

平成 28 年度 修士論文

CTA 大口径望遠鏡初号機の光学性能最適化に
向けた分割鏡測定とその配置の検討

Measurement of Mirror Segments for the First
CTA Large-Sized Telescope and Consideration
of Their Optimum Layout

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
宇宙線研究所チェレンコフ宇宙ガンマ線グループ
稲田 知大

指導教員：吉越貴紀 准教授
提出日 平成 29 年 1 月 5 日

概要

数十 GeV を超えるエネルギーのガンマ線観測する超高エネルギーガンマ線宇宙物理学は近年発展してきた分野である。超高エネルギーガンマ線を観測し、放射機構を理解することで、放射源での物理を解き明かすことができる。解明が期待される物理として主なものは、宇宙線起源の特定、ブラックホール近傍の物理と粒子加速の性質、標準模型を超えた物理の探索などである。

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、次世代国際ガンマ線天文台計画である。現行の望遠鏡の 10 倍の感度と 20 GeV から 100 TeV という 4 桁にわたる観測エネルギー帯を目指している。幅広い観測エネルギー帯域を達成するために、3 種類の口径の望遠鏡を配置するが、日本グループは主に最も口径の大きい大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) の開発に貢献している。LST は CTA の中では低エネルギーを担当しているため、宇宙線によるバックグラウンドの除去が最重要課題である。解像型大気チェレンコフ望遠鏡は空気シャワー由来のチェレンコフ光の撮像イメージにより、バックグラウンド除去を行う。そのため、イメージを形作る光学系の性能が非常に重要である。

本研究では、CTA 計画の LST に用いる分割鏡の光学性能を 2f 法と呼ばれる手法で評価し、最適配置の検討を行った。LST 望遠用の光学性能を実際の分割鏡データを用いて行ったのは本研究が初である。LST 主鏡光学系は 198 枚の分割鏡で構成される放物面であり、個々の分割鏡の性能を知った上で、最適配置を施すことが望遠鏡の光学性能を高める上で重要である。2f 法測定を行う中で、より詳細な分割鏡の形状および光学性能評価を行い、「さらなる」分割鏡の最適配置の実現可能性があることがわかってきた。「さらなる」分割鏡の最適配置が可能になれば、望遠鏡の光学性能をより引き出すことができ、感度向上につながる。そのため、性能評価を行った個々の分割鏡の光学性能をもとに、分割鏡形状モデルを発展させることを提案、光線追跡シミュレーションによる原理実証を経て、新しい形状評価手法の開発を行った。この解析手法の特徴は、既存の測定法である 2f 法測定で得られたデータをそのまま使用し、より詳細な分割鏡の形状評価が可能という点であり、測定の手間は変わらないが、評価項目を増やすことができる。2f 法で評価した 90 枚の分割鏡にこの解析手法を適用し、分割鏡の光学性能の評価項目に新たなパラメータを加えることに成功した。そして、新たな分割鏡形状モデルを取り入れた放物面形状を用いて光線追跡シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、分割鏡の光学パラメータごとに望遠鏡放物面への最適配置を施した場合の望遠鏡スポットサイズへの影響を見積もることができ、曲率半径の最適化が最も望遠鏡スポットサイズに影響を与えることがわかった。

目次

概要	iii
第 1 章 超高エネルギーガンマ線宇宙物理学	1
1.1 ガンマ線観測の歴史	1
1.2 ガンマ線放射機構	2
1.3 VHE ガンマ線の物理	5
1.4 ガンマ線バースト	10
第 2 章 解像型大気チェレンコフ望遠鏡	15
2.1 大気チェレンコフ光の発生原理	15
2.2 IACT によるガンマ線観測原理	17
第 3 章 Cherenkov Telescope Array 計画	21
3.1 CTA で狙う物理	21
3.2 目標性能	22
3.3 CTA サイト	22
3.4 望遠鏡デザインと配置	22
第 4 章 CTA 大口径望遠鏡光学系	27
4.1 LST 光学系仕様	27
4.2 主鏡光学系	28
4.3 分割鏡	30
4.4 能動的ミラー制御システム (Active Mirror Control, AMC)	33
4.5 ライトガイド	34
4.6 カメラ窓	34
第 5 章 LST 用球面分割鏡の性能評価	35
5.1 目的	35
5.2 性能評価方法:2f 法	35
5.3 実験セットアップ: 東京大学宇宙線研究所での 2f 測定	41
5.4 測定結果	42
5.5 まとめ	46

第 6 章	分割鏡の「さらなる」配置最適化に向けた解析手法の開発	47
6.1	目的	47
6.2	光線追跡シミュレーションによる検証	51
6.3	測定データを用いた検証	60
6.4	まとめ	69
第 7 章	LST 光学性能の最適化の検討	71
7.1	目的	71
7.2	放物面形状での幾何光学	71
7.3	LST の結像性能のシミュレーション	72
7.4	まとめ	87
第 8 章	結論と展望	89
付録 A	最適配置検討	91
A.1	目的	91
謝辞		95
参考文献		97

第 1 章

超高エネルギーガンマ線宇宙物理学

宇宙は「激動」している。近年大幅に発展した高エネルギー宇宙物理学の観測技術により、宇宙に高エネルギー現象が満ち溢れていることがわかってきた。高エネルギー現象の観測において、宇宙から到来するガンマ線は良い手段である。ガンマ線は最も高いエネルギーを持つ電磁波である。また電荷を持たないため、陽子や電子等の宇宙線を異なり、星間磁場によって軌道が曲げられず、到来方向の情報を持っている。そのため、ガンマ線を観測し、放射機構を理解することで、放射源での物理を解き明かすことができる。つまり、地上では到底再現できないような、様々な高エネルギー現象に満ち溢れた「激動する宇宙」の探求が可能となる。この章では、超高エネルギーガンマ線宇宙物理学を概観する。まずは宇宙ガンマ線の観測の歴史と放射機構について解説したのち、超高エネルギーガンマ線*1(以下 VHE ガンマ線、VHE は”Very High Energy”の略である)で狙える物理として、放射源と基礎物理の探求について述べる。

1.1 ガンマ線観測の歴史

初めて天体からのガンマ線を検出したのは 1967 年に行われた人工衛星 (OSO-3 衛星) による手法である。近年では Compton 衛星に搭載された EGRET 検出器による 20MeV-10GeV 領域のガンマ線全天観測や Fermi 衛星に搭載された LAT 検出器による 20MeV-300GeV 領域の観測が行われている。GeV 領域以下のエネルギー帯でのガンマ線観測人工衛星が活躍している。超高エネルギーの TeV 領域のガンマ線観測は人工衛星には難しい。主な理由は TeV 領域のガンマ線の検出効率を上げるために必要な広い検出面積の実現が検出器の大きさに制限のある人工衛星では難しいからである。そのため、検出面積を大きく取れることが見込まれる地上望遠鏡の登場が望まれた。大気中に高エネルギーガンマ線が入射した際にはチェレンコフ光を伴う空気シャワーが発生する。TeV 領域ではこの現象が顕著となる。この空気シャワー由来のチェレンコフ光を観測するために、シャワーイメージの形状を利用し、バックグラウンド除去を行う解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) が提唱された。解像型大気チェレンコフ望遠鏡の検出原理については次章で詳しく述べる。1989 年に IACT である Whipple 望遠鏡がかに星雲から世界で初めて TeV ガンマ線信号を検出した。これにより、シャワーイメージを利用した技術 (イメージング法) が確立され、現在までに多数の IACT が世界各地に建設され、

*1 「超高エネルギーガンマ線」とは一般に IACT による観測が主流となる数十 GeV 以上のガンマ線を指す。

TeV ガンマ線を放射する超高エネルギーガンマ線天体が地上から多数観測されるようになった。図 1.1 は 2016 年現在までに観測された TeV ガンマ線天体の全天図である。

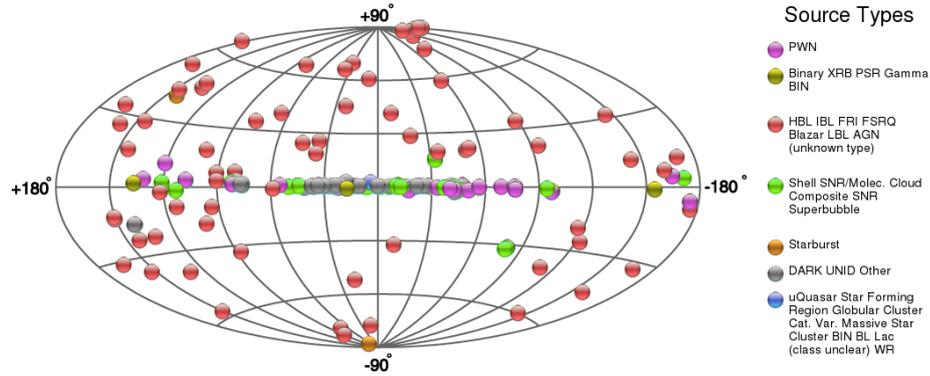


図 1.1: 2016 年 12 月現在までにチェレンコフ望遠鏡により、高エネルギーガンマ線が検出された 181 天体の一覧。[1]

1.2 ガンマ線放射機構

宇宙線は非熱的な加速を受け、ガンマ線を放射する。この際、放射機構の違いにより、電子成分と陽子成分に分類される。電子成分であれば、他の荷電粒子との相互作用による制動放射、磁場との相互作用によるシンクロトロン放射、周囲に低エネルギー光子場がある場合光子にエネルギーを移す逆コンプトン散乱の三種類がある。一方、宇宙線陽子からは原子核との強い相互作用により生成した π^0 中間子の崩壊による放射がある。以下に主要な放射機構をまとめる。

1.2.1 シンクロトロン放射

シンクロトロン放射は、磁場中で相対論的な速度で運動している荷電電子から電磁波が放射される現象である (図 1.2)。磁場中を運動する電子は、運動方向と磁力線の方に垂直な方向のローレンツ力を受ける。それによって電子は磁場中を螺旋運動するが、進行方向を曲げられることに伴って、加速度運動により円軌道面に垂直な方向に電磁波を放射する。e を電荷、B を磁束密度、 m_e を電子の質量、 γ をローレンツ因子とした場合、螺旋運動の回転周波数は、 $\omega_B = eB/\gamma m_e$ である。放射される電磁波は、螺旋運動の回転周波数 $\omega_B = eB/\gamma m_e$ に対しておよそ γ^3 倍の周波数である

$$\omega_c = \frac{3}{2}\gamma^3\omega_B = \frac{3}{2}\gamma^2\frac{eB}{m_e} \quad (1.1)$$

のパルス波を放射する。放射スペクトルのピークは $0.29\omega_c$ にある。シンクロトロン放射による電子の単位時間あたりのエネルギー損失は E_e を電子のエネルギー、 $\sigma_T = 8\pi r_e^2/3$ を Thomson 散乱断面積とすると、1.2 式で記述される。

$$-\frac{dE_e}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_T c \beta^2 \gamma^2 \frac{B^2}{8\pi} \quad (1.2)$$



図 1.2: シンクロトロン放射の模式図。

荷電粒子のエネルギー分布がべき関数で指数が $-p$ の場合は、シンクロトロン放射スペクトルもべき関数になり、その指数は $\alpha = -(p-1)/2$ となる α はスペクトル係数と呼ばれる。スペクトル指数 α を観測すれば、エネルギー分布の指数 p がわかる。

1.2.2 制動放射

荷電粒子は原子核のクーロン場で曲げられ、加速度を受ける。この時電磁波が放射される現象を制動放射という(図 2.2)。陽子が原子核のクーロン力に受ける影響は電子に比べてはるかに弱いので、陽子からの制動放射は考えなくて良い。電子が相対論的で、冪関数 E^{-s} を持つ場合の制動放射を考える。一度の制動放射で失うエネルギーは、

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{Z(Z+1.3)e^6 N}{16\pi^3 \epsilon_0^3 m_e^2 c^4 \hbar} E_e \left[\ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) + \frac{1}{8} \right] = \frac{E}{X_0} \quad (1.3)$$

である。相対論的制動放射の場合、 $-dE/dt$ は電子のエネルギー E_e に比例する。 X_0 は制動放射によって電子のエネルギーが $1/e$ になるまでに走る放射長と呼ばれる距離である。

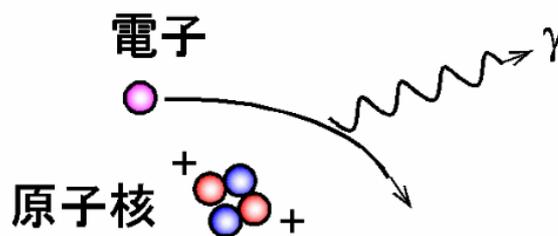


図 1.3: 制動放射の模式図。

1.2.3 逆コンプトン散乱

相対論的な電子による十分低エネルギーの光子の散乱であり、電子がエネルギーを失い、光子にその一部を移すという過程である(図 1.4)。 ν を実験室系での光子の振動数、 ν' を電子の静止系での入射光子の振動数とする。電子の静止系で入射光子のエネルギーを $h\nu' \sim \gamma h\nu \ll m_e c^2$ と

すると、衝突はトムソン散乱で近似でき、エネルギーは散乱前後で変化しない。ローレンツ変換を行い、実験室系での散乱後の振動数 ν'' とすると、

$$h\nu'' \sim \gamma h\nu' \sim \gamma^2 h\nu \quad (1.4)$$

と書ける。つまり、相対論的電子による一回の逆コンプトン散乱で、入射光子のエネルギーは γ^2 倍になる。エネルギー γmc^2 の一つの電子がコンプトン散乱によって単位時間に放出するエネルギーの割合は、 U_{ph} を光子のエネルギー密度だとすると、

$$P_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c U_{ph} \gamma^2 \quad (1.5)$$

となる。

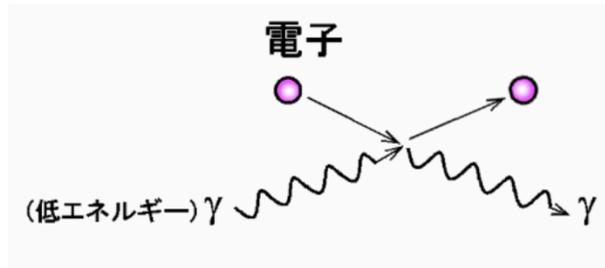


図 1.4: 逆コンプトン散乱の模式図。

1.2.4 π^0 中間子崩壊による放射

相対論的な宇宙線陽子と星間物質が衝突するとハドロン相互作用により、メソンが生成される。大多数が π^0 中間子であり、 π^0 と π^\pm が同数ずつ生成される。 π^\pm が崩壊すると電子ニュートリノ、 ν_e もしくはミューニュートリノ、 ν_μ が生成される。このニュートリノを検出することも宇宙線陽子が加速されている証拠のひとつとなる。パイオンの生成閾値は

$$E_{th} = 2m_\pi c^2 \left(1 + \frac{m_\pi}{4m_p}\right) \sim 280 \text{ MeV} \quad (1.6)$$

である。 π^0 は寿命が 8.4×10^{-17} 秒で崩壊し、

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (1.7)$$

のように2つの光子を放射する。(図 1.5) この放射は

$$E_\gamma = m_{\pi^0} c^2 / 2 \sim 67.5 \text{ MeV} \quad (1.8)$$

に特徴的なピークを持つ。実際は、実験室系で π^0 は運動しているため、エネルギーの幅が生ずる。 π^0 から得られるガンマ線のピークもまた宇宙線陽子が加速されている証拠となりうる。

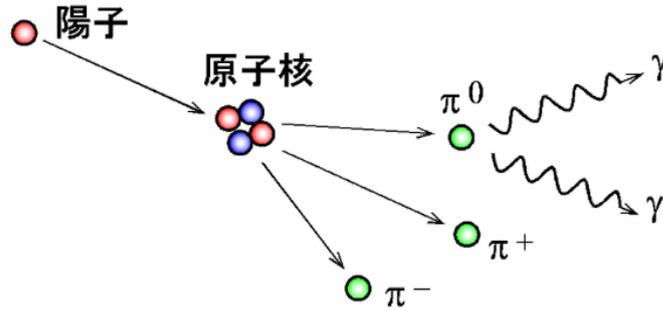


図 1.5: π^0 中間子崩壊による放射の模式図。

1.3 VHE ガンマ線の物理

VHE ガンマ線を観測することで、宇宙線加速現場の同定や、放射源で起こる非熱現象の解明が可能になる。以下では VHE ガンマ線を放射する天体とその物理について述べる。天体に関しては、銀河系内天体である超新星残骸、パルサー、パルサー星雲、系外天体である活動銀河核、ガンマ線バーストについて記す。

1.3.1 超新星残骸

超新星残骸 (SuperNova Remnant, SNR) は大質量星が一生を終えるときに起こす大規模な爆発現象である超新星爆発の後に残る天体である。超新星爆発の際には元素合成過程が起こり、星の進化の各段階で合成された元素が外部に放出される。そのため銀河の化学進化観点からも重要な現象であると同時に、爆発の際に生じる衝撃波により、宇宙線加速源としての役割も果たしていると考えられている。衝撃波による加速機構については、「衝撃波統計加速」(フェルミ加速) という説が提唱されている [2][3]。この加速機構を考えることにより、SNR を宇宙線のエネルギースペクトルに存在する 10^{15} eV 辺りに "knee" と呼ばれる特徴的な折れ曲がりの起源とする説が有力視されている。宇宙線が放射するガンマ線の放射過程として宇宙線原子核と星間物質中の原子核の相互作用によるパイ中間子崩壊による説 (ハドロニックモデル) や宇宙線電子と宇宙背景放射などとの逆コンプトン散乱による説 (レプトニックモデル) などの議論がある。電子起源の場合、電子の逆コンプトン散乱の反応断面積に Klein-Nishina 効果によるカットオフがある。このカットオフが起こるエネルギー領域のガンマ線観測を行うことで、電子と陽子を区別できる。また電子と陽子で放射場所が違うため、空間分布を比較する事により区別をする事が可能である。これは X 線と VHE ガンマ線は同じ空間分布になるはずであるからである。図 1.6 のように若い超新星残骸 RX J1713.7-3946 ではスペクトルの形をモデルと比較すると電子起源モデルのほうが観測結果をよく再現するという結果が報告されている [4]。しかし、図 1.7 のように電子起源モデルのほうが観測結果をよく再現するという結果も報告されており [5]、現状ではどちらが正しいのかわかっていない。そのため、より高感度、高角度分解能で多くの SNR からの VHE ガンマ線観測を行い、両者のモデルを比較することが必要となっている。

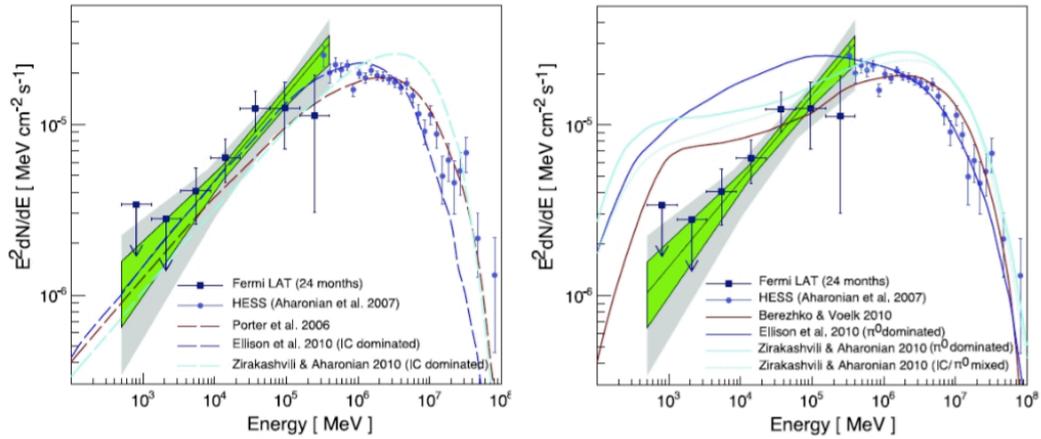


図 1.6: RXJ1713.7-3946 の GeV-TeV スペクトル [4]。左は電子起源モデル、右は陽子起源モデルとともに示している。

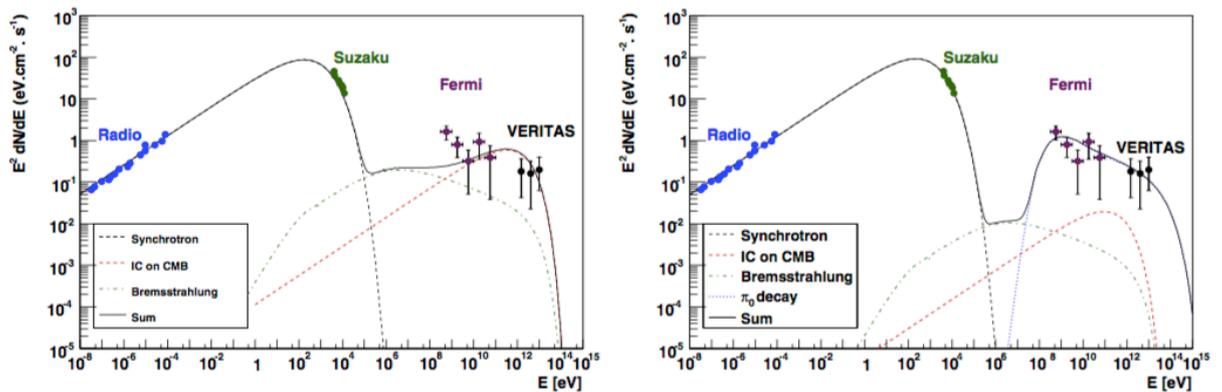


図 1.7: 超新星残骸 Tycho で観測された多波長スペクトル [5]。左は電子起源モデル、右は陽子起源モデルとともに示している。

1.3.2 パルサー、パルサー星雲

パルサーは高速で回転する強磁場を持った中性子星である。自転周期は約 10 ミリ秒から数秒であり、ミリ秒周期で自転するパルサーはミリ秒パルサーと別途呼ばれる。磁場の高速回転によって強い誘導起電力が発生し、荷電粒子の加速が起こる。荷電粒子は磁場の向きからずれた運動をすると、シンクロトロン放射を起し、磁場に垂直な成分の運動量は急激に失われてしまう。そのため結果として、荷電粒子は磁場に沿った方向に加速される。その放射領域が中性子表面の磁極近傍で起こる (polar-cap モデルものなのか、磁場と直交しない加速電場が図 1.8 の中 light cylinder と呼ばれる面よりも少し内側に加速電場が発生する (outer-gap モデルもしくは slot-gap モデル) のか議論がなされていた [7]。パルサー全体の構造の概略図を図 1.8 に示す。

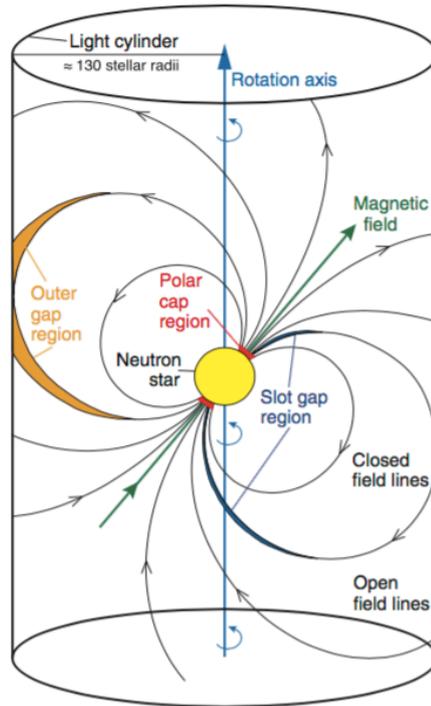


図 1.8: パルサーの全体像 [6]。slot-gap 領域、polar-cap 領域、outer-gap 領域を示している。

MAGIC 望遠鏡によって 2008 年に Crab パルサーからの 25 GeV のガンマ線放射が発見 [6] され、超高エネルギーガンマ線の放射機構としての polar cap モデルが棄却された。先に述べた slot-gap 領域もしくは outer-gap 領域で加速が起きているとすると、曲がった磁力線に沿って荷電粒子が加速される。この際に加速度を受け、電磁波を放射する。これを「曲率放射」と呼ぶ。この曲率放射により、ガンマ線スペクトラムはあるエネルギー以降指数関数的に減少するはずであると考えられていたが、MAGIC[8][9]、VERITAS[10] の観測や MAGIC が 400 GeV という超高エネルギーガンマ線放射を観測 [11] した結果、これまでのシナリオでは Crab パルサーからの放射を説明できないことがわかり、この観測結果を説明するためのモデルがいくつか考えられ、今後の観測においてこれらのモデルを検証していくことが必要とされている。

パルサーから解放される回転エネルギーのうち、パルス成分として放射で消費されているエネルギーはそのごく一部であり、大部分はパルサーの磁気圏で加速された荷電粒子が電磁カスケードにより大量の電子・陽電子を生成、最終的に電子・陽電子プラズマとして放出され、パルサー風となる。パルサー風は周囲の星間物質などと相互作用することで、衝撃波を形成し、荷電粒子を加速、図 1.9 で示されるようにシンクロトロン放射及び逆コンプトン散乱で光り、パルサー星雲として観測される。

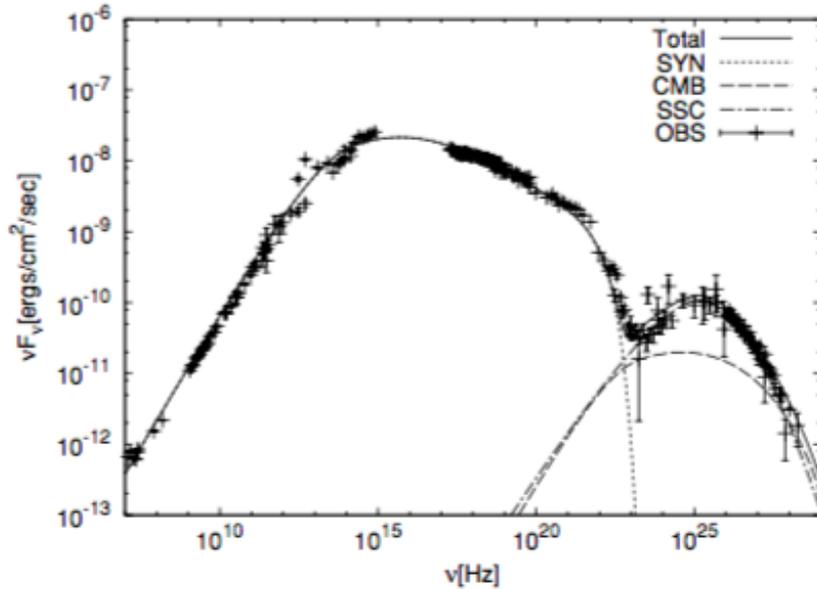


図 1.9: 現在のかに星雲のスペクトル。モデルに考慮したすべての放射過程の和 (黒線) で観測値 (十字) を説明できている。電波から X 線領域が主にシンクロトン放射、ガンマ線領域は主にシンクロトン (SYN) 光子を逆コンプトン散乱したものによって説明される [12]。

1.3.3 活動銀河核

活動銀河核 (Active Galactic Nuclei, AGN) は、大質量のブラックホール周辺にガスが降着し、銀河中心部分が銀河全体にも匹敵するほど非常に明るく輝く銀河の中心領域 (図 1.10) を指す。図 1.11 で示すように、放射は多波長で観測できるのも特徴である。AGN を持つホスト銀河としては、クェーサー、セイファート銀河、電波銀河、ブレーザー等がある。しかし、これら違うタイプに思える AGN も実際はどれも同じ構造の天体で、観測する向き等によってそのスペクトルが変わるといふモデルによって統一的に解釈できると考えられている。AGN の相対論ジェットが視線方向に対して、正面を向いている天体をブレーザーと呼ぶ。ブレーザーは短いものでは数分という短い時間スケールでフレアを起こし激しい活動を示すことでも特徴的である。これはガンマ線の放射領域が小さいことを示唆しており、VHE ガンマ線領域での観測はどの波長よりも中心天体であるブラックホール近傍を観測していることになる。放射と時間変動の情報を用いてフレア発生機構を明らかにする事が、今度の観測に求められており、ひいてはブラックホールの物理解明にもつながるかもしれない。

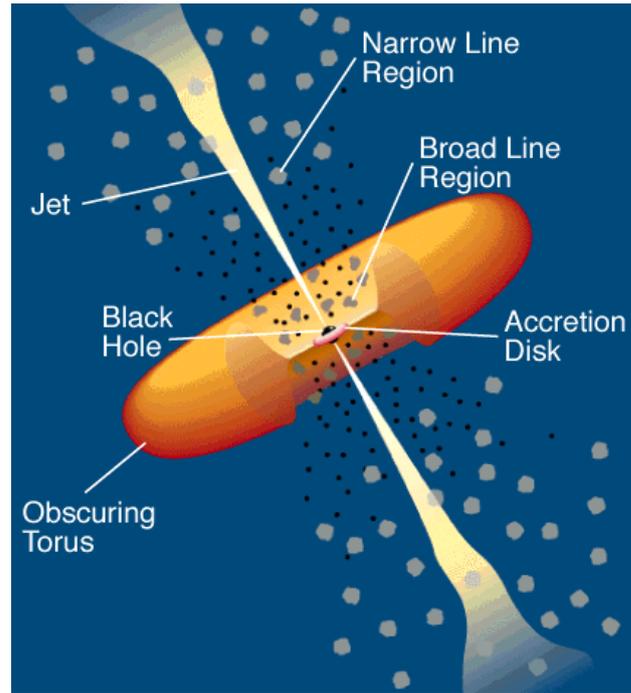


図 1.10: AGN の全体構造の模式図 [13]。中心のブラックホールから上下に相対論的プラズマジェットが吹き出している。周辺には降着円盤、分子雲の広輝線領域、厚いトーラスがブラックホールを取り囲んでいる

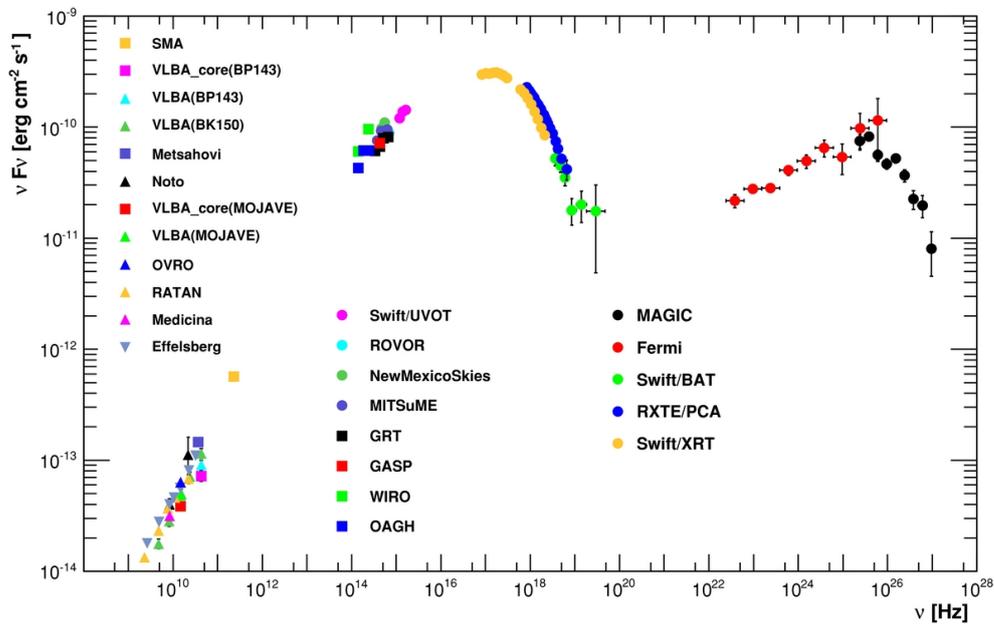


図 1.11: 多波長観測で得られた Mrk421 のスペクトル [14]。X 線までの低エネルギー領域から GeV-TeV までの高エネルギーの領域からなる。

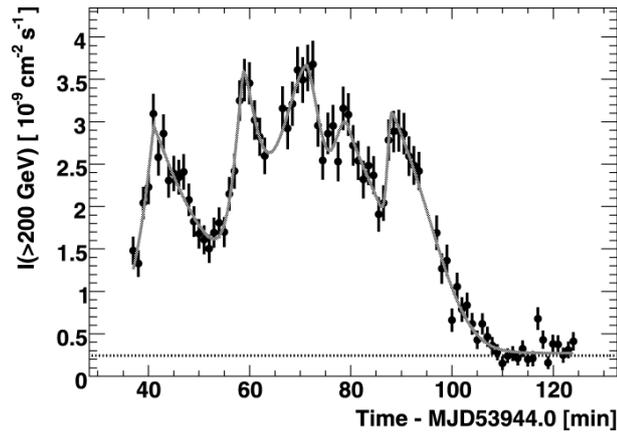


図 1.12: H.E.S.S. で観測された活動銀河核 PKS 2155 - 304 のガンマ線放射 ($E > 200$ GeV) の時間変動 [15]

1.4 ガンマ線バースト

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst, GRB) とは、太陽が一生の間に発する全エネルギーに勝る量である 10^{53} erg にもおよぶ莫大なエネルギーをたった数秒から数十秒の間に放出する、宇宙最大の爆発現象である。しかし、中心天体の正体や発生機構は解明されていない。GRB の放射過程は、経過時間、エネルギーによって区別される。数百秒以内は主に MeV 領域で光る。これは即時放射と呼ばれる。その MeV 放射後は、電波から GeV までの幅広いエネルギーで残光放射を行う。GRB の MeV 領域の放射はフェルミ衛星が捉えているが、GeV 以上は統計が足りていない。これは、衛星の検出有効面積が小さいからである。一方で IACT では有効検出面積は大きい、視野が小さいため、これまで未検出である。しかし、GeV 以上の放射を検出することは、即時放射と残光放射の関係を理解し、GRB の放射機構を理解するために非常に重要である。CTA では、特に大口径望遠鏡 (LST) が検出を試みている。詳細は後述するが、LST は天球のどこでも 20 秒以内に向けられるという特徴と、低いエネルギー閾値を目指しているので、Fermi とオーバーラップした領域の GRB の残光放射の測定可能性が期待されている。

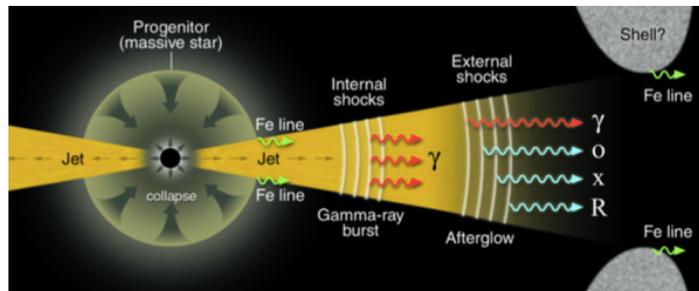


図 1.13: GRB の放射イメージ [17]。ここでは即時放射が発生し、衝撃波によって加速された電子による残光放射が表されている。

1.4.1 暗黒物質間接探索

現在の宇宙論の標準模型である Λ -CDM(Cold Dark Matter) 模型 [16] では、宇宙項で記述されるダークエネルギーと暗黒物質が支配的であり、素粒子の標準模型で説明できる物質は全宇宙の 4% 程度である [18][19]。暗黒物質の有力候補として、WIMP(Weakly Interactive Massive Particle) が挙げられるが、宇宙初期の熱的残存粒子として予想される質量範囲は典型的には、GeV 以上から、数 TeV と広い。そのため、WIMP の探索手法として、標準模型粒子を衝突させて、WIMP を生成する加速器探索実験、原子核と暗黒物質との散乱を利用する直接探索実験、WIMP 同士の対消滅由来の標準模型粒子を探索する間接探索実験と様々な手法が取られてきた。図 1.14 は、三種類の方法により、現象論的 Minimal Supersymmetry のパラメータを探索した結果を示している。相補的にパラメータを探索しているが、比較的質量の高いモデルでかつ感度が必要なモデルを排除できるのは間接探索のみであることがわかる。間接探索の中でも有効観測手段として考えられているのが、WIMP の対消滅由来のガンマ線を探索する暗黒物質間接探索 [20] である。ガンマ線を用いた間接探索の場合、対消滅による信号フラックスは以下の式で表される。 [20] [24]

$$\frac{d\phi(\Delta\Omega, E_\gamma)}{dE_\gamma} = \frac{1}{4\pi} \frac{(\sigma_{ann}v)}{2m_\chi^2} \sum_i BR_i \frac{dN_\gamma^i}{dE_\gamma} \cdot \tilde{J}(\Delta\Omega) \quad (1.9)$$

$$\tilde{J}(\Delta\Omega) = \int_\Delta \Omega d\Omega \int_{los} ds \rho^2(s, \Omega) \quad (1.10)$$

