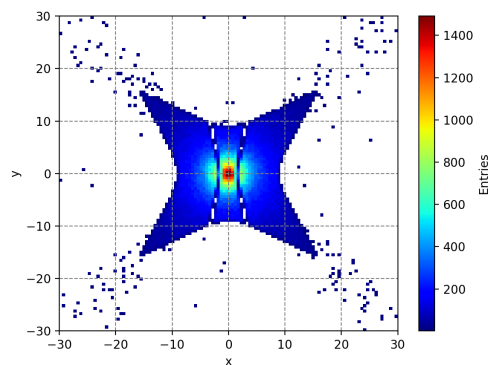


図 3.9: 光源波長 450nm のときのシミュレーション結果

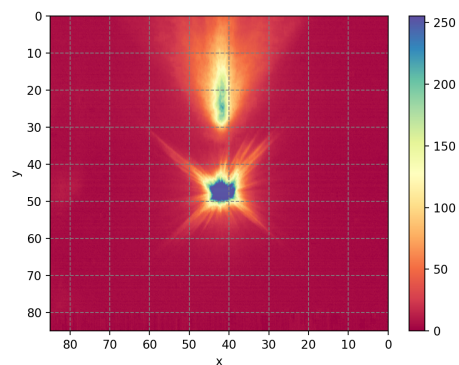


図 3.10: 光源青色のときの各ピクセルの B 値

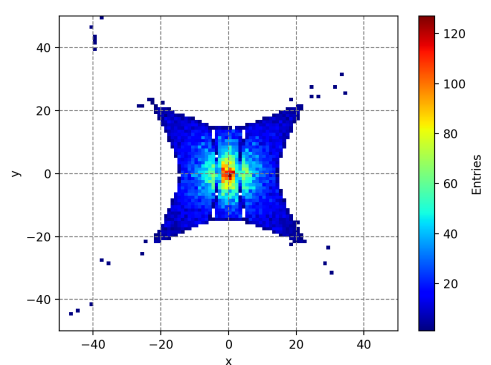


図 3.11: 光源波長 500nm のときのシミュレーション結果

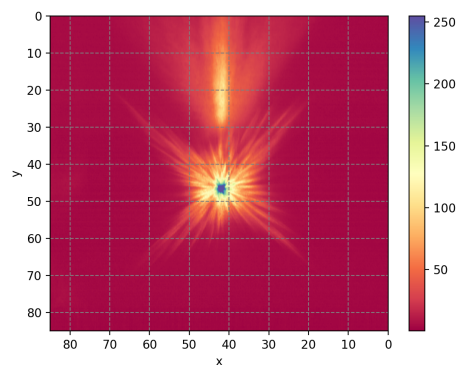


図 3.12: 光源緑色のときの各ピクセルの G 値

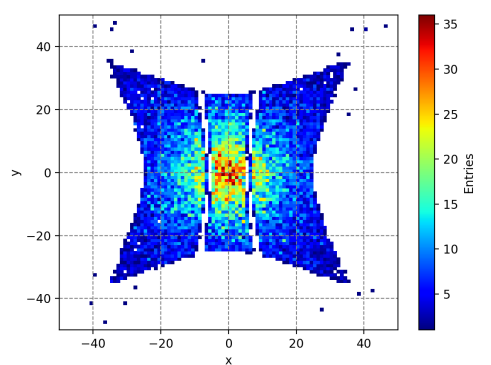


図 3.13: 光源波長 650nm のときのシミュレーション結果

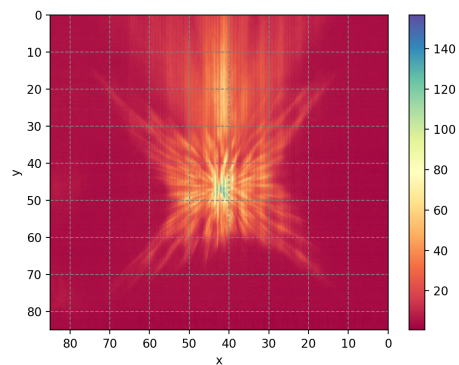


図 3.14: 光源赤色のときの各ピクセルの R 値

表 3.1: 実験データとシミュレーションの集光像の大きさの比較

	スキャンデータ	カメラでの撮影画像	シミュレーション
青色 LED	31mm	35mm	32mm (波長: 450nm)
緑色 LED	42mm	50mm	44mm (波長: 500nm)
赤色 LED	54mm	75mm	70mm (波長: 650nm)

から、シミュレーションで集光像の大きさをよく再現できていることを確認した。

3.2.3 光量分布の比較

続いて光量分布の比較を行う。スキャナーで測定したデータのうち、集光の中心部分を縦 10 ピクセル × 横 10 ピクセルずつ、x 軸方向に RGB 値を取り出す。この 10×10 ピクセル分の RGB 値の平均値を算出し、測定データとする。シミュレーションは光子の焦点面での位置を記録しているため、スキャナーのデータと同様に 10 ピクセル × 10 ピクセル分の範囲に集光した光子数を算出する。これらを用いて x 軸方向の光量分布を比較した。

図 3.15~3.20 に光源に各色 LED を用いたときの、測定したデータとシミュレーションの x 軸方向の光量分布を示す。データは 5 回分の平均値であり、エラーバーは標準誤差である。また、二つのデータを比較するために、正規化してプロットしている。グラフから光源 LED が青色のときの測定データは、中心部分の光量が強すぎるため飽和してしまい、正しくデータが取れていない。したがって、ここでは緑色と赤色のデータを用いて比較する。シミュレーションと測定データを比較すると、シミュレーションではレンズを抑えるフレームの影により、光がほとんど入射していない bin が確認できる。一方測定データでは、像が滲み影がはっきりと見えない様子が図 3.12, 3.15 から確認できる。そこで、シミュレーションデータにガウス関数を畳み込むことで、像の滲みを再現した。図 3.21, 3.22 にシミュレーションの元データ、シミュレーションにガウス関数を畳み込んだデータ、測定データをまとめてプロットしたグラフを示す。プロットから、緑色 LED のときはシミュレーションと測定値が似た分布となっているが、赤色 LED の分布はやや差が見られる。これは、床による反射や、像の端部分の微弱な光をセンサーで認知できなかったためと考えられる。一方で、フレームの影となっている部分は共通して光量が低くなっていることがわかる。このことから、光量の分布においてもシミュレーションでフレネルレンズの集光が再現されていることを確認した。

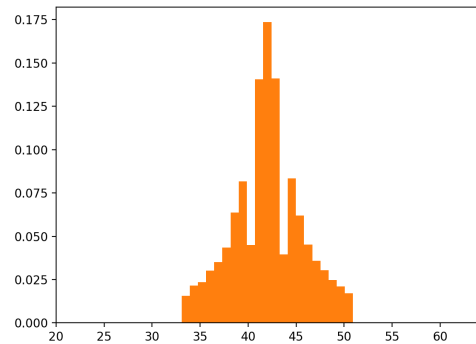
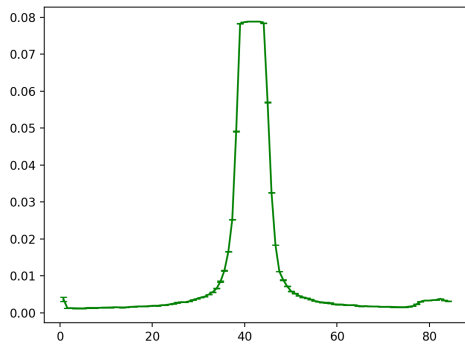


図 3.15: 測定データにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 光源 LED 像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 波長は青色.

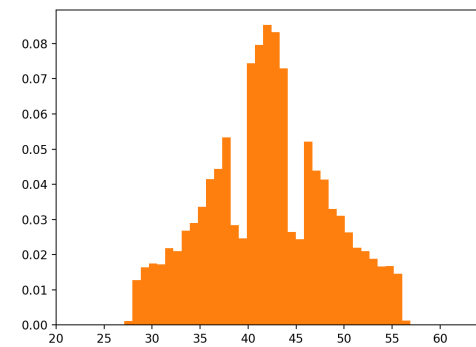
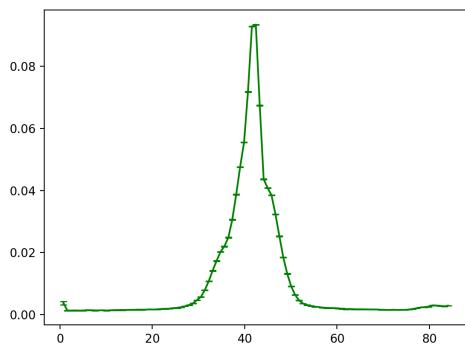


図 3.17: 測定データにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 光源 LED 像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 波長は緑色.

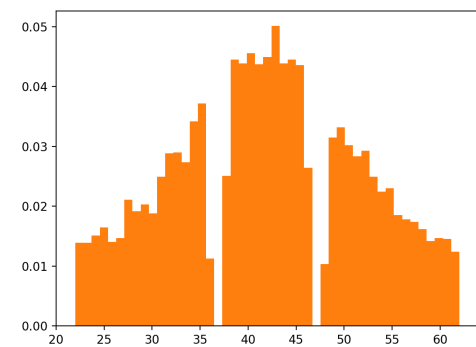
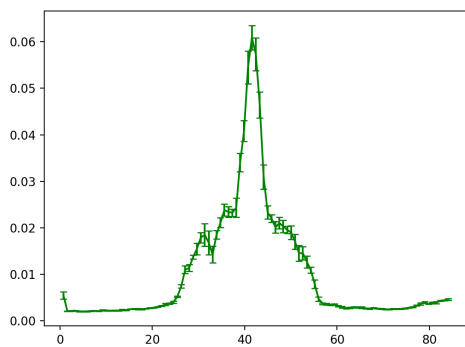


図 3.19: 測定データにおける集光像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 光源 LED 像中心部部分の x 軸方向の光量分布. 波長は赤色.