式 1.9 の因子 $\sum_i BR_i \cdot dN_\gamma^i/dE_\gamma$ は素粒子物理学から計算される項であり、分岐比 BR_i の対消滅を起こす崩壊経路での光子フラックスの積を対消滅を起こしうる全ての崩壊経路で和をとっていることを意味する。 $\sigma_{ann}v$ は、対消滅断面積であり、暗黒物質が宇宙初期の熱的残存粒子だとすると、 $\sigma_{ann}v = 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ 程度 [21] であることが知られている。 \tilde{J} は J-Factor と呼ばれる項で、式 1.10 より視線方向の暗黒物質の密度分布によって得られる値である。暗黒物質の密度分布は図 1.15 が示すようにモデルによる不定性が大きいため、J-Factor の不定性も大きくなる。ガンマ線観測のみならず、可視光などによる観測により、J-Factor の不定性を小さくする試みが進められている [22]。このように暗黒物質対消滅フラックスは素粒子物理学のモデルによる決まる項と宇宙物理学による密度分布の観測により決まる項の積によって決まっている。

観測対象は暗黒物質の密度が大きいと思われる WIMP が集積していると考えられる銀河中心、銀河系近傍の伴銀河である矮小楕円銀河などである。銀河中心はガンマ線強度が一番大きい、同時にガンマ線を放射する天体や拡散ガンマ線も多いためバックグラウンドが支配的になる。一方で矮小楕円銀河は、予想される暗黒物質の割合が非常に高くバリオンに起因するガンマ線バックグラウンドがほとんどないことが特徴であるため良い観測対象になるが、ガンマ線強度は銀河中心よりも小さいといったように観測対象によりトレードオフがある。

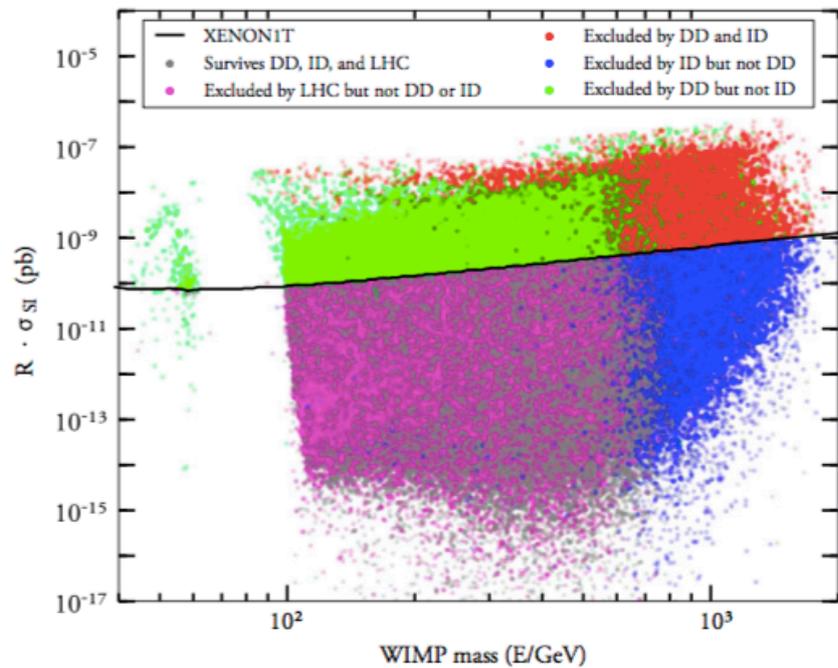


図 1.14: 加速器実験、直接探索実験、間接探索により探索された現象論的 Minimal Supersymmetry のパラメータを探索した結果を示している。加速器実験は LHC が 8TeV で陽子陽子衝突実験を行った際の ATLAS、CMS 実験による結果である。間接探索は CTA と Fermi-LAT により、現行既に探索もしくは将来探索が見込まれる結果を示し、直接探索は XENON1T による結果である。3 種の方法が相補的に探索を行っている事が示されている。

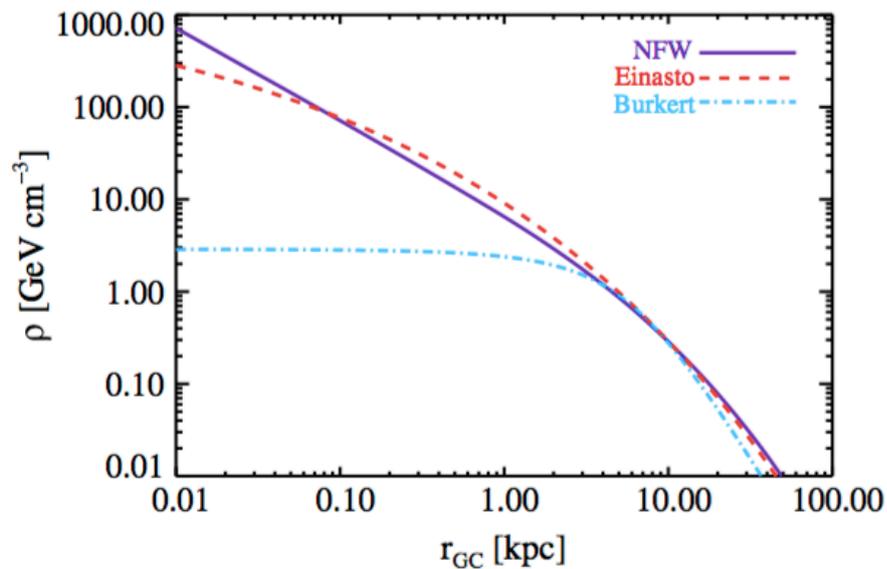


図 1.15: Milky Way の暗黒物質ハロー密度分布のモデルの比較である [23]。図中の NFW、Einasto、Burkert は密度分布を示すモデルである。

これまで Fermi-LAT や現行のチェレンコフ望遠鏡により暗黒物質の間接探索が行われてきた。図 1.16 はこれまでの観測結果の現状を示している。Fermi-LAT が矮小楕円銀河に対して最も厳しい制限をつけており、数十 GeV 以下の領域では $\sigma_{\text{ann}v} = 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ の領域を排除できている事がわかる。H.E.S.S. 等現行のチェレンコフ望遠鏡は、熱的残存粒子由来の対消滅断面積の値に達するような制限を与えていないが、最も強い制限を与えている H.E.S.S. の銀河中心の観測結果では後一桁という領域まで迫っている。この現状に対し、将来見込まれる制限曲線を示したのが、図 1.17 である。後述する、現在開発中の次世代ガンマ線天文台 CTA を用いて、銀河中心を観測対象とすることにより数十 GeV 以上の領域において、熱的残存粒子由来の対消滅断面積を探索する事が可能となり、数十 GeV 以下を探索する Fermi-LAT と相補的になる。

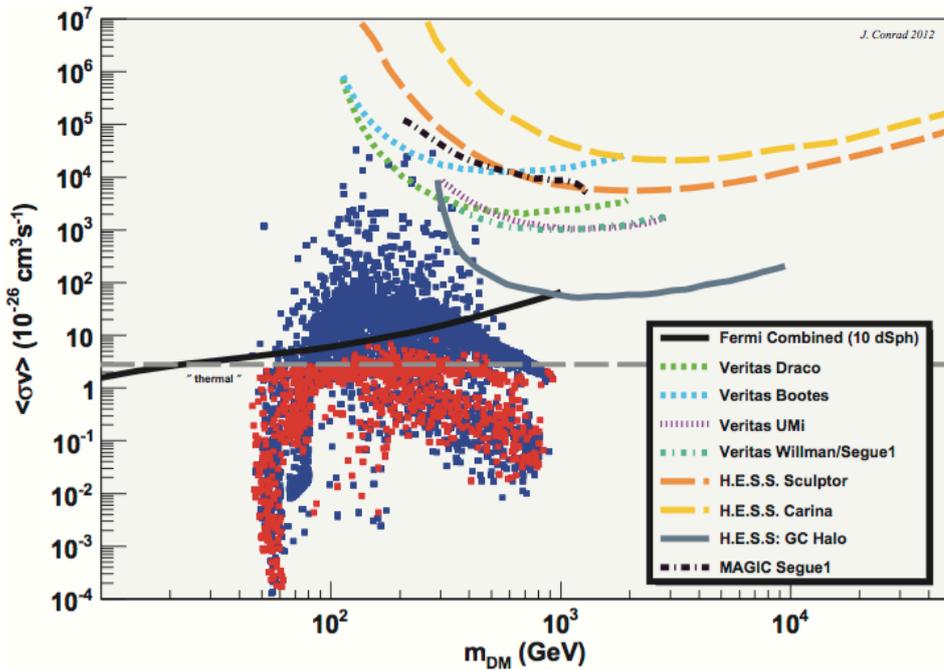


図 1.16: 現行の実験が与えた WIMP 対消滅断面積に対する制限 [25]。グレーの破線が $\sigma_{\text{ann}v} = 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ を表す。また赤と青の点はそれぞれ非熱的、熱的な現象論的 Minimal Supersymmetry(MSSM)における暗黒物質モデルを表す。

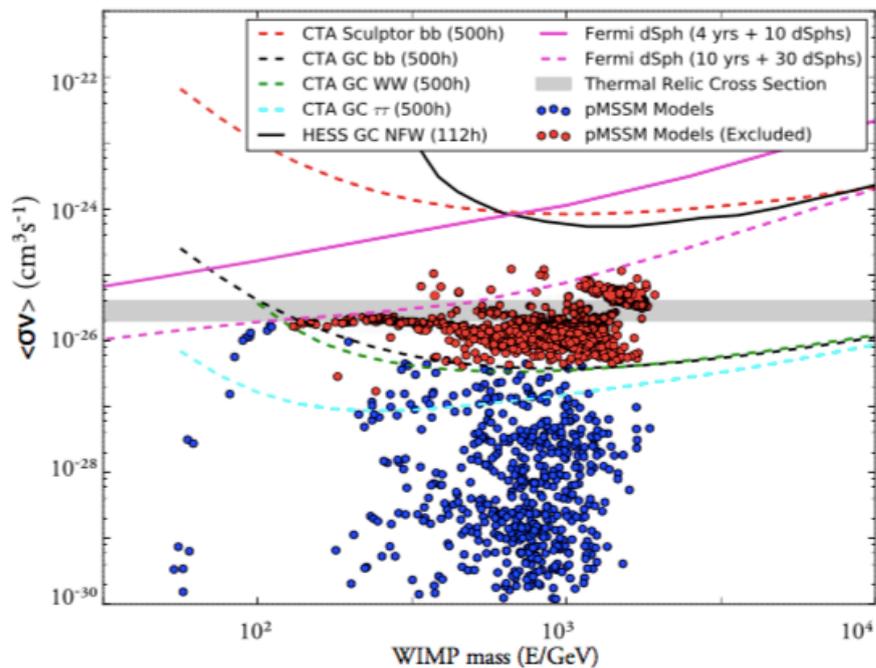


図 1.17: 実線が現行の制限を示しており、破線が将来見込まれる制限曲線である。Fermi-LAT と H.E.S.S. の制限局線は暗黒物質の対消滅による崩壊分岐比において bb への崩壊が 100% であるとして計算している。CTA で見込まれる制限曲線については、500 時間観測 Sculptor を観測して、 bb が対生成される場合 (赤破線)、銀河中心を 500 時間観測した場合は対生成されるものが bb (黒破線)、 W^+W^- (緑破線)、 $\tau^+\tau^-$ (シアン破線) で示している。灰色の領域は $\sigma_{\text{ann}}v = 3 \times 10^{-26} \text{cm}^3\text{s}^{-1}$ を示し、赤、青点はそれぞれ排除された、まだ排除されていない現象論的 Minimal Supersymmetry (MSSM) における暗黒物質モデルを表す [24]。

第 2 章

解像型大気チェレンコフ望遠鏡

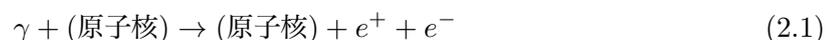
解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) の登場により数百 GeV から TeV 以上の領域における超高エネルギーガンマ線の観測が可能となった。ガンマ線は大気中の原子核と相互作用して、シャワーを形成するため、地上での直接検出はできないが、シャワー由来の大気チェレンコフ光を観測することにより、間接的にガンマ線の検出を行うことを IACT は可能とした。この章では IACT の観測原理を説明する。

2.1 大気チェレンコフ光の発生原理

検出するチェレンコフ光はガンマ線と大気との相互作用で生じる空気シャワー由来であり、観測原理を知る上で空気シャワーの物理を知ることは必要不可欠である。空気シャワーは陽子やヘリウムなどの原子核由来のものがハドロンシャワー、ガンマ線由来のものは電磁シャワーと呼ばれる。電磁シャワーとハドロンシャワーにはシャワーの形状にいくつか異なる特徴があり、それらを利用することでガンマ線イベントとハドロンイベントを分離する。

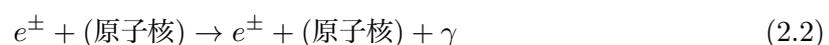
2.1.1 電磁シャワー

ガンマ線のエネルギーが $2m_e c^2$ を超えると大気中の原子核との相互作用により電子-陽電子対生成式 (2.1) の断面積が主要になってくる。



ガンマ線単独では、エネルギー保存則と運動量保存則により式 2.1 の反応を起こすことはできない。原子核を媒介とすることで成立する。電子対生成の断面積は $\sim \alpha \sigma_T Z^2$ で近似される。

入射したガンマ線のエネルギーが十分高いと、生成された電子、陽電子が制動放射式 2.2 を起こし、再びガンマ線を放出する。この過程の連鎖を電磁シャワーという。



電磁シャワーの生成は粒子一個の持つエネルギーが臨界エネルギーに達した時まで続く。臨界エネルギーは 1 放射距離 (X_0) あたりの電離損失エネルギーで定義され、空気中では約 83MeV である。電磁シャワーの特徴は生成物である光子や電子がシャワー軸に対して対称に分布することで

ある [26]。これはシャワーによって生じた電子が空気中で多重クーロン散乱を受けることが主な原因である。

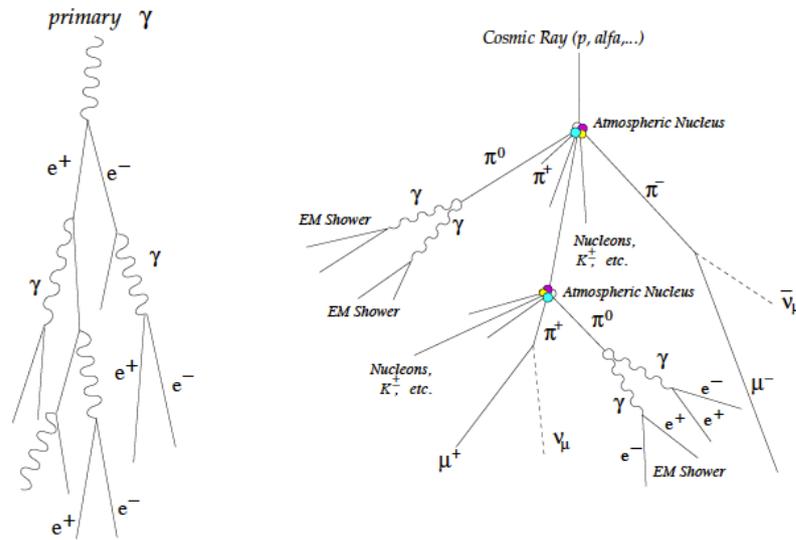


図 2.1: 左図は電磁シャワーの概念図であり、右図はハドロンシャワーの概念図である [27]。

2.1.2 ハドロンシャワー

高エネルギー宇宙線の主成分は陽子やヘリウムであり、このような宇宙線が生成する空気シャワーを電磁シャワーと区別してハドロンシャワーと呼ぶ。1次宇宙線は大気中の原子核と相互作用をし、多くの2次粒子を発生させる。2次粒子は π 中間子、K中間子等で構成される、主成分は π 中間子である。生成された π 中間子は π^0 、 π^\pm の3種類がありそれぞれほぼ同数生成される。なかでも π^0 は極めて短い寿命 8.4×10^{-17} 秒で生成後すぐに2つの光子に崩壊し電磁カスケードの起点となる。一方、 π^\pm は一部は式(2.3)のように崩壊する。

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2.3)$$

ハドロンシャワーは電磁シャワーと異なる特徴をいくつか持っている。そのうち二つが以下の事項である。

- 一次宇宙線がガンマ線の場合全エネルギーを電磁シャワーに転換するのに対し、ハドロンの場合エネルギーの2/3をミューオンなどの電磁シャワーに寄与しない粒子が持ち去ってしまう。
- 個々の π 中間子は生成時に横方向の運動量を持つため、ハドロンシャワーはガンマ線シャワーに比べ横方向に広がったシャワーを形成する。またハドロンシャワーに含まれる電磁シャワーは別々の場所で生まれた π^0 から作られるのでガンマ線による電磁シャワーと異なり、シャワー軸に対して不規則となる。

2.1.3 チェレンコフ光

大気(媒質)中の光速は大気の屈折率 n を用いて c/n で表される。粒子の速度 β が c/n より大きい時は粒子の運動に追いつかない光子が衝撃波となる。この衝撃波をチェレンコフ光と呼ぶ。この関係は式 2.4 で表される。

$$v \geq \frac{c}{n} \quad (2.4)$$

チェレンコフ光の放出される方向(粒子の進行方向とのなす角 θ) は屈折率 n と粒子の速度 $\beta = v/c$ で決まる。

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2.5)$$

シャワー中の電子・陽電子のような荷電粒子が十分なエネルギーを有するため、チェレンコフ光を発する。地表付近では $n \sim 1.00028$ なので $\theta = 1.4^\circ$ という値をとる。またチェレンコフ光を起こすエネルギー閾値は電子の場合だと 21MeV に相当する。

2.2 IACT によるガンマ線観測原理

シャワーによるチェレンコフ光はライトプールと呼ばれる円盤を形成する。ライトプールの半径は検出高度 H_1 とチェレンコフ光発生高度 H_2 、チェレンコフ光放出角度 θ_c による $r = (H_2 - H_1)\theta_c$ の関係式で決まる。光子が発生した高度に対して望遠鏡で捉える角度が異なるので焦点面のカメラで記録されたイメージはある軸上に伸びるように分布する。記録された光量とイメージの形状を解析することにより、ガンマ線のエネルギーとその到来方向を決定することが可能となる。この解析手法はイメージング法と呼ばれている

2.2.1 イメージング法

ガンマ線とハドロンのイベント比は宇宙線を捉える視野やガンマ線の Flux にもよるが代表的なガンマ線源であるかに星雲の場合はおおよそ $1:10^4$ である。相対的に少ないイベントを抽出するために厳しいイベントセレクションが必要となる。その手法の一つがイメージング法である。焦点面カメラでとらえたシャワーイメージ(図 2.2) は Hillas によって定義されたパラメータ [29] を用いて特徴付けられる。主な Hillas パラメータは以下である。

- size : イメージに含まれる全光量
- alpha : イメージを楕円近似した時の長軸方向と楕円の重心からカメラ中心を結んだ線のなす角度
- dist : 楕円の重心からカメラ中心までの距離
- length : イメージの光量の二次のモーメントに由来する楕円の長軸方向の大きさ
- width : イメージの光量の二次のモーメントに由来する楕円の短軸方向の大きさ

ガンマ線由来の電磁シャワーと比べたハドロン由来の空気シャワーの場合、シャワーが横に広がるので、楕円で近似する事が難しい。そのため、ガンマ線イベントとハドロンイベントでは、図

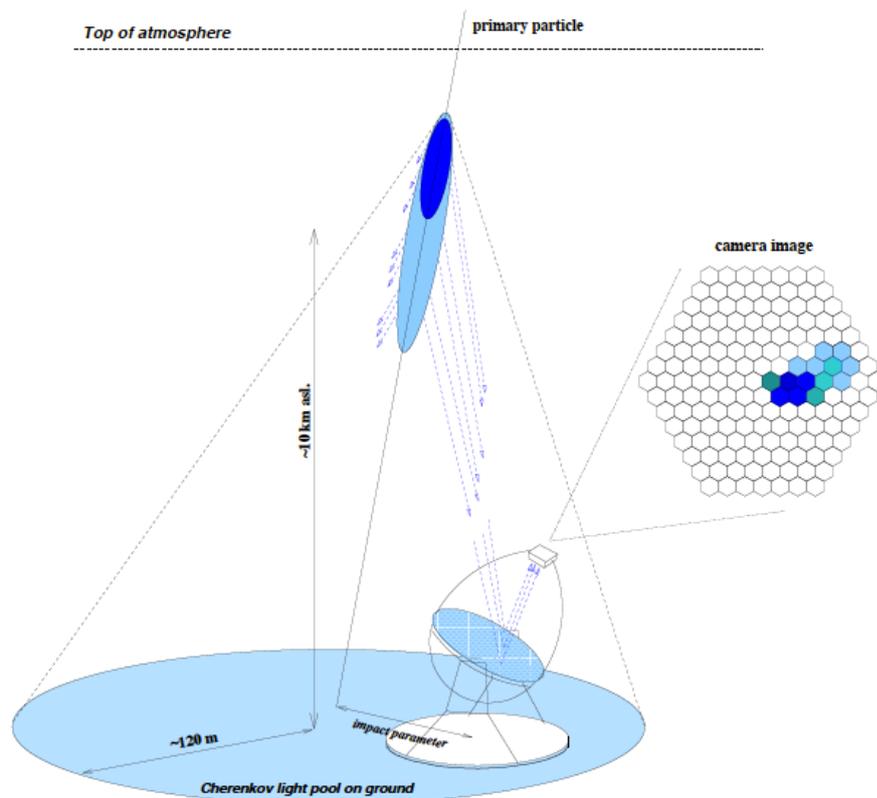


図 2.2: IACT のガンマ線観測の模式図である [28]。一次粒子が上空の大気と相互作用し、空気シャワーを形成する。図中、暗青色部分が先に形成され、その後明青色部分が形成される。青破線で示した大気チェレンコフ光が、シャワーが成長するにつれて、望遠鏡光軸との角度を大きくしながら地表に到達し、望遠鏡の鏡面で反射し、焦点面にあるカメラに到達する。カメラ中心から実際に光が到達した焦点面位置までの距離は、シャワー軸と望遠鏡光軸との距離を反映したものの、すなわち impact parameter を示している。カメラはピクセル状になっており、シャワーイメージを再構成する。

2.4 のようにイメージが異なるので、Hillas パラメータを用いて、バックグラウンドであるハドロンとの区別を行う事ができる。バックグラウンドとして、ハドロンシャワー由来のミュオンも存在する。ミュオンは相対論効果により寿命が伸び、地表まで到達する。そして地表付近でチェレンコフ光を出す。ミュオン由来の大気チェレンコフ光はリング形状を保っているため、ハドロンよりも容易に除去が可能である。

2.2.2 ステレオ観測

ガンマ線の到来方向を精度よく決定する方法として望遠鏡二台以上を用いて行うステレオ観測がある。図 2.5 のように、シャワーを離れた複数箇所で同時に検出して天体の方向を求め、到来方向をより正確に求めようというのがステレオ観測法である。天体からのガンマ線であれば二つのシャワーイメージの長軸の交点は天体方向を中心に分布することになる。天体方向とチェレンコ

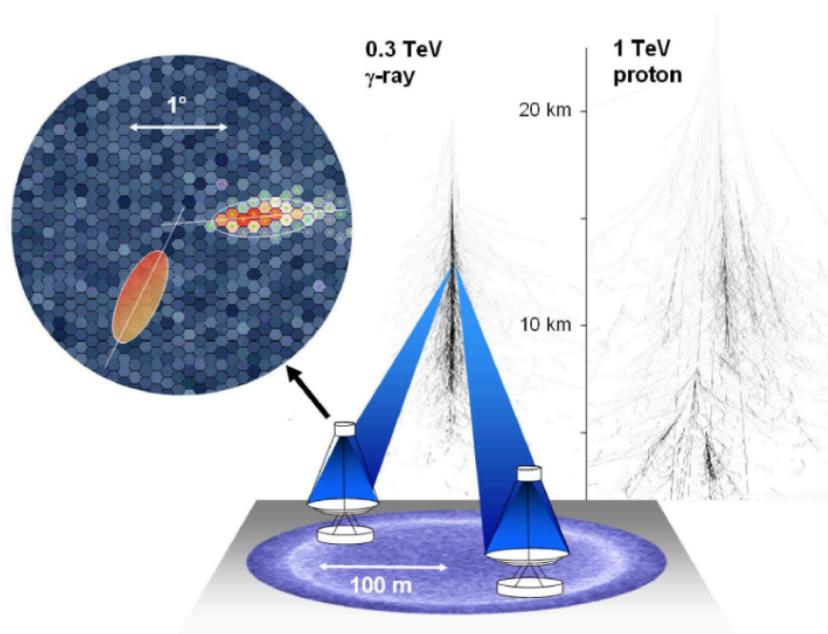


図 2.5: ステレオ観測の原理を示した模式図である [30]。0.3TeV のガンマ線によるシャワーを示しており、カメライメージはガンマ線由来の電磁シャワーのものである。比較のために、右側に 1TeV の陽子によるシャワーの発達も示している。二つの望遠鏡で得られたシャワーイメージより、入射したガンマ線の方向を得る事ができる。

に位置し、12m 望遠鏡 4 台で北天を観測する。これら現行の IACT により現在までに 100 を超える TeV ガンマ線源を発見している。

第 3 章

Cherenkov Telescope Array 計画

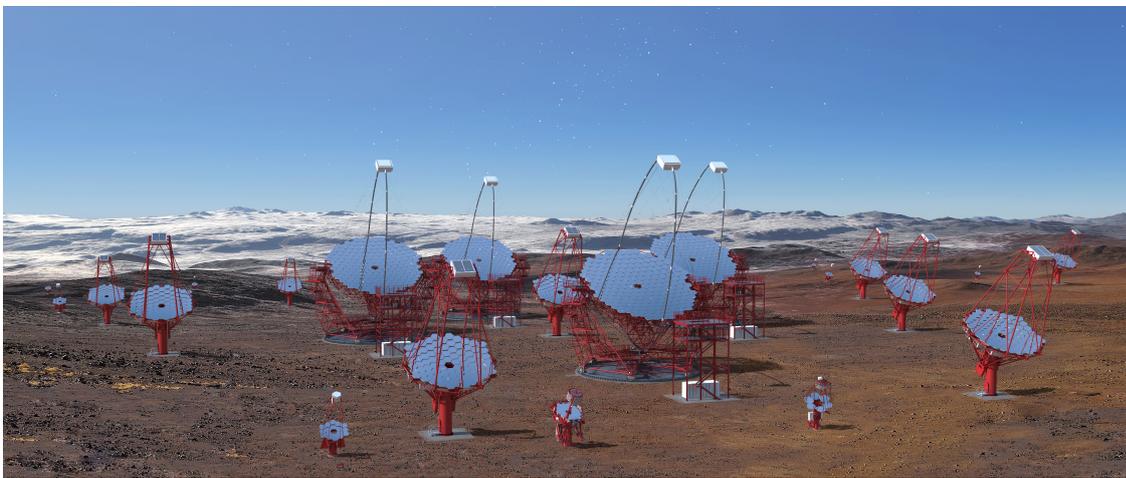


図 3.1: Cherenkov Telescope Array の概念図 [33]。図中央から大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST)、図右側に、中口径望遠鏡 (Medium-Sized Telescope, MST)、図下側にあるのが小口径望遠鏡 (Small-Sized Telescope, MST) である。

次世代国際ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array は現行の解像型大気チェレンコフ望遠鏡に比べ 10 倍以上の感度での観測を目指す、29 ヶ国 1200 名以上からなる国際共同計画である。CTA 計画では南半球と北半球にそれぞれ 1 つずつ、計 2 つの観測サイトを持ち、大中小の 3 種類の観測エネルギー帯域の異なる望遠鏡をおよそ 10 km^2 のエリアに数十台並べることで高感度な観測を可能にする。図 3.1 がその完成予想図になる。

3.1 CTA で狙う物理

現行のプロジェクトに対して飛躍的な発展が期待される CTA 計画では、観測対象の物理の中でいくつかを重点的に研究を進めていく CTA key science project として指定している。代表的なものをまとめると

- (1) 宇宙線の起源の特定

- (2) ブラックホール近傍の物理と粒子加速の性質
- (3) 標準模型を超えた物理の探索

に分けられる。上の3項目は一章で述べた VHE ガンマ線での物理に関連している。(1)は銀河系内、系外の加速起源候補天体の観測によって行われる。(2)は AGN やガンマ線バーストの観測によって行われる。(3)は、暗黒物質探索などによって行われる。以上の物理は以下の目標性能によって達成することが見込まれており、CTA で解明する新しい物理に対して期待がされている。

3.2 目標性能

CTA が達成する目標性能の代表的な項目について、説明する [31]。

- ガンマ線強度に対する感度 (10 倍向上)
CTA は現行の IACT よりも全てのエネルギー領域で約 10 倍優れた感度を目指す。特に 300GeV - 3TeV では 50 時間の観測により 1mCrab($10^{-14}\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) の感度を達成する [31]。図 3.2、図 3.3 に CTA の目標感度を示す。
- エネルギー帯域 (20 GeV-100 TeV)
CTA では大・中・小の3種類の口径の望遠鏡を建設することで、20 GeV - 100 TeV のおよそ 4 桁にわたる幅広いエネルギー範囲で VHE ガンマ線の観測を目指す。20GeV 領域では、EBL(Extragalactic Background Light) によるガンマ線吸収の効果が高エネルギーのガンマ線と比べると少ない。この低いエネルギー閾値により、CTA では $z\sim 2$ 程度までの活動銀河核、ガンマ線バーストの観測が可能となる。
- 角度分解能 (3 倍向上)
現行の望遠鏡では、角度分解能は 0.1 度 (6 分角) 程度である。CTA では多くの望遠鏡により、ひとつのガンマ線シャワーを観測することが可能になり、より高い角度分解能 (1-2 分角) を達成できる。この高い分解能により、天体の詳細なガンマ線放射領域の空間分布を観測することができる。ひいては宇宙線加速源の特定にもつながるであろう。

3.3 CTA サイト

CTA は全天観測を行うため、北半球、南半球二つのステーションから構成される。北サイトはスペイン領カナリア諸島ラ・パルマ島にある Observatorio del Roque de los Muchachos に建設が決まっており、南サイトはチリのパラナルが選ばれている。また CTA 本部はイタリアのローニャ大学に設置し、CTA の観測データセンターはドイツの Zeuthen にある DESY に設置することが決まっている (図 3.4)。

3.4 望遠鏡デザインと配置

20GeV-100TeV という 4 桁に及ぶ広いエネルギー領域でのガンマ線観測を実現するために、このエネルギー領域の低、中、高エネルギー領域それぞれに特化した 3 種類の口径の望遠鏡がある。

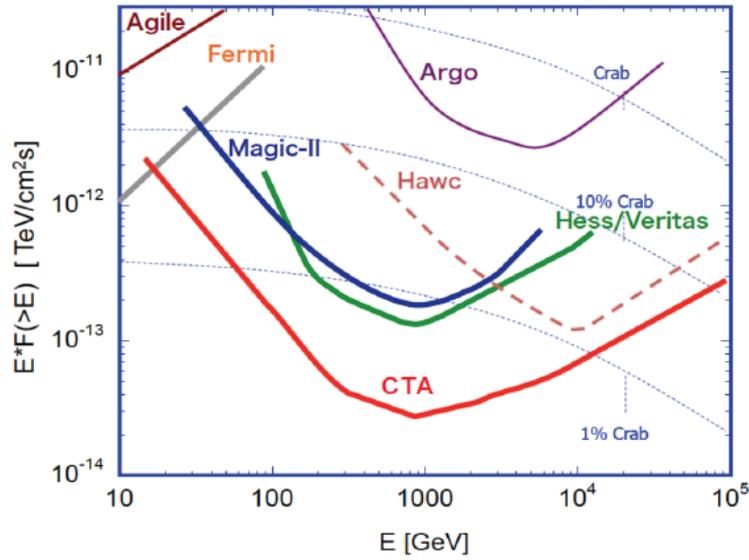


図 3.2: CTA の目標感度曲線と MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS の達成積分感度 [31]。CTA、MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS は観測時間 50 時間で計算している。

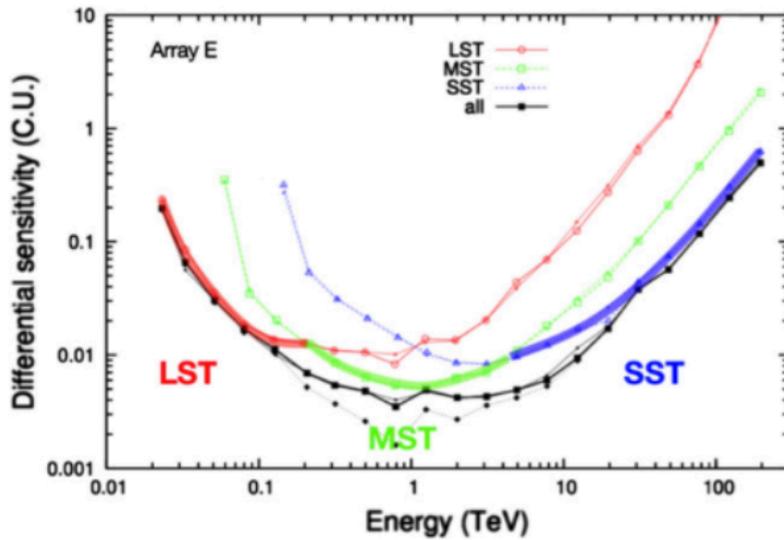


図 3.3: 望遠鏡毎の微分感度曲線 [32]。低エネルギー側は LST の寄与が大きく、高エネルギー側では SST の寄与が大きい。



図 3.4: 南北の CTA サイト地、本部、そしてデータセンターの位置を示す地図 [33]。

それぞれについて説明する。

3.4.1 大口径望遠鏡

20GeV から 1TeV の低エネルギー領域をカバーする。口径は 23m であり、低エネルギー領域のガンマ線の観測は、シャワーにより発生するチェレンコフ光の光量が小さいため、集光面積を特に大きく取流必要がある。そのため、高反射率・高集光効率の鏡面、高光検出効率の検出器を揃える対策を施している。また、閾値を下げるため、夜光の影響を抑える必要があるため、主鏡面構造体は集光される時の光の同時性を重要視した放物面になっている。詳細は次章で説明する。

3.4.2 中口径望遠鏡

100GeV から 10TeV の中エネルギー領域をカバーする (図 3.5)。鏡の口径は 12m であり、HESS、VERITAS 望遠鏡と同サイズで、これを 20-30 台配置する。銀河面スキャン、全天スキャンを行うため、視野を出来るだけ広くすることが求められている。そのため、主鏡面構造体の光学系はイメージの時間的同時性を犠牲にする一方、広い視野でイメージを得ることが可能な Davis-Cotton を採用しており、視野が 8 度となっている。