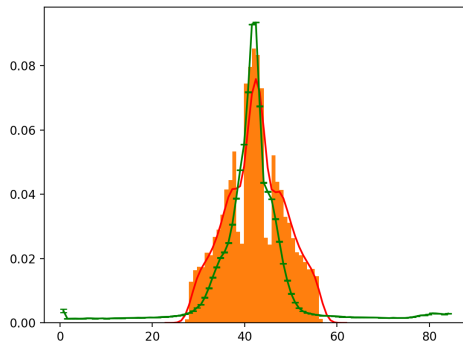


図 3.21: 光源が緑色のときのシミュレーションと測定データの比較. オレンジがシミュレーションの元データ, 赤が畳み込み後のデータ, 緑が測定データを示す.

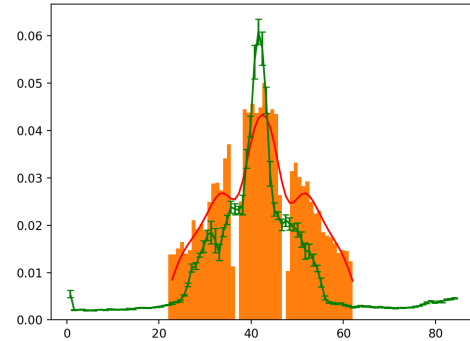


図 3.22: 光源が赤色のときのシミュレーションと測定データの比較.

表 3.2: 入射光子 60% が含まれる中心からの距離

入射角度	0°	4°	8°
中心からの距離	31.7mm	121.5mm	238.7mm

3.3 検出部面積に対する視野角の見積もり

焦点面での集光位置は, フレネルレンズに対する入射角によって中心から移動する. 移動距離は, 入射角が大きくなるにつれて増える. また, 収差の影響で集光する像がのび, スポットサイズも大きくなる. したがって, 検出部の受光面積によって, 入射角度が変化したときの検出量が変わる. そこで, レイトレースシミュレータを用いて, 入射角を変化させたときの焦点面での集光状況をシミュレートした. 図 3.23, 図 3.24, 図 3.25 にそれぞれ, 入射角度を 0°, 4°, 8° としたときの焦点面でのヒットマップを示す. ヒットマップからわかるように, 入射角が大きくなると, 集光点がズレて, 像も伸びる様子が確認できる.

このヒットマップから検出部面積に対する視野角を考える. シミュレーション結果から, 各入射角に対する, 光子が 60% が含まれる中心からの距離を表 3.2 に示す. 表から, 検出面積を 50cm×50cm 程度確保すれば, 入射角 8° までの光が 60% 以上受光できる. また, CRAFFT 望遠鏡の大きさは 1.05m×1.4m であり, 50cm×50cm の検出部面積は十分に確保できると考えられる.

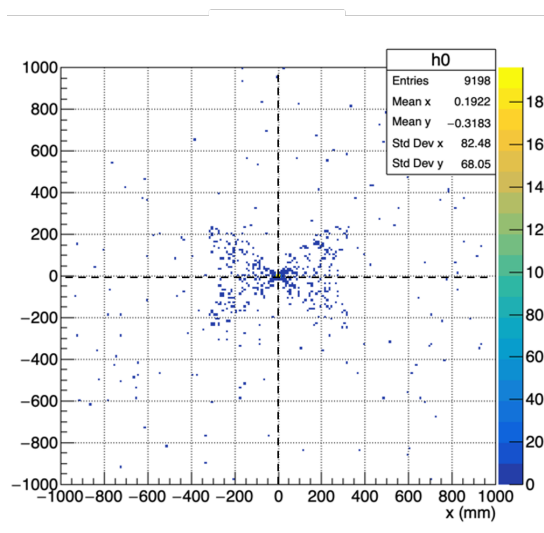


図 3.23: 入射角 4° での出力波形

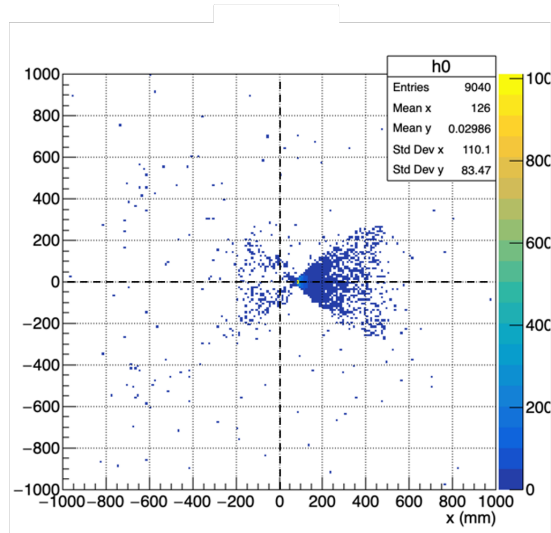


図 3.24: 入射角 6° での出力波形

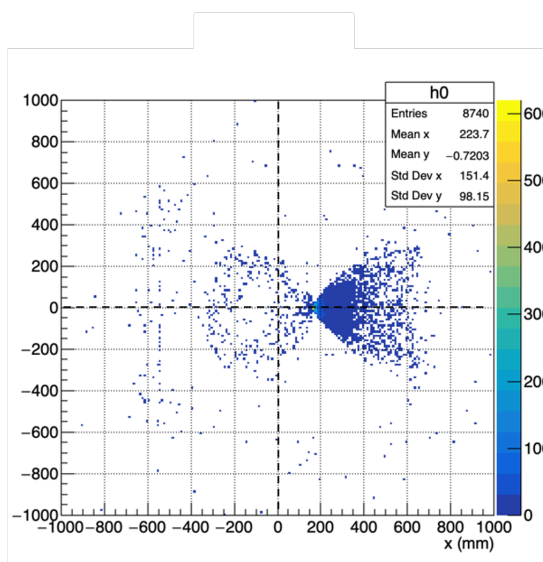


図 3.25: 入射角 8° での出力波形

第4章

紫外光 LED の光量測定試験

第3章では、可視光を用いて、シミュレーションによる焦点面での集光像と実際の集光像を比較した。比較の結果、シミュレーションがレンズの集光を再現できていることを確認した。一方で、CRAFFT 望遠鏡が測定する大気蛍光は紫外光であるため、可視光とは波長が異なる。また、入射角によって焦点面で収差が発生し、焦点面での像が伸びることが考えられる。そのため、入射角を変更しながら焦点面での光量を測定し、シミュレーションと比較することでシミュレータでのスポットの遷移や収差が再現できているか評価を行う。本章では、入射角を変化させた際の焦点面での光量測定試験について説明する。

4.1 試験用の PMT マウントの製作

2.1 章のプロトタイプ機は PMT1 本で構成されているが、入射角度をつけると集光する位置が移り、1 本の PMT では光を取得できない。実験を行うためには、受光面積を広げ、入射角ごとの集光位置の変化を確認できるように PMT の本数を増やす必要がある。そこで、望遠鏡の内部に PMT を格納するためのボックスと固定するためのマウント、アームを製作した。マウントは、PMT を保護するためのスポンジを緩衝材として取り付けた円形の固定具で固定する設計で製作した。また、設置角や設置位置を変更することを想定し、ボルトを緩めることで位置や角度を変更し、締めることで固定できる機構を取り付けた。図 4.1, 4.2 に製作した固定マウントとボックスを示す。

アームはボックスから伸ばし、固定させている。アームもマウント同様、ボックスのフレーム上を移動させることで位置を調節可能である。

実験で使用する PMT は直径が 13cm の円形のものである。3.3 章での見積もり



図 4.1: PMT 固定用のアーム

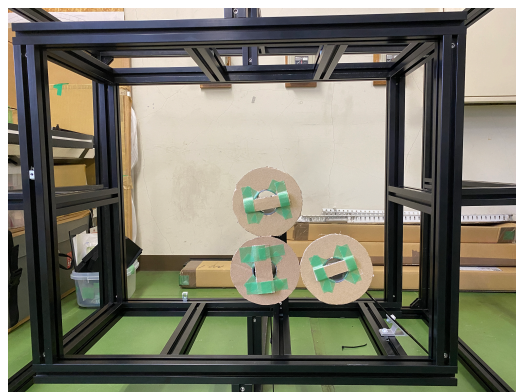


図 4.2: PMT 固定用のボックス



図 4.3: 作成した 4 本分の固定マウント。マウントしているのはプラスチックのダミー。

から、入射角 8° までの光を受光するには、中心から 25cm 程度の受光面が必要である。実験では水平方向に光源を移動することを想定し、PMT を 4 本を使用して $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ の受光面を作成した。レンズの集光は左右対称と考えられるので、PMT は図 4.3 に示すようなレンズ側からみて右下 4 本分に設置した。

4.2 紫外光 LED を用いた光量測定試験

2021 年の 9 月に 3 日間かけて光量測定試験を行った。1 日目は試験準備、2 日目は悪天候のため途中で中断、3 日目に光量の測定を行った。試験は夜光ノイズによる影響をなるべく減らせるように、標高が高く街明かりの少ない小川村のグラウンドで行った。