3.4.3 小口径望遠鏡

1TeV から 100TeV の高エネルギー領域をカバーする (図 3.6)。鏡の口径は 4m であり、高エネルギー領域のガンマ線観測では、シャワーが生成する大気チェレンコフ光は光量が大きいためバックグラウンド除去能力は、低エネルギー側ほど厳しく求められず、感度を制限しているのは、バックグラウンドではなく統計量である。到来頻度の低さを補うために、口径は小さいが、望遠

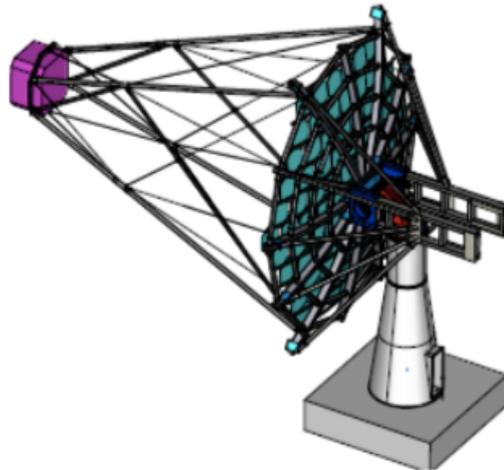


図 3.5: DESY により設計された中口径望遠鏡。口径 12m、Davies-Cotton 光学系である [31]。

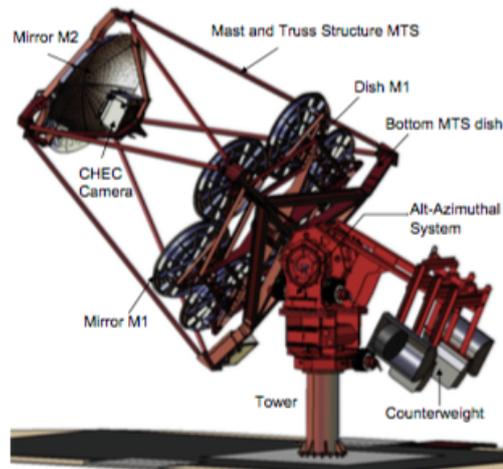


図 3.6: 小口径望遠鏡の一種である Gamma-ray Compact Telescope の 4m 口径望遠鏡の概念図 [31]。他にも数種類の開発が進んでいる。

鏡を多数配置して統計量を稼ぎ、感度を上げる。ガンマ線の最高エネルギー領域を観測することで、宇宙線のスペクトルが変化する 1PeV 領域の宇宙線加速源と加速機構の解明を狙う。

銀河面を観測するのに有利な南半球のステーションでは、広いエネルギー範囲を覆うことが必要のため、大 (23m)、中 (12m)、小 (4m) 口径の三種類の口径の望遠鏡を設置する。そのため南半球のステーションは約 10km^2 の広さになる。一方銀河面の観測に限られる北半球のステーションにおいては、低いエネルギーレンジ (20GeV から 10TeV) に観測の重きがおかれ、大 (23m)、中 (12m) の二種類の望遠鏡群から構成され、約 1km^2 の広さになる。

3.4.4 アレイ配置

大中小の望遠鏡をどのように配置するかは、費用と狙う物理のトレードオフである。銀河面を広く観測できる南半球のサイト (図 3.8) では、広いエネルギー範囲を覆うことが必要のため、大 (23m)、中 (12m)、小 (4m) 口径の三種類の口径の望遠鏡を設置する。北半球のサイト (図 3.7) には、大、中を設置し、20GeV から 10TeV の低いエネルギー範囲に重点を置いている。

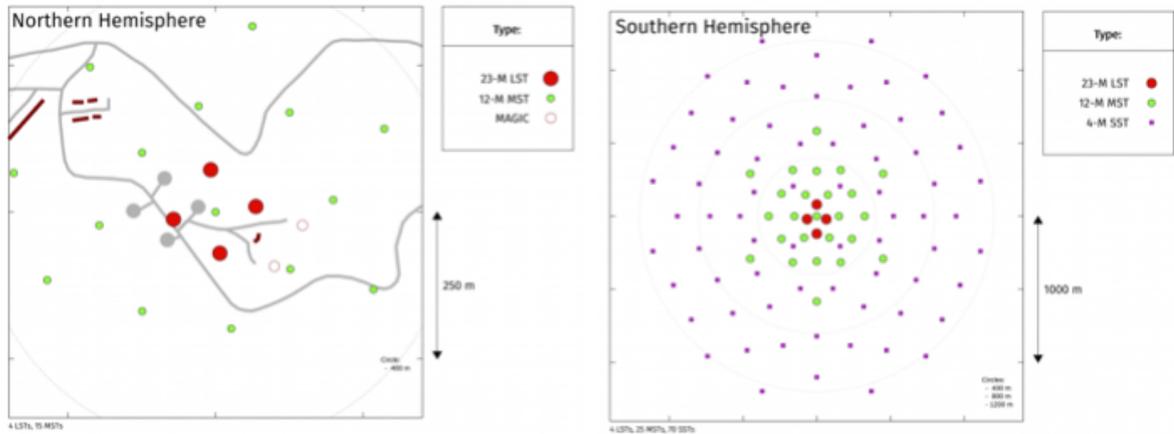


図 3.7: 北サイトの望遠鏡配置図 [33]。

図 3.8: 南サイトの望遠鏡配置図 [33]。

第 4 章

CTA 大口径望遠鏡光学系

大口径望遠鏡 LST は CTA を構成する望遠鏡の中で最も低エネルギー側 (数十 GeV から数 TeV 領域) を狙う。低エネルギー領域は他の望遠鏡が狙うエネルギー領域よりも宇宙線によるバックグラウンドの影響が大きく、高いバックグラウンド除去能力が必要である。IACT はチェレンコフ光のイメージを用いてイベントセレクションを行うため、光学系の性能が非常に重要になってくる。そのため、今まで以上の高反射率、高精度の反射鏡、高量子効率の検出器の製作が行われ、また望遠鏡の大型化に伴う望遠鏡支持構造やドライブシステムの開発を行なっている。日本グループの主な貢献は LST 開発である。光学系については分割鏡製作や分割鏡制御システム開発、光検出器である光電子増倍管の前面で光を誘導するためのライトガイドの開発等の部分を日本が担当している。本章では LST の光学系を構成するハードウェアについて述べる。

4.1 LST 光学系仕様

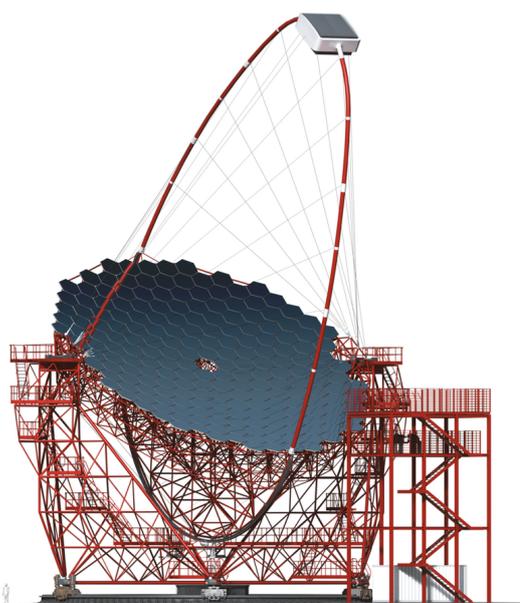


図 4.1: 大口径望遠鏡 LST の概念図 [33]。

LST(図 4.1) は、主鏡口径が 23m で、その総有効面積が 368m^2 にもなり、CTA の望遠鏡の中で最高の集光能力を誇る。これは、現在稼働中の MAGIC(240m^2) と比べて、1.5 倍である。この圧倒的な集光能力により、シャワー由来の大気チェレンコフ光量の少ない低エネルギー側のイベントセレクションを行う。それにより、エネルギー閾値を下げることを可能とする。VHE ガンマ線において低エネルギー側を観測するというのは、より遠くの宇宙を見ることができるということを意味する。また LST は構造体に軽量で丈夫なカーボンファイバーチューブ (CFRP) を採用することで、全体の総重量を 100 トン以下に抑え、20 秒以内で 180 度回転を行うことを目指している。この結果、銀河系外のガンマ線バーストのガンマ線領域における地上での初検出も実現可能になるのではないかと期待されている。表 4.1 に LST の仕様についてまとめる。

表 4.1: LST 光学系仕様 (一部抜粋)

主鏡口径 (D)	23 m
総有効面積	368 m^2
焦点距離 (f)	28 m ($f/D = 1.2$)
反射面形状	放物面
視野	4.5°
カメラ Pixel サイズ	50 mm

4.2 主鏡光学系

4.2.1 放物面鏡

大気チェレンコフ光を集光するための望遠鏡光学系として放物面鏡が採用されている。放物面は光線が焦点に至るまでに走る距離 (光路長) が等しいため、光の同時性を保つことができる。LST では夜光による雑音をカットするため、チェレンコフ光由来の信号の積分時間をできるだけ短くする必要があり、同時性を有する放物面鏡を採用している。LST に求められる主鏡は口径 23m と大きいため、一枚鏡で精度よく製造することは難しい。そのため、198 枚の球面分割鏡により構成されている (図 4.2)。放物面は、図 4.3 のように回転軸中心が最も曲率半径が小さく、回転軸から離れるにつれて曲率半径が大きくなる。そのため、LST 放物面は、放物面位置での曲率半径に適した、曲率半径を持つ球面分割鏡を配置することが求められる。

放物面の幾何光学

放物線は軸の両側が対称であり、内側部分で光線を反射させると、軸に平行に入射した光線は、反射されて一つの焦点に集まるという性質を持っている。そこで軸を回転軸として、この放物線を 360 度回転すると、一つの面ができる、これが放物面である。球面鏡の場合は、軸に近い光線が反射した場合のみ、焦点に集まり、軸を遠ざかっている光線の反射したものは焦点に集まらない球面収差と呼ばれる現象が起こる一方で、放物面鏡では、反射光線は全て焦点に集まる。つまり放物面の場合球面収差はなく、一点によく光線が集められるという特徴がある。放物面鏡ではこの特徴を利用し集光する。

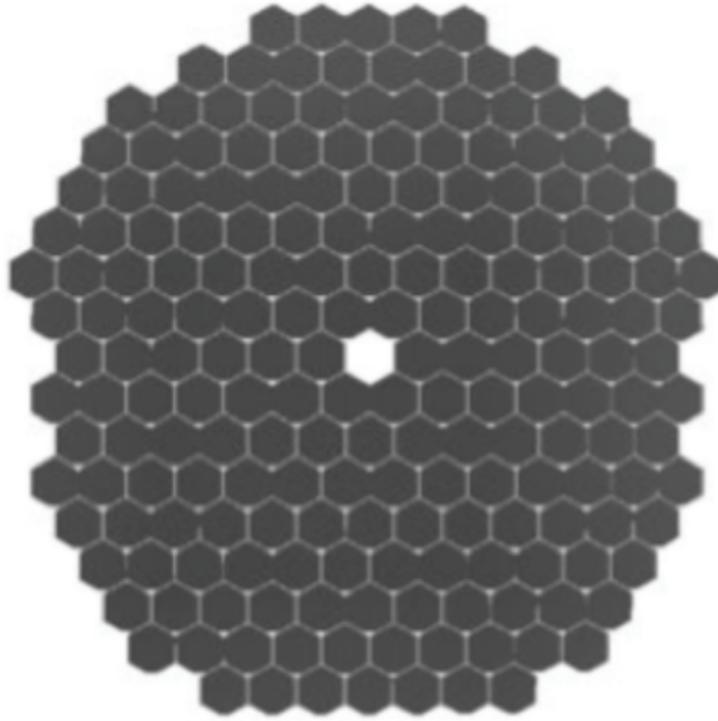


図 4.2: 分割鏡の放物面への配置図 [34]。

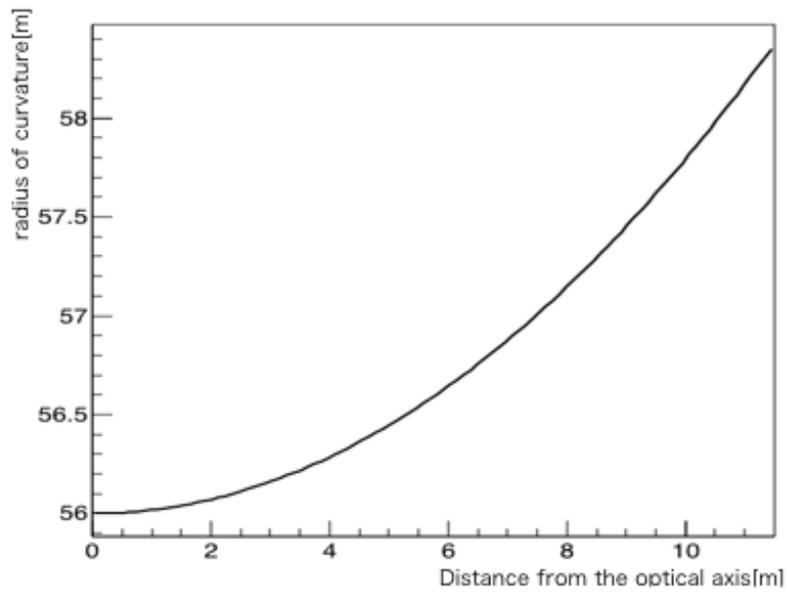


図 4.3: 放物面の曲率半径と光軸からの距離の関係。光軸から離れるほど、曲率半径が大きくなっている。

4.3 分割鏡

従来の10倍以上の感度を追求するCTA計画では、大口径望遠鏡の主鏡に対して高い反射率と集光率が要求されている。大口径望遠鏡は約200枚の分割鏡から構成される放物面鏡で、一枚の分割鏡は対辺1.51m、質量約50kgの六角形状の分割鏡である(図4.4)。また放物面の曲率に合わせるために、曲率半径は56-58.4mの分割鏡が必要となる。望遠鏡主鏡は放物面なので、分割鏡は非球面鏡であることが望まれる。しかし、非球面鏡は費用がかかるという点がデメリットがある。そのため、非球面鏡より費用が少なく済む球面鏡の形状で製造を行っている。その分、放物面の曲率半径に対応するために、分割鏡の曲率半径のパターンを三種類用意している。

個々の分割鏡の裏面には図4.5のように3つのパッドが取り付けられている。このパッドはアクチュエータを取り付けるためのものである。取り付ける3点のアクチュエータのうち1点は2軸方向、1点は1軸方向に対する自由度を持っており、分割鏡動的制御システム(Active Mirror Control, AMC)によって鏡面の傾きのリアルタイムな微調整が可能となる。AMCについては後述する。



図4.4: 分割鏡：表面、分割鏡は専用のラックに収納している。

分割鏡構造は、図4.7に示すように、3mm厚ガラスシート、60mm厚アルミハニカム、3mm厚ガラスシートのサンドイッチ構造になっている。鏡面は5層コーティング(Cr、Al、SiO₂、HfO₂、SiO₂)のスパッタリングが施されており、高い集光率や反射率を実現すると同時に、長期間の安定した使用を可能にするために表面が強固になるように設計されている。



図 4.5: 分割鏡：裏面 [35]。アクチュエータを取り付けるためのパッドが取り付けられている。

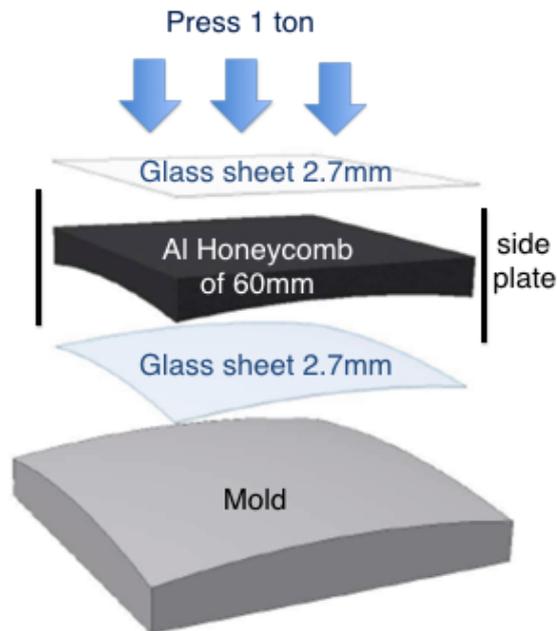


図 4.6: 分割鏡の製造方法の概念図 [36]。

4.3.1 製造方法

分割鏡の製造手法は「cold slump」と呼ばれる手法である。LST は北と南のサイトで合計 8 台建設予定であり、そのために必要な分割鏡は 1800 枚にも及ぶ。「cold slump」手法は MAGIC 望遠鏡用の鏡を 100 枚以上作った実績のある手法であり、安価かつ大量生産を可能にする。製造の際には、モールドと呼ばれる曲率を持った型で、球面鏡形状を作る。このモールドの値を複数用意することで、連続的に変化する放物面の曲率に分割鏡の曲率を対応させている。現在使用して

いるモールド数は3つで、曲率半径が短いものから、56.4m(A)、57.2m(B)、58.0m(C)となっている。茨城県つくば市の三光精衡所との共同開発を行い、製造を進めている。基本作業工程は以下のようなになる。

- (1) 鏡面となるガラスシートを洗浄後、ガラス鏡面に Cr と Al の反射膜、 SiO_2 、 HfO_2 、 SiO_2 の保護膜をスパッタリングすることにより生成する。
- (2) 反射面・保護膜が生成されたガラスシートを反射面がモールドと接するように、モールド上に設置・固定する。これにより、モールドの形状を写しとる。エポキシ接着剤を裏面ガラスシートに塗布し、その上にアルミハニカム 60mm 厚を接着する。
- (3) 接着剤を塗布した別のガラスシートをアルミハニカムの上に置き接着する。サンドイッチ構造とし、上から1トンの荷重をかけプレスし温度を上げた状態で数時間固定する。この工程により、分割鏡構造が完成する。
- (4) アクチュエータと接続する SUS410 150mm ϕ パッドを鏡裏面にエポキシで高温接着した上、シリコンで周囲を保護する。また、鏡裏面はプライマー処理後、太陽光による急激な温度変化による劣化を防ぐため、フロン系塗料で白く塗装を施す。

4.3.2 要求仕様

LST の要求値を満たすために分割鏡についても仕様が定められている。各要求項目について述べ、仕様値についてまとめる。

- 外形

対辺間の距離が 1510 mm の六角形。また頂点の一つは、AMC 用 CMOS カメラを設置するために高さ約 10 cm の三角形の形で切除される。

- 重量

LST は突発天体に対応するために 20 秒以内に 180° 回転するという要求がなされている。この高速回転を可能にするために、LST の重量を軽量化する必要がある。そのため分割鏡一枚あたりの重量は少なくとも 50 kgf 以下には抑えることが要求されている。分割鏡の構造にはハニカム構造を採用することにより強度を保ちながら、重量を 50 kgf 以下に抑えている。

- 厚み

分割鏡の厚みに対する仕様値は 80 mm 以下である。LST 用分割鏡では、2.7 mm 厚ガラスシート、60mm 厚アルミハニカム、2.7mm 厚ガラスシートのサンドイッチ構造で作られている。

- 結像性能

LST 焦点面カメラの 1 Pixel が直径 50 mm (0.1° 相当) であり、その $1/3$ の大きさの直径 16.6mm 以内に集光した光の 80 % が含まれることが要求される。このときの光が 80% 含まれる直径のことを「D80」と定義し、評価パラメータとして用いる。

- 焦点距離

焦点距離は、28 m から 29.2 m の間で要求される。これは LST の主鏡が放物面の形状を

とるため、放物面は中心から外側に向かうにつれ、その曲率半径は大きくなる。そのため分割鏡は、中心付近に配置される LST の焦点距離である 28 m から外側に配置される 29.2 m までの幅を持った焦点距離で作られる。

- 耐水性

望遠鏡が雨に曝され、分割鏡内部に水が溜まると重量増加だけでなく、内部の劣化、最悪の場合鏡の破損を招く恐れがある。そのため簡単に水が入らないように外部は密閉され、仮に水が入った場合も内部ハニカムのスリット、水抜き用の穴を通り外に流れ出る作りになっている。

- 反射率

観測されるチェレンコフ光の波長である 300 nm から 550 nm において 85 % 以上の反射率が求められる。鏡表面に特殊なコーティングを施し、その厚さを最適化することで反射率を実現する。

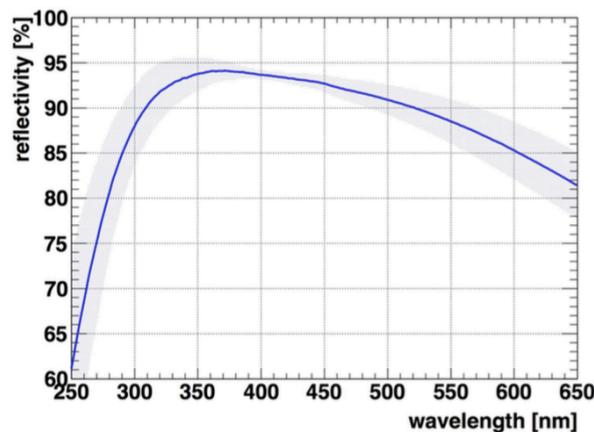


図 4.7: 分割鏡の反射性能。灰色のバンドはそれぞれの波長でのバラつき (分散) を表す。

- 反射率経年変化

CTA の望遠鏡は屋外で運用することになるためサイトの環境変化による反射率低下が考えられる。高い反射率を維持するためにも年 1% 以内の低下で抑えることが求められる。

- 運用期間

LST 用分割鏡は 10 年以上の屋外運用が要求され、強固で頑丈な分割鏡が求められる。

4.4 能動的ミラー制御システム (Active Mirror Control, AMC)

LST は口径 23m、焦点距離 28m と巨大な建造物のため、自重や風圧、温度変化によって構造体に天頂角に依存する歪みを生じさせる。この歪みにより、放物面に最適配置した分割鏡の位置が期待する放物面からずれてしまう。そこで構造体の歪みを補正し、分割鏡を常に最適配置の状態に保つシステムが能動的ミラー制御システム (Active mirror control, AMC) である。望遠鏡の光軸中心から、焦点面に向かってレーザーを打ち、分割鏡に取り付けた CMOS カメラにそのレーザーを認識させる。そして、常にレーザーがカメラ上で同じ位置になるように、分割鏡裏面に取

り付けられたアクチュエータにフィードバック処理を行い、分割鏡一枚一枚の方向を常に正しく補正する。この AMC システムにより、より高精度かつ短時間に望遠鏡を方向に対して、補正を施すことが可能となり、突発天体観測などに対して威力を発揮すると期待されている。

4.5 ライトガイド

チェレンコフ光を検出器へと導く光学素子 (図 4.8)。ライトガイドを PMT に取り付けることにより PMT 間に生じるデッドスペースを解消する。またコーンの形状によりある一定の入射角以上の光子の検出効率を急激に下げることが可能で、夜光などの視野外の光をカットできる。内側の側面には 3M 社製の「ESR」と呼ばれる誘電体多層膜を圧着することで、300mm 以上の波長での反射率 96% 以上を達成している。

4.6 カメラ窓

CTA 計画は 2020 年から約 20 年間の運用が予定されており、装置全体がその期間正常かつ最適な状態で稼働することが求められている。装置の各部分に対しても耐用性の要求仕様は設定されているが、カメラの前方にカメラ窓を設置することで、焦点面検出器の表面を雨風や砂から保護することを予定している (図 4.9)。CTA 計画で用いる焦点面検出器は直径が大きいので、大きさに対応するカメラ窓を作成するにあたって素材の強度が重要となってくる。また焦点面カメラの前方に設置するため、400 nm 以下の紫外線も十分に透過する性質が要求される。そこで、先行研究である MAGIC で使われていた素材である PlexiGlass に代えて新たに検討されているのが、三菱レイヨン社製のアクリル樹脂板、アクリライトである。現在三光精衡所と共同開発を行っている。

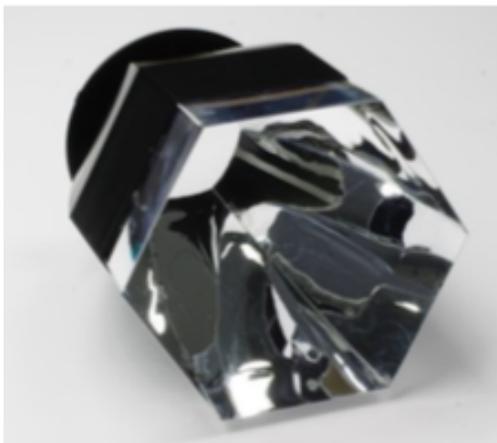


図 4.8: LST 用ライトガイド



図 4.9: 三光精衡所と共同開発を行ったカメラ窓。

第 5 章

LST 用球面分割鏡の性能評価

5.1 目的

本研究の目的は CTA-LST 用分割鏡の全数測定とデータベース化を行い、得られた光学パラメータを元に分割鏡配置の最適化を行うことである。LST 放物面主鏡では 198 枚の分割鏡を使用する。分割鏡を配置する際に、放物面のどこに配置するかを決定するため、すべての分割鏡について必要なデータを含む資料が必要となる。考慮される特性としては結像性能と曲率半径がある。この章ではこの二つのパラメータについての性能評価手法について述べる。次の節では測定手法を説明し、後の節で実際の測定の実験セットアップ、結果について述べる。

5.2 性能評価方法:2f 法

5.2.1 球面鏡の幾何光学

図 5.1 のように球面鏡の曲率半径を R 、焦点距離を f 、分割鏡の光軸からの距離を h 、入射した平行光線の鏡上での位置と焦点を結ぶ線と光軸のなす角を θ とすると次のような関係式が成り立つ。

$$h = R\sin\theta = (R - f)\sin 2\theta \quad (5.1)$$

光軸に近い場合を考えると θ が微小のため、

$$\sin\theta \sim \theta \quad (5.2)$$

$$\sin 2\theta \sim 2\theta \quad (5.3)$$

と書けるため、

$$h \sim R\theta = (R - f)2\theta \quad (5.4)$$

$$R \sim 2f \quad (5.5)$$

と近似できる。よって $2f$ は光軸に十分近い位置において曲率半径を表している。

5.2.2 2f 法原理

球面鏡の場合、その曲率半径は焦点距離の 2 倍 ($2f$) に相当するので、理想的な球面では曲率半径分離れた点光源の光は鏡面で反射して同じ光路を辿る。また、鏡面に平行に入射した光は反射

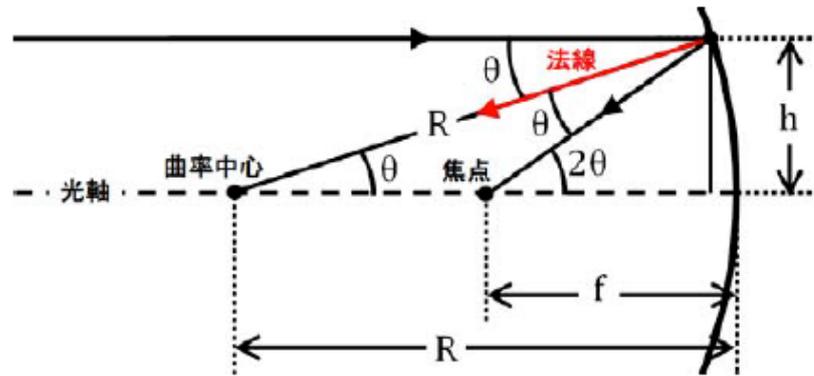


図 5.1: 平行光に対する球面鏡の反射の図 [37]。

して焦点を通る。2f 分離れた点光源の反射した像の大きさを測ることでその集光性能を測るのが 2f 法の基本原理である。2f 法で評価する分割鏡光学性能パラメータは以下の二つである。

- 曲率半径
 - 焦点距離は、28 m から 29.2 m の間で要求される。これは LST の主鏡が放物面のため、中心から外側に向かうにつれ、その曲率半径は大きくなる。
- 結像性能 (Point Spread Function, PSF)
 - LST 焦点面カメラの 1 Pixel が直径 50 mm であり、焦点位置において、その 1/3 の大きさの直径 16.6 mm 以内に集光した光の 80 % が含まれることが要求される。このときの光が 80 % 含まれる直径のことを「D80」と 3 章で定義した。しかしこの定義は、焦点位置での定義であるので、焦点位置の二倍の位置で測定を行う 2f 測定では得られるスポットサイズが焦点位置と比べて二倍になる。そのため、D80 の定義を再定義する。2f 測定での結果に対しては、カメラの 1Pixel の 2/3 の大きさである 33.3mm を「D80」の仕様として用いる。

5.2.3 測定

実際に行った 2f 法は写真撮影を用いた手法で、光源には点光源として LED を置き、反射された像をスクリーン上に映し出す。スクリーン上に作られた像を目で見、広がりが一番小さいと思われる位置を基準点とし、± 0.45 m を 0.15 m 間隔 (計 7 点) で光源が「ON」の画像と「OFF」の画像を CMOS カメラで撮影する。分割鏡の曲率半径の仕様範囲は決まっているが、ある一枚においてその値は既知ではないので、広がり小さい点を探す必要が有る。目視で決めた点からオフセットを取って測定することにより、スポットの広がり (D80) が最も小さい位置を決めることが可能となった。光源由来以外の光 (バックグラウンド) を取り除くためこの二枚の画像を用いて、解析により、「ON」の値から規格化定数をかけた「OFF」の値を差し引きし、D80 を決める。解析手法については次の節で述べる。

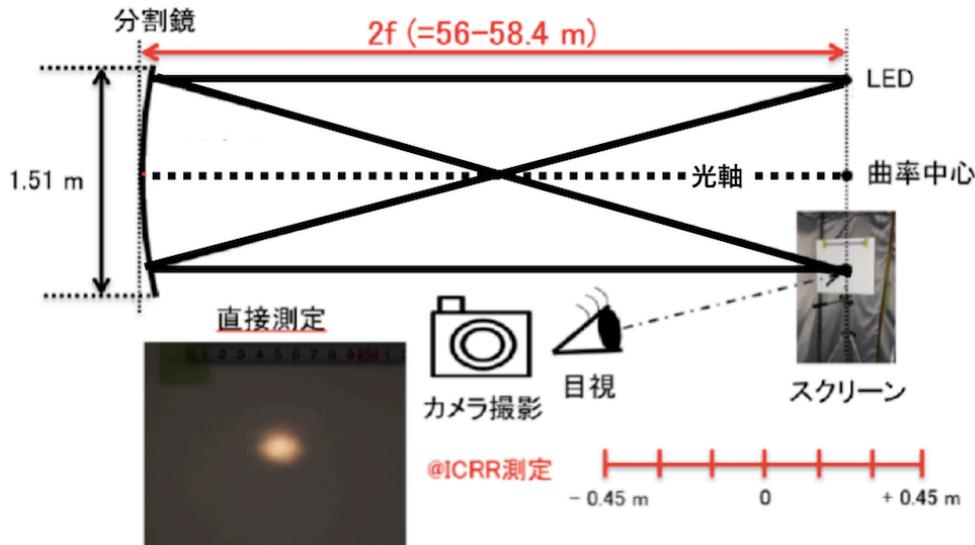


図 5.2: 2f 法を用いた写真撮影測定の模式図 [37]。

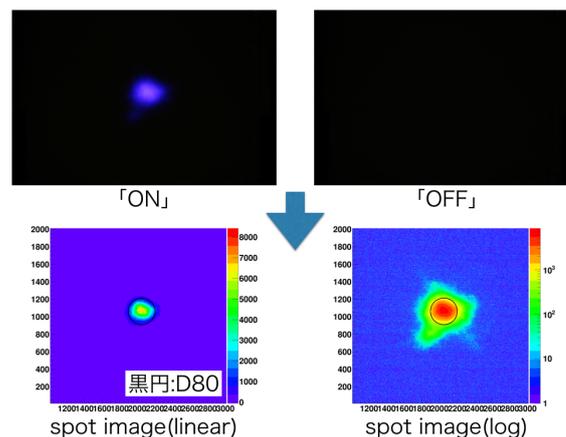


図 5.3: 2f 法を用いて撮影したスポットの写真 (上段) と解析後のスポットイメージ (下段)。

5.2.4 撮影画像の解析手法

画像解析には大きく分けて 3 段階のステップがある。以下ではそれぞれについて述べる。

(1) 撮影画像からデータ抽出

– RAW 画像の現像

CMOS カメラにより撮影された画像は RAW 画像として保存する。RAW 画像とはそれぞれのピクセルに入ってきた光を電気信号に変えたときの ADC 値のみが記録されているファイル形式である。RAW 画像を用いるメリットとしては記録された bit 数の光量をそのまま保存しているため、暗部の階調が潰れなくスポットの「裾」の解析が可能なことや、JPEG に代表されるような不可逆圧縮がないので画像劣化がない、実際の

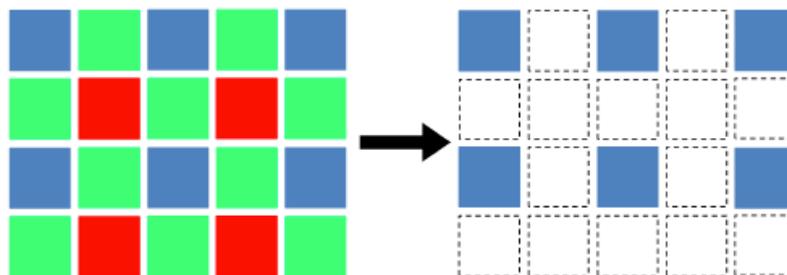


図 5.4: バイヤー配列からの青色ピクセル抽出の模式図 [37]。

入射光量が線型に記録されているので物理量に直しやすいといったことがある。RAW 画像からデータを取り出す (現像) ことによって実験で得られた光量を正しく得られる。RAW 画像を現像する方法として、dcraw[38] と ImageMagick[39] という 2 種類のフリーソフトを利用した。方法としては dcraw で raw 画像を現像、ImageMagick を用いて天文分野でよく用いられるデータ形式である FITS 形式に変換するという順に行った。

– バイヤー配列からの抽出

FITS 形式に変換した RAW 画像の中には緑、赤、青の情報を持った CMOS のピクセルがバイヤー配列で並べられている。一般的に色を認識できないイメージセンサーの前にカラーフィルターを置くことにより、各ピクセルは色の情報を得ている。バイヤー配列とは緑、赤、青のフィルターを 2:1:1 の比率で同じ色が隣合わないように並べた配列の方法である。バイヤー配列で並べられた各ピクセルがそれぞれのフィルターに対応した色のみに感度を持つようになる。

解析ではこの 3 色のうち、地上に届くチェレンコフ光の波長に近い青色のみを抽出して解析を行う。ピクセルサイズと実際の長さの対応付けは DS9[40] という FITS 形式のデータを扱えるフリーソフトを使用し、スクリーンに貼ったメジャーの値を読み取り行った。

(2) バックグラウンド処理

分割鏡のスポットサイズを得るためには、分割鏡からの反射光のみを用いて解析を行う必要がある。そのため分割鏡からの反射光以外の光、いわゆるバックグラウンドとなる光をスクリーンに映った反射像から取り除いて解析を行うために、撮影の際はスポットが映っている「ON」の画像と LED を消した状態での「OFF」の画像の二種類のデータを取得した。得られた ON と OFF の画像を差し引きすることにより、分割鏡からの反射光のみを得ることができる。しかし、単純に 1:1 で差し引きするのではない。ON と OFF の画像撮影の際に時間差があることにより、起こりうるバックグラウンドの時間変動を考慮に入れるため、ON から差し引く際に OFF 画像に規格化定数 A をかけて差し引く。規格化定数 A の求め方を以下に示す。

図 5.5 で示した解析領域の端から L 字型の範囲を撮影画像のバックグラウンド領域とした。スポットサイズよりも十分離れた位置に領域を取っているため、この領域での光量は

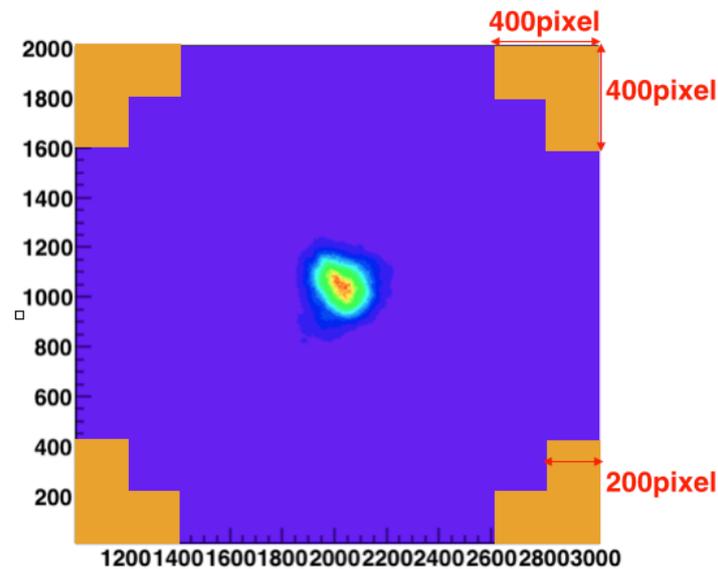


図 5.5: 撮影画像から 2000 ピクセル × 2000 ピクセルの解析領域を抜き出した図。オレンジ色の領域は規格化定数 A を得るために用いたバックグラウンド領域である。

分割鏡からの反射光ではなく。バックグラウンド光によるものだと考えられるからである。ON、OFF 両画像の画像の中で、このバックグラウンド領域を用いて OFF に対する規格化定数 A を決める。バックグラウンド領域内の総ピクセル数を M、領域内の任意のピクセルを m とし、そのピクセルにおける ON、OFF 画像の光量を $I_{ON,m}$ 、 $I_{OFF,m}$ とし、規格化定数を以下の式で求める。

$$A = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{I_{ON,m}}{I_{OFF,m}} = \left\langle \frac{I_{ON,m}}{I_{OFF,m}} \right\rangle \quad (5.6)$$

そして、解析領域内の各ピクセルに対して以下の計算を行う。

解析領域内の任意のピクセルを n とし、そのピクセルにおける光量を $I_{A,n}$ とすると、

$$I_{A,n} = I_{ON,n} - A \times I_{OFF,n} \quad (5.7)$$

$I_{A,n}$ は ON 画像から規格化定数 A をかけた OFF 画像を差し引くことで求められており、分割鏡からの反射光の光量に相当している。

(3) スポットサイズ (D80) の算出

– 光量の重心座標の計算

バックグラウンド処理後の解析画像からスポットの光量 I_A の重心座標 (x_G, y_G) を求める。画像中心から 750 ピクセル × 750 ピクセルの領域を重心計算に用いる。重心領

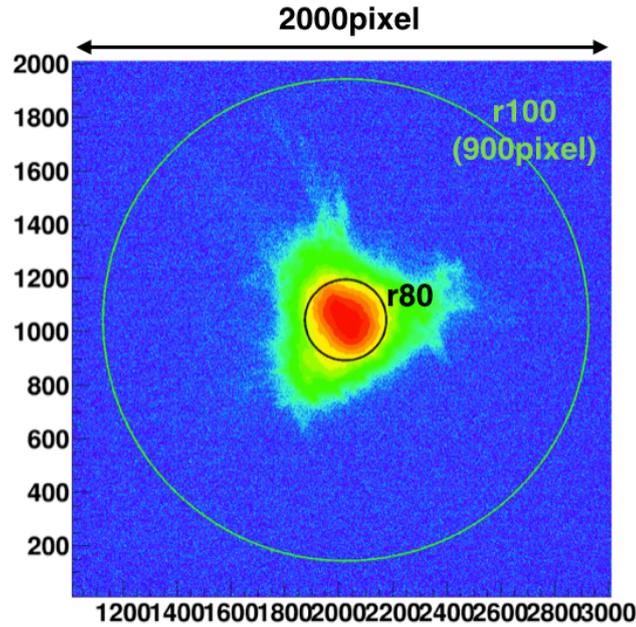


図 5.6: 実際の画像で算出した D80 のスポットに対するスケール。黒線は半径 r_{80} の円、緑線は半径 r_{100} の円を示している。

域内の総ピクセル数を N とすると、

$$x_G = \frac{\sum_{n=1}^N I_{A,n} x_n}{\sum_{n=1}^N x_n}, \quad y_G = \frac{\sum_{n=1}^N I_{A,n} y_n}{\sum_{n=1}^N y_n} \quad (5.8)$$

– r_{100} の計算

求めた重心座標 (x_G, y_G) を用いて十分全光量が入ると思われる円の半径 r_{100} を定義する。本解析では r_{100} の値を 900 ピクセルに固定している。 r_{100} 内に含まれる光量を分割鏡から反射された全光量と定め、 $I_{A,100}$ と表記する。反射光の 80% は $I_{A,80}$ と表し、この時の円の半径は r_{80} であり、スポットサイズの指標として用いている D80 は r_{80} の二倍の値である。

– D_{80} の計算

光量の計算は任意の半径 r までの微分値と積分値を求めることにより得られる。光量の積分値と微分値の求め方について説明する。

$4\pi r^2 dr$ という微小シェルを考える、この微小シェルが微分値に相当する。(ref) $dr=1$ ピクセルとし、この微小シェルに含まれる光量を動径方向に足し上げていく、これが積分値に相当する。この足し上げた光量が全光量の 80% を含む $I_{A,80}$ となる時の半径 r_{80} を求める。

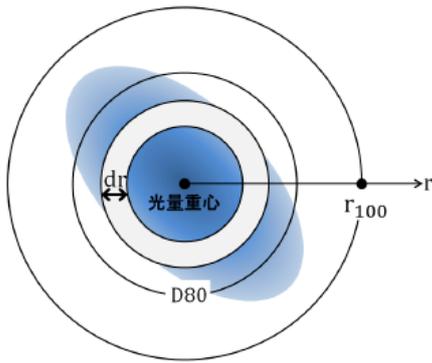


図 5.7: D80 の計算方法の模式図 [37]。

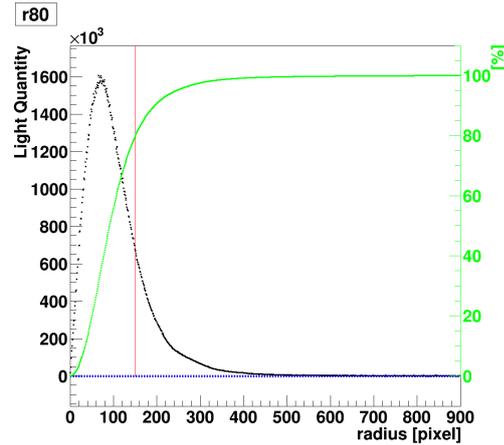


図 5.8: 縦軸は光量、横軸は光量の重心からの距離、単位はピクセル数となっている。黒点は微小シエルの光量、緑線は光量重心から、あるピクセルまでの光量の積分値の $I_{A,100}$ に対する割合を示している。

5.3 実験セットアップ：東京大学宇宙線研究所での 2f 測定

2f 測定実験を行うことができるためには、バックグラウンド光が少なく、かつ定常光であることと、曲率半径を得るために約 60m の直線距離を取ることができるという条件がある。この条件を満たすことは容易ではないが、先行研究 [35] により、東京大学宇宙線研究所 6 階廊下環境がこの条件を満たしていることが示された。以下にその実験セットアップを示す。

(1) 光源

光源には青色 LED を用いた。青色を選んだ理由は波長が大気チェレンコフ光と似ているからである。用いた LED は OptoSupply 社の OSB5XNE3C1S である。この LED は波長が 470 nm で 3 W という非常に明るい LED であるため、約 60 m 先にある鏡にも十分な光が届く。光源には光量の安定性が求められるため、定電流回路と組み合わせた LED モジュールを作成した。光量が半分になる角度が 60° と広がるため、壁の反射光や直接光がカメラに入らないように $\phi=5\text{mm}$ のコリメータを取り付け光を絞った。

(2) スクリーン

スクリーンには、テフロン板を用いている。テフロン板の大きさは $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 、厚さは 1 cm である。テフロン板は三脚に取り付けることができるようにコルク板の上に L 字金具を用いて固定した。テフロン板の右側にはカメラで撮影した際の Pixel 数と実際の長さを合わせるためのメジャーが貼ってある。

(3) カメラ

撮影用 CMOS カメラは、Canon EOS 8000D を使用し、レンズには、Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM を使用した。さらに LED から直接光が入るのを防ぐためレンズフード Canon ET-60 を取り付けた。カメラの画素数は 6000×4000 画素である。

(4) レーザー測量計

2f 測定は距離を測定して得られた値が、曲率半径の値のため、距離測定は最重要事項のひとつである。そのため、精度の高さと利便性から、レーザー測量計を用いている。鏡から光源、鏡からスクリーンの距離を測定には、目標物にレーザー光を照射し、反射して戻ってくる時間から目標物までの距離を測定する。

(5) 距離測定用的

鏡から光源、鏡からスクリーンの距離を測定するためにレーザー距離計を用いているが、レーザー測量計は目標物からレーザー光を反射させる必要がある。分割鏡は球面鏡のため、鏡にレーザー光を照射するとレーザー光が正しく測量計に戻らず、距離が測定できない。そのため、的を用意する必要がある。収納コンテナの右下の部分に測定用的を取り付けた。この的は鏡面から 6cm 手前側の位置に取り付けている。

5.4 測定結果

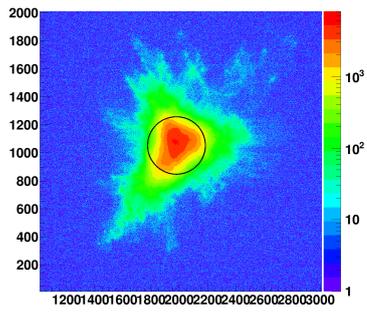
2f 法により、測定した結果を示す。まず、一枚の鏡についての典型的な例を示し、その後 2016 年に東京大学宇宙線研究所に納品された 90 枚の測定結果を示す。

5.4.1 2f 測定で得られたスポットイメージと D80

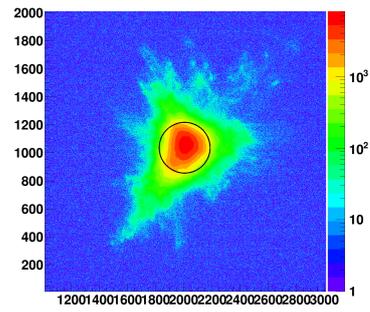
2f 測定では、最もスポットサイズが小さくなると目視で決めた基準点より、前後 0.15m 毎に 3 点ずつ、計 7 点測定を行った。目視の基準点から前後 3 点ずつ計 7 点測定することにより、目視で決めきれない分のスポットサイズの最小値とその値をとる位置を決定することができる。また実測点だけでなく、実測 7 点をモデルフィッティングすることで、最小点を求めた。図 5.9 は 2f 法により測定した 7 点の位置でのスポットイメージを示している。図 5.10 は、2f 法で測定した 7 点の D80 と測定点と鏡間の距離を示した図である。D80 の最小値をとる位置が曲率半径である。曲率半径を取る測定点から距離のオフセットがあると D80 が大きくなることがわかる。次節の結果では、90 枚の鏡のフィッティング点での結果を示す。

5.4.2 測定した 90 枚の曲率半径の分布

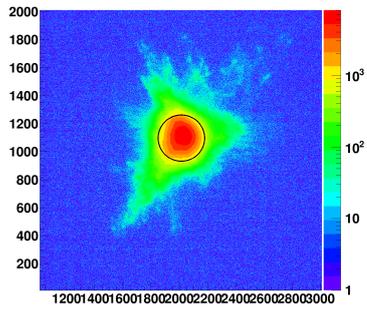
2015 年度から分割鏡の量産が始まった。2015 年度末から現在にかけて納品された 90 枚の分割鏡に対して、性能評価を行った結果を示す。性能評価を行った分割鏡はモールド A から作られた分割鏡が 63 枚、モールド B から作られた分割鏡が 27 枚である。図 5.11 は 2f 法で性能評価を行って得られた分割鏡の曲率半径の値を一次元ヒストグラムにしたものである。モールド A で作られた分割鏡の分布とモールド B で作られた分割鏡は分布の平均値はどちらもモールド本体の曲率半径 (モールド A : 56.4m、モールド B : 57.2m) にほぼ等しい。このことからモールドの値を中心に正規分布に近い形で分割鏡の値が散らばって、得られていることが推測される。



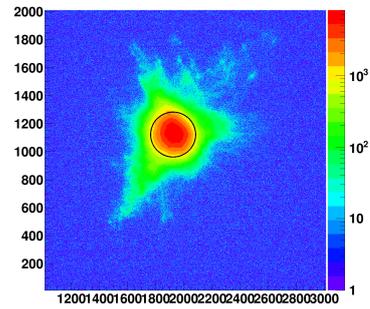
(a) R-0.45m 位置でのスポット



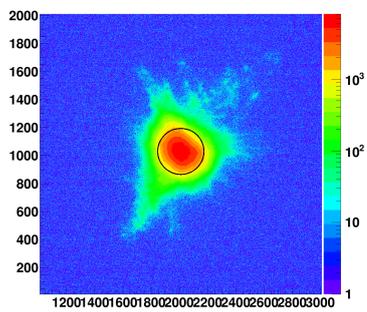
(b) R-0.30m 位置でのスポット



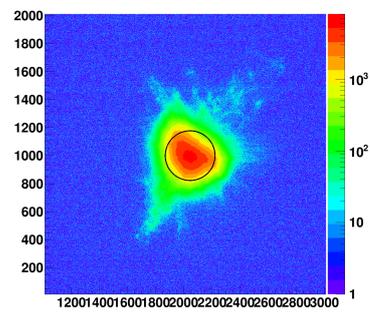
(c) R-0.15m 位置でのスポット



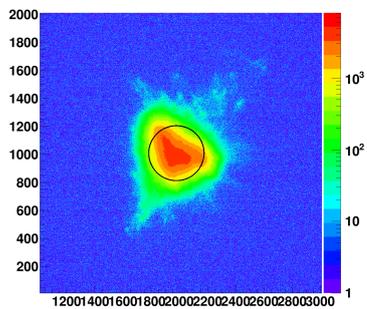
(d) R 位置でのスポット



(e) R+0.15m 位置でのスポット



(f) R+0.30m 位置でのスポット



(g) R+0.45m 位置でのスポット

図 5.9: 測定した 7 点各位置でのスポットイメージを示している。カラーバーは光量を表し、Log Scale で表している。中心付近の黒円は D80 を直径とした円を表している。

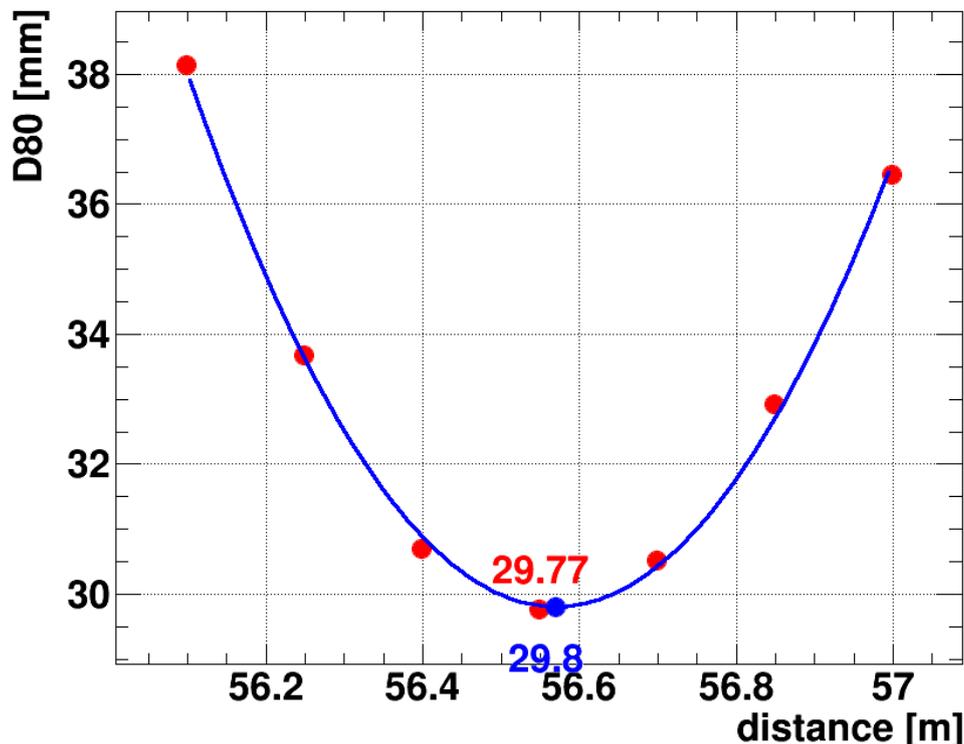


図 5.10: 測定点での D80 を示した図。横軸が測定点と鏡間の距離である。縦軸がそれぞれの測定点での D80 [mm] を表す。赤点が 2f の実測で得られた D80 の値で、青線は放物線によるフィッティング線で、青点とその最小値である。

理想分布との比較

図 5.12 青色のヒストグラムは、図 4.2 で示した放物面上の分割鏡位置から決まる理想的な曲率半径分布を示しており、紫色のヒストグラムは、測定を行った 90 枚の結果を表している。理想的な曲率半径分布は、主鏡が放物面であることから均質な分布になる。90 枚の鏡は一台の望遠鏡の半分に対応する数であるが、この比較より、曲率半径が短い領域は既にカバーできていることがわかる。曲率が長い領域は、これから製造予定である。

5.4.3 測定した 90 枚の結像性能の分布

図 5.13 は、測定した 90 枚の D80 の分布を示している。モールド毎の差は 2mm 程度あるが、モールド B はモールド A の数が半分しかないので、今後モールド B による製造が進み、鏡の性能が改善されると分布の差も小さくなるが見込める。スペックを越えている鏡に関しては、放物面での最適配置を考える必要がある。最適配置については 7 章で述べる。

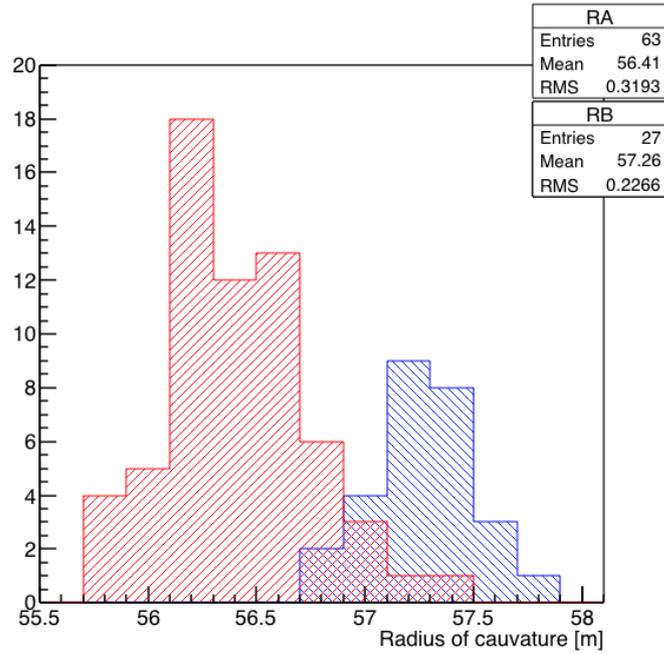


図 5.11: 横軸が曲率半径、縦軸が分割鏡の枚数を表しているヒストグラム。赤色のヒストグラムがモールド A から製造された分割鏡、青色のヒストグラムがモールド B から製造されたヒストグラムである。bin 幅は 0.2m である。

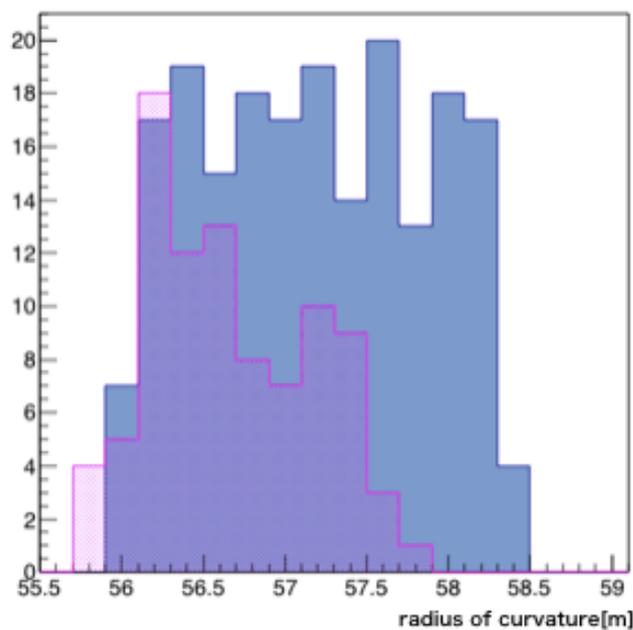


図 5.12: 横軸が曲率半径、縦軸が分割鏡の枚数を表しているヒストグラム。青色のヒストグラムは、図 4.2 で示した放物面上の分割鏡位置から決まる理想的な曲率半径分布を示しており、紫色のヒストグラムは、測定を行った 90 枚の結果を表している。

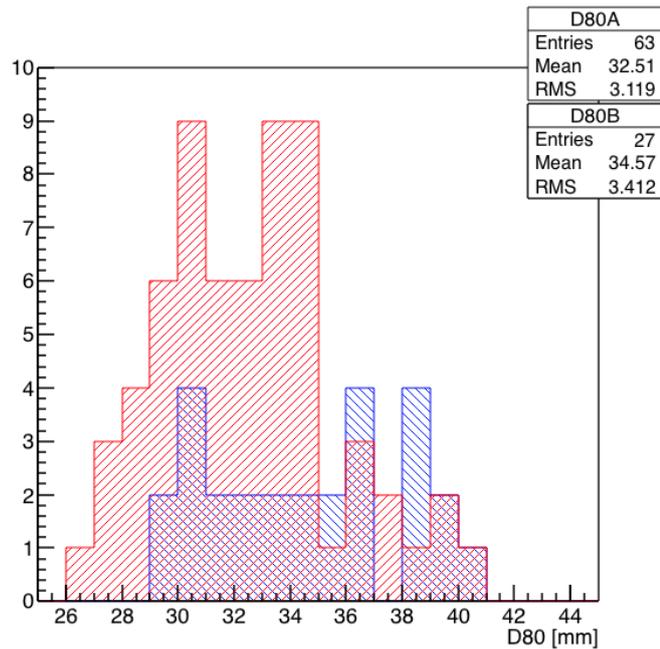


図 5.13: 横軸が曲率半径、縦軸が分割鏡の枚数を表しているヒストグラム。赤色のヒストグラムがモールド A から製造された分割鏡、青色のヒストグラムがモールド B から製造されたヒストグラムである。bin 幅は 0.1mm である。

5.5 まとめ

分割鏡を測定する手法として、2f 法という手法を確立した。その後 2f 法を用いて、LST 放物面に搭載する 90 枚の分割鏡の曲率半径と結像性能 (D80) を行った。得られた 90 枚の曲率半径を用いて、LST 放物面の曲率半径である図 4.2 の値に沿うように分割鏡を配置することで、分割鏡配置の最適化を行うことができる。

第 6 章

分割鏡の「さらなる」配置最適化に向けた解析手法の開発

6.1 目的

前章で述べた 2f 測定を行い分割鏡が作るスポット (図 6.1、図 6.2) を得る中で、スポットの形状が円になっていないものが多く見られた。これは分割鏡の形状に理想球面からのずれがあることを意味する。この理想球面からのずれを積極的に利用し、図 6.3 のように、放物面上で直交する 2 方向の曲率半径の最大値と最小値の 2 方向として近似して放物面配置に利用できないかということ考えた。つまり、分割鏡の後述する非点収差を利用することで、分割鏡の二種類の曲率半径を測定し、その結果を考慮して放物面に分割鏡配置をする方法を新たに考えられないかということである。

一般的に焦点距離が f の放物面上の点 $(x, y, \alpha r^2)$ は、 $\alpha = 1/(4f)$ の時、 $P(\alpha) = \alpha(x^2 + y^2)$ を満たす。これは焦点の座標位置が、 $(0, 0, f) = (0, 0, 1/(4\alpha))$ であることを意味する。中心を除く全ての点で、放物面は複数の曲率半径を持つ。ここでは、放物面のある点を取りうる曲率半径の最大値と最小値を考える。曲率半径の最大値 ρ_r は、放物面の動径方向であり計算すると、放物面の回転軸からの距離 r の関数として、 $\rho_r = (1 + 4\alpha^2 r^2)^{3/2}/2\alpha$ で表せる。曲率半径の最小値 ρ_p は、動径方向と直交する方向であり計算すると、 $\rho_p = (1 + 4\alpha^2 r^2)^{1/2}/2\alpha$ で表せる。 ρ_r をとる方向と ρ_p をとる方向を望遠鏡概念図を用いて示したのが図 6.3 である。

図 6.4 は、図 4.2 で示した放物面に球面鏡を配置する場合に、鏡位置と焦点位置との距離の二倍を最適曲率半径として光軸からの距離 r の関数で表した曲線を黒線として、放物面上の曲率半径の最大値 ρ_r と最小値 ρ_p を光軸からの距離 r の関数で表した曲線を加えた図である。赤線は関数 ρ_r 、青線は関数 ρ_p を示している。5 章のまとめで述べたように、2f 法で得られた D80 の解析から得られた曲率半径の値のみで最適化する場合、分割鏡形状は、球面鏡であるというモデルを採用しているため、黒線に沿って分割鏡を配置することになる。しかし、その情報に加えて、分割鏡一枚一枚について直交する 2 方向の曲率半径の情報をもとに、分割鏡形状をモデル化し、主鏡配置の際に最適化することで、主鏡全体形状としてより放物面に近づけることができる。その結果、望遠鏡全体の結像性能の向上、ひいては感度向上に貢献することができると考えられる。

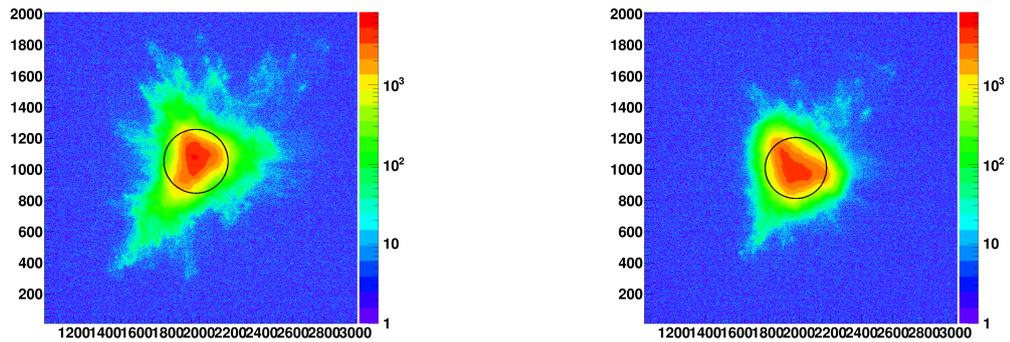


図 6.1: 曲率半径位置-0.45m 位置での 2f 測定で得たスポットイメージ。黒円は D80 を示している。
 図 6.2: 曲率半径位置 +0.45m 位置での 2f 測定で得たスポットイメージ。黒円は D80 を示している。



図 6.3: 放物面上での ρ_r をとる方向 (赤線) と ρ_p をとる方向 (青線) を示している。

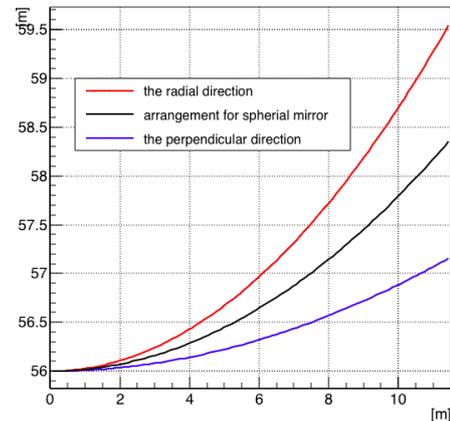


図 6.4: 図 4.2 で示した分割鏡形状を球面鏡としてモデル化した際に配置に最適な曲率半径を黒線で示し、 ρ_r 、 ρ_p をそれぞれ赤線、青線で示している。

6.1.1 鏡の非点収差

鏡の非点収差とは、光軸から離れた物体上の 1 点から出た光が完全な 1 点に集束せず、間隔をおいた二つの直交する線分上に別々の像を結ぶ収差である (図 6.5)[42][43][44]。図 6.6 左図のように鏡に入射し反射した光線を、縦断面を通る光 (Tangential 光線) と、横断面を通る光 (Sagittal 光線) の 2 成分に分けると、それぞれの光線で像を結ぶ位置が異なるため、一方が像を結んでいるが、他方は像を結んでいないという現象がおり、像が楕円に見える。またこの楕円形状の像は図 6.6 右図のように、鏡位置から近い方から遠い位置へ像面が動くにつれて、90 度回転する。5

章で行った $2f$ 法測定で $D80$ が最も小さくなる位置という定義で定めた位置は、非点収差が最も小さくなる位置に相当する。

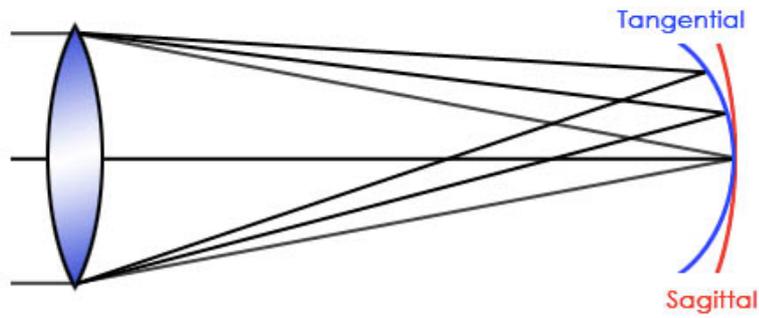


図 6.5: Tangential 方向と Sagittal 方向で焦点距離が異なるとき、非点収差が存在することを示した図 [41]。

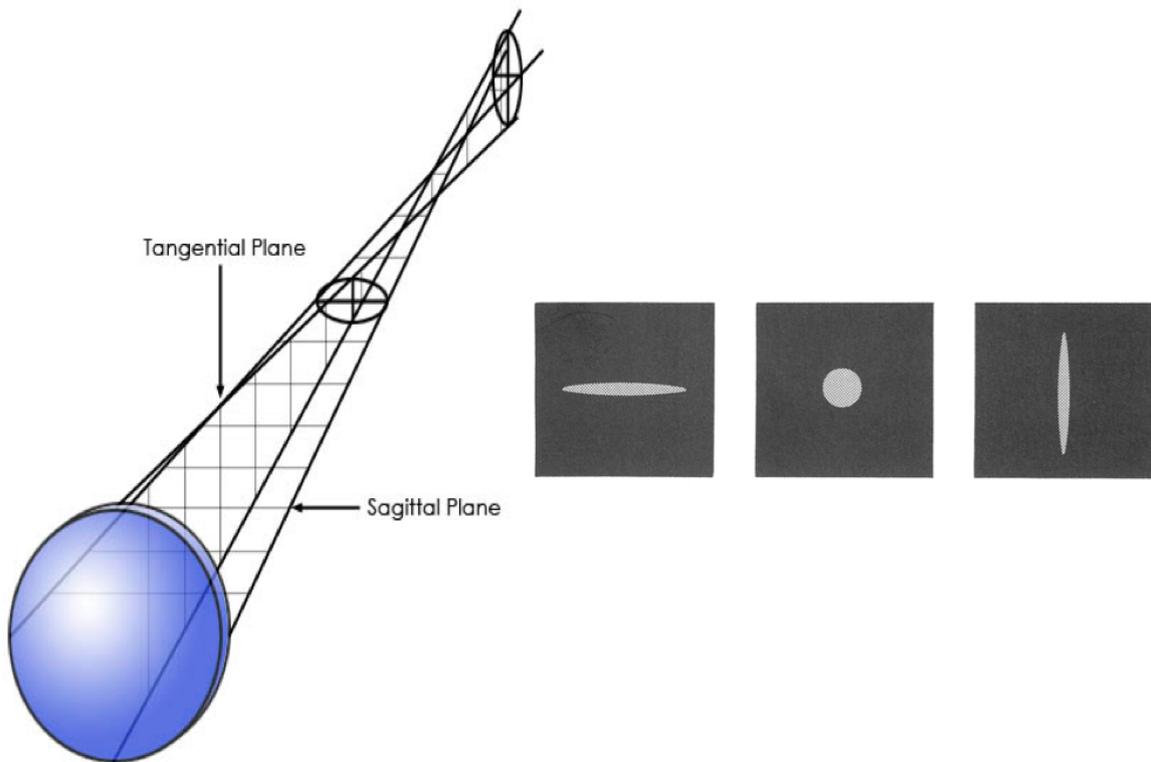


図 6.6: 左図 [41] は、非点収差を起こす光路を示している。右図 [42] は左から Sagittal 方向の光線が結像した像、非点収差が最も小さくなる位置、Tangential 方向の光線の結像した像。非点収差が最も小さくなる位置は、 $2f$ 測定で最も $D80$ が小さくなる位置に相当する。

6.1.2 分割鏡形状のモデル化

非点収差を利用し、二方向の曲率半径を決めることができれば、前節で述べた通り分割鏡配置に役に立つ。しかし、現在 2f 法測定で行っている D80 と曲率半径の測定は、分割鏡形状が球面であるというモデルである。このモデルでは、二方向の曲率半径を記述することはできないので、モデルを拡張する必要がある。そのため、新たに分割鏡形状モデルを考える。分割鏡形状をモデルに与えるパラメータとしては、2 方向の曲率半径だけでなく、図 6.6 左図で示した、Tangential 方向と Sagittal 方向も決める必要がある。これは、理想球面からのずれを利用して Tangential 方向と Sagittal 方向を定義しようとしているため、必ずしも一定の方向に曲率半径の軸が向いているとは言えないためである。分割鏡には 4 章で述べた AMC システムのために分割鏡下部に CMOS カメラを設置するためのカットがあるため、望遠鏡に配置する際には位置ごとに向きがあらかじめ決まっている。そのため最適配置を考える際には、分割鏡平面での Tangential 方向と Sagittal 方向も考慮することが必要となる。Tangential 方向と Sagittal 方向は、90 度で交わっているため、片方が決まれば同時にもう片方も決まる。そのため今回は、鏡からより遠くで結像する方向、図 6.6 左図でいうと Sagittal 方向を分割鏡平面で θ として定義する。「さらなる」配置最適化に必要な二方向の曲率半径を持った分割鏡形状モデルのパラメータは以下の 3 つであり、図 6.7 に示す。

- (1) 分割鏡の持つ 2 方向の曲率半径 : $R1_{\text{short}}$ 、 $R2_{\text{long}}$ ($R2 > R1$)
- (2) 分割鏡上での曲率半径の方向 : θ