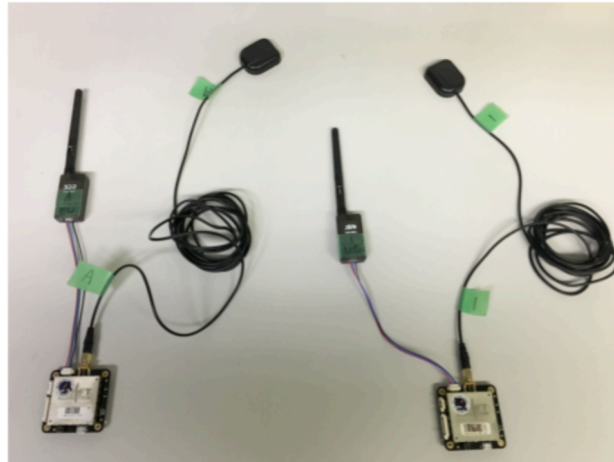


図 4.4: RTK 測位モジュール piksi

4.2.1 測位用 GPS モジュール

試験では光源 LED を移動させることで、CRAFFT 望遠鏡のレンズへの入射角が変化し、受光部での集光位置も変化する。シミュレータで実験を再現するためには、実験時の光源と望遠鏡の相対位置関係を記録する必要がある。位置測定には Swift Navigation 社製の Piksi を使用した。Piksi は Real Time Kinematic (RTK) 測位を利用するモジュールで、複数台の GPS が相互に衛星からの電波を受信することで高精度に位置を把握することができる。今回は二組のモジュールを使用し、基準局（望遠鏡側）と移動局（LED 側）の相対位置を測定した。使用した piksi の外観を図 4.4 に示す。

4.2.2 Real Sence Depth カメラ

光源の位置と同様に、望遠鏡内の PMT の位置も再現シミュレーションを行うために必要なパラメータである。そこで、PMT が期待通り設置できているかの確認と、実験時の PMT の位置や角度を把握するため、Intel 製の Real Sence LIDAR camera を使用した。Real Sence LIDAR camera は、カメラから赤外線レーザーを射出し、物体に反射したレーザーを受光部で受け取ることで、カメラに対する対象物の位置と奥行き方向の距離を測定することができる。また、赤外線を用いた測距方式のため、PMT を設置した暗闇の中でも測定を行える。Real Sence LIDAR camera カメラの外観を図 4.5 に示す。測距の際は CRAFFT 望遠鏡のレンズ内側



図 4.5: Real Sence LIDAR camera

にカメラを設置し，PMT の位置を測定した．カメラが影を作ってしまうため，位置測定後に取り外している．取り付けた外観を図 4.6 に示す．今回は LIDAR カメラを PMT の位置と角度測定のために使用したが，将来的には測定したデータを用いて，観測データの校正に用いられることが期待される．

4.2.3 試験方法

試験では望遠鏡を地面と平行に設置し，望遠鏡から 50m 離れた地点に LED を設置する．望遠鏡の向きは，可視光の LED を望遠鏡正面に起き，レンズを透過した光が垂直に集光しているか目視で確認しながら調節した．

今回の実験では，入射角による PMT の出力の変化を確認するために， $0^{\circ} \sim 8^{\circ}$ まで 2° ずつ測定を行う．あらかじめ 50m 先での各角度の変位を計算しておき，巻き尺で測りながら LED の設置位置を移動させた．その際の望遠鏡との相対位置は piksi で記録している．

光源には Roithner Laser Technik 社 H2A1-H375 を使用し，波長は 375nm，発

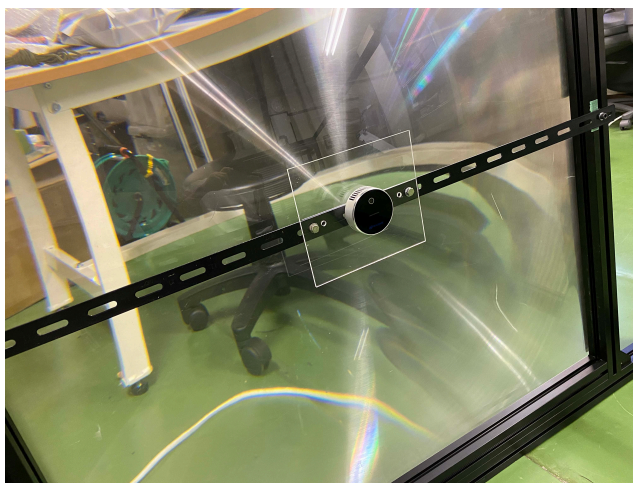


図 4.6: レンズ前面に設置した LIDAR カメラ

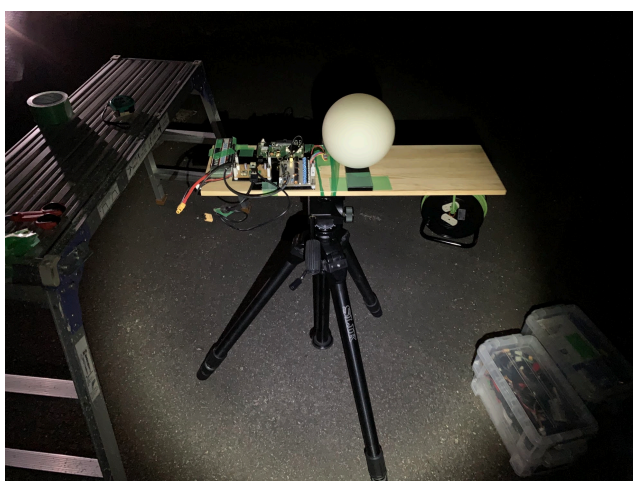


図 4.7: 実験で使用した光源。LED の上にディフューザーを取り付けている。

行タイミングは GPS による PPS と同期しており、 $10\mu\text{sec}$ のパルス幅で発光する。また、光源からの光を一様にするためディフューザーを被せている。光源の高さは、フレネルレンズの高さを測り、同じ高さで設置した。使用した光源の外観を図 4.7 に示す。

光源の設置位置を確定したのち、PMT を望遠鏡に装着した。PMT は検出面がレンズと平行になるように調整して合計 4 本設置し、LIDAR カメラで PMT の位置を測定した。測定後カメラを取り外し、各入射角の光に対する出力を 4 本の PMT でそれぞれ記録した。信号はオシロスコープで記録した。信号取得時のトリガーは LED の発行タイミングと同様、GPS による PPS を用いている。

4.3 試験結果

各入射角での PMT4 本分の出力波形を図 4.8~4.11 に示す。どの波形も同期した幅 $10\mu\text{m}$ のパルスが確認できる。また、各波形を積分し、4 本分の積分値の合計に対する各 PMT での積分値の割合を計算した。入射角ごとの各 PMT の積分値の割合のグラフを図 4.12 に示す。積分値の割合から、入射角によって光の入る PMT が変化し、スポットの中心が 6° 付近で隣の PMT に遷移している様子が確認できる。ここで、入射角 0° で 4 本の割合に差が少ないのは、レンズに垂直入射した光が中央付近で小さいスポットで集光したため、各 PMT にあまり光が入らなかったためだと考えられる。また、中心から 25cm の受光面で入射角 8° までの光を検出できることを確認した。

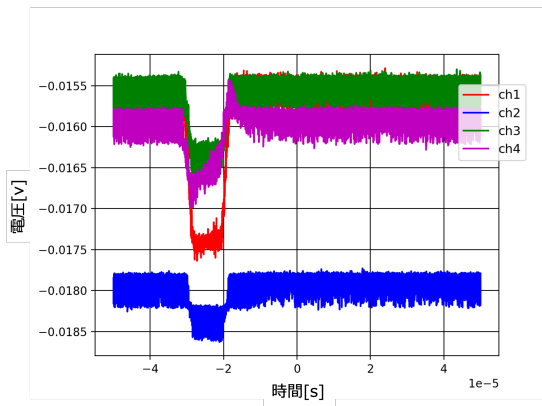


図 4.8: 入射角 0° での出力波形

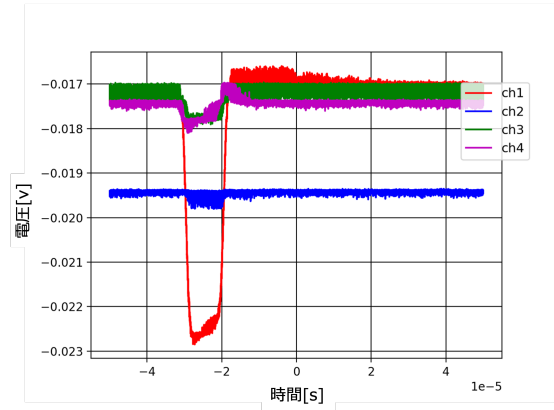


図 4.9: 入射角 2° での出力波形

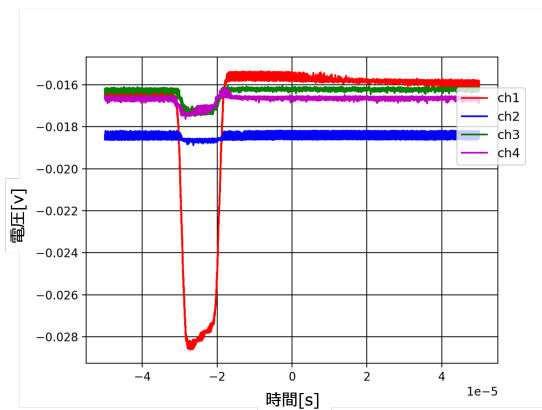


図 4.10: 入射角 4° での出力波形

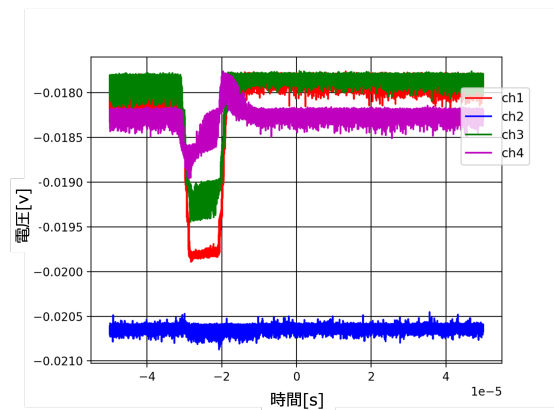


図 4.11: 入射角 6° での出力波形

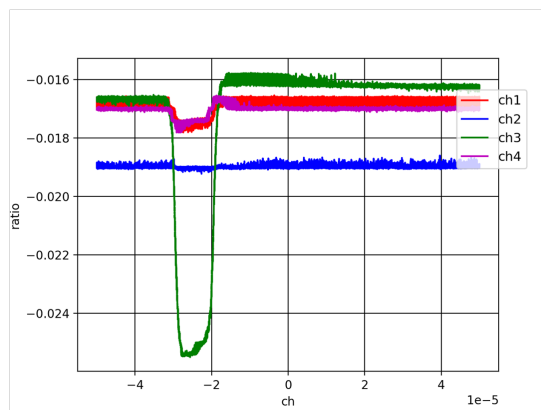


図 4.12: 入射角 8° での出力波形

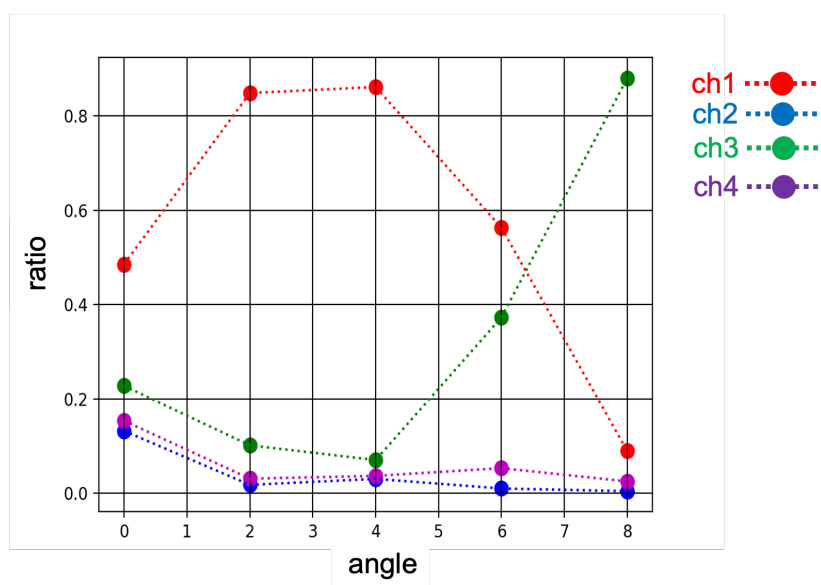


図 4.13: 全 PMT の測定波形の積分値の合計に対する、各角度での積分値の割合

第5章

光量測定試験の再現シミュレーション

4章では製作したマウントで光量測定試験を行なった。試験時に合わせて測定した piksi や LIDAR カメラのデータから光源の位置や PMT の位置，角度を見積もった。さらに，それらをレイトレーサシミュレータ内に再現し，シミュレーションを行なった。

5.1 LED と望遠鏡の位置関係

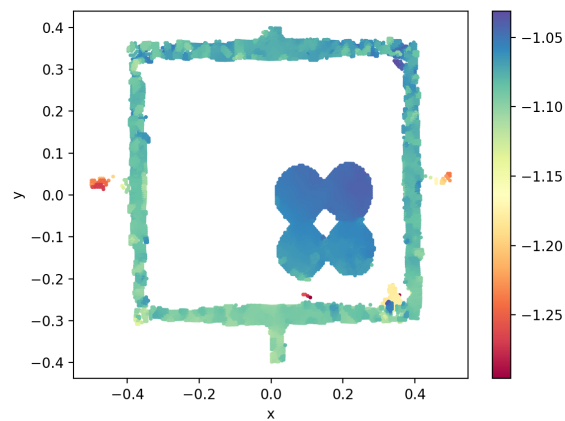
実験時の光源と望遠鏡の位置関係は piksi によって記録している。piksi では基準局（望遠鏡側）に対する移動局（光源側）の相対位置を東西と南北に分けて記録している。フレネルレンズの集光位置は，レンズへの入射角に依存するため，記録している相対位置を入射角に変換する必要がある。実験時，望遠鏡は 0° 地点を向けて設置しているため， 0° 地点と各地点でのデータから相対角度を算出した。piksi で測定した望遠鏡の位置を基準とした光源の位置と算出した相対角を表 5.1 に示す。各相対位置は測定した 3 分間分のデータの平均値で示している。

5.2 PMT の設置位置

4.2 章で説明した通り，実験時の PMT の位置は Real Sence LIDAR camera を用いて測定した。Depth カメラは測定した PMT の位置データを plt というファイル形式で保存している。plt ファイルは 3D データを保存するファイル形式で，撮影した対象物体をカメラの位置を座標 $(0,0,0)$ とした x,y,z 座標で記録している。

表 5.1: piksi の座標データと 0° 地点を基準とした相対角度

想定している角度	南北方向の差	東西方向の差	0° 地点との相対角
0°	-44.83m	-22.57m	none
2°	-42.83m	-23.07m	1.63°
4°	-42.22m	-24.89m	3.78°
6°	-41.04m	-26.15m	5.73°
8°	-39.87m	-27.41m	7.84°

図 5.1: 測定したフレームと PMT の位置. z 軸が奥行き方向の距離を示す.

実験時に測定した PMT と固定用のボックスの座標をプロットしたグラフを図 5.1 に示す.

PMT が取得する光は設置した位置と角度によって変化する. そのため得られたデータから PMT の位置と角度を見積もる必要がある. まず得られたデータから PMT に該当する部分を取り出す. PMT のデータはボックス内の 4 つの円の部分を取り出し, それぞれの PMT に目視で分割した. さらに, 分割したそれぞれ PMT のデータ群を平面フィッティングすることで, PMT の設置角を算出する. 平面フィッティングは Python ライブラリの SVD (特異値分解) によって行なった. 特異値分解は行列分解の一つの手法で, ある行列を二つの直交行列と対角行列に分解する処理である. 今回はある平面に対して測定データ群が平面上にあると仮定して, データ群の行列の特異値を計算する. 得られた特異値が最も 0 に近くなる平面のパラメータを計算することで, フィッティングを行なった. 測定したチャンネル 1 番の PMT のデータとフィッティングした平面を図 5.2, 5.3 に示す.

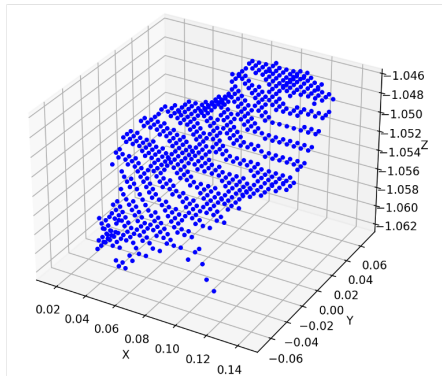


図 5.2: ch1 の PMT のデータ

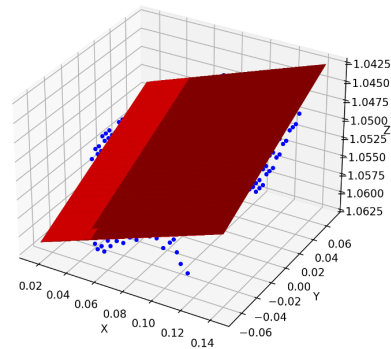


図 5.3: ch1 のデータからフィットした平面

表 5.2: PMT の設置位置と設置角度

PMT の ch	設置位置 (x,y,z)	傾ける角度 θ	傾ける向き ϕ
ch1	(-59.3,1.9,1051.5)	3.38°	36.7°
ch2	(-62.6,-136.7,1061.5)	5.74°	15.29°
ch3	(-195,6.3,1041.5)	1.46°	56.42°
ch4	(-200.6,-131.6,1051.5)	2.80°	24.78°

これらを ch1~4 まで同様に行う．さらにカメラの設置角によるズレを算出するため，測定したデータのうち PMT を固定するボックス部分を抜き出し，同様に平面フィッティングを行う．得られた傾きがカメラの設置角に相当すると考え，PMT の傾きから差し引くことで角度の校正を行なった．校正後の PMT の設置位置，設置角度を表 5.2 に示す．設置位置はレンズの中心を (0,0,0) とした座標， θ は傾けた角度， ϕ は垂直方向を基準とする傾ける向きを示している．

5.3 実験を再現したシミュレーション

レイトレースシミュレータ内に算出した光源の位置，PMT の位置・角度を用いて，構造を再現する．シミュレータでは任意の空間図形を定義し，配置が可能であるため，使用した PMT の受光面と同じ直径の円を定義し，5.3 章で求めた位置に設置した．フレネルレンズは 2.6 章の通り作成済みである．

同様に光源の位置も任意に調節可能であるため，5.2 章で示した測定結果をもとに配置している．光源から射出する光線は，全方向に一様に射出すると余分な光子

が増え、計算量が増えてしまう。そこで、3.2.1章と同様に、光源を頂点とした底面の半径が20mの円錐状に光線を射出している。射出した光子数は 10^6 、光子の方向ベクトルはランダムである。それぞれの入射角での焦点面でのヒットマップを図5.4～図5.8に示す。

得られたヒットマップから、各PMTに入射する光子の数をカウントし、各PMTの取得光量とする。さらに、4章の実験結果と比較するため、PMT4本分の取得光子数に対する各PMTでの取得光子数の割合を計算した。シミュレーションで得られた入射角ごとの各PMTでの取得光子の割合のグラフを図5.9に示す。