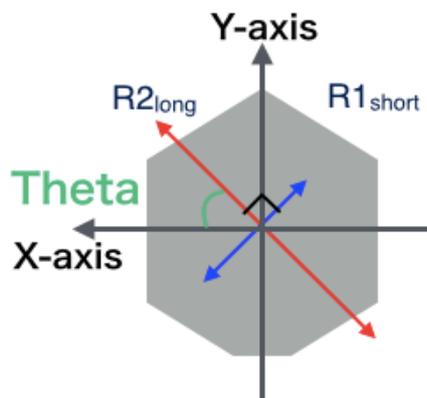


図 6.7: 二方向の曲率半径を持った分割鏡形状モデルを示している。

6.1.3 2f 法での測定可能性の検証

現在の分割鏡の測定手法は、前章で述べた 2f 法である。しかし、2f 法で分割鏡の形状を決定できるか否かというのは自明ではない。そのため、2f 法で測定を行った結果に対して新しい解析手法を導入し、2f 法を用いて 2 方向の曲率半径を決められるかどうかの検証を二段階のアプローチ

で行った。

- 光線追跡シミュレーションを用いて 2 方向の曲率半径 ($R1_{short}$ 、 $R2_{long}$) をあらかじめ決めた分割鏡形状を定義しスポットにどのような特徴が現れるか調べた。
- 実際に 2f 測定で得られたデータを用いて Θ 、 $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ が決められるかどうかを調べた

6.2 光線追跡シミュレーションによる検証

2f 法での測定可能性の原理検証として、あらかじめ形状がわかっている分割鏡の場合、2f 位置からのオフセット距離でどのようにスポットが変化するかを光線追跡シミュレーションを用いて調べた。光線追跡シミュレーションソフトには ROBAST というソフトウェアを用いた。ROBAST とは ROOT-BAsed Simulator for ray Tracing の略であり、ガンマ線・宇宙線望遠鏡のための光線追跡計算ソフトウェアである。C++ で書かれており、ROOT のジオメトリに関するライブラリ (libGeom.so) を活用できるようになっている。ROBAST を用いて、分割鏡形状を定義し、光線追跡を行うことでスポット形状がどのようになるかを調べることができる。

6.2.1 セットアップ

1 枚の分割鏡に点光源から光を入射して、2f 位置および前後 0.1m ごとに 10 点ずつ計 21 点取った位置でスポットがどのように変化するか調べた。入れたパラメータは分割鏡の形状とぼけの二種類である。分割鏡のぼけは鏡の局所的な理想球面からの差から起因していると仮定し、図 6.8 のように、鏡で反射した光線の方向が XY 軸の分散が同じ二次元正規分布にしたがってふらつくようにしており、分散がぼけのパラメータに相当している。分割鏡の形状は、理想球面分割鏡と理想的に二方向の曲率半径を持った分割鏡の二種類を用意した。二方向の曲率半径を持った形状は図 6.9 で示すようにトーラスの形状を利用している。理想球面分割鏡の曲率半径は $R=56.0$ m とし、二方向の曲率半径 $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ は次式のように定義した。

$$R1_{short} = R - dR \quad (6.1)$$

$$R2_{long} = R + dR \quad (6.2)$$

$$dR = 0.3m \quad (6.3)$$



図 6.8: 鏡のぼけは、光線が鏡表面から反射する 図 6.9: 二方向の曲率半径を持った分割鏡形状を方向を、ぼけがない場合に反射する方向を中心と定義するにあたって、トーラスの形状の一部を用いて、XY の二軸が同じ分散を持つ二次元正規分布を定義している [45]。\$R_v\$、\$R_h\$ は直交する二軸である。分布でふらつかせてることで定義している。

6.2.2 結果

形状は理想球面分割鏡と理想的に二方向の曲率半径を持った分割鏡の二種類、ぼけは $2f$ 位置でのスポットイメージの D80 が 33mm 相当であるとした。形状が理想的な球面分割鏡のみ、ぼけがない場合も行った。次小節からそれらの結果について示す。

理想球面分割鏡、ぼけなし

ぼけなし理想球面鏡の場合のうち、 $R-0.50m$ 、 R 位置、 $R+0.50m$ の 3 点でのスポットイメージをそれぞれ図 6.10、6.11、6.12 に示している。オフセット距離が小さくなるとスポットが小さくなり、 $2f$ 位置で最小値を取るという実際の $2f$ 測定で見られている球面鏡のスポットサイズとオフセット距離の関係を確認することができた。

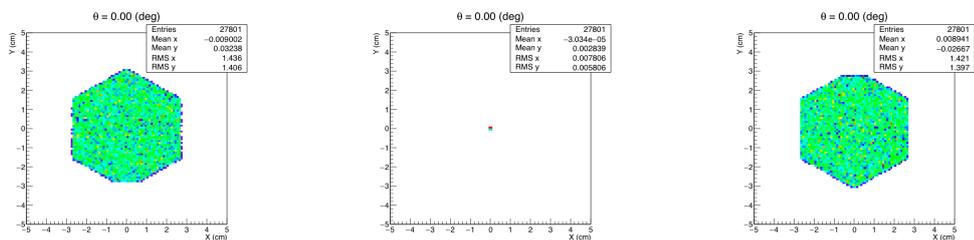


図 6.10: $R-0.50m$ 位置でのスポット画像 図 6.11: R 位置でのスポット画像 図 6.12: $R+0.50m$ 位置でのスポット画像

理想球面分割鏡、ぼけあり

形状が理想的な球面分割鏡かつぼけが $D80=33\text{mm}$ の場合について光線追跡シミュレーションを行った結果を示す。

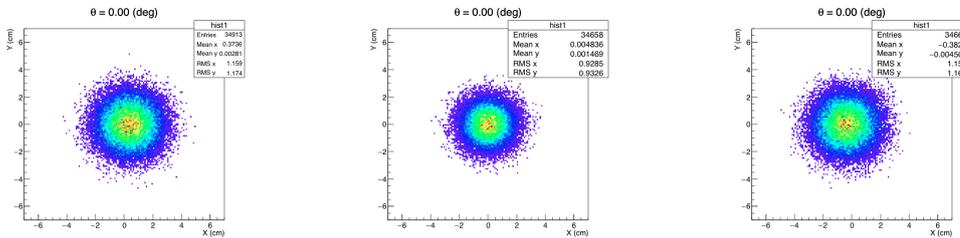


図 6.13: R-0.50m 位置でのスポット画像 図 6.14: R 位置でのスポット画像 図 6.15: R+0.50m 位置でのスポット画像

ぼけのある理想球面鏡の場合の、R-0.50m、R 位置、R+0.50m の 3 点でのスポットイメージをそれぞれ図 6.13、6.14、6.15 に示している。2f 位置からのオフセット距離が大きくなるとスポットは円の形を維持したまま、大きくなり、オフセット距離が小さくなるとスポットが小さくなり、2f 位置で最小値を取るという実際の 2f 測定で見られている球面鏡のスポットサイズとオフセット距離の関係を確認することができた。

二方向の曲率半径を持った分割鏡

2 方向の曲率半径の形状を理想的に持つ分鏡光線追跡シミュレーションを行った結果を示す。

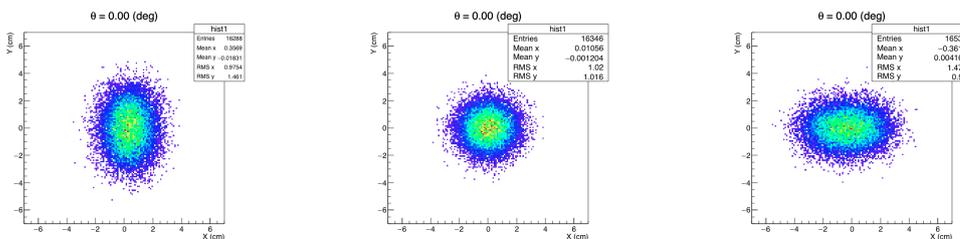


図 6.16: R-0.50m 位置でのスポット画像 図 6.17: R 位置でのスポット画像 図 6.18: R+0.50m 位置でのスポット画像

理想的に 2 方向の曲率半径を持つ分割鏡の場合の、R-0.50m、R 位置、R+0.50m の 3 点でのスポットイメージをそれぞれ図 6.16、6.17、6.18 に示している。2f 位置からオフセット距離を大きくすると理想球面鏡の場合と異なり、スポットが円ではなく、楕円状になることが確認できた。分割鏡から測定点が遠ざかるにつれて、楕円状のスポットの長軸が 90 度程度回転していることも確認できた。理想球面鏡のスポットと比較して、この楕円状のスポットが二方向の曲率半径を持った分割鏡のスポットの特徴であると考えられる。次節ではこの楕円イメージのスポット解析手法について述べる。

6.2.3 楕円イメージのスポット解析手法

前節に行った光線追跡シミュレーションにより、二方向の曲率半径を持つ分割鏡はスポットに楕円状の特徴があるということがわかった。この節ではこのスポットイメージに対して行った解析手法について述べる。楕円イメージの解析手法には、光量分布の二次のモーメントを計算するという手法がある。2章で述べたように、解像型大気チェレンコフ望遠鏡で得たガンマ線由来のシャワーイメージの解析では、この手法を応用して、光量分布の二次のモーメントの平方根、つまり標準偏差を用いてガンマ線由来の楕円シャワーイメージの解析が行われている。光量分布の二次のモーメントの平方根は”Hillas Parameter”と呼ばれるパラメータの一部である。本解析ではこの Hillas Parameter を楕円イメージ解析に適用して、スポット形状を評価した。本解析に用いた Hillas Parameter は、以下の三種類であり、図 6.19 に示す。

- Length : 楕円の長軸方向の光量分布の二次のモーメントの平方根
- Width : 楕円の短軸方向の光量分布の二次のモーメントの平方根
- Angle : Length と Width で特徴付けられる楕円の重心を通り、長軸方向に沿った一次関数の傾きから決まる角度。

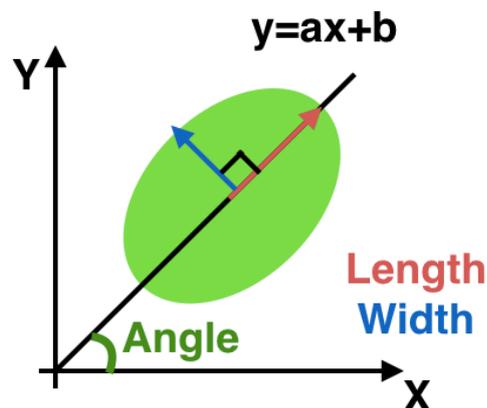


図 6.19: 本解析で用いた Hillas Parameter を抜粋して示した。 $y=ax+b$ は楕円の重心を通り、長軸方向に沿った一次関数である。

光線追跡シミュレーションにより得た 21 枚のスポット画像に対して上記 3 種類の Hillas Parameter を当てはめて楕円イメージ解析を行い、各パラメータを計算した結果を示したのが図 6.20 である。

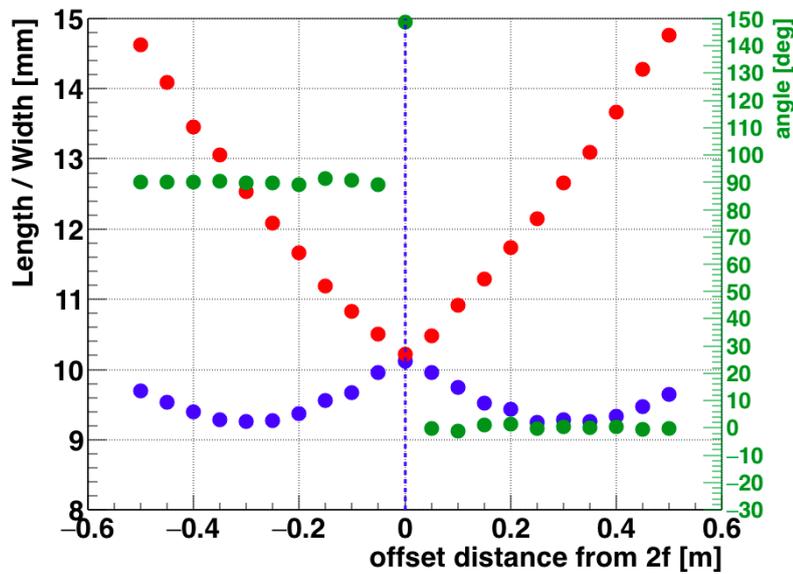


図 6.20: 2f 法測定を模した光線追跡シミュレーションで得られた 21 枚のスポットイメージに対して、楕円イメージ解析を行った結果を示している。赤点が Length、青点が Width の値であり、次元は図中左軸に対応する。緑点は Angle の値であり、次元は図中右図に対応する。

赤点が Length、青点が Width、緑点が Angle の値を示している。横軸は 2f 位置からのオフセット距離を示しており、0 が 2f 位置を意味している。この点で Length, Width がほぼ同じ値を取っている、これは 2f 位置でスポット形状が円形になっているためである。そして Angle の値が 2f 位置を境に 90° 変わっていることにより、楕円の長軸方向が変化していることが確認できる。2f 位置で Angle=150[deg] となっているのは、この位置でのスポットの形状が円に近いため、長軸方向が決まりにくいからであると考えられる。楕円の長軸方向、つまり図 6.7 で示した分割鏡の Angle は、光線追跡シミュレーションで定義した鏡の形状より 2f 位置の前では $R2_{\text{long}}$ の方向に対応し、後では $R1_{\text{short}}$ 方向に対応していると考えられる。図 6.7 の定義より、鏡のパラメータ Theta は、 $R2_{\text{long}}$ の方向であるため、この鏡の Theta は 2f 位置より前の Angle の値、つまり 90 度と決められる。シミュレーションに定義した分割鏡形状では長軸方向を図 6.7 の座標で 90 度とっているので、Theta の入力と出力が一致し、解析がうまくいっていることがわかる。

21 点のスポットイメージに対して、Angle を固定して、再度楕円イメージ解析を行った。Angle を固定して、解析を行う際には上で定義した Hillas Parameter を改変をしたものを用いた。改変した Hillas Parameter の定義は以下である。

- S1 : Angle に沿った方向の光量分布の二次のモーメントの平方根
- S2 : Angle に沿った方向と直交する方向の光量分布の二次のモーメントの平方根
- Angle : Hillas Parameter である Length と Width を用いた解析で得た分割鏡の Theta の値に固定する

二度目の解析の際には、パラメータを改変することで、図 6.21 のように、特定の軸に沿った方向の光量分布の二次のモーメントの平方根、つまりスポットサイズを調べることができる。今回は、

一度目の解析より、 $\text{Theta}=90[\text{deg}]$ を用いて、 $\text{Angle}=\text{Theta}=90[\text{deg}]$ として固定し、光量分布の二次のモーメントの平方根 $S1$ と $S2$ を計算した。この結果が図 6.22、図 6.23 である。

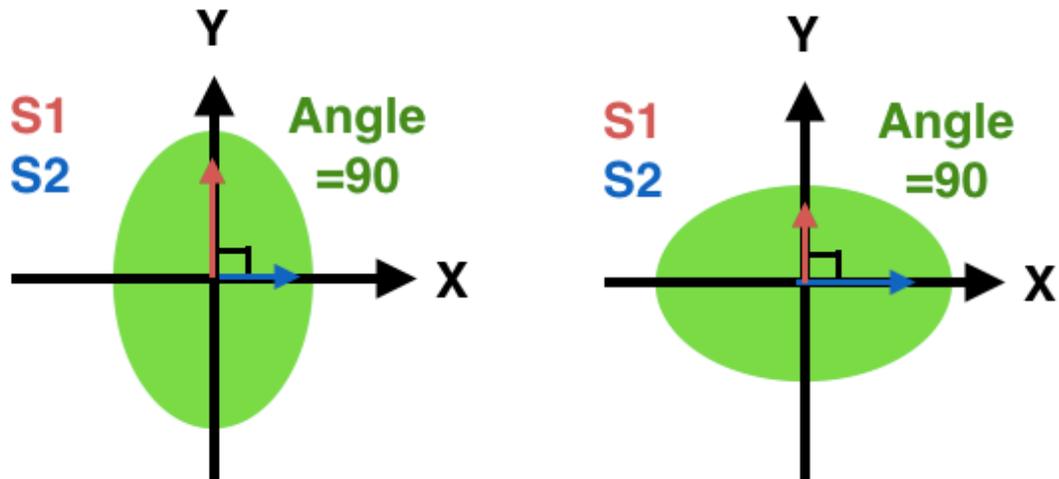


図 6.21: 楕円の長軸の回転前後のスポットに対して、固定した軸方向の光量分布の二次のモーメントの平方根を求めることで、鏡平面上の特定の軸方向の結像の度合いを調べることができる。

図 6.22、図 6.23 より、 $S1$ と $S2$ が最小値を持つことが確認できた。D80 の最小値が曲率半径に対応しているのと同様に、 $S1$ の最小値をとる位置が分割鏡上における Theta 方向面の結像する位置を示しており、 $S2$ の最小値をとる位置は分割鏡上における Theta 方向面と直交する面の結像する位置を示している。つまり、図 6.6 によるところの Tangential 方向の結像位置を調べるパラメータが $S1$ であり、Sagittal 方向の結像位置を調べるパラメータが $S2$ である。フィッティングにより $S1$ 、 $S2$ の最小値を求めたのが図 6.24 である。フィッティング関数には式 6.5 で示した双曲線を用いた。

$$\frac{(y - y_1)^2}{b^2} - \frac{(x - x_1)^2}{a^2} = 1 \quad (6.4)$$

$$y = \sqrt{\frac{b^2}{a^2}(x - x_1)^2 + b^2} + y_1 \quad (6.5)$$

オフセット距離を大きくしていくと、図 6.25 で示すような、 $2f$ 法測定における光量 80% を含む円錐に漸近していくと考えられるため、漸近線を持ち、最小点を持つ双曲線をフィッティング関数に選んだ。その結果、D80 同様、 $S1$ と $S2$ の最小値を決めることができた。次節ではスポットサイズの最小値の $2f$ 位置からのオフセット距離と 2 方向の曲率半径について考える。

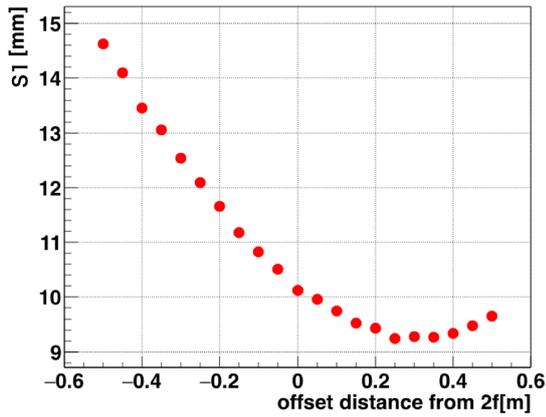


図 6.22: シミュレーションで得られた 21 枚のス
ポットイメージに対してパラメータ S1 を計算し
た結果。

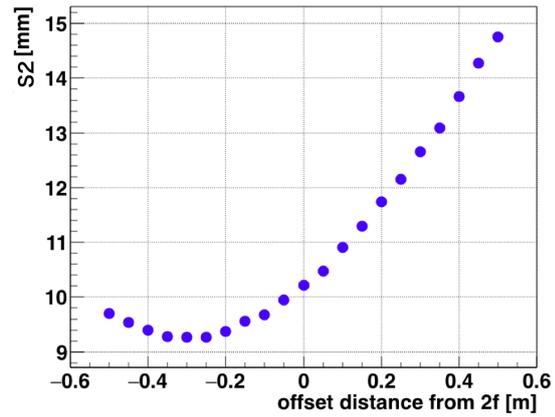


図 6.23: シミュレーションで得られた 21 枚のス
ポットイメージに対してパラメータ S2 を計算し
た結果。

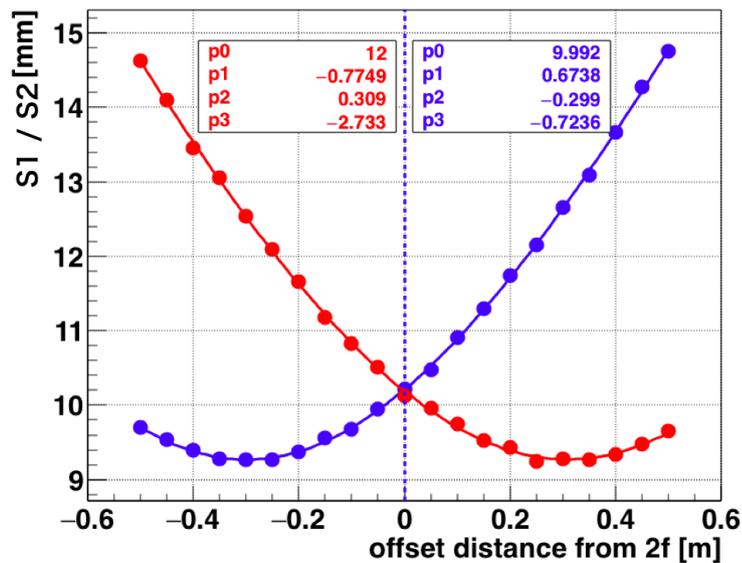


図 6.24: パラメータ S1、S2 を双曲線フィッティングの結果を示している。図中 p0、p1、p2、p3 はフィッティングに用いたパラメータであり、式 6.5 中のパラメータとの対応は、 $p0 = b$ 、 $p1 = a$ 、 $p2 = x_1$ 、 $p3 = y_1$ である。

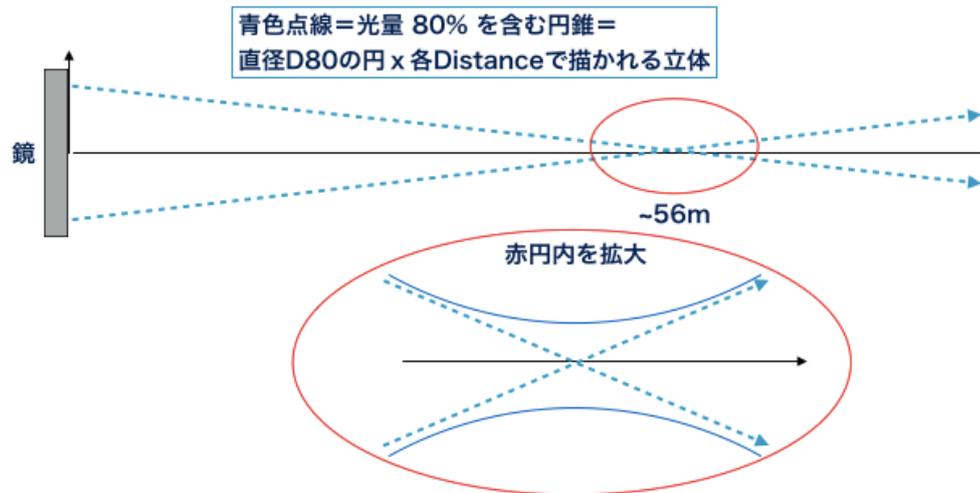


図 6.25: 2f 測定における光線が結像する様子を示した模式図。球面分割鏡が理想形状であるなら点線のように集光するはずだが、実際は焦点近くで光量 80% は点線から外れて青実線になる。そして焦点位置から離れると青実線は青点線に漸近する。

6.2.4 2 方向の曲率半径と S1、S2 パラメータの最小値との関係

パラメータ S1、S2 の最小値からのオフセット距離と 2 方向の曲率半径の値の関係を調べるために、図のように鏡のパラメータを決め、dR を変えながらそれぞれの dR の時の S1、S2 が最小値をとる 2f 位置からのオフセット距離の値を調べた。

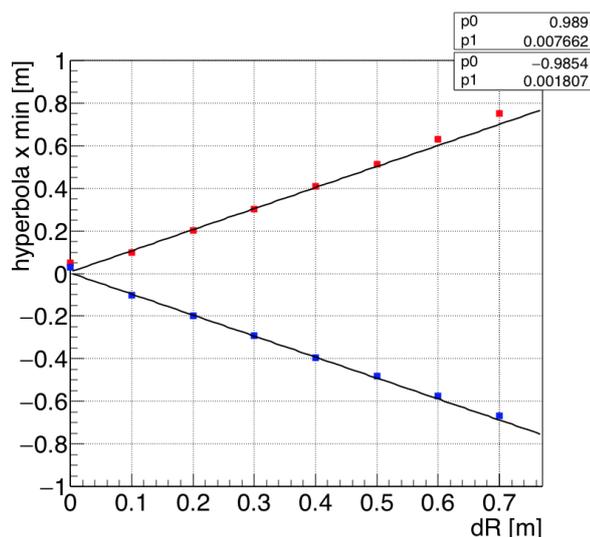


図 6.26: 楕円イメージ解析で得たパラメータ S1、S2 と分割鏡形状 $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ との間の対応関係を示している。

図 6.26 は横軸が dR、縦軸がそれぞれの dR の時の S1、S2 が最小値をとる 2f 位置からのオフ

セット距離の値となっている。赤点はそれぞれの dR の時の $S1$ の最小値を取る $2f$ 位置を示しており、青は $S2$ の場合の値を示している。黒線は一次関数によるフィッティングの結果を示している。この図より dR と $S1$ 、 $S2$ が最小値をとる $2f$ 位置は比例していることがわかる。図 6.26 上部にあるボックスは一次関数によるフィッティングによるパラメータの値となっており、 $p0$ が傾き、 $p1$ が切片を示している。この結果からスポット解析で得たパラメータと分割鏡形状 $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ との間に対応関係があることがわかった。

6.2.5 非点収差の大きさ、 dR と鏡のスポットサイズの関係

球面鏡のスポットサイズ ($D80$) は、光線追跡シミュレーションにおいて、光線が鏡に当たって反射する際にどの程度ふらつくのかという、ぼけに対応する確率分布を入れることでモデル化している。今回用いた確率分布には二次元正規分布を用い、ぼけを表すパラメータには二次元正規分布の分散を用いた。しかし、二方向の曲率半径を持った鏡の場合、焦点が $D80$ の最小点となる位置 (R と定義する) 以外に $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ と二箇所存在することになり、 $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ が R から離れた距離分だけ、 R では像の重ね合わせが起きるので、結果的に結像された像が大きくなる。これが非点収差である。つまり、 R 位置でのスポットサイズは dR に依存性があることが推測される。そのため、二次元正規分布の分散を固定した状態で、 dR のみを変化させ、光線追跡シミュレーションを行うことで $D80$ に対する dR の依存性を調べた

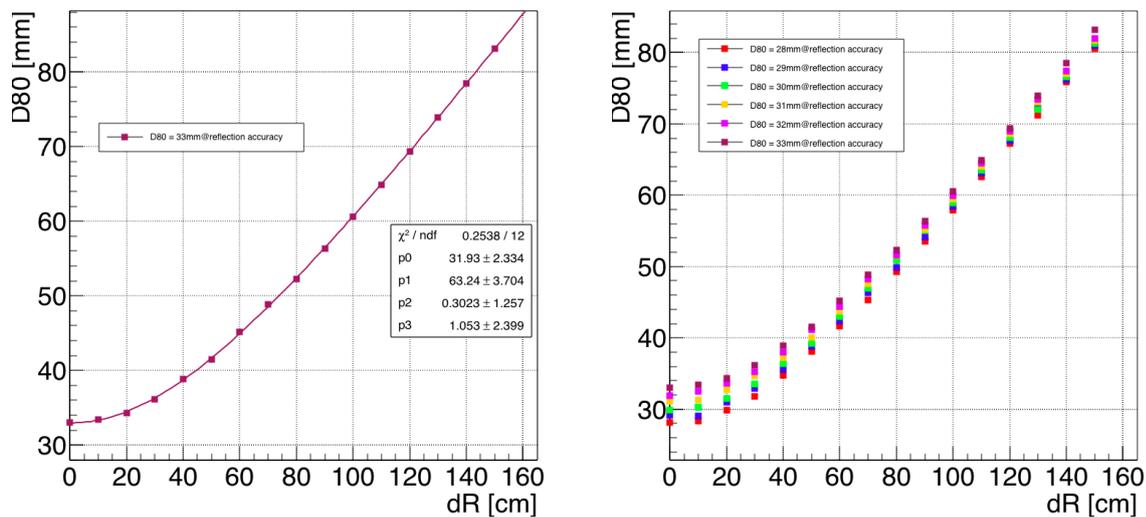


図 6.27: 横軸は dR 、縦軸は R 位置でのスポットサイズを示している。球面鏡であればスポットサイズを示している。ぼけを表す分散を $D80=33\text{mm}$ 相当の分散に固定したまま、 dR を $D80=28\text{mm}$ から 33mm まで変化させて、 R 位置でのスポットサイズの変化を調べた。曲線は双曲線によるフィッティングの結果である。

図 6.27 は、非点収差の影響を示している。図 6.6 での Tangential 方向の結像位置と Sagittal 方向の結像位置の間の距離 dR を大きくしていった時に、最も非点収差の影響が少ない位置、 $2f$ 測定の場合は $D80$ の最小値を取る位置、つまり曲率半径 R 位置で非点収差の影響がどの程度が調べた結果である。非点収差のみの影響を調べるために、ぼけのパラメータは dR に関わらず一定である。 dR が大きくになるにつれ双曲線に従って、スポットサイズが大きくなっている。図 refpoint 鏡のぼけを 33mm だけでなく値を変えて、 dR のスポットサイズへの影響を調べた結果である。分散を変えても、 dR はスポットサイズに影響を与える。スポットサイズには dR 依存性、つまり非点収差の影響があることがわかり、さらにその大きさを見積もることができた。

6.3 測定データを用いた検証

前節までの光線追跡シミュレーションによる結果より、スポット解析で得たパラメータと鏡形状 R_{1short} 、 R_{2long} との間に対応関係があることがわかった。シミュレーションの際は鏡形状があらかじめ定義されているので、曲率半径の向きである θ の値は既知の値であるため、曲率半径の向きを決めることができ R_{1short} 、 R_{2long} を得ることができた。しかし、測定データに解析を適用する際は、曲率半径の向きである θ が既知ではないため、測定データから求める必要がある。この章ではその手法について述べる。

6.3.1 θ の決定

測定したスポットイメージに対して、後述するイメージクリーニングを行い、楕円のスポットイメージ解析を行う。解析により、各イメージに対して、楕円の長軸方向の角度である θ と楕円の長軸方向の 2 次のモーメントの平方根である $Length$ と短軸方向の 2 次のモーメントの平方根である $Width$ の値を得る。光線追跡シミュレーションにより、二方向の曲率半径を鏡が持っていた場合、各スポットの長軸の方向が 90 度回転 (図 6.20) することがわかっている。このモデルを測定データにも同様に適用する。モデル関数を考え、フィッティングを行うことにより、 θ の値を決定した。 θ の決定方法について説明する。

イメージクリーニング法

解析領域に存在するピクセル数は $2000 \times 2000 = 4 \times 10^6$ である。CMOS センサーのダイナミックレンジは 13.5 ビットなので、最大値はたかだか 10^4 程度である。典型的にスポットの中心の最も明るい領域に存在するピクセル数よりも外側の広がった成分 (ハロー成分と定義する) の領域に存在するピクセル数の方が多いので、 θ を決める際にハロー成分の形に影響を受けやすくなる。形を知りたいのはスポットの中心部分なので、イメージクリーニングを行い中心部分を上手く取り出してやる必要がある。ここではイメージクリーニング手法について説明する。

$D80$ の解析に用いたのと同じバックグラウンド領域の光量を図 6.29 のようにガウシアンフィッティングした時の、分散を 1 シグマとして、その 10 倍以上の光量を持つピクセルのみ解析に用いることにより、スポットのハロー成分を除去することが可能となった。図 6.30 はイメージクリーニング前のスポットイメージで、図 6.31 はイメージクリーニング後のスポットイメージである。ハロー成分が除去できていることがわかる。10 シグマの値は典型的には、1 ピクセルが取る光量

の最大値の 1% 程度である。

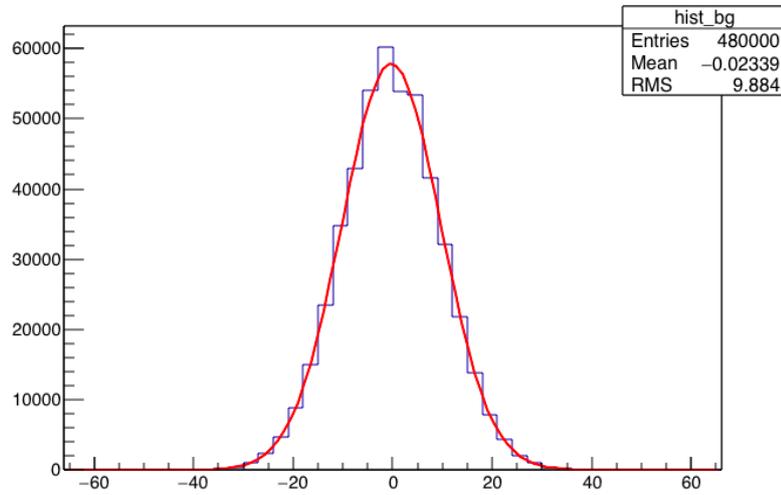


図 6.29: ON のスポット画像から最適化係数かけた OFF のスポット画像を差し引くことによって得られた、バックグラウンド領域に存在するピクセルの光量の分布。

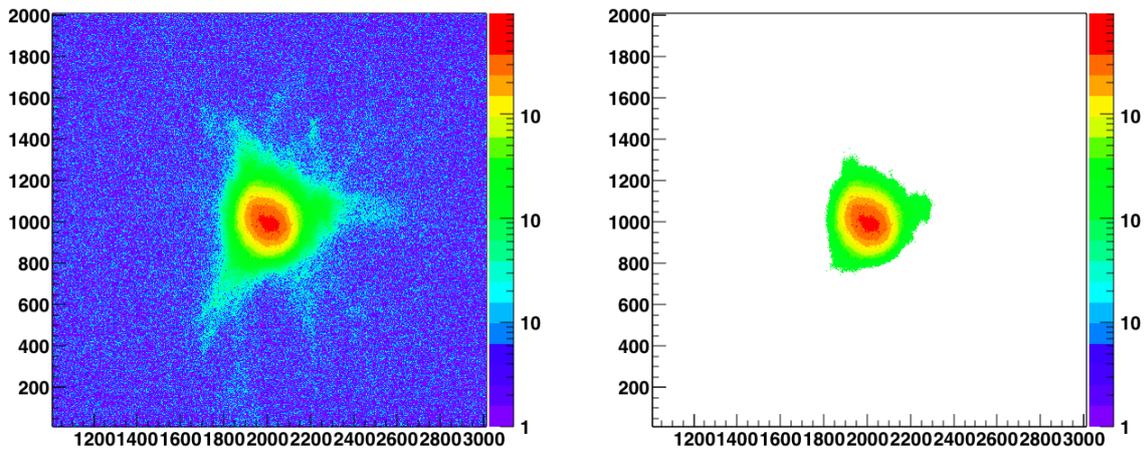


図 6.30: イメージクリーニング前のスポットの例、カラーは光量に対応しており、Log スケールとなっている。
 図 6.31: イメージクリーニング後のスポットの例、カラーは光量に対応しており、Log スケールとなっている。

フィッティング手法

2f 法 7 点測定で得たそれぞれのスポットイメージの Angle に対してフィッティングを行う関数 $f(x)$ については以下の条件を課した。

(1) 関数の値の始点と終点の値の差が 90 度であること。つまり

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) - \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = 90 \quad (6.6)$$

(2) 関数 $f(x)$ の二次の導関数をとる x に対して点対称。

条件 (1)、(2) ともに $R1_{short}$ 、 $R2_{longg}$ が直交しているという条件から課せられるものである。そのような条件に当てはまるものとして、本解析ではモデル関数としてシグモイド関数と呼ばれる関数を採用した。

シグモイド関数とは、

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} = \frac{\tanh(ax/2) + 1}{2} \quad (6.7)$$