図4.10と図5.9を比較すると、入射角 0° の時の割合に大きく差がある。これは実験の際の望遠鏡の向きや光源の位置にズレがあり、集光点が中央からズレてしまい、PMTで取得する光が大きく減ってしまったためと考えられる。一方で、どちらの結果も入射角 2° 、 4° ではチャンネル1番のPMTにほとんどの光が入射している。また、入射角が 6° でチャンネル3番での受光量が増加し、入射角 8° で集光点が完全にch3へ移っている点も一致している。これらから、入射角ごとの集光位置の遷移が、シミュレーションと実験値一致していることを確認した。

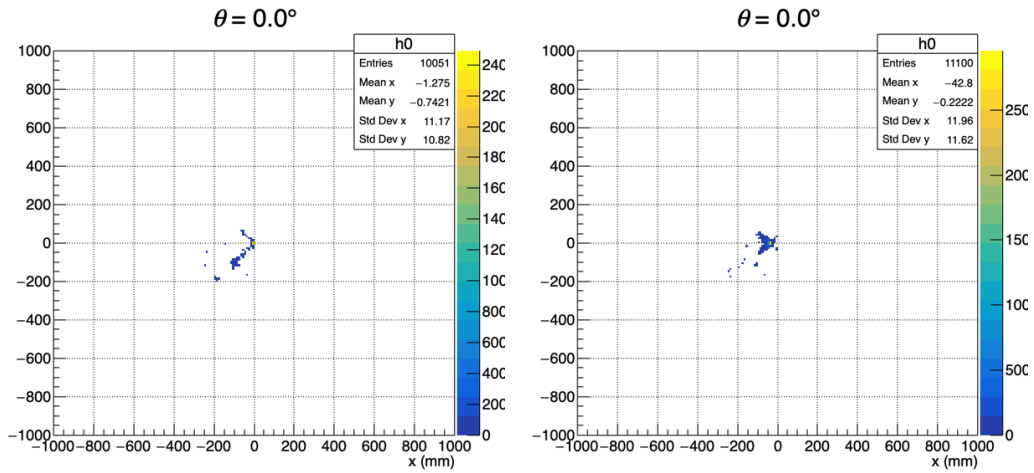


図 5.4: 想定入射角 0° での焦点面でのヒットマップ

図 5.5: 想定入射角 2° での焦点面でのヒットマップ

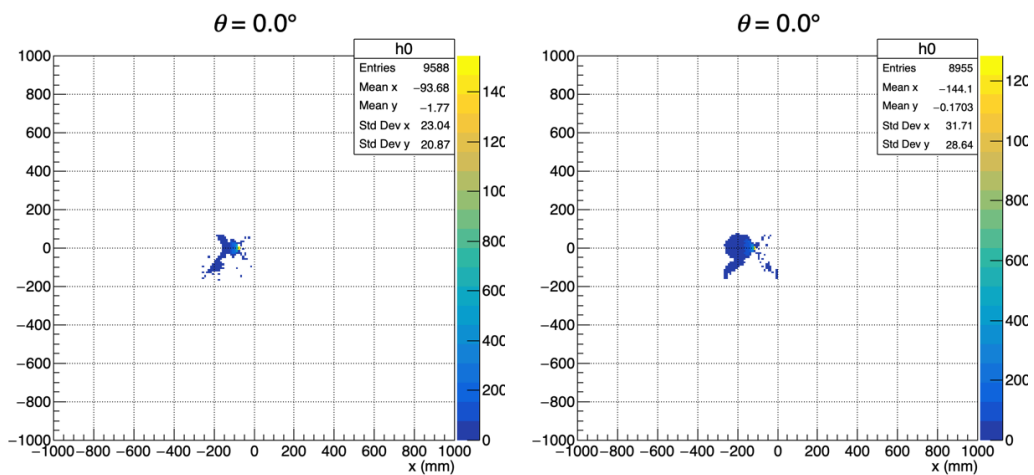


図 5.6: 想定入射角 4° での焦点面でのヒットマップ

図 5.7: 想定入射角 6° での焦点面でのヒットマップ

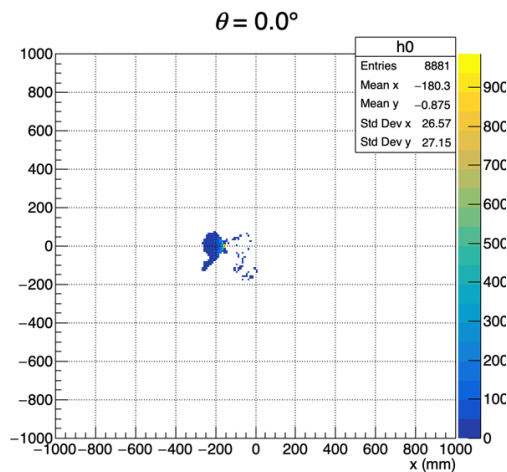


図 5.8: 想定入射角 8° での焦点面でのヒットマップ

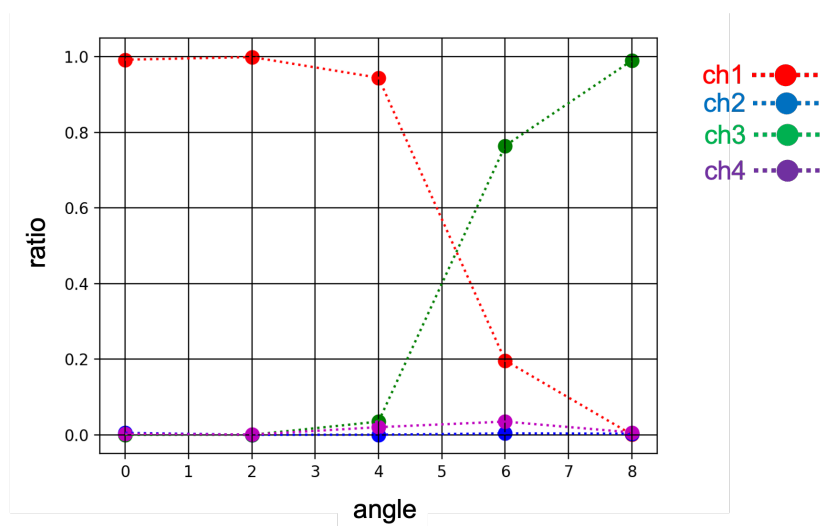


図 5.9: 全 PMT で取得した合計光子数に対する各 PMT での入射角ごとの取得光子の割合

第6章

望遠鏡の精度向上のための検出部構成評価

CRAFT 望遠鏡が次世代の宇宙線観測実験を行うためには、宇宙線の到来方向や到来位置を再構成できる解析性能が必須である。そのため、試作機の検出部構成を変更し、より精度よく宇宙線の幾何情報を再構成できる検出部構成に再設計したい。一方で、検出器コストの観点から、過剰な素子数の増加は好ましくない。そこで、シミュレーションを用いて、検出部を評価し、要求される精度を満たすより安価な検出部構成の仕様を決定する。主に搭載する検出素子数や大きさ、配置を変更し、検出部構成の評価を行った。本章ではシミュレーションによる検出部評価の流れと評価の結果について記述する。

6.1 要求される天頂角の決定精度

検出部構成を検討するために宇宙線の幾何情報の再構成に必要な精度の見積もりを行なった。必要な精度を見積もるにあたり、質量組成の推定に必要な X_{\max} の観測精度について考える。 X_{\max} は宇宙線の二次粒子が最も増加する大気の深さであり、宇宙線の到来方向、特に、天頂角の精度の影響を強く受ける。

そこで、実際に到来した宇宙線の天頂角と望遠鏡が観測したデータから再構成した天頂角の差が及ぼす、 X_{\max} への影響を計算する。到来した宇宙線の天頂角が 40° の時、天頂角を 3° 間違えると、 X_{\max} を約 $40g/cm^2$ 間違えることになる。さらに、 X_{\max} の解析において、到来した宇宙線の粒子種を大別する際に必要な X_{\max} の分解能を考えると、プロトン、ヘリウムと窒素、酸素などを分けるために必要な X_{\max} の分解能は $30\sim 40g/cm^2$ であることがわかっている。よって、観測

データからプロトン，ヘリウムと窒素，酸素を分けるために必要な天頂角の精度は約 3° であることがわかる。

6.2 望遠鏡検出部評価のためのシミュレータ

大気蛍光望遠鏡による宇宙線の再構成精度は，望遠鏡の検出部の構成で変化する。検出素子の数を増やせば精度は良くなるが，同時に望遠鏡の製作コストも増加してしまう。CRAFT望遠鏡は，大規模な展開と完全自動観測を目標としていて，製作コストの増加は理念に反する。そのため，より低コストで製作可能かつ，6.1章の決定精度 3° を満たすような検出部の構成を探索する必要がある。超高エネルギー宇宙線は到来頻度が低いため，実際の宇宙線を用いた検出部構成の評価は現実的ではない。そこで，望遠鏡検出部の設計に向けた，検出部構成を評価するためのシミュレータを開発した。

シミュレータでは，望遠鏡に対して任意の位置，角度，エネルギーの空気シャワーを生成する。空気シャワーの縦方向発達は Gaisser-Hillas 関数を用いて計算している。空気シャワーから飛来する光子は，大気蛍光由来のものとチェレンコフ光由来のものがあるが，今回は大気蛍光のみ考慮している。生成された空気シャワーから望遠鏡に飛来する蛍光の情報を，大気におけるレイリー散乱による減衰を加味して計算する。実際の CRAFT 望遠鏡ではフレネルレンズで蛍光を集光し PMT で記録する。しかし，今回のシミュレーションは，高速化のためフレネルレンズのレイトレーシングを行わず，代わりに PMT 形状に望遠鏡のスポットサイズを畳み込んだ感度マップを使用することで集光を再現する。図 6.1 に円形の PMT 形状にスポットサイズを畳み込んだ感度マップを示す。CRAFT 望遠鏡のスポットサイズは先行研究によって見積もられており，受光した光子の 95% が入る大きさが 44mm となる。今回はこのスポットサイズで感度マップを作成している。