で示される実関数である。特徴として $(-\infty, +\infty) \rightarrow (0, 1)$ で単調増加連続であり、ひとつの変曲点を持つ。この関数を用いてモデル関数を以下のように定義した (図 6.32)。

$$f(x) = \frac{90}{1 + e^{-a(x-x_1)}} + y_1 \quad (6.8)$$

フィッティングパラメータとして、関数の平行移動を表すパラメータ x_1 、 y_1 、傾きを表すパラメータ a の 3 つがあり、 $f(x)$ の値が 0 から 90 に変化するように正規化した。このモデル関数を実際の測定データに適用し、それぞれ鏡の Theta を求めた。Theta の値はフィッティング関数 $f(x)$ の $-\infty$ での極限 $f(-\infty)$ の値と定めた。

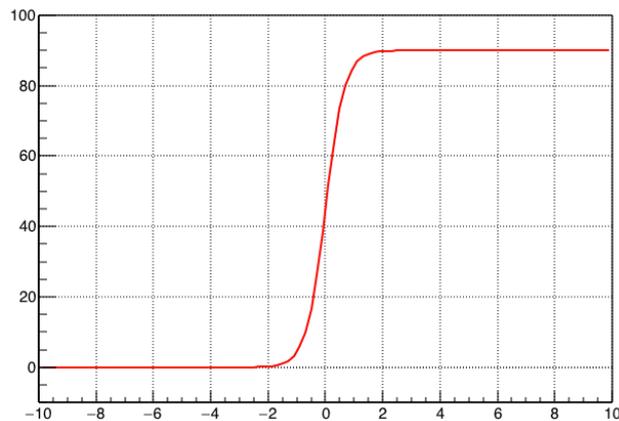
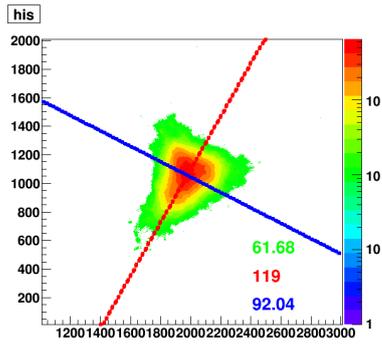


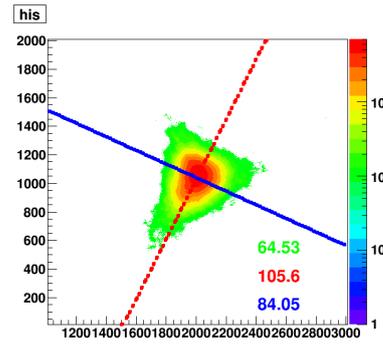
図 6.32: パラメータの値をそれぞれ、 $a=3$ 、 $(x_1, y_1)=(0,0)$ とした場合のフィッティング関数の例。

個々の分割鏡に対して得られた結果

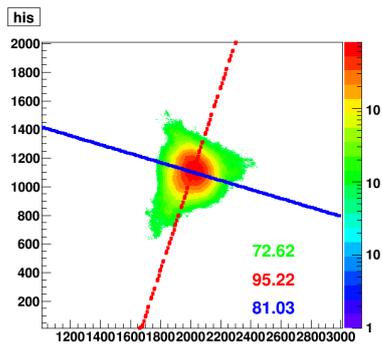
先に述べたイメージクリーニングを 2f 法測定で得た 7 枚の画像に適用した。7 枚の画像は、分割鏡の曲率半径 R 位置を基準位置として、 $\pm 0.15\text{m}$ 、 $\pm 0.30\text{m}$ 、 $\pm 0.45\text{m}$ のオフセット距離で測定で得たスポット画像である。それぞれの画像に解析を適用し、Angle と Length と Width を計算した。図 6.33 はイメージクリーニング後の 7 点のスポットイメージであり、図 6.34 は測定位置と Theta の値の移り変わりを示している。点が 90 度近く回転しており、フィッティングがうまくいっている様子がわかる。長軸が回転している様子はスポットイメージでも見て取れる。



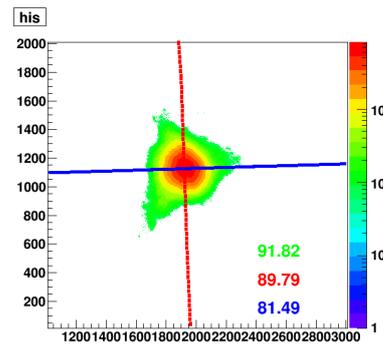
(a) R-0.45m 位置でのスポット



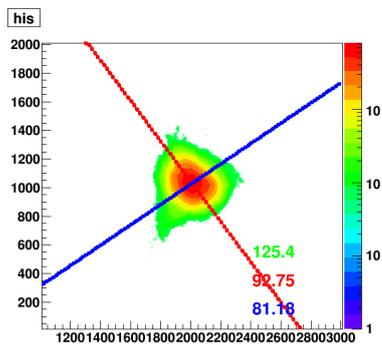
(b) R-0.30m 位置でのスポット



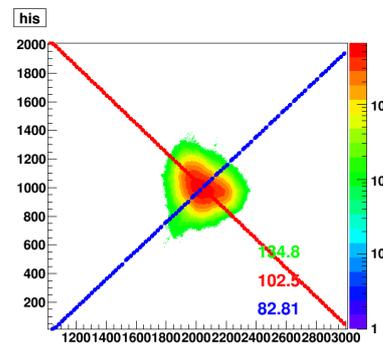
(c) R-0.15m 位置でのスポット



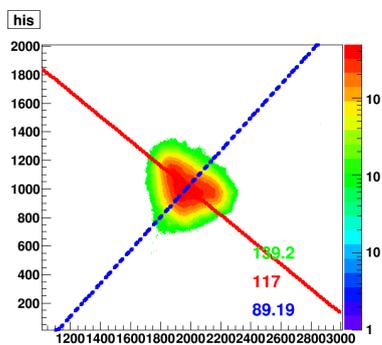
(d) R 位置でのスポット



(e) R+0.15m 位置でのスポット



(f) R+0.30m 位置でのスポット



(g) R+0.45m 位置でのスポット

図 6.33: 測定した 7 点各位置でのスポットイメージを示している。カラーバーは光量を表し、Log Scale で表している。図中、赤線は Length の方向、青線は Width の方向を示している。緑字が Angle、赤字が Length、青字は Width の値を示している。

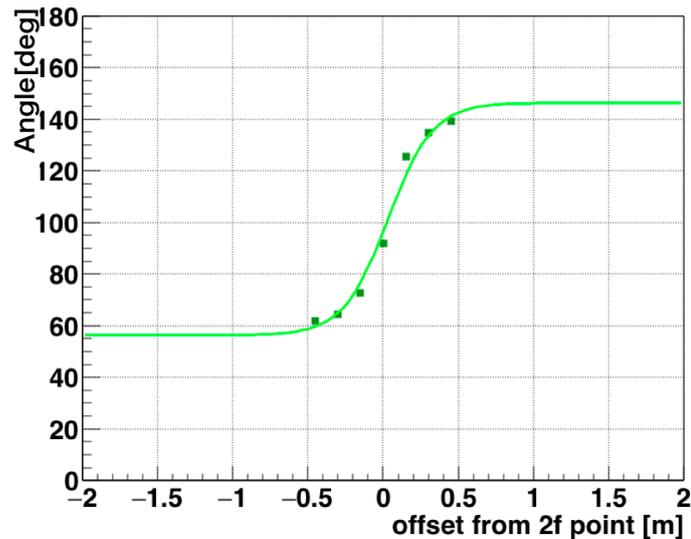


図 6.34: 点は 2f 法測定での 7 点測定で得られたそれぞれの Angle の値を示し、曲線はモデルフィッティングを適用した結果である。鏡に近い位置から遠い位置になるにつれて、Angle が 90 度移り変わっていることがわかった。

解析可能な鏡の選別

二方向の曲率半径を持った分割鏡のモデルは、分割鏡の理想球面からのずれを積極的に利用し、二方向の曲率半径方向に近似するという目的で行っているが、分割鏡の製造はその目的に対して、最適化しているわけではないので、モデルに合わない鏡も存在することが予想される。この場合、二方向の曲率半径を持ったモデルでは、近似できない複雑な分割形状となっていることが考えられる。結果的にモデルに合わない鏡というのは、楕円解析を行った際に、図 6.35 のように長軸方向がほぼ一定という場合であることがわかった。図 6.36、6.37 は、2f 測定で得られたスポットイメージであり、測定では最も離れた 2 点でのイメージであるが、長軸の方向が変わっていないことが見て取れる。このようなことが起こる原因は、大きく二種類考えられる。一つ目は鏡の形状が理想球面に近く、スポットが円形のため、長軸方向が定まらない場合であり、二つ目はそもそも理想球面からのずれを二方向に近似できない場合の二種類である。楕円の長軸の回転が見えないと、そもそもモデルを適用できないため、シグモイド関数でのモデルフィッティングを正しく行えない。そのため、モデルに合わない鏡を解析対象から外すという手順が必要になる。今回は解析対象とする鏡の基準として、シグモイド関数でモデルフィッティングした際の変曲点が 2f 法での測定範囲内に存在するという基準を設けた。この基準を設けることにより、楕円の長軸方向の回転がほとんど見えない鏡を解析対象から取り除くことができる。

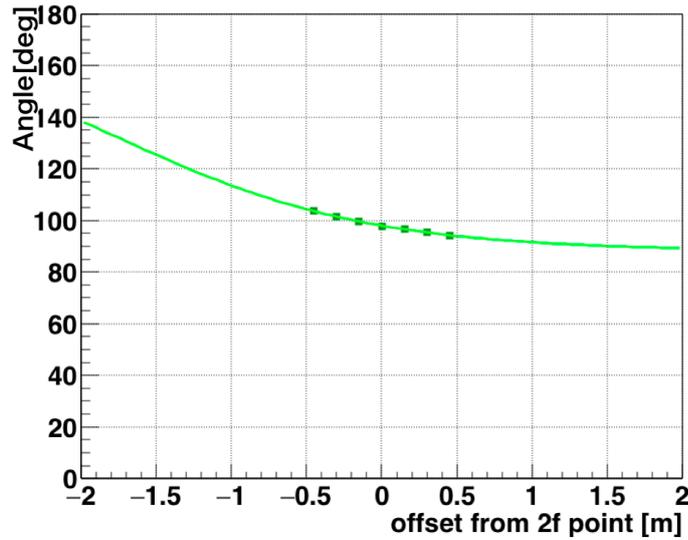


図 6.35: モデルに合わない分割鏡の Angle の値。分割鏡の曲率半径位置から距離のオフセットを取っても Angle が 90 度変化していないことがわかる。

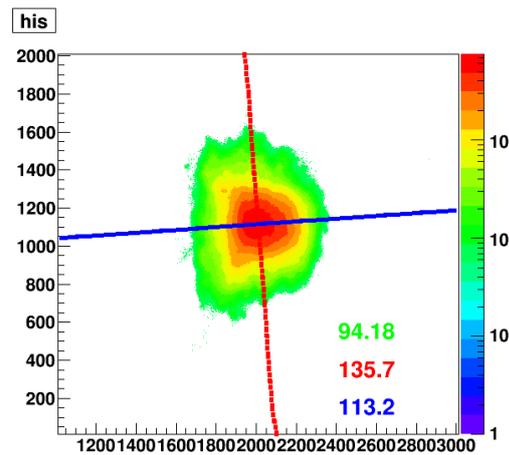
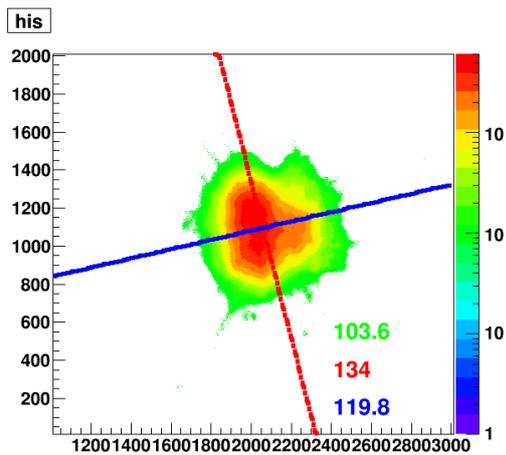


図 6.36: モデルに合わない分割鏡のスポットイメージ。R-0.45m 位置での 2f 法測定により得た。図 6.37: モデルに合わない分割鏡のスポットイメージ。R+0.45m 位置での 2f 法測定により得た。

解析を 90 枚に適応した結果

選別後、解析可能とした鏡を用いて得られた Theta の値について述べる。図 6.38 は解析可能な 82 枚、それぞれの鏡から得られた Theta の分布である。製造されたモールドによって色を変えている。緑色はモールド A で作られたもの、青色はモールド B で作られたものを示している。モールド A で作られた鏡は Theta が 40° から 90° に集中しており、またモールド B も 19 枚中 17 枚の Theta が 100° から 150° に集中している。モールド毎に分布の偏りが分かれていること

から、Theta の偏りはモールドの違いに関係した製造プロセスのくせが原因であると考えられる。図 6.39 は鏡の曲率半径と Theta の関係を示している。点 1 点 1 点が鏡一枚に対応しており、赤点がモールド A から作られた鏡、青点がモールド B から作られた鏡を示している。曲率半径と Theta には相関がなく、モールドの種類により、Theta が偏っていることがわかる。

また、図 6.40 は、横軸が鏡のシリアル番号、縦軸が Theta を示している。図 6.39 と同様に赤点がモールド A から作られた鏡、青点がモールド B から作られた鏡を示している。鏡のシリアル番号は、製造順に付けられており、番号が小さいほど早い段階で作られた鏡である。モールド A はこれまで試作でも使われていたモールドであるが、モールド B は量産体制に入った今回より、使われ始めたモールドである。そのため、製造上の問題より最初の 2 枚は Theta の値がその後のモールド B で作られた鏡と異なっているのではないかと推測できる。このことを積極的に用いると Theta を偏りなく製造できる可能性が十分あると考えられる。

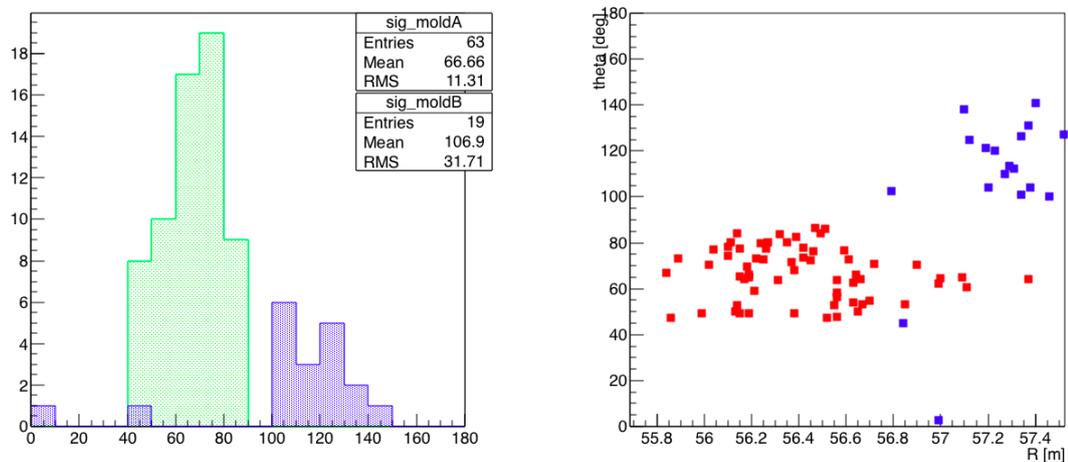


図 6.38: theta の値の一次元ヒストグラム。作ら 図 6.39: 縦軸に Theta [deg]、横軸に R[m] を表れたモールドの応じてヒストグラムの色を変えた図である。色はモールド種類を表している。緑色がモールド A、青色がモールド B 赤がモールド A、青がモールド B から作られたで製造されたものを示している。ものである。

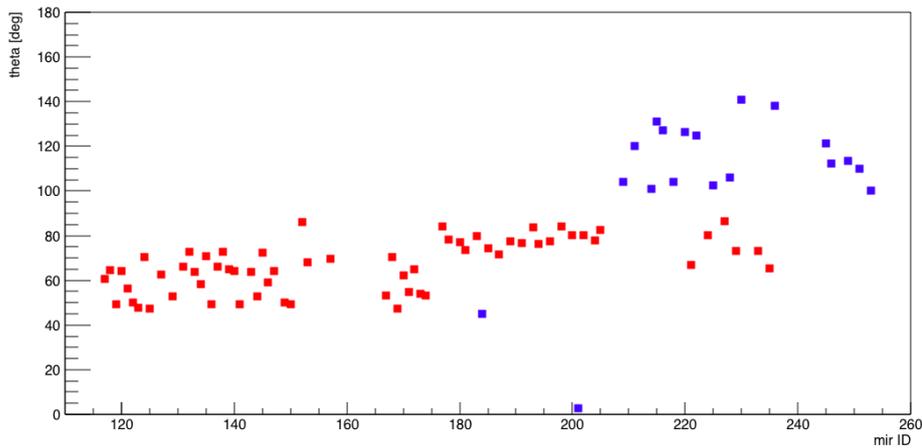


図 6.40: 鏡のシリアル番号と分割鏡の Theta[deg] の関係を示した図である。色はモード種類を表している。赤がモード A、青がモード B から作られたものである。モード毎の Theta の分布の違いがはっきり見える。

6.3.2 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の決定

この小節では、Theta を解析により決定できた 82 枚の鏡に対して、決定した $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ 、 dR の結果について述べる。前小節の手法で決定した Theta の値を用いると、鏡上での二方向の曲率半径の方向を決定でき、Theta を固定した軸周りで S1、S2 を計算、それぞれの値に対して双曲線フィッティングで求めた最小値として $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ を得ることができた (図 6.41)。シミュレーションの際と同様に $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ は dR を用いて、以下のように表される。ここでの R は $2f$ 法での測定の際に $D80$ の最小値をとる距離を示している。

$$R_{1\text{short}} = R - dR \quad (6.9)$$

$$R_{2\text{long}} = R + dR \quad (6.10)$$

シミュレーションの際は R と dR が既知の値であったが、測定の場合は R 、 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ が既知の値である。そのため、 dR は以下の式で表せる。

$$dR = (R_{2\text{long}} - R_{1\text{short}})/2 \quad (6.11)$$

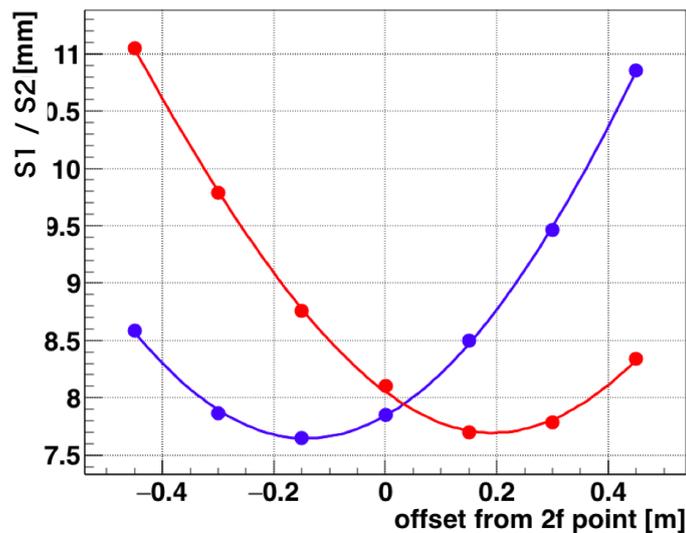


図 6.41: 分割鏡の Theta を決めたのちに $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ を求めた図。横軸が曲率半径を意味する $2f$ 位置からのオフセット距離。負の値が大きくなると鏡に近づき、正の値が大きくなると鏡から遠ざかることを意味する。縦軸が各位置で得られたスポットイメージから計算した $S1$ と $S2$ の値である。赤曲線は $S1$ に対して、青曲線は $S2$ に対してそれぞれ双曲線フィッティングを行った結果である。

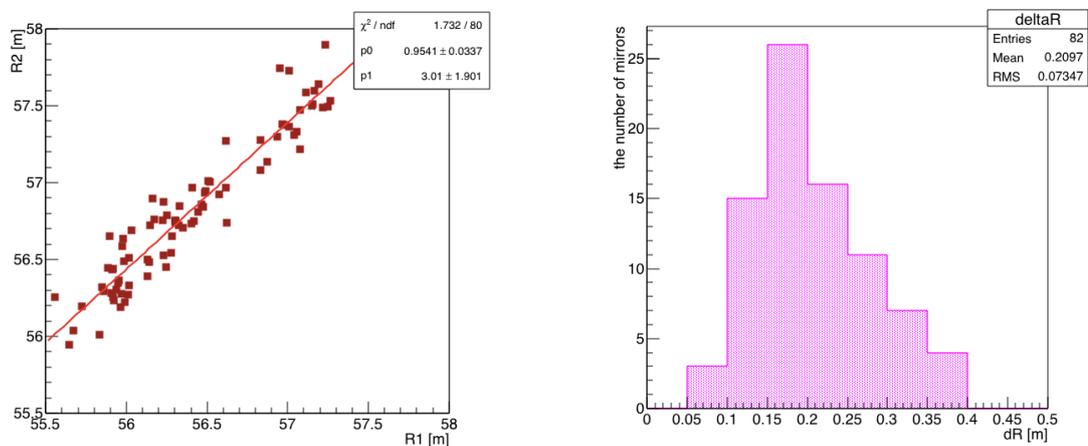


図 6.42: 82 枚の分割鏡の $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の関係を示した図である。直線 (赤色) は分布を直軸が dR [m] を表している。線フィッティングした結果であり、 $p0$ が傾き、 $p1$ が切片を示している。横軸 $R_{1\text{short}}$ (m)、縦軸 $R_{2\text{long}}$ (m) を表している。

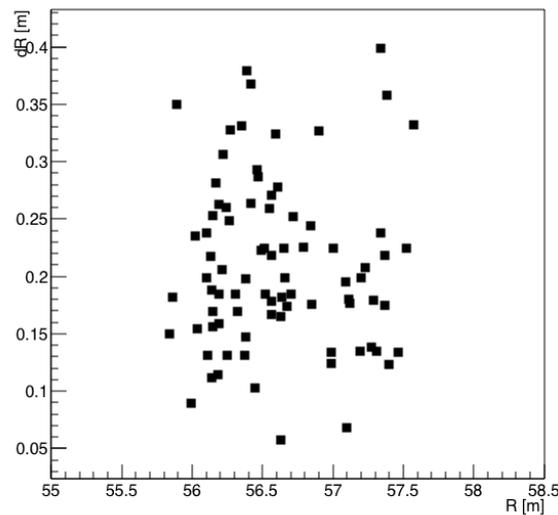


図 6.44: 82 枚の分割鏡の dR と曲率半径 R の関係を示している。横軸が dR 、縦軸が鏡の曲率半径 R を示している。bin 幅は 0.05m である。

図 6.42 は、横軸 $R1_{\text{short}}[\text{m}]$ 、縦軸 $R2_{\text{long}}[\text{m}]$ を表しており、また最小二乗法を用いて、直線近似を行った。図 6.43 は、解析により得られた $R1$, $R2$ の値と式 6.11 を用いて得られた分布である。この分布より、 dR は一様に分布しているのではなく、ピークを持った分布であることがわかる。また図 6.44 より、 dR と R の間には依存関係はないことがわかった。次章では本解析により、得られた分割鏡それぞれの $R1_{\text{short}}$ 、 $R2_{\text{long}}$ 、 dR 、 Θ そして R 、 $D80$ の値から成る分布を用いて望遠鏡全体のスポットサイズがどのように影響を受けるかを考察する。

6.4 まとめ

4 章で述べた $2f$ 法測定を行う中で、球面からのずれが存在することがわかり、このずれを積極的に利用し、放物面への最適配置を行う際に分割鏡の評価項目を増やすことで、「さらなる」最適配置を行えないかという着想に至った。「さらなる」最適配置を検討するにあたって、分割形状を球面であるとするモデルを拡張し、分割鏡の球面形状からのずれを二方向の曲率半径に近似する新しい分割鏡形状モデルを考案した。光線追跡シミュレーションによる原理実証により、分割鏡の非点収差を用いた $2f$ 法測定による分割鏡の二方向の曲率半径を評価する新たな解析手法の開発を行った。この新たな解析手法により、分割鏡の光学性能の評価項目に、二方向の曲率半径とその方向という項目を追加することができた。そして、この解析手法を先の 90 枚の分割鏡を適用した。その結果、90 枚中 82 枚の鏡に新しい分割鏡形状モデルを適用させることができた。

第 7 章

LST 光学性能の最適化の検討

5 章では分割鏡の結像性能 (スポットサイズ)、曲率半径を 2f 法で測定し、6 章では解析手法の開発により、おのおのの分割鏡に対して二方向の曲率半径とその方向を決定することができた。この章では測定から得られた分割鏡の曲率半径、結像性能、二方向の曲率半径とその方向というパラメータを用いて、実際に現存する分割鏡が望遠鏡に搭載された場合、一台の望遠鏡としてどのような光学性能を示すかについて光線追跡シミュレーションを行った内容について述べる。

7.1 目的

現在分割鏡の大量製造が行われており、2016 年には 90 枚の鏡が東京大学宇宙線研究所に納品された。それらの測定を行ったことで現在の分割鏡性能の状態を把握することができた。先行研究で行われてきた望遠鏡光学系のシミュレーションは、分割鏡の 10 枚程度と数がまだ少なく、いわば理想的に近い状況でしか光学性能を見積もっていない。大量に分割鏡が製造されている今、再度実測値に基づく分割鏡性能に即した望遠鏡の光学性能評価を行う必要がある。さらに今回の望遠鏡光学性能評価では、従来用いられてきた D80 と曲率半径だけでなく、6 章で述べた解析法により新たに得たパラメータを追加したモデルを採用している。それによって、より現実に近い状態で望遠鏡の結像性能を見積もり、各パラメータそれぞれを考慮した配置がどの程度望遠鏡の結像性能に影響を与えるのかを見積もることが本章の目的である。

7.2 放物面形状での幾何光学

放物面の回転軸に平行な光線が入射した場合、反射光線は全て焦点に集まる。次に、光軸から傾いた平行光線が放物面鏡に入射する場合を考える。光軸から光線が傾いている角度を Off-Axis Angle と呼ぶ。この場合、光線の外側の光の重心が反射像平面の半径方向にずれることによる収差であるコマ収差により、スポットは三角に広がった尾のような構造を持つ。図 7.1 と図 7.2 では、Off-Axis Angle が 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 度の 6 セットの平行光線をそれぞれ放物面に入射させ、光線追跡シミュレーションにより得られたスポットイメージを示している。光線を入射した放物面は LST 放物面と同じ曲率、口径を持つ一枚鏡形状の放物面鏡である。分割鏡から構成されている形状ではない。Off-Axis Angle が 0 度、つまり光軸と平行な場合は一点に集光し、Off-Axis Angle が大きくなるにつれて、コマ収差の影響でスポットが伸びていることが見て取

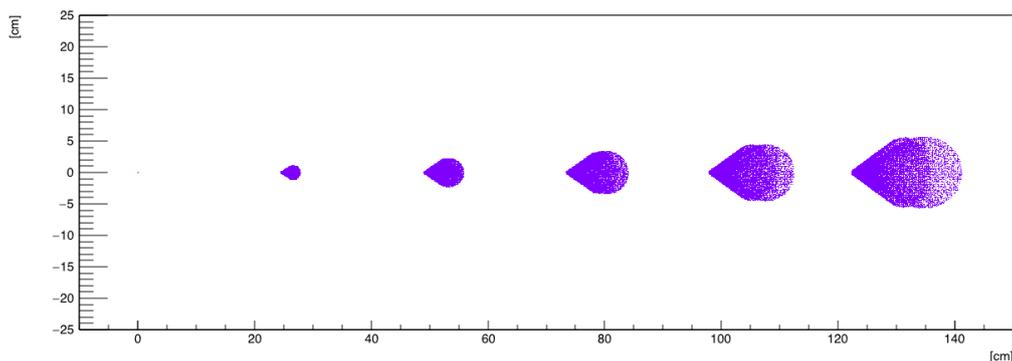


図 7.1: 理想放物面鏡形状を用いた光線追跡シミュレーションにより得られたそれぞれの Off-Axis Angle ごとの望遠鏡焦点面でのスポットの位置と形状を表した図。原点 $(x, y)=(0, 0)$ は放物面の焦点を意味している。Off-Axis Angle=0.0[deg] のときは、原点で一点に集光している。

れる。図 7.3 は Off-Axis Angle とスポットサイズである D80 の関係を示した図である。この図 7.3 の黒線にどれだけ近づけることができるか考えるのが分割鏡の最適配置を考える上で重要である。比較のために、典型的な例である 198 枚の分割鏡からなる放物面に対してシミュレーションを行った結果も載せている。ここの分割鏡のぼけはすべて仕様値である焦点距離位置で 16.7mm、曲率半径は配置位置の放物面の曲率半径と一致させた。図 7.3 下図は黒線と赤線の比を表しており、Off-Axis Angle が大きいとき、両者の値が近づいていることがわかる。これはコマ収差の影響であると考えられる。図 7.3 の青線は LST 望遠鏡の要求性能である「Off-Axis Angle が 1.2 度でスポットサイズ (D80) が 0.11 度以下」を示している。要求性能を満たすことも目標の一つである。

7.3 LST の結像性能のシミュレーション

7.3.1 シミュレーションセットアップ

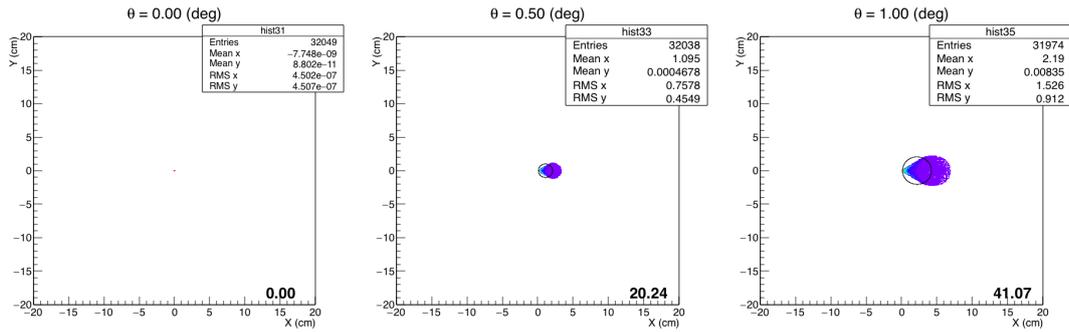
鏡一枚のスポットサイズを調べた際と同様に、光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡の光学性能を調べた。光学性能を調べるために平行光線を 198 枚の分割鏡を配置した放物面に入射した。光軸からの Off-Axis Angle を 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5[deg] に変えて、望遠鏡のスポットサイズがどのように変化するかを調べた。光線追跡シミュレーションの様子を図 7.4 に示す。シミュレーションの際に入力した光学系に関するパラメータを以下に示す。

(1) 鏡の位置

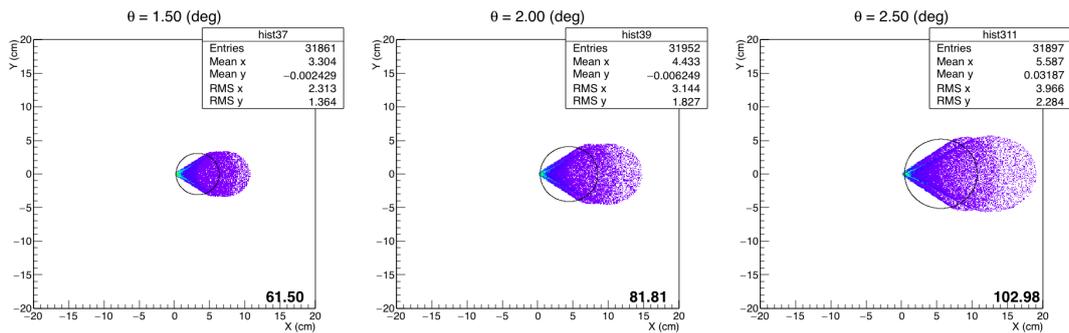
六角形の形状分割鏡を図 7.5 のような LST 仕様の座標に配置した。

(2) 分割鏡の形状

分割鏡一枚の際の光線追跡シミュレーションと同様に、対辺 1.51m の六角形の形状で、ひとつの頂点が CMOS カメラを取り付けるための頂点から 10cm の位置に三角形のカットが入っている。



(a) Off-Axis Angle 0.0[deg] の場合 (b) Off-Axis Angle 0.5[deg] の場合 (c) Off-Axis Angle 1.0[deg] の場合



(d) Off-Axis Angle 1.5[deg] の場合 (e) Off-Axis Angle 2.0[deg] の場合 (f) Off-Axis Angle 2.5[deg] の場合

図 7.2: 理想放物面鏡形状を用いた光線追跡シミュレーションにより得られたそれぞれの Off-Axis Angle ごとの望遠鏡のスポットサイズを表した図。スポットの下にある数字は D80[mm] の大きさを表しており、黒円は D80 に対応している

(a) 分割鏡の曲率半径 R

2f 法での測定で、スポットサイズ (D80) が最小となる位置と鏡間の距離で決まる値である。

(b) 分割鏡の二方向の曲率半径 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の差の半分の値 dR

$R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ は、 $R_{2\text{long}} = R + dR$ 、 $R_{1\text{short}} = R - dR$ で定義している。そのため、dR をパラメータとして入力し、R と組み合わせることで $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ を決定することができる

(c) 二方向の曲率半径の方向 Theta

分割鏡の理想的な Theta という、図 7.5 より定義した、xy 座標を用いて計算した原点を中心とした回転角を意味する。

(3) 分割鏡の結像性能 (スポットサイズ)

一枚の光線追跡シミュレーションの際と同様に、鏡の反射のふらつきによるぼけの効果と鏡の二方向の曲率半径を持つことによる非点収差により結像性能が悪くなる効果という二つの効果を畳み込んだものが分割鏡の結像性能 (スポットサイズ) となっている。ぼけの効果は鏡の反射のふらつきを直交した二軸 (XY 平面) の分散が等しい二次元正規分布でモデ

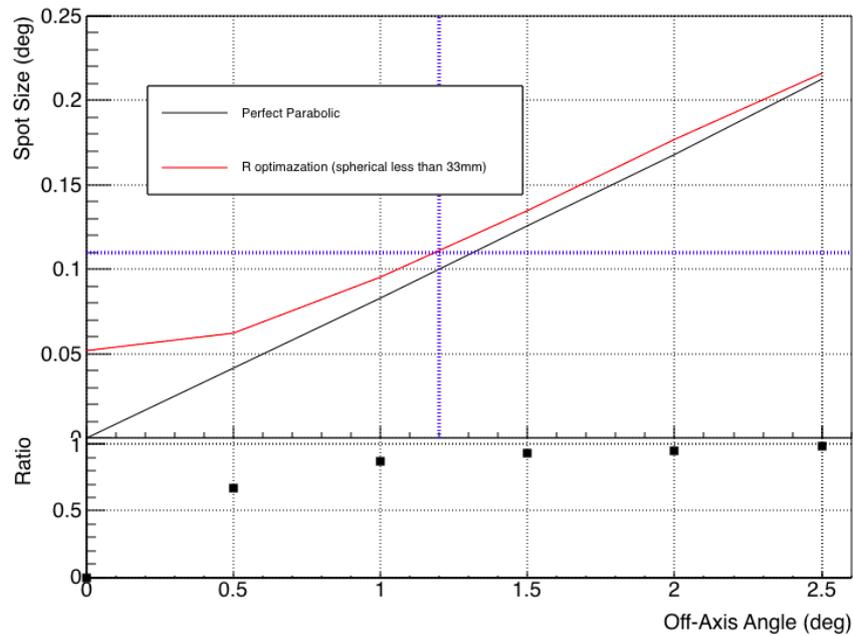


図 7.3: 上図は光線追跡シミュレーションで得られた Off-Axis Angle ごとのスポットサイズを表している。黒線は、理想放物面形状に対してシミュレーションを行った結果である。赤線は、比較のために用意した 198 枚の分割鏡からなる放物面に対してシミュレーションを行った結果である。この分割鏡のぼけはすべて仕様値である焦点距離位置で 16.7mm、曲率半径は配置位置の放物面の曲率半径と一致させている。青線は要求性能である「Off-Axis Angle が 1.2 度でスポットサイズ (D80) が 0.11 度以下」を示している。下図は黒線と赤線の比を表している。