各 PMT に入射した光子は，PMT の感度と量子効率，収集効率を加味し，光電子数に直され時間と共に記録される。図 6.2 は円形の PMT を 9 本用いて作成した検出部の感度マップと，望遠鏡から約 10km の地点に天頂角 15° ，方位角 40° の空気シャワーを生成させたときのトラックを重ねたマップを示す。図 6.3 はそのときの各 PMT の光電子数と時間のグラフを示している。グラフの波形の色は図 6.2 の矢印と重なったそれぞれの PMT の出力波形を示している。グラフから発光点に合わせて光子の入射する PMT が変化し，空気シャワーの通過した 3 つ分の PMT の出力が確認できる。

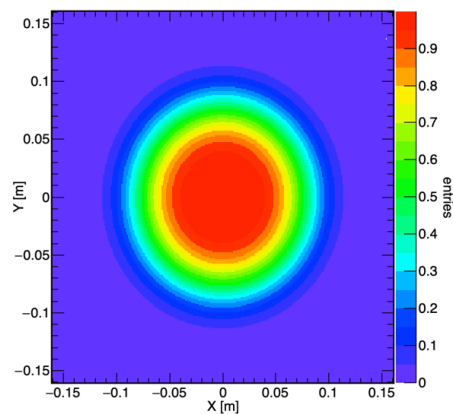


図 6.1: PMT の感度マップ

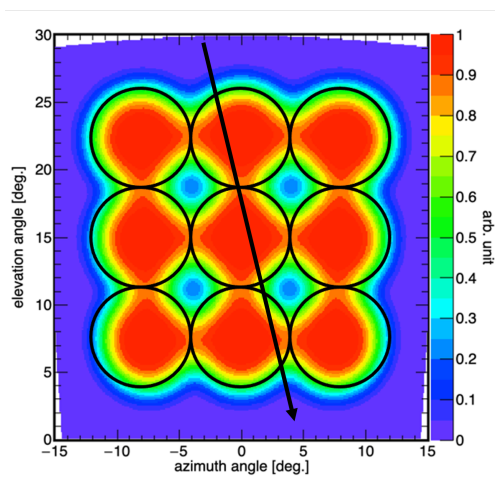
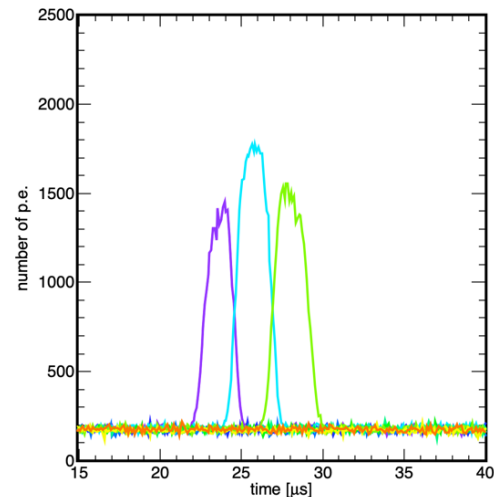


図 6.2: 円形の PMT を 9 本使った検出部と到来させた空気シャワーのトラック

図 6.3: 望遠鏡から約 10km 地点に天頂角 15° 、方位角 40° の空気シャワーを生成された時の光電子数-時間のグラフ

6.3 PMT の形状ごとの比較

現行の大気望遠鏡の PMT 形状は六角形であるが、CRAFTT で使用される PMT は 1 本あたりが大きく形状は円形になる。一方で、PMT の形状を変化させることで望遠鏡の精度が変化する可能性を考えた。特に三角形は、スポットの通過した位置により波形の幅や信号強度が変化しやすく、後述する信号波形の比較による再構成において、到来位置や方向に感度が出やすいと考えた。そこで、シミュ

レータを用いて三角形と円形の2種類のピクセル形状で比較を行った。

6.3.1 評価の方法

評価はシミュレーションによって得られた光電子数と時間の波形を用いた波形フィットで行う。まず任意の空気シャワーを生成し、その空気シャワーから飛来する光子から期待される出力波形を計算する。この波形を擬似データとする。一方で、空気シャワーの到来位置や到来方向を様々に変化させ、それぞれの空気シャワーでの観測波形を同様に計算する。この波形を波形期待値とする。この擬似データと波形期待値を比較する。波形の比較には尤度関数を用いる。用いた式を式6.1に示す。

$$-\ln(L) = -\frac{1}{2} \sum_i \left\{ \frac{(x_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2} + \log 2\pi + \log \sigma_i^2 \right\} \quad (6.1)$$

x_i に擬似データの光電子数、 μ_i に波形期待値の高電子数、 σ_i に擬似データの標準偏差を代入する。式6.1が最も小さくなる波形、すなはちそのときの宇宙線幾何情報を再構成結果として擬似データでの宇宙線情報との差をとることで再構成の精度を見積もり、各検出部の性能を評価できる。

6.3.2 1 イベントでの比較

三角形のPMTを用いた検出部と円形のPMTを用いた検出部を作成し、1イベントでの比較を行った。三角形のPMTを用いた検出部を図6.4に、円形のPMTを用いた検出部を図6.5にそれぞれ示す。検出面は三角形の1辺の視野と円形の直径の視野、および1台あたりの水平方向の視野が同じ程度になるように作成している。

CRAFFT望遠鏡は、2カ所以上に望遠鏡を設置しステレオで観測することを前提としている。そこで、シミュレーションでも2カ所に望遠鏡を設置し、評価した。図6.6、図6.7に図6.4、6.5を検出部構成としたときの、期待値に対して到来方向を格子状に変化させたときの $-\ln(L)$ のマップを示している。横軸が期待値に対する方位角の変位、縦軸が期待値に対する天頂角の変位、黒点が $-\ln(L)$ の最小値を示している。どちらの図からも、期待値に近いほど $-\ln(L)$ の値が小さくなり、期待値付近で最小値になっていることがわかる。

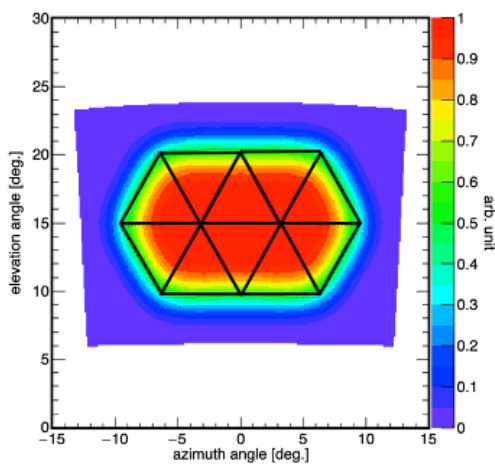


図 6.4: 三角形の PMT を用いた検出部の感度マップ

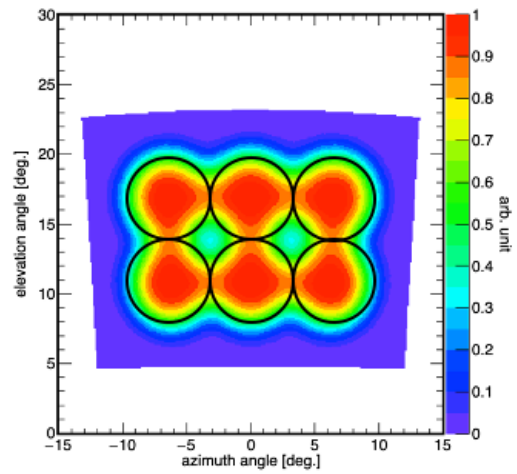


図 6.5: 円形の PMT を用いた検出部の感度マップ

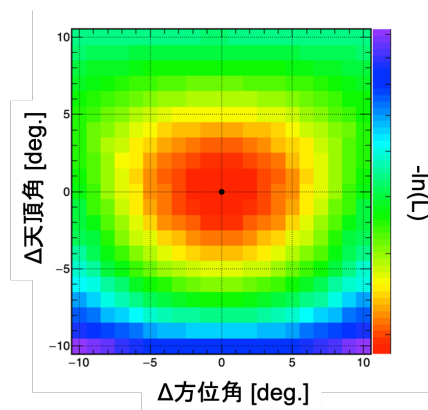


図 6.6: 図 6.4 を検出部構成としたときの、到来位置を変化させた時の $-\ln(L)$ のカラーマップ。z 軸が $-\ln(L)$ の値を示す。

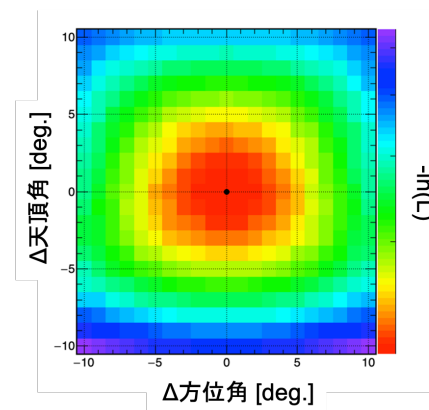


図 6.7: 図 6.5 を検出部構成としたときの、到来位置を変化させた時の $-\ln(L)$ のカラーマップ。

6.3.3 ランダムな 100 イベント分での評価

1 イベントで式 6.1 を用いて、幾何情報の推定が行えることを確認した。そこでより統計を増やして、図 6.4, 図 6.5 の 2 つの検出部構成を比較する。

統計数を増やすため、100 イベント分の空気シャワーを生成した。到来させる空気シャワーイベントは、2 か所に設置した望遠鏡の視野内の三角形内にランダムに

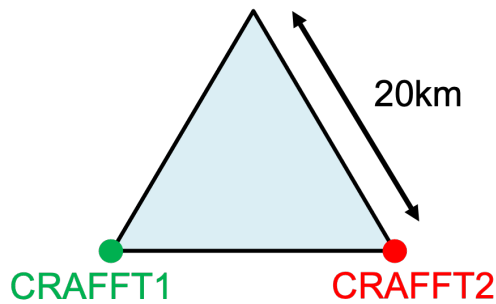


図 6.8: 空気シャワーを到来させた範囲のイメージ図. 2カ所の望遠鏡の視野を重ねた三角形の内側に空気シャワーを生成する.

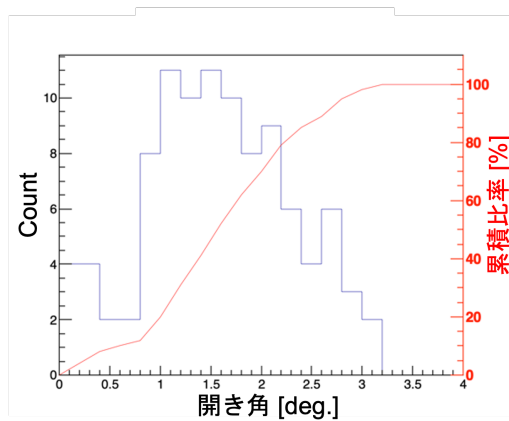


図 6.9: 図 6.3 を検出部構成としたときの, 100 イベント分の期待値との開き角. 赤線は累積比率を示す.

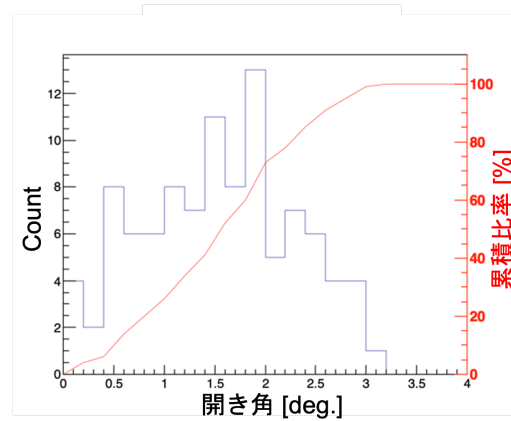


図 6.10: 図 6.4 を検出部構成としたときの, 100 イベント分の期待値との開き角.

到来させた. 空気シャワーを到来させた範囲のイメージを図 6.8 に示す. 三角形の一边は 20km で, 到来位置が三角形内になるようにシミュレーションしている. 1 イベントの時と同様に, 到来させたそれぞれのイベントに対して, 6.1 を最小化し, 期待値との差を求めた. 図 6.9, 図 6.10 に, 図 6.4, 図 6.5 を検出部構成としたときの期待値との開き角をまとめたヒストグラムを示す. ヒストグラムからどちらの検出部構成でも最大の開き角が約 3° 程度であり, 二つの形状での差はあまりない.

6.4 検出素子数による比較

PMT の形状による精度の比較を行ったので、ここでは検出素子の数を変化させて比較を行う。前章ではシミュレーション状に三角形の PMT を再現し比較を行ったが、現実には三角形の PMT は存在しない。そのため、ライトガイドで三角形のピクセルを再現する必要がある。よってここではより製作しやすい円形の PMT に統一して用いて比較を行う。

6.4.1 評価を行う関数の変更

検出部の評価は、6.3.1 章と同様に、各 PMT で取得するの光電子数と時間の波形を比較することで行うが、最小化の際に使用する関数を χ^2 に変更している。用いた式を式 6.2 に示す。

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (6.2)$$

x_i に擬似データの光電子数、 μ_i に波形期待値の高電子数、 σ_i に擬似データの標準偏差を代入する。式 6.2 が最も小さくなる波形、すなはちそのときの宇宙線情報を再構成結果として擬似データでの宇宙線情報との差をとることで各検出部の性能を評価する。図 6.11, 6.12 はそれぞれ、基準となる空気シャワーに対して、到来位置と到来方向を格子状に変化させたときの χ^2 の値をプロットしたものである。プロットの中央が期待値の宇宙線情報、縦軸、横軸はそれぞれ到来位置の変位と天頂角、方位角の変位を示している。また、黒点は式 6.2 が最小になった点を表している。図 6.11, 6.12 から到来方向、到来位置ともに、期待値に近づくとつれて χ^2 が小さくなり、中央付近で最小になっている。ここから、式 6.2 を用いた波形フィッティングによって基準となる空気シャワー情報を再構成できることがわかる。

χ^2 を最小化するとき、格子状に全パラメータを変化させると探索範囲が増えるにつれて計算量が増えてしまう。そこで `minuit` と呼ばれる最小化ツールを使用する。`minuit` は尤度や最小二乗適合のための最小化ライブラリである。今回はその中で `python` インターフェイスである `iminuit` を使用している。

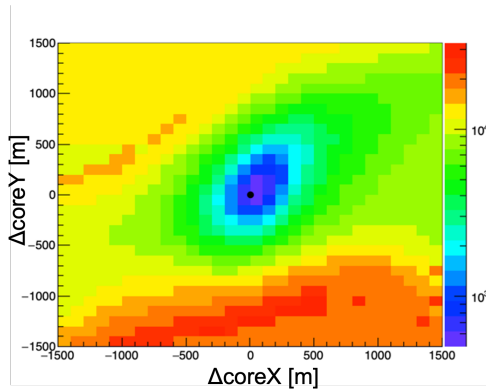


図 6.11: 到来位置を変化させた時の χ^2 のカラーマップ. z 軸が χ^2 の値を示す. 検出部構成は図 6.13 を使用している.

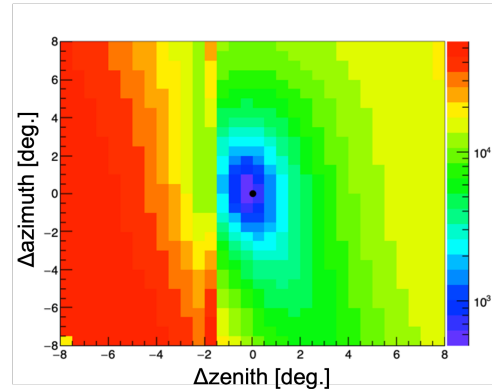


図 6.12: 到来方向を変化させた時の χ^2 のカラーマップ.

表 6.1: 生成した空気シャワーの条件

項目	値
エネルギー	$10^{19.5}$ eV
到来位置	座標 (0,0) 地点を中心に半径 15km の円内
空気シャワー天頂角	$0^\circ \sim 60^\circ$
空気シャワー方位角	$0^\circ \sim 360^\circ$
生成数	5000 イベント
望遠鏡配置	座標 (10000,-5773), (-10000,-5773) 地点

6.4.2 2種類の検出部構成での精度の見積もりと仕様決定

評価の際は、二ヶ所の望遠鏡を内包するように半径 15km の円内にランダムな到来角度、到来位置の空気シャワーを合計 5000 イベント生成した。また、トリガーを実装し、両方の望遠鏡で擬似データ波形の S/N 比が 6 以上になった場合にトリガーをかけ、評価に仕様する空気シャワーを選別した。これにより、視野外の空気シャワーを評価から除外することができる。図 6.13 に設置した望遠鏡と 5000 イベント分の到来位置を示す。図内の赤丸がトリガーのかかった空気シャワーの到来位置、黒丸がトリガーのかからなかった空気シャワーの到来位置をそれぞれ示している。また、生成した空気シャワーの条件を表 6.1 に示す。

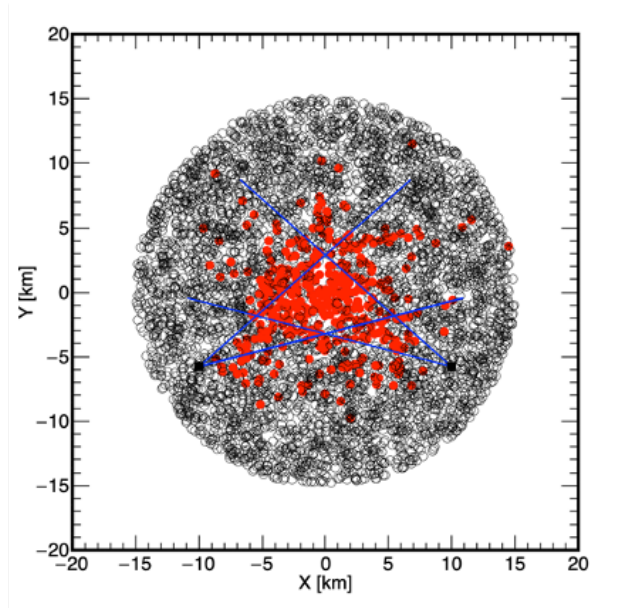


図 6.13: 望遠鏡の設置位置と生成した 5000 イベント分の到来位置. 赤丸がトリガーされたシャワー, 黒丸がトリガーされなかったシャワーを示す. また, 青線はそれぞれの望遠鏡の視野を示す.

トリガーのかかった空気シャワーイベントを評価に使用するイベントとして最小化を行う. まず, 到来位置, 到来方向それぞれに対して粗い格子状にパラメータを変化させ, χ^2 の最小になる点を計算する. 得られた最小点を初期探索点として *iminuit* を用いて再び最小点探索を行う. これにより χ^2 の最小値とそのときの到来位置, 方向が得られ, これらと擬似データの宇宙線情報との差から再構成精度を見積もり, 検出部を評価を行える. 図 6.14, 6.15 は円形の直径 16cm の PMT9 本と直径 13cm の PMT16 本をそれぞれ, $3 \times 3, 4 \times 4$ の正方形状に配置したときの感度マップを示している. 2つの検出部構成は, 3.3 章での見積もりから, 1 辺の長さが 50cm 程度になるように設定している.