ル化し、ぼけの大きさは二次元正規分布の分散により与えている。鏡の二方向の曲率半径を持つことによる非点収差の効果は二方向の曲率半径の差の半分である dR で与えている。またここで述べる分割鏡のスポットサイズである D80 は、 $2f$ 位置での値である。

望遠鏡の光学性能を調べるにあたって、(2-a)、(2-b)、(2-c)、(3) のパラメータは、測定した 90 枚の分割鏡の分布を拡張し、198 枚の分布を仮定した。

7.3.2 最適化を行う項目における評価

LST の結像性能 (スポットサイズ) を評価するにあたって、次の 4 つの事柄についての影響を評価した。ここでのスポットサイズは分割鏡の際と同様に、全光量の 80% を含む円の直径で定義している。

(1) 曲率半径の最適化の影響

・背景：198 枚の分割鏡から構成される LST 主鏡放物面鏡で鮮明なスポットを得るには、全体形状を放物面にできるだけ近づければよい。そのためには $2f$ 法測定で得た分割鏡の曲率半径と分割鏡を置く位置の放物面の曲率半径を考慮して分割鏡配置を決める必要がある。ここでは、分割鏡の曲率半径を短いものから長いもの順に放物面の中心から外側へ並べる

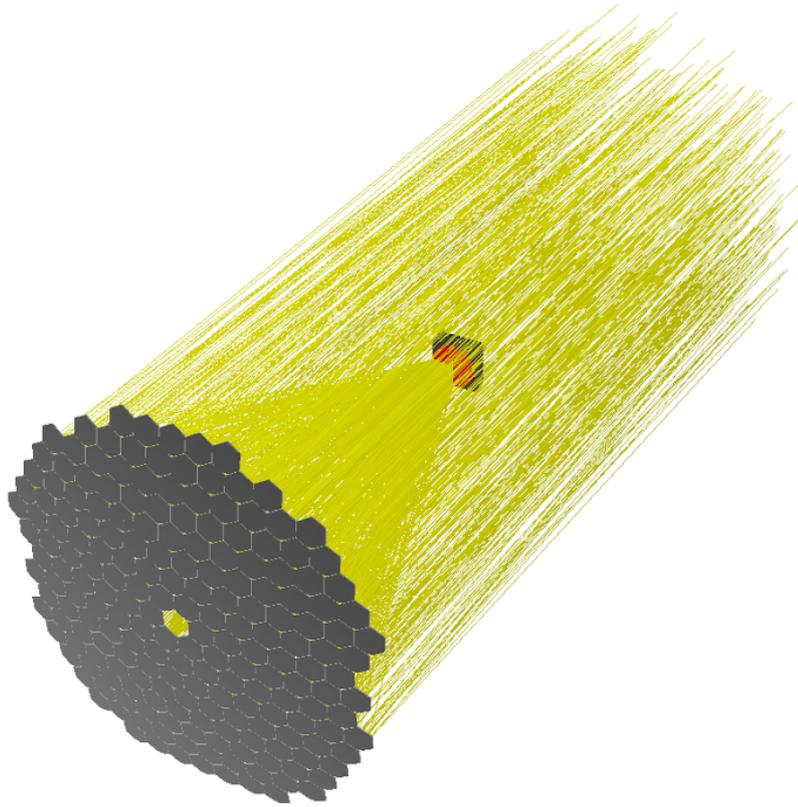


図 7.4: ROBAST を用いた分割鏡で構成された放物面に光線 (黄線) を打ち込んだ際の光線追跡シミュレーションの様子を示した例。Off-Axis Angle が 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5[deg] の平行光線をまとめて示している。平行光線が焦点に集められていることがわかる。

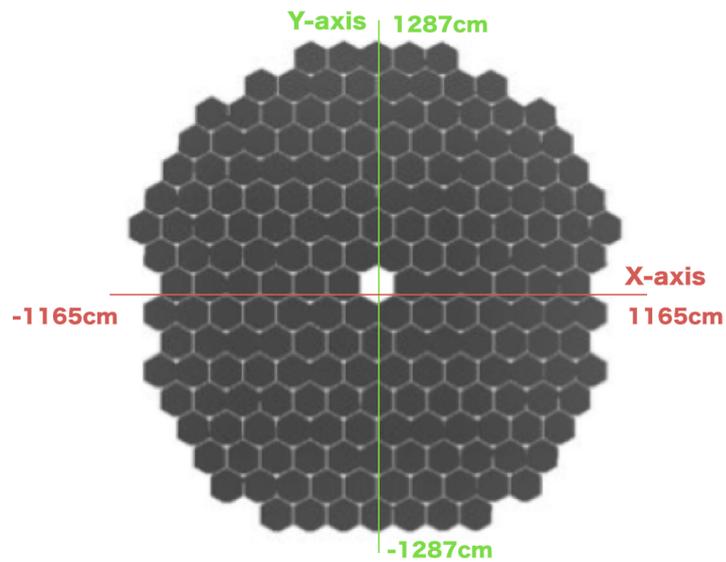


図 7.5: 分割鏡の配置図 [34] と座標系。

場合、分割鏡の曲率半径を長いものから短いもの順に放物面の中心から外側へ並べる場合、分割鏡曲率半径を考慮しない場合という3パターンでの望遠鏡のスポットサイズを比較し、最もスポットサイズが小さくなる場合と大きくなる場合を見積もった。

・目的：分割鏡の曲率半径を放物面に近づけた場合、どれだけ望遠鏡スポットサイズに影響を与えるかを調べること。

(2) 曲率半径のより現実的な最適化の影響

・背景：(1)では、望遠鏡のスポットサイズを比較し、最もスポットサイズが小さくなる場合と大きくなる場合を見積もった。(2)では、分割鏡を放物面にインストールする作業を考慮した配置方法を見積もる。これが「より現実的な最適化」である。分割鏡を放物面に配置する場合、曲率半径の大きさの順に並べて、短い順に放物面の内側に置いていくのが一番良い方法である。しかしこの方法だと一枚一枚分割鏡を選んで、放物面に取り付けるという手間がかかる。そのため、よりインストール作業を効率的にするために、放物面をある曲率半径の範囲で、分割し領域を決めその中ではランダムに鏡を配置するという手法で分割鏡曲率半径の最適化を行った場合、どれだけスポットサイズに影響を与えるかを見積もりたい。

・目的：曲率半径の範囲による領域の数がスポットサイズにどれだけ影響を与えるかを見積もり、適当な領域数を決めること。

(3) Theta の最適化の影響

・背景：5章で述べた解析手法の開発により、分割鏡の曲率半径の方向 Theta というパラメータを得ることができた。放物面上のどこに置くかによって、理想的な Theta は決まるので、それにしたがって配置することが望まれるが、実際に製造された分割鏡の Theta が均質に分布しているとは限らない。そのため、放物面をある Theta の範囲で、分割し領域を決めその中ではランダムに鏡を配置するという手法で分割鏡の Theta の最適化を行った場合、どれだけスポットサイズに影響を与えるかを見積もりたい。

・目的：Theta の範囲による領域の数がスポットサイズにどれだけ影響を与えるかを見積もり、適当な領域数を決めること。

(4) 分割鏡のスポットサイズの最適化の影響

・背景：分割鏡のスポットサイズは要求仕様では焦点距離位置で $D80=16.7\text{mm}$ 、つまり $2f$ 位置では 33.4mm 以内であるとしているが、実際測定したところ仕様を満たさないものもあることがわかった。それら仕様を満たさない分割鏡を使用した場合、望遠鏡スポットサイズにどれだけ影響を与えるかを見積もりたい。

・目的：仕様を満たさない分割鏡を使用した場合、望遠鏡スポットサイズにどれだけ影響を与えるかを見積もること。

4つの事柄それぞれの場合で、最適化を行うパラメータ以外は変更せずに光線追跡シミュレーションを行った。パラメータの分布は乱数によって生成したものを10セット用意した。どのような分布を生成したかは後述する。表7.1にどのパラメータを固定し、変化させたのかをまとめた。「パラメータを固定している」というのは用意した10セットのパラメータを使用しているということの意味する。以降の小節で、それぞれの比較について詳しく述べる。

最適化項目	曲率半径	dR	Theta	分割鏡スポットサイズ
(1) 曲率半径の最適化	変化させた	固定	固定	固定
(2) 曲率半径のより現実的な最適化	変化させた	固定	固定	固定
(3) Theta の最適化	固定	固定	変化させた	固定
(4) 分割鏡スポットサイズの最適化	固定	固定	固定	変化させた

表 7.1: シミュレーションにおけるパラメータの組み合わせを示した表

7.3.3 曲率半径の最適化の影響評価

放物面の曲率半径は光軸から近いほど小さく、離れるにつれて大きくなるので、分割鏡を配置する場合、曲率半径の小さいものから光軸に近い位置に置いていくのが曲率半径の最適配置である。この小節では (a) 曲率半径の小さいものから内側に置く最適配置を行った場合、(b)198 枚の鏡を個々の曲率半径を考慮せずにランダムに配置した場合、(c) 曲率半径の大きいものから内側に置いていく最も悪い配置法を行った場合の三種類の比較を行った。用いたパラメータについて説明する。

(1) 曲率半径

2f 法での測定より、曲率半径の分布は各モールドの値を中心に分布していることがわかった。今回はそれぞれのモールドから製造された鏡の曲率半径の分布を正規分布と仮定し、鏡 198 枚の曲率半径の分布を生成した。モールド C に関しては未製造のため、モールド A、モールド B の測定からの外挿により分布を生成した (図 7.6)。曲率半径の分布から、分割鏡の曲率半径の違いによる効果を見積もるため、先に述べた 3 パターンの方法で分割鏡を配置した。その結果を図 7.7 に示す。図 7.7 は、分割鏡の曲率半径と配置した位置が光軸からどれだけ離れた位置であるかを示した図である。放物面の曲率半径は、光軸から離れるにつれて大きくなる。そのため、分割鏡の曲率半径分布を与えた場合、図 7.7a が最も放物面の曲率に近くなる配置方法で、図 7.7c が最も放物面の曲率から遠くなる方法である。

(2) 分割鏡の二方向の曲率半径 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の差の半分の値 dR

6 章で解析したデータより、値が平均値 0.20m、分散が 0.08m の正規分布に従うとして、分布を生成した (7.8)。図 7.9 は、図 7.6 と図 7.8 からもとに作成した R_1 と R_2 の分布である。 $R_{2\text{long}} = p_0 \times R_{1\text{short}} + p_1$ の直線でフィッティングを行った結果が、図中のに書かれており、 p_0 が傾きを表し、 p_1 が直線の切片を表すパラメータである。前章の測定データと比較すると、誤差の範囲内で一致している。この場合の誤差は各点の誤差の重みが同じである場合で計算している。

(3) Theta

図 7.5 で定義した鏡の座標位置から光軸周りの回転角を計算し、得られた理想的な分布を用いた。分割鏡は放物面上に配置されているので、図 7.10 のようにほぼ均質な分布になる。

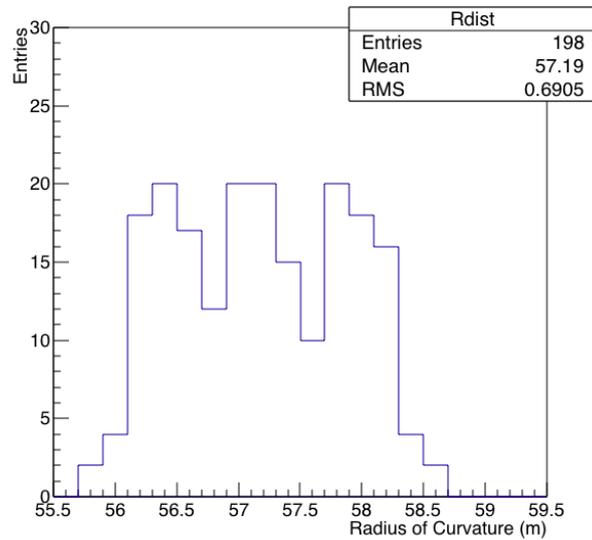
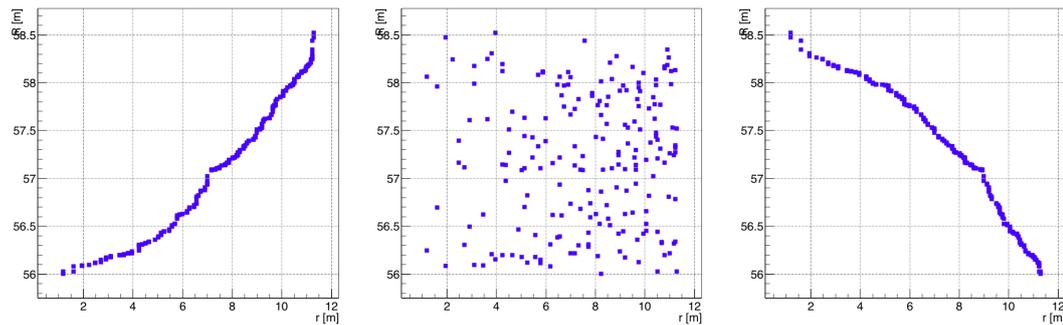


図 7.6: 曲率半径の分布の一例。この曲率半径の分布を 10 セット用意した。bin 幅は 0.2m。



(a) 曲率半径の小さいものから内側に置く最適配置を行った場合
 (b) 198 枚から鏡をランダムに取り出し、内側から置いていく配置方法を行った場合
 (c) 曲率半径の大きいものから内側に置いていく最も悪い配置方法を行った場合

図 7.7: 縦軸に分割鏡の曲率半径 R 、横軸に光軸からの距離 r を取った図。それぞれ 10 セット用意した中での一例である。一点一点が一枚の分割鏡を表している。

(4) 分割鏡のスポットサイズ (D80)

分割鏡のスポットサイズ (D80) は 6 章で述べたとおり、光線追跡シミュレーションでは分割鏡の結像のぼけと dR に依存する。しかし、測定したデータはこれら二つの効果がたまたみ込まれた結果になっている。結像のぼけのみの効果を測定データから取り出すことができないため、今回は測定したスポットサイズをぼけの値として、図 7.11a のようにパラメータに入れ、それに用意した dR の分布である図 7.11b を入れるという手法を取った。そのため実際の分布よりも dR の効果分だけ悪い分布になっている。図 7.11c は実際に分割鏡に入力した結果である。しかし、 dR のスポットサイズの影響は dR が正規分布の平均値で

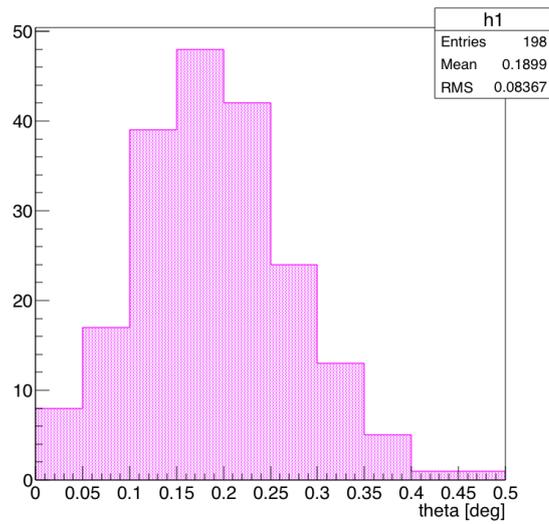


図 7.8: dR の分布の一例。この dR の分布を 10 セット用意した。bin 幅は 0.05m。

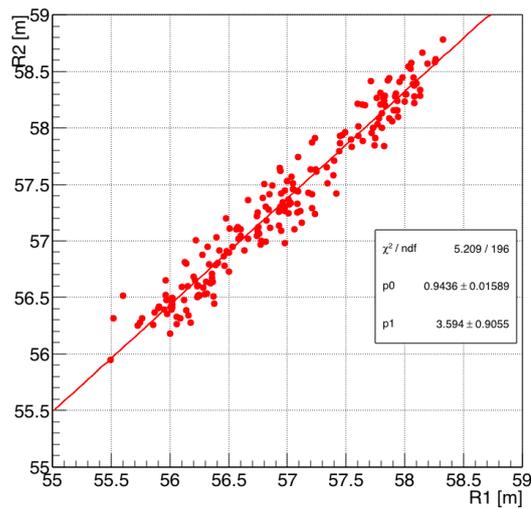


図 7.9: 図 7.6 と図 7.8 をもとに作成した $R1_{\text{short}}$ と $R2_{\text{long}}$ の関係を表した図。縦軸に $R2_{\text{long}}$ 、横軸に $R1_{\text{short}}$ を取っている。

ある 0.2m であるときにたかだか D80 に対して 1mm 程度増加する程度なので分布を大きくは変えないと思われる。そのため、今回はぼけの値に測定データのスポットサイズを入力しても問題ないとした。

結果

放物面の光軸に対して、Off-Axis Angle を 6 種類、0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 度とした平行光線を入射させた光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡のスポットサイズを評価した結果を

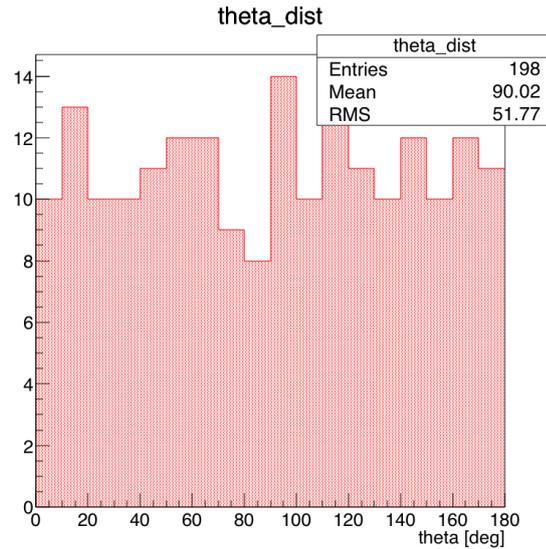
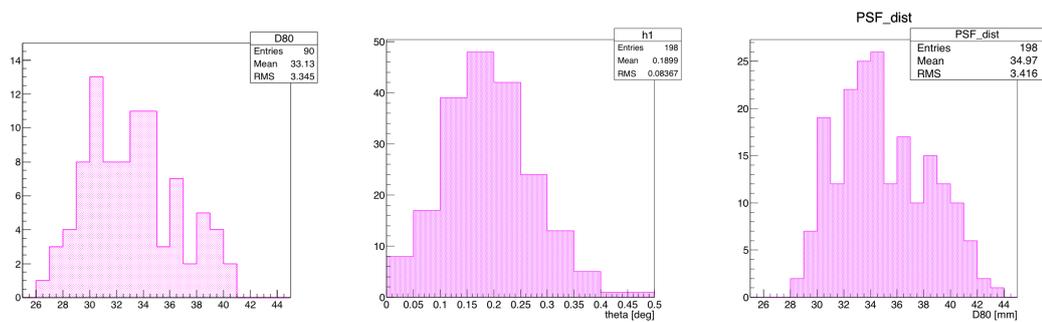


図 7.10: Theta の分布の一例。この Theta の分布を 10 セット用意した。bin 幅は 10deg。



(a) 2f 法測定によって得た分割鏡のスポットサイズの分布。bin 幅は 1.0mm。
 (b) 図 7.8 と同じ、測定データから仮定した dR の分布。bin 幅は 0.05m。
 (c) 実際に入力した分割鏡の 2f 位置でのスポットサイズの分布。bin 幅は 1.0mm。

図 7.11: 二方向の曲率半径を持った分割鏡のスポットサイズは、ぼけと二方向の曲率半径の差から由来する dR の値の二種類の値をたたみ込むことによって得られる。今回はぼけとして、測定データのスポットサイズを入力し、dR は測定データから仮定した dR の分布を入力した。

図 7.12 に示す。図 7.12 の上段は、各 Off-Axis Angle の場合の望遠鏡のスポットサイズを表している。それぞれの線幅は、10 セットの分布の結果の分散である。下段は曲率半径を光軸からの距離とは関係なく、一様にランダムに与えた場合で他のそれぞれの場合の平均値を割った比を表している。この結果、分割鏡の曲率半径の小さいものから光軸に近い方に配置すると、分割鏡の曲率半径を考慮せずにランダムに配置した場合と比べて、Off-Axis Angle が 0 度の位置で 30%、スポットサイズが向上し、小さくなることがわかった。

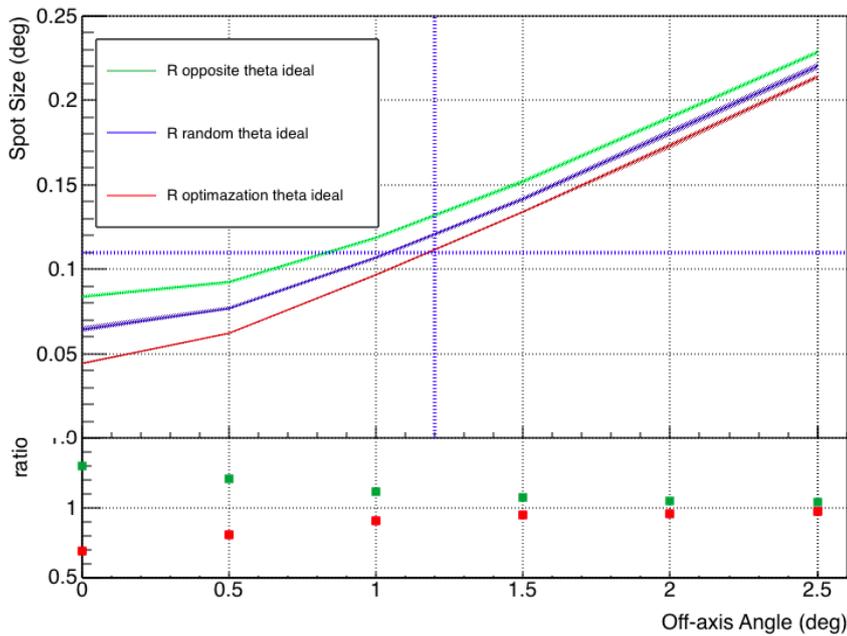


図 7.12: 上図は光線追跡シミュレーションで得られた Off-Axis Angle ごとのスポットサイズを表している。シミュレーションに用いた配置パターンはそれぞれ、図 7.7c のように分割鏡を配置した場合 (緑線)、図 7.7b のように分割鏡を配置した場合 (青線)、図 7.7a のように分割鏡を配置した場合 (赤線) である。青線は要求性能である「Off-Axis Angle が 1.2 度でスポットサイズ (D80) が 0.11 度以下」を示している。下図は青線とそれぞれの比を表している。

7.3.4 曲率半径のより現実的な最適化の影響

前節で、曲率半径の短い分割鏡から光軸に近い位置に配置する方法の場合、最もスポットサイズが小さくなることがわかった。この手法の場合は、分割鏡の曲率半径の分布が決まれば一對一に場所が決まる。今節では一對一ではなく、ある程度幅を持たせた配置が可能か考察する。「幅を持った配置」について説明する。この方法では一對一に分割鏡の配置を決めるのではなく、まず放物面を中心からの距離に応じて、いくつかの区画に分ける (図 7.13)。この際、それぞれの区画は分割鏡を同数ずつ含んでいるとする。ここで決めた区画の数に応じて、分割鏡の曲率半径の分布の中で、曲率半径の短いものから光軸に近い位置の区画にランダムに配置していく。そしてひとつの区画がいっぱいになると、次の区画へというように、分割鏡の曲率半径と放物面上の配置を一對一にするのではなく、分割鏡の曲率半径の分布から、範囲を区切ってランダムに取り出し、決められた区画に配置するという配置手法である (図 7.14)。この手法は、分割鏡を放物面にインストールする際に有用である。実際に、インストールする際に分割鏡と放物面上の位置が一對一対応だと、非常に手間がかかり非効率である。一對一ではなく、ある区画の中ではどこに置いても許されるとした場合、配置の自由度が生まれインストール作業がより効率的になる。今節では、区画数を変えた場合、スポットサイズにどのように影響が出るかを調べた。

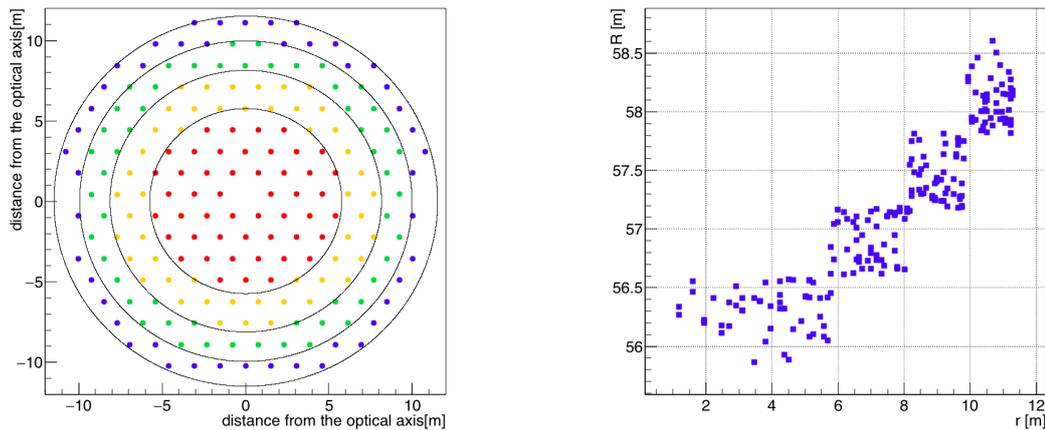


図 7.13: 放物面を同心円上に分割した例を示す。図 7.14: 7.13 のように放物面を区画に分けた場
この図では、4つの区画に分割している。色はそ 合の、分割鏡を置いた放物面上の位置と分割鏡の
それぞれの区画に含まれる鏡を示している。 曲率半径の関係を示している。4つの区画それぞ
れの中では分割鏡の曲率半径がランダムになっ
ていることがわかる。

(1) 曲率半径

放物面を図 7.13 のように同心円上にいくつかの区画に分割した。それぞれの区画は同面積
であり、ほぼ同数ずつ鏡を含むようにしている。分割した区画数は 2、3、4、5 つの 4 パ
ターンである。

(2) 分割鏡の二方向の曲率半径 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の差の半分の値 dR

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.8 で表される、測定データから仮定した
正規分布。

(3) Theta

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.10 で表される、鏡の座標位置から計算
した理想的な分布を用いた。鏡は放物面状に配置されているので、ほぼ均質な分布になる。

(4) 分割鏡のスポットサイズ (D80)

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.11c で表される、測定データから仮定し
た正規分布。

結果

放物面の光軸に対して、Off-Axis Angle を 6 種類、0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5[deg] をとした平
行光線を入射させた光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡のスポットサイズを評価した結果
を図 7.17 に示す。図 7.17 の上段は、各 Off-Axis Angle の場合の望遠鏡のスポットサイズを表し
ている。それぞれの線幅は、10 セットの分布の結果の分散である。下段は Theta の値を分割鏡の
曲率半径に関係なくランダムに配置した場合の平均値で他のそれぞれの場合の平均値を割った比

を表している。この結果、理想的に配置した場合と比べて、曲率半径を最適化する領域数は3つ以上に分けても違いは Off-Axis Angle が0度の時に最大で3%以内であるが、2つに分けた場合と比べると最大約10%異なることがわかった。

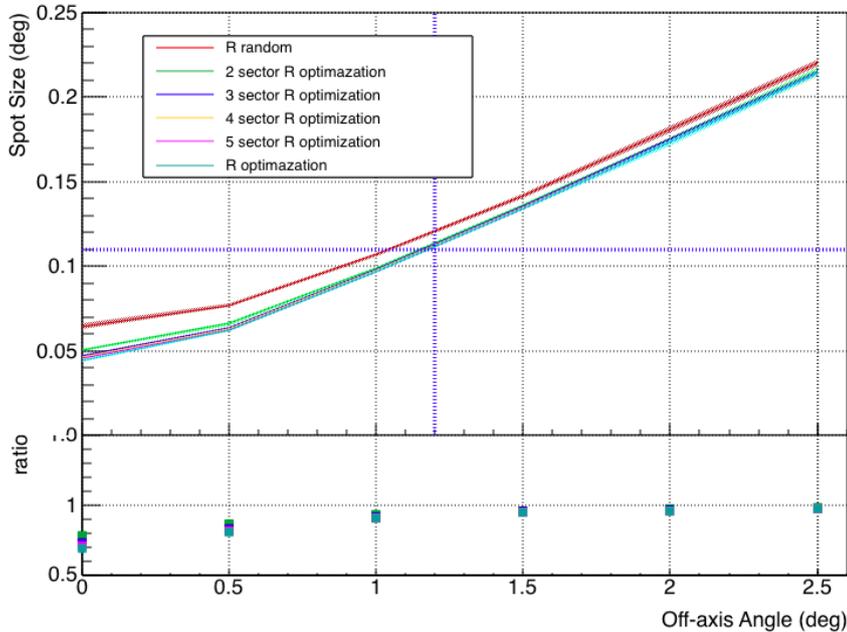


図 7.15: 上図は光線追跡シミュレーションで得られた Off-Axis Angle ごとのスポットサイズを表している。シミュレーションに用いた配置パターンは、放物面を2つに分割した場合(緑線)、放物面を3つに分割した場合(青線)、放物面を4つに分割した場合(黄線)、放物面を5つに分割した場合(桃線)の4つのパターンに加えて、前節で求めた図 7.7b のように分割鏡を配置した場合(赤線)、図 7.7a のように分割鏡を配置した場合(水色線)である。青線は要求性能である「Off-Axis Angle が1.2度でスポットサイズ(D80)が0.11度以下」を示している。下図は赤線とそれぞれの比を表している。

7.3.5 Theta の最適化の影響

(1) 曲率半径

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.6 で表される、三種類の正規分布からなる分布。

(2) 分割鏡の二方向の曲率半径 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の差の半分の値 dR

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.8 で表される、測定データから仮定した正規分布。

(3) Theta

Theta の最適化を行うために、放物面を数度毎の回転角の区画に分け、その区画の中の範囲で一様乱数で振った値を Theta とした。区画の数は、以下の6パターンである。

(一) 区間を区切らずに、それぞれの鏡に対して0度から180度の一様乱数で Theta の値を

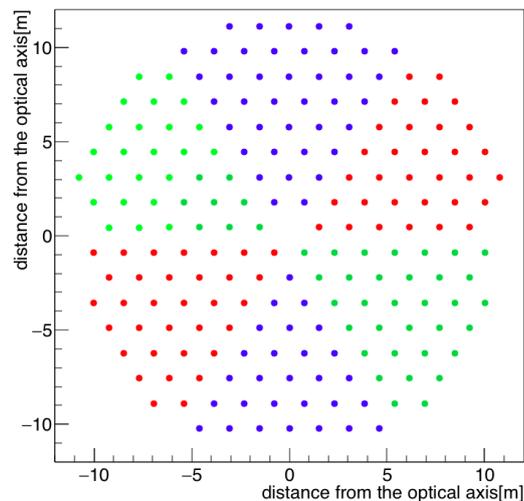


図 7.16: 放物面を 60 度毎、3 区画に区切った時の例。鏡の Theta の定義が 0 度から 180 度までなので、向かうあう区画は同じ Theta の範囲となる。

与えた場合。

- (二) 各 90 度ずつに 2 区画に区切った場合。
 - (三) 各 60 度ずつに 3 区画に区切った場合。
 - (四) 各 30 度ずつに 6 区画に区切った場合。
 - (五) 各 15 度ずつに 12 区画に区切った場合。
 - (六) 鏡の位置の座標から計算した理想的な角度に鏡毎の Theta の値を与えた場合。
- (4) 分割鏡のスポットサイズ (D80)

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.11c で表される、測定データから仮定した正規分布。

結果

放物面の光軸に対して、Off-Axis Angle を 6 種類、0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5[deg] をとした平行光線を入射させた光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡のスポットサイズを評価した結果を図 7.17 に示す。図 7.17 の上段は、各 Off-Axis Angle の場合の望遠鏡のスポットサイズを表している。それぞれの線幅は、10 セットの分布の結果の分散である。下段は Theta の値を分割鏡の置かれた位置に関係なく一様にランダムに与えた場合の平均値で他のそれぞれの場合の平均値を割った比を表している。この結果より、最も望遠鏡のスポットサイズが大きくなった、Theta を分割鏡の位置とは関係なくランダムに置いた場合と比べて、最もスポットサイズ小さくなった理想的な Theta を分割鏡に与えた場合は Off-Axis Angle が 0 度の時に一番差が生まれ、その差は 14% となった。理想的な Theta を与えた場合と区画を 15 度ずつ 12 つに分けた場合と 30 度ずつ 6 つに分けた場合での差は最大で 3% である。

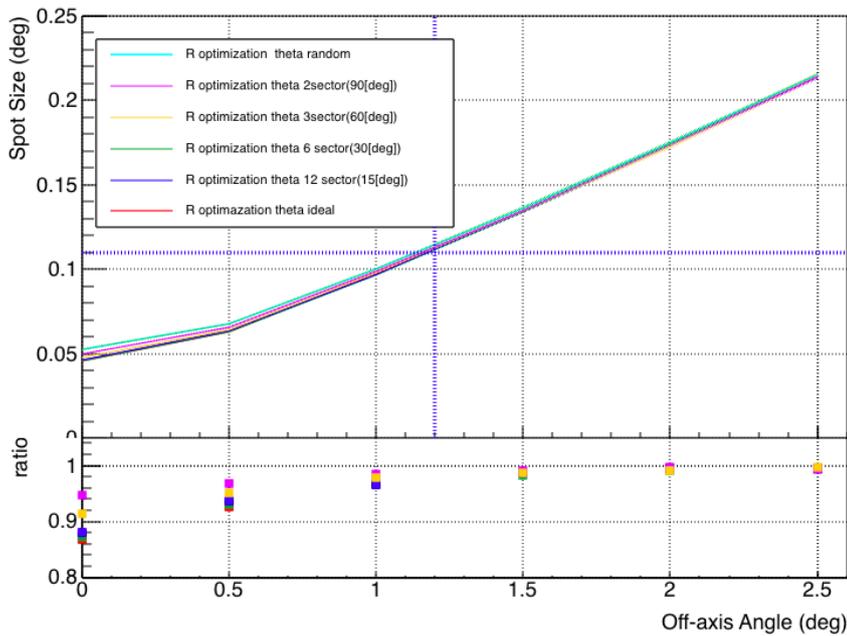


図 7.17: 上図は光線追跡シミュレーションで得られた Off-Axis Angle ごとのスポットサイズを表している。シミュレーションに用いた配置パターンは、区間を区切らずに、それぞれの鏡に対して 0 度から 180 度の一様乱数で Theta の値を与えた場合 (水色線)、各 90 度ずつに 2 区画に区切った場合 (桃線)、各 60 度ずつに 3 区画に区切った場合 (黄線)、各 30 度ずつに 6 区画に区切った場合 (緑線)、各 15 度ずつに 12 区画に区切った場合 (青線)、鏡の位置の座標から計算した理想的な角度に鏡毎の Theta の値を与えた場合 (赤線) の 7 パターンである。青線は要求性能である「Off-Axis Angle が 1.2 度でスポットサイズ (D80) が 0.11 度以下」を示している。下図は水色線とそれぞれの比を表している。