図 6.16, 図 6.17 は, 検出部構成を図 6.14 として, 5000 イベント分のランダムな空気シャワーを最小化し, 擬似データとの到来方向, 到来位置との差を開き角, 距離の差としてヒストグラムで示したものである. また, 赤線は累積比率を示している. 図 6.18, 6.19 は, 検出部構成を図 6.15 としたときに同様に開き角, 距離の差をまとめたヒストグラムである. 両構成の精度を累積比率 68% で比較すると, どちらの構成でも, 到来角の精度が約 2° , 到来位置の精度が約 500m であることがわかる. どちらも 6.1 章で見積もった天頂角の決定精度 3° を満たしている. 直径 16cm の PMT は, プロトタイプ機の PMT の直径と合わせて設定している. プロ

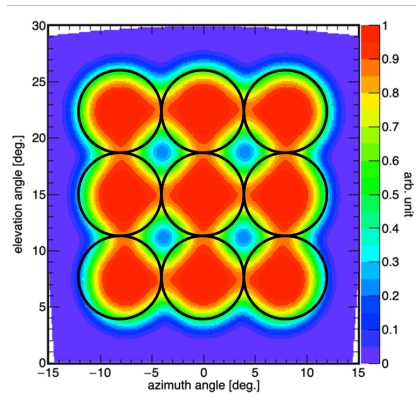


図 6.14: 直径 16cm の PMT9 本を 3×3 の正方形に配置した時の感度マップ

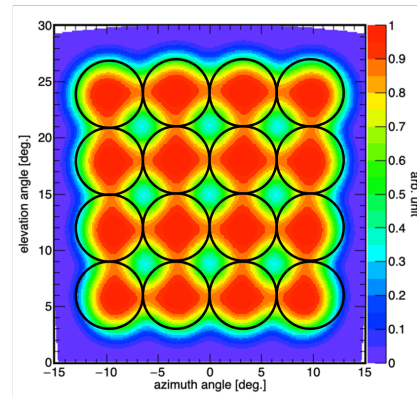


図 6.15: 直径 13cm の PMT16 本を 4×4 の正方形に配置した時の感度マップ

トタイプ機は視野絞りをを用いて直径 20cm の PMT を 16cm に調整している。一方で、直径 13cm の PMT は浜松フォトニクス社で市販されており実現が容易である。そのため、検出部には 13cm の PMT を用いることを決定した。また、図 6.15 で示した構成は PMT を 16 本使用しているが、1 台あたり 16 本の PMT を使用すると検出素子のみで、約 160 万円のコストがかかる。そこで、仰角方向の視野を削り、13cm の PMT12 本を 4×3 の長方形に配置することを決定し、基礎設計を完了した。

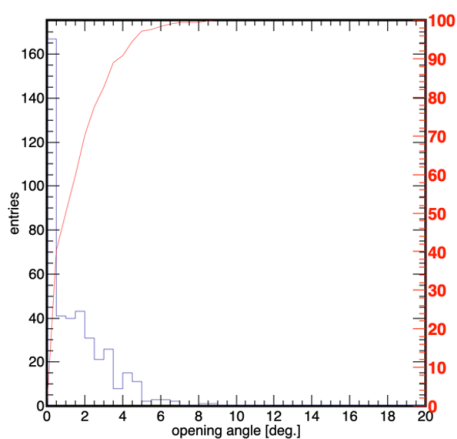


図 6.16: 直径 16cm の PMT9 本を検出部構成としたときの期待値との開き角.

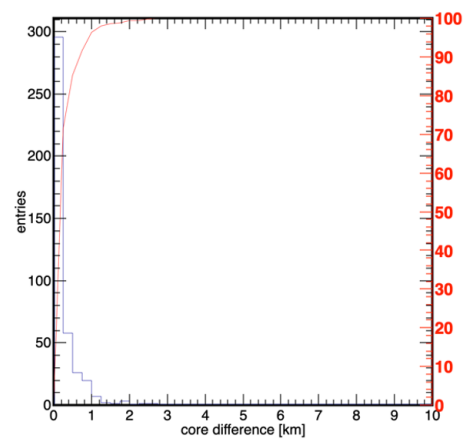


図 6.17: 直径 13cm の PMT16 本を検出部構成としたときの期待値との距離の差.

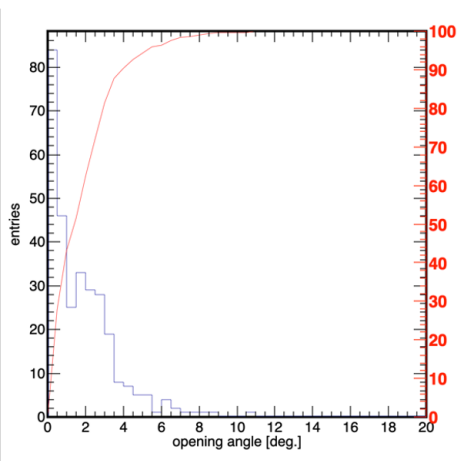


図 6.18: 直径 16cm の PMT9 本を検出部構成としたときの期待値との開き角.

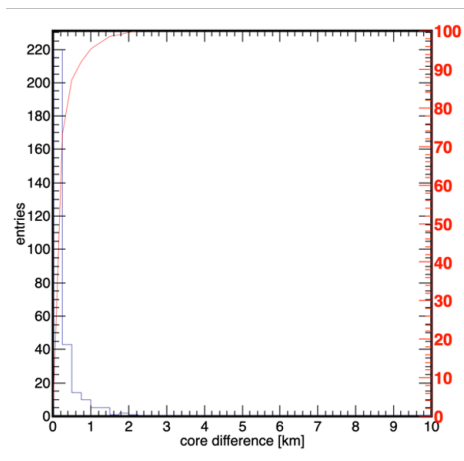


図 6.19: 直径 13cm の PMT16 本を検出部構成としたときの期待値との距離の差.

第7章

結論

7.1 まとめ

我々は、次世代の超高エネルギー宇宙線観測に向けて、大規模展開に適した低コストかつ完全自動で観測を行える大気蛍光望遠鏡として、CRAFTFT 望遠鏡の開発を行っている。開発されたプロトタイプ機では、単眼での検出部構成となっていたが、CRAFTFT 望遠鏡単体での解析には検出素子を増やし、解析精度の向上が必要である。そこで、再設計に使用されるレイトレースシミュレータの性能の評価を行い、受光面積に対する視野を見積もった。また、検出部評価のためのシミュレータを用いて、解析に必要な精度を満たす検出部構成を決定した。さらに、製作費用を考慮し検出部の基礎設計を完了した。

レイトレースシミュレータは、正面から入射した際の集光像と入射角度を変化させた際の光量を取得する2種類の実験を比較することで評価した。比較から、シミュレータ内のフレネルレンズが正しく再現されていることを確認した。また、シミュレーションと実験から、50cm×50cmの受光部で視野8°までの光を検出できることを確認した。

検出部の構成は、シミュレータを用いて、解析に必要な天頂角の決定精度3°を基準として評価を行った。その結果、直径13cmのPMTを12本を4×3の長方形状に配置した構成を検出部の仕様として決定し、基礎設計を完了した。

7.2 今後の展望

シミュレータを用いた評価から、検出部の基礎設計が完了した。今後は、光子の収取効率を考慮しながら、構造的な設計が必要である。特に、PMTを固定するた

めのマウントは砂漠地帯など難しい環境でも取り外しやすく，安全な構造が必要である。また，仰角方向の視野を削ったため，望遠鏡の仰角方向の設置角度の最適化が必要である。

望遠鏡の製作が完了したら，シミュレータで見積もった精度を実現できているか確認するための実証実験が必要である。完全自律観測システムの現地試験と望遠鏡を2カ所に配置したステレオでの観測試験を合わせて実施予定である。

参考文献

- [1] TELESCOPE ARRAY PROJECT,
”<http://www.telescopearray.org/index.php/about/what-are-cosmic-rays>”,
Cosmic Ray Spectra of Various Experiments
- [2] 多米田裕一郎,
”http://www.astro-wakate.org/ss2011/web/ss11_proceedings/proceeding/cosmicray_tameda.pdf” , 超高エネルギー宇宙線観測の現状
- [3] テレスコープアレイ実験 HP,” http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp/ta_public/index.html”
- [4] 中村雄也, 修士論文, 信州大学, 令和 2 年度
- [5] 山本真周, 修士論文, 信州大学, 平成 30 年度

謝辞

本研究を進めるにあたり，日頃から熱心なご指導をいただいた指導教員の富田孝幸助教に深く感謝いたします。大阪電気通信大学の多米田裕一郎講師，神奈川大学の池田大輔助教，中部大学の山崎勝也助教には毎週の CRAFT 実験の会議にて丁寧な指導と数多くの助言をいただきました。信州大学の岩倉広和氏，中村雄也氏には日々の研究に多くの助言とご指導をいただきました。

日々の研究生生活において，多くの議論と助言をいただいた，中澤新氏，中村智行，柴崎悠馬氏には大変お世話になりました。

研究室の稲富大地氏，上濱孝文氏，宇都宮成弥氏，曾根直宙氏，佐野賢吾氏，切中拓也氏，齊藤亮介氏，吉岡翼氏，栗栖真乃祐氏，日比亮佑氏，阿部泰明氏，高桑宏輔氏，西本大輝氏には日頃のゼミや研究生生活において大変お世話になりました。

皆さま，本当にありがとうございました。