7.3.6 スポットサイズの最適化の影響

(1) 曲率半径

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.6 で表される、三種類の正規分布からなる分布。

(2) 分割鏡の二方向の曲率半径 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ の差の半分値 dR

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.8 で表される、測定データから仮定した正規分布。

(3) Theta

曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.10 で表される、鏡の座標位置から計算した理想的な分布を用いた。鏡は放物面状に配置されているので、ほぼ均質な分布になる。

(4) 分割鏡のスポットサイズ (D80) ここでは、分割鏡のスポットサイズに上限を設け、上限値を変えることによって望遠鏡スポットサイズにどれだけ影響を与えるのかを考える。ここで、上限値を与えているスポットサイズとは、すでにばけと dR の効果がたたみ込まれてい

る値であり、シミュレーションの際には分割鏡に与えられている正味の値である。図 7.18、図 7.19 は分割鏡のスポットサイズとして入力した値の分布を示している。ぼけの値を一様分布で与えて、dR の効果を加えたスポットサイズが上限値以下になるように分布を作成した。上限値は次の 5 パターンを用意し、それらの影響を調べた。以下は全て 2f 位置での分割鏡のスポットサイズの値で示している。

- (一) スポットサイズの上限が 42mm の場合
- (二) スポットサイズの上限が 40mm の場合
- (三) スポットサイズの上限が 38mm の場合
- (四) スポットサイズの上限が 36mm の場合
- (五) スポットサイズの上限が 34mm の場合

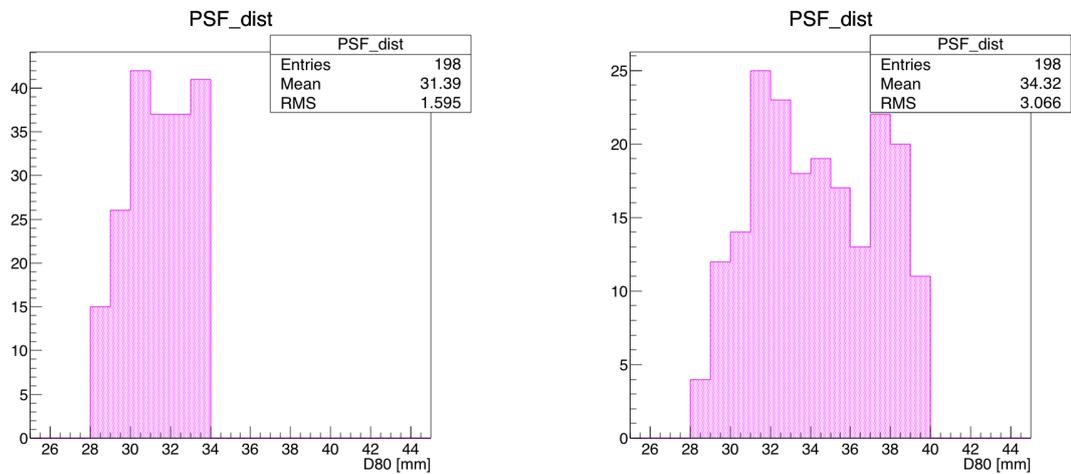


図 7.18: 2f 位置でのスポットサイズの上限が 42mm の場合の入力したスポットサイズの分布。bin 幅は 1.0mm。
 図 7.19: 2f 位置でのスポットサイズの上限が 40mm の場合の入力したスポットサイズの分布。bin 幅は 1.0mm。

結果

放物面の光軸に対して、Off-Axis Angle を 6 種類、0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5[deg] をとした平行光線を入射させた光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡のスポットサイズを評価した結果を図 7.20 に示す。図 7.20 の上段は、各 Off-Axis Angle の場合の望遠鏡のスポットサイズを表している。それぞれの線幅は、10 セットの分布の結果の分散である。下段はスポットサイズの上限が 42mm の場合の平均値で他のそれぞれの場合の平均値を割った比を表している。この結果より、最もスポットサイズが大きくなった、分割鏡のスポットサイズの上限が 42mm の場合と比べて、Off-Axis Angle が 0 度の時に 5% 小さくなることがわかった。

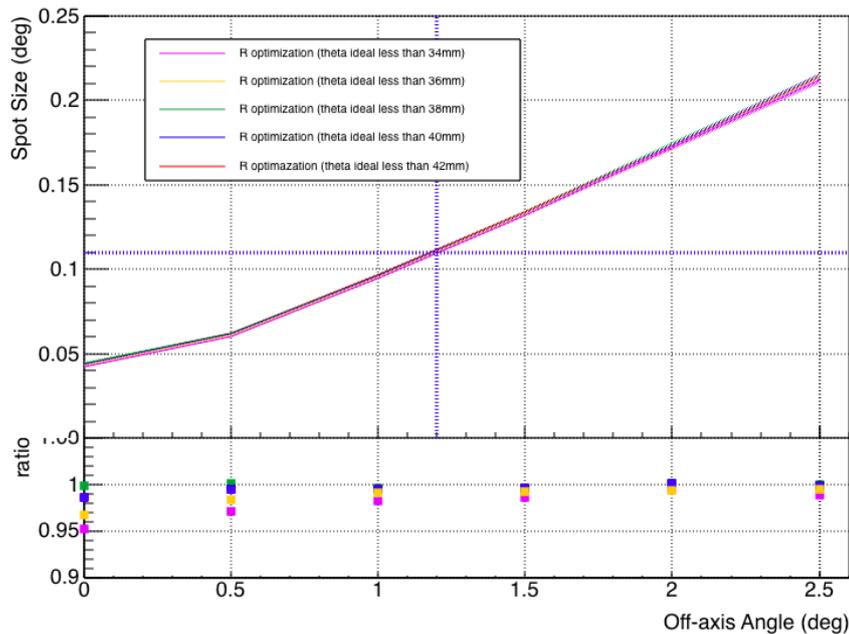


図 7.20: 上図は光線追跡シミュレーションで得られた Off-Axis Angle ごとのスポットサイズを表している。シミュレーションに用いた配置パターンは、区間を区切らずに、スポットサイズの上限が 34mm の場合 (桃線)、スポットサイズの上限が 36mm の場合 (黄線)、スポットサイズの上限が 38mm の場合 (緑線)、スポットサイズの上限が 40mm の場合 (青線)、スポットサイズの上限が 42mm の場合 (赤線) の 5 パターンである。青線は要求性能である「Off-Axis Angle が 1.2 度でスポットサイズ (D80) が 0.11 度以下」を示している。下図は赤線とそれぞれの比を表している。

7.4 まとめ

6 章で得た二方向の曲率半径を持った鏡の形状のパラメータを反映させた分割鏡形状を用いて、LST 放物面への最適配置法を検討した。最適配置を検討するにあたって、分割鏡の曲率半径の最適化、分割鏡の二方向の曲率半径の方向 Theta の最適化、分割鏡のスポットサイズの最適化を行い、光線追跡シミュレーションを行うことで、放物面鏡のスポットサイズにどれだけ影響を与えるか見積もった。さらに曲率半径の最適化については、インストール作業を考慮したより現実的な曲率半径の最適化も行った。結果としては、分割鏡の最適化を行った場合、全く曲率半径を考慮しないで配置した場合と比べて望遠鏡の Off-Axis Angle が 0.0 度のとき最大で 30% スポットサイズが小さくなることがわかった。より現実的な曲率半径の最適化においては、曲率半径を最適化する領域数は 3 つ以上に分けても違いは最大 3% 以内であるが、2 つに分けた場合と比べると最大約 10% 異なることがわかった。そのため、3 つ以上に分割することが望まれる。分割鏡の二方向の曲率半径の方向 Theta の最適化については、Theta を考慮した配置法は理想な場合、考慮しない場合と比べて、Off-Axis Angle が 0.0 度のとき最大で 14% 異なることがわかった。理想的な Theta で配置したときと 30 度ずつ 6 つの区画に分割した場合を比べると、最大で 3% しかなく、分割する区画数は 6 つが適当であると考えられる。スポットサイズの最適化については 198

枚全ての分割鏡のスポットサイズが仕様要求を満たしていた場合と実測の場合比べると、望遠鏡のスポットサイズに5%差が生まれることがわかった。

第 8 章

結論と展望

次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array は 20GeV から数百 TeV の 4 桁にわたるエネルギー領域で、現行の解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) から 10 倍以上での感度を目指している。日本グループが主に貢献している大口径望遠鏡 LST は CTA の中でも 20GeV から 1TeV 領域という比較的低エネルギーの観測を行う。IACT はチェレンコフ光のイメージを用いて宇宙線によるバックグラウンド除去を行うため、光学系の性能が非常に重要になってくる。LST 光学系は、198 枚の分割鏡から構成される放物面鏡である。高い結像性能を得るには、個々の分割鏡の光学性能を知り、それぞれの分割鏡性能を考慮した放物面への最適配置を行う必要がある。本研究では、分割鏡測定法である 2f 法の確立および 2016 年に東京大学宇宙線研究所に納品された 90 枚の分割鏡の性能評価測定を行った。その結果、分割鏡の曲率半径は、製造の際に用いるモールドと呼ばれる曲率を持った型の値を中心として、分布していることがわかった。スポットサイズは、要求仕様を満たしていないものも見られた。そのため、配置の際に考慮する必要がある。この性能評価により、個々の分割鏡の光学性能である曲率半径と結像性能を把握できたので、放物面への最適配置のための議論を行うことが可能となった。この性能評価測定を行ううちに、球面形状として製造している分割鏡に、球面からのずれが存在することがわかり、このずれを積極的に利用し、放物面への最適配置を行う際に分割鏡の評価項目を増やすことで、「さらなる」最適配置を行えないかという着想に至った。「さらなる」最適配置を検討するにあたって、分割形状を球面であるとするモデルを拡張し、分割鏡の球面形状からのずれを二方向の曲率半径に近似する新しい分割鏡形状モデルを考案した。光線追跡シミュレーションによる原理実証により、分割鏡の非点収差を用いた 2f 法測定による分割鏡の二方向の曲率半径を評価する新たな解析手法の開発を行った。この新たな解析手法により、分割鏡の光学性能の評価項目に、二方向の曲率半径とその方向という項目を追加することができた。そして、この解析手法を先の 90 枚の分割鏡を適用した。その結果、90 枚中 82 枚の鏡に新しい分割鏡形状モデルを適用させることができた。その解析で得られた分割鏡の性能評価項目を反映させた分割鏡形状を用いて、LST 放物面への最適配置法を検討した。最適配置を検討するにあたって、分割鏡の曲率半径の最適化、分割鏡の二方向の曲率半径の方向 Θ の最適化、分割鏡のスポットサイズの最適化を行い、光線追跡シミュレーションを行うことで、放物面鏡のスポットサイズにどれだけ影響を与えるか見積もった。さらに曲率半径の最適化については、インストール作業を考慮したより現実的な曲率半径の最適化も行った。結果としては、分割鏡の最適化を行った場合、全く曲率半径を考慮しないで配置した

場合と比べて望遠鏡の Off-Axis Angle が 0.0 度のとき最大で 30% スポットサイズが小さくなることがわかった。より現実的な曲率半径の最適化においては、曲率半径を最適化する領域数は 3 つ以上に分けても違いは最大 3% 以内であるが、2 つに分けた場合と比べると最大約 10% 異なるので、3 つ以上に分割するのが望まれることがわかった。分割鏡の二方向の曲率半径の方向の最適化については、放物面を 30 度ずつ 6 つの区画に分割するのが適当であるという結論を得た。スポットサイズの最適化については 198 枚全ての分割鏡のスポットサイズが仕様要求を満たしていた場合と実測の場合比べると、望遠鏡のスポットサイズに 5% 差が生まれることがわかった。

将来展望としては、「さらなる」分割鏡配置の最適検討による望遠鏡のスポットサイズへの違いが望遠鏡の物理感度にどれだけ影響を与えるかを、今回導入した新たな分割鏡形状モデルを導入した、空気シャワーシミュレーションを行う必要があると考える。また、分割鏡形状モデルも今回導入したのは、 $R_{1\text{short}}$ 、 $R_{2\text{long}}$ は曲率半径位置に対して、 dR を対称に差し引きすることで与えるという仮定が入っているが、現実にはその仮定に当てはまらない分割鏡も存在する。分割鏡形状をさらに詳細にモデル化するには新たな仮定を付け加えることができればより現実的なパラメータに即した望遠鏡光学性能を見積もることが可能となるだろう。

付録 A

最適配置検討

A.1 目的

「さらなる」最適化配置を行うにあたって、分割鏡の Theta の値はその個々の分割鏡の配置位置に対して、座標位置から計算した値を理想値として、分割鏡の曲率半径ごとに並べ替えを行い、最適配置を行った。その結果については、7章にある「より現実的な曲率半径」の最適配置の検討で述べた。

この章では、個々の分割鏡の形状は非球面形状モデルであるが、Theta の値を一様ランダム分布に従って、乱数を振り、Theta の値がわからずに並べているという条件と等しい放物面を用意した。その後、その放物面に対して、7章で行ったのと同様の光線追跡シミュレーションを行った。Theta を理想的に並べている「さらなる」最適配置と比較することで、「さらなる」最適化により望遠鏡光学性能がどれだけ改善するのかを見積もることができる。

A.1.1 曲率半径の最適化

目的

7章の「より現実的な曲率半径」の最適配置と同様に、放物面を曲率半径の値ごとにリング状に領域を分割し、その領域ごとが同数ずつ分割鏡を含むようにした。そのリングの数が、望遠鏡光学性能に与える影響を見積もった。図 A.1 は、各リングパターンにおける 198 枚の分割鏡の曲率半径と放物面軸からの距離の関係を示している。図 A.1-(a) は 198 枚の分割鏡それぞれの曲率半径に対して、曲率半径が小さい順に放物面の内側から並べていった配置のパターンである。この配置方法が考えられる最も良い配置手法と言える。図 A.1-(b) は、放物面を 2 つのリングに分割してから配置したパターンである。このパターンの場合は、198 枚の分割鏡を曲率半径を値の大きさによって、大小グループに分け、小グループを内側リングに、大グループを外側リングに置いた。リングの中では、曲率半径の大きさにかかわらず、ランダムに配置させた。以下リングが 3 つ、4 つ、5 つとしたパターン (そのため、リング数の数だけ、分割鏡曲率半径分布の塊があることが見て取れる。) と、リングがないパターン、つまり分割鏡曲率半径に関係なく、放物面上に配置した場合の計 6 パターンの配置法を用意した。そして、それぞれの配置法に対して、光線追跡シミュレーションを行い、リング数による望遠鏡光学性能の違いを調べた。

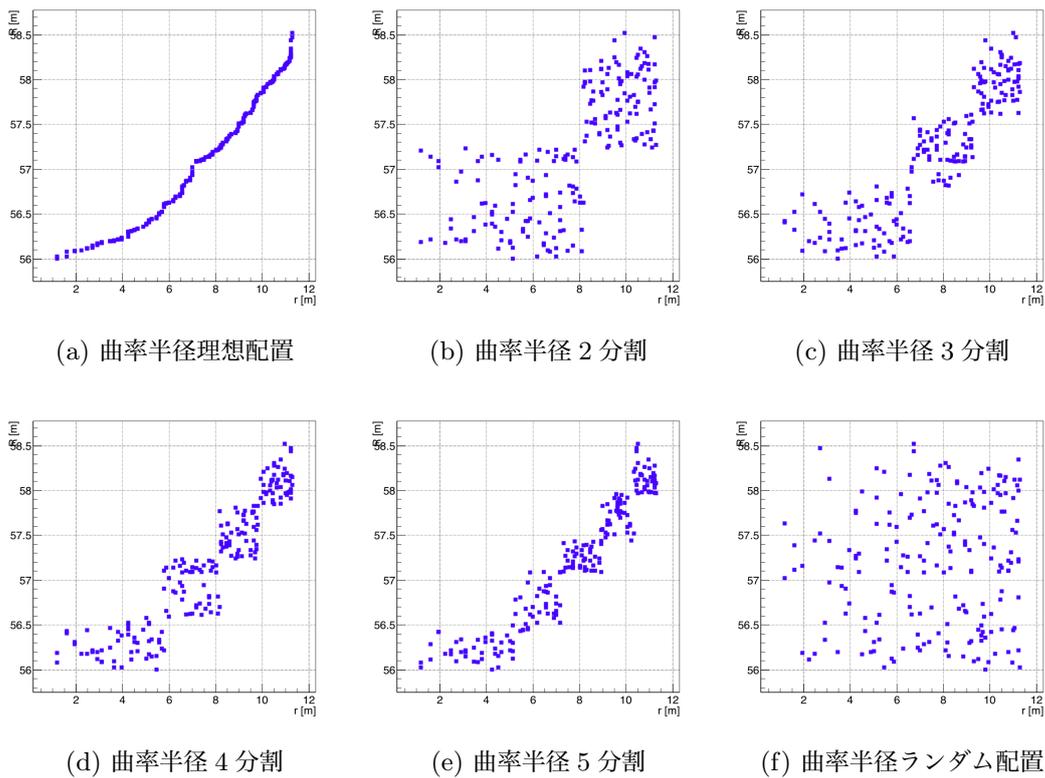


図 A.1: 分割鏡配置と放物面の分割リングパターン

- 曲率半径
放物面を図 7.13 のように同心円上にいくつかの区画に分割した。それぞれの区画は同面積であり、ほぼ同数ずつ鏡を含むようにしている。分割した区画数は 2、3、4、5 つの 4 パターンである。
- 分割鏡の二方向の曲率半径 $R1_{short}$ 、 $R2_{long}$ の差の半分の値 dR 曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.8 で表される、測定データから仮定した正規分布。
- Theta
0 度から 180 度までの一様乱数で与えた。このことより、Theta の値が既知ではない状態で分割鏡を並べたことと等しい状況になっている。
- 分割鏡のスポットサイズ (D80)
曲率半径の最適化の影響を考慮した際と同じ、図 7.11c で表される、測定データから仮定した正規分布。

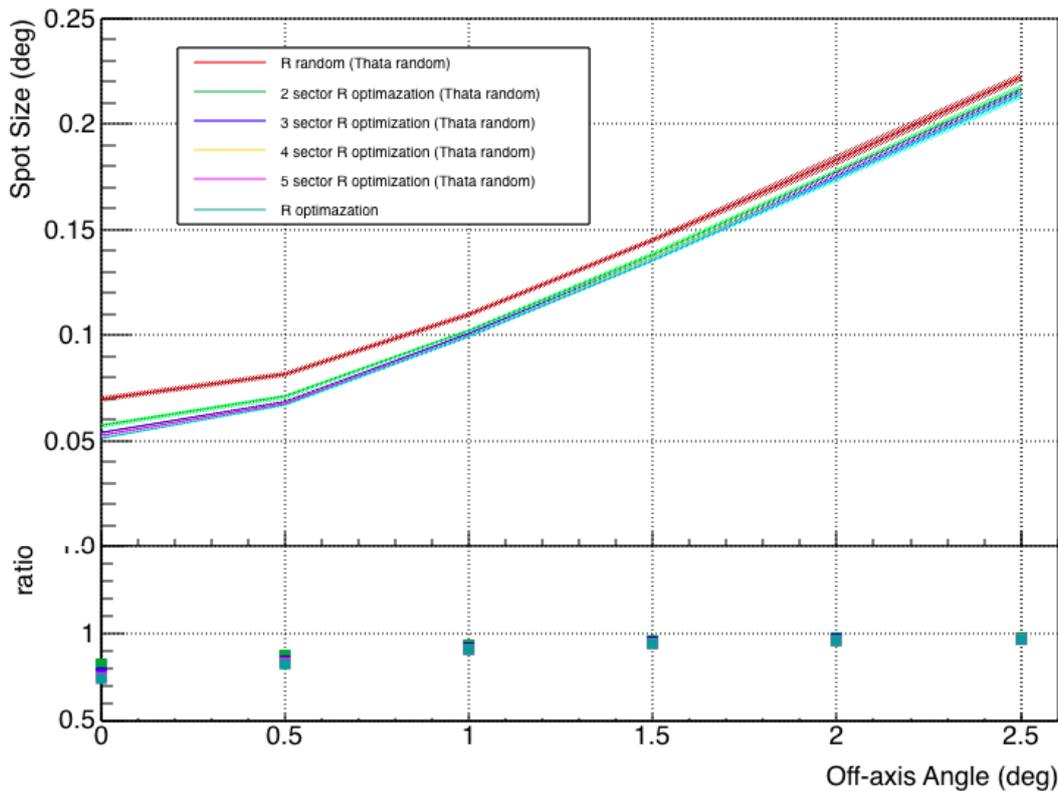


図 A.2: 上図は光線追跡シミュレーションで得られた Off-Axis Angle ごとのスポットサイズを表している。シミュレーションに用いた配置パターンは、放物面を 2 つに分割した場合 (緑線)、放物面を 3 つに分割した場合 (青線)、放物面を 4 つに分割した場合 (黄線)、放物面を 5 つに分割した場合 (桃線) の 4 つのパターンに加えて、図 A.1-(f) のように分割鏡を配置した場合 (赤線)、図 A.1-(a) のように分割鏡を配置した場合 (水色線) である。それぞれ分割鏡の Theta の値はランダムにしてある。下図は赤線とそれぞれの比を表している。

A.1.2 結果

放物面の光軸に対して、Off-Axis Angle を 6 種類、0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5[deg] をとした平行光線を入射させた光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡のスポットサイズを評価した結果を図 A.2 に示す。図 A.2 の上段は、各 Off-Axis Angle の場合の望遠鏡のスポットサイズを表している。それぞれの線幅は、10 セットの分布の結果の分散である。下段は曲率半径の値を分割鏡の放物面上に置かれた位置に関係なく一様にランダムに与えた場合の平均値で他のそれぞれの場合の平均値を割った比を表している。この結果より、最も望遠鏡のスポットサイズが大きくなった、Theta を分割鏡の位置とは関係なくランダムに置いた場合と比べて、最もスポットサイズ小さくなった理想的な Theta を分割鏡に与えた場合は Off-Axis Angle が 0 度の時に一番差が生まれ、その差は 26% となった。領域数を増やすごとに望遠鏡スポットサイズは向上する。ランダム配置から 2 分割配置への差が一番大きく、スポットサイズが 18.2% 向上した。2 分割から 3 分割にすると 4.8% 向上、3 分割配置から理想配置にすると 3.3% 向上する。図 A.3 は、7 章で求

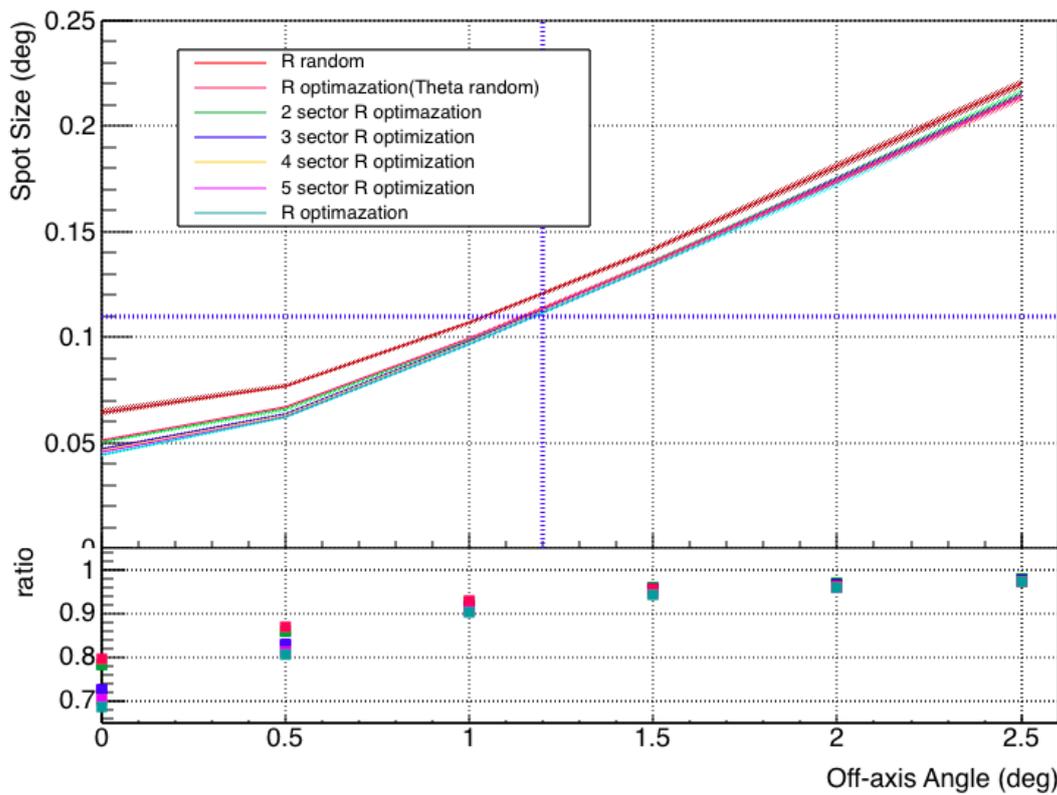


図 A.3: 7章で求めた「さらなる」最適化により得られた6パターンの結果(図 7.15)と、この章での最良の結果を R optimization(Theta random) として、合わせて載せた結果である。

求めた「さらなる」最適化により得られた結果(図 7.15)とこの章での最良の結果を合わせて載せた図である。この章での最も良い望遠鏡スポットサイズを与える配置手法は、分割鏡曲率半径を図 A.1-(a) で与えた場合であるが、これをさらなる最適配置、すなわち Theta が理想的に並んでいる場合(図 7.15)と比較すると、図 7.15 において図 A.1-(b) のように並べた配置の際に得られる望遠鏡スポットサイズにほぼ等しい。Theta を理想にすることによる「さらなる」最適配置により、同じように曲率半径を最適化した場合でも、11%の差が生まれることがわかった。

謝辞

本研究にあたり、多くの方々のご指導、ご協力をいただきましたこと深く感謝申し上げます。まず、この二年間に修士課程生活で指導教員としてお世話になった吉越貴紀准教授に感謝申し上げます。いつも寛大な心で、気にかけて下さいました。進学をするのか就職をするのかということなど、いろいろ迷ってばかりの私の修士生活でしたが、その度にいつも長い時間相談に乗ってくださり、豊富な経験をもとに様々な道を指し示していただきました。頂いた助言は今も胸に残っています。その結果、視野を広くして、物理や研究のみならず様々な事柄を学ぶことができました。手嶋政廣教授には、毎週の progress report の際には、毎回長時間にわたる私の発表に対して、いつも鋭すぎる指導をして頂きました。その度に、何度も心が折れかけましたが、自分では気づかなかった点が浮き彫りになり、大変勉強になりました。手嶋先生を納得させるような成果をだすというのが、いつしか自分の中で研究を進める原動力となっていました。感謝申し上げます。林田将明特任助教には大変お世話になりました。仕事の要領が悪い私に対して、いつも粘り強く指導して下さいました。企業の方とのコミュニケーションの仕方も大変勉強になりました。わからないことがあって、停滞している際にはいつも進むべき道を示して下さいました。自分の仕事を修士論文をまとめることができたのでは林田さんのおかげです。本当にありがとうございました。Daniel Mazin 助教には、progress report でいつも私の研究の詰めるべき点を指摘して頂きました。また仕事もうまくいっていない時にはいつも励まして頂きました。大変感謝しています。大石理子先生には、sim.telarray の光学系の記述や、分割鏡の形状測定、シミュレーション等に対して、progress report の際に助言頂き、望遠鏡光学系に対する知見を深めることができました。感謝申し上げます。明野に行った際に買って頂いたワインおいしかったです。中嶋大輔特任助教には、progress report の際に実験に関するさまざまなことを教えて頂きました。入った当初には、Raspberry を使ったトリガーを指導を頂きながら作らせて頂きました。また何度も飲み連れて行って頂きました。ありがとうございました。Daniela Hadasch 特任研究員には、しばしば研究の進捗や近況を気にかけていただき、いつも励まして頂きました。英語でのコミュニケーションも Daniela さんのおかげで上手くなったと思います。誕生日を祝って頂いた時はとても嬉しかったです。秘書の菅原みどりさんには、学会の旅費の手続きなどの際にお世話になりました。技術職員の岡崎奈緒さんには、アクチュエータの電源ケーブルの作成等でお世話になりました。

MPI(現 IFAE) の野田浩司研究員には、本論文の研究において大変お世話になりました。光線追跡シミュレーションを行うために使った ROBAST を始め LST 望遠鏡光学系について丁寧に指導頂きました。野田さんの手ほどきなしでは、この仕事を行うことはできなかったと思います。野田さんのことは学部の頃から研究室のつながりで存じていたので、一緒に研究ができると決まっ

た際には勝手に縁のようなものを感じていました。柏での CTA の会議の際には一緒にサッカーをしたのはいい思い出です。ICRR に来てくださった際には研究以外のことも気にかけてくださり、大変感謝しております。

分割鏡を製造している三光精衡所の小川社長と安田さんには、分割鏡製造、性能評価の際に大変お世話になりました。製造現場を何度も見せていただいたおかげで、製造プロセスの理解が深まりました、ありがとうございました。

ICRR CTA グループの学生の皆さんにも大変お世話になりました。同期の岩村由樹さんは、見かけからはわからないそのタフさで、progress report 前日や、修論提出間際とともに追い込みをかけたのは良い思い出です。特に修士論文間際に二人で黙々と作業しながら、年越しの瞬間まで過ごしたのは一生忘れないでしょう。岩村さんが頑張る姿があったおかげで、私も頑張れました。ありがとうございました。もうひとりの同期の加藤くんのは修士一年の半年お世話になりました。その多彩な趣味は今でも印書に残っています。またお会いできることを願っています。一学年上の先輩である深見哲志さんには、二年間同じ居室の隣通しで過ごして、数え切れないほど色々な話をしたのはとてもいい思い出です。研究面では、同じ MIR-Group で、仕事に鋭い指摘を頂いたおかげで理解が深まりました。測定の際には協力して頂きありがとうございました。二学年上の先輩である高橋光成さんには progress report の際に、有意義なコメントをたくさん頂きました。また YMAP の研究会で発表の機会をいただけたこと感謝いたします。永吉勤さんには、その X 線観測を始めとする天体物理に関する詳しい知見をもとに研究面での助言はもちろんのこと、進路での悩みをたくさん聞いて頂きました。仕事が上手くいっていない際には、時に厳しい喝を入れてくださったのは大変ありがたかったです。後輩の黒田隼人くんは、2f 測定で大変お世話になりました。黒田くんがいなかったら 90 枚の測定は完遂できなかったかもしれません。ありがとうございました。櫻井駿介くんには、いつも研究に対する鋭い質問頂きました。後輩ですが研究に対する理解度と情熱は尊敬しています。鏡の測定にも協力してもらい、ありがとうございました。後かっこいい鏡の写真も。

昨年、茨城大学大学院を修了された長紀仁さんには、2f 測定の「いろは」を教えて頂きました。また 90 枚のうちの最初の 30 枚の測定を手伝って頂きました。多くの鏡の測定で心が折れそうになった際も長さんの励ましと背中中で語る姿に感化され、頑張れました。ありがとうございました。CTA-Japan の皆様、特に MIR-Group の皆様、隔週で行われる研究報告の際に、研究に対する様々なご指導、ご指摘を頂きましたこと深く感謝いたします。宇宙線研究所の同期の方々にも大変お世話になりました。みなさんの熱心に研究に打ち込む姿は大変励みになりました。宇宙線研究所高エネルギー天体理論グループの石崎渉さんには、理論ゼミでガンマ線を通して見える物理に関してたくさんご指導頂きました。ありがとうございました。

これまでの修士での学生生活を本当に色々な面から支えてもらい、私の健康と幸せをいつも願ってくれていた父、母、弟、妹に感謝いたします。いつまで経っても自由奔放な長男ですが、これからもよろしく願います。

ここに書ききれないほどの多くの方々の支えがあり、ご協力があったことで本研究の論文を執筆できましたこと、改めてお礼申しあげます。最後に、この研究において、厳しい基準をくぐり抜け ICRR にたどり着き、私の実験パートナーとして、最後まで頑張ってくれた 90 枚の分割鏡と自分の測定に自信を与えてくれた No.74 に、心から感謝いたします。

参考文献

- [1] TeVCat website <http://tevcat.uchicago.edu/>
- [2] E. Fermi Phys. Rev. 75, 1169 1949
- [3] R. D. Blandford, J. P. Ostriker, ApJ 221, L29 1978
- [4] F. Giordano et al., The Astrophysical Journal Letters, Vol. 744, No. 1, p. L2, 2012
- [5] A. A. Abdo et al. ApJ, Vol. 734, p. 28, June 2011.
- [6] The MAGIC Collaboration. Science Vol. 322 no. 5905 pp. 1221-1224, 2008
- [7] 齋藤隆之 天文月報 第108巻 第2号 122-130 2015年2月
- [8] J. Aleksic, et al., 2011, ApJ 742, 43
- [9] T. Saito, Ph.D. Thesis, Ludwig-Maximilians-Universitaet Muenchen, 2010
- [10] VERITAS Collaboration, 2011, Science 334, 69
- [11] J Aleksic et al., Astronomy and Astrophysics, Vol. 540, p. 69, 2012
- [12] S. J. Tanaka, F. Takahara, 2010, ApJ 715, 1248
- [13] C. M. Urry and P. Padovani. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 107, 803, 1995
- [14] A. A. Abdo et al. ApJ, Vol. 736, p. 131, August 2011.
- [15] F. A. Aharonian et al, 2007, Astrophys. Jour., 664, L71
- [16] J. P. Ostriker and P. J. Steinhardt, ArXiv Astrophysics e-prints astro-ph/9505066
- [17] P. mezaros Science 5 Vol. 291 no. 5501 p79-84 2001
- [18] E. Komatsu et al., ApJS 192, p. 18
- [19] 田島宏康 高エネルギーニュース Vol.31 No.2 2012
- [20] M. Doro et al., Astropart. Phys. 43 189-214, 2013
- [21] G. Jungman, M. Kamionkowski, K. Griest, Phys.Rept. 267 195-373 1996
- [22] K. Hayashi et al., MNRAS 461, 2914 2928 2016
- [23] M. Fornasa and A.M. Green Phys. Rev. D89 2014
- [24] S. Funk Proc. Natl. Acad. Sci. 112 (40) 12243-12245 2015
- [25] J. Conrad AIP Conf. Proc. 1505, 166, 2012
- [26] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学 日本評論社 2008
- [27] M. Doro Ph.D. Thesis, Universit degli Studi di Padova, 2009
- [28] M. Lopez Moya Ph.D. Thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2006
- [29] A. M. Hillas. In Proc. of the 19th ICRC, La Jolla, 1985

- [30] J. A. Hinton and W. Hofmann, *ARAandA* 47, 523-565, 2009
- [31] CTA-Japan Consortium, Cherenkov Telescope Array 計画書 (LOI), 2014
- [32] B. S. Acharya et al., *Astropart. Phys.* 43 3 2013
- [33] CTA-Consortium <https://www.cta-observatory.org>
- [34] CTA Construction Project, 2015, 「Large Size Telescope Technical Design Report」
- [35] 長 紀仁 修士論文 茨城大学 2016
- [36] 林田 将明 日本天文学会 秋季年会 2016
- [37] 馬場 浩則 修士論文 茨城大学 2013
- [38] dcraw <https://www.cybercom.net/dcoffin/dcraw/>
- [39] Image Magick <http://www.imagemagick.org/script/index.php>
- [40] SAO Image DS9 <http://ds9.si.edu/site/Home.html>
- [41] G. H. Rieke *Measuring the universe : a multiwavelength perspective* Cambridge University Press 2012
- [42] C. R. Kitchin *Telescopes and techniques: an introduction to practical astronomy* Springer 1995
- [43] 青木貞雄 *光学入門* 共立出版
- [44] R. N. Wilson *Reflecting Telescope Optics 1* second edition Springer
- [45] 島津製作所 <http://www.shimadzu.co.jp/opt/products/mir-03.html>