修士論文

CTA 大口径望遠鏡 2-4 号基における 分割鏡配置の決定と光学性能の検証 2020 年度 (令和2年度)

茨城大学 大学院 理工学研究科 理学専攻

高エネルギー宇宙物理研究室 修士2年次 学籍番号 19NM152R 小原光太郎

2021年3月25日

ガンマ線の観測は、初めて観測が行われた 1967 年当初より地球大気圏外に人工衛星を打ち上げること によって行われてきた。しかし、数十 GeV を超えるエネルギーを持つガンマ線の観測では、衛星に搭載 する検出器の有効面積が限られてしまうことやガンマ線のエネルギーが増大するにつれて到来頻度が減 少することから人工衛星による観測は難しい。そこで、数十 GeV を超えるガンマ線が大気と相互作用 をして大量の二次粒子を生成し、その粒子が放射するチェレンコフ光を地上の望遠鏡でシャワーイメー ジとして観測し、入射ガンマ線の到来方向やエネルギーを推定する観測方法が考案された。この方法は 解像型チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT)と呼ばれ、IACT に よる観測は 1989 年に Whipple 天文台が実用化し、2000 年代からは H.E.S.S.、VERITAS、MAGIC 望 遠鏡が現行の IACT 望遠鏡として台頭している。

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は次世代の IACT 建設計画で、現行の望遠鏡に比べて感度 を一桁以上向上すると共に、観測可能エネルギー領域を 20 Gev から 300 Tev に拡大してガンマ線を観測 することを目指している。CTA では、この幅広い観測エネルギー領域を実現するために、大、中、小の 異なる口径の望遠鏡を配置するが、この中で日本が大きく貢献しているのは大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope, LST)の開発、建設である。LST の主鏡光学系は、正六角形の対辺が 1.5 m の球面分割鏡を 1 基あたり 198 枚使用することで、口径 23 m の放物面形状を達成している。2018 年 10 月に北サイトに て LST 初号基が完成し、安定運転中であり、LST2 号基から 4 号基は要素開発が終了し、2021 年からは 順次建設が始まる予定である。

本研究では、まず、製造された 1000 枚の分割鏡の中から LST 初号基で使われた 198 枚と LST 初号 基搭載時に破損した 1 枚の鏡、さらに日本で保管されている 60 枚の鏡を除いた 741 枚の分割鏡を用い て、LST2 から 4 号基に搭載する 594 枚(198 枚×3)の分割鏡を決定した。そして、LST2 から 4 号基 全てで LST 初号基に劣らない集光性能を持ち、かつ CTA の要求仕様である「Off-Axis Angle(光軸に 対する光線の入射角度)が 1.2° においてスポットサイズ(D80)が 0.11° 以下」を満たすことを目指し た。結果として、LST2 から 4 号基全てで LST 初号基よりも理想的な放物面に近い曲率半径の分布を達 成し、LST1 から 4 号基全てで CTA の仕様を満たすスポットサイズであることがわかった。この調査に よって、CTA の仕様を満たす結像性能を持つ望遠鏡の建設が LST2 から 4 号基全てで可能になった。

次に、決定した LST2 から 4 号基の分割鏡と LST 初号基の分割鏡の反射率データを用いて、LST1 から 4 号基のそれぞれの望遠鏡の平均の反射率を求めた。LST の反射率はモンテカルロシミュレーション に用いられ、実測のガンマ線のエネルギーを見積もる際に正確な反射率を望遠鏡に与えることが重要で ある。私は分割鏡場所依存性測定によってより正確な分割鏡の反射率を調査し、LST1 から 4 号基全て のより現実的な反射率の見積もりを行い。LST1 から 4 号基全てで CTA の要求仕様である「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」を満たすことが確認できた。

以上の調査によって、LST2から4号基全てでLST初号基と同等以上で、CTAの仕様を満たす結像性 能、反射率の光学系を持つことが分かり、2021年から順次2から4号基の建設が開始される。LST2号 基建設後からは、LST初号基やMAGIC望遠鏡とのステレオ観測を開始し、さらなるガンマ線天文学の 発展が予想される。

最後に、LST1から4号基の反射率を決定したことを活かして、LSTの反射率を光線追跡シミュレー ションに組み入れたときに焦点面でのスポットの光量やその分布がどのように変化するかの調査を行っ た。現在は、その第一歩として、望遠鏡に搭載した分割鏡に対して望遠鏡の内側にある鏡には100%、外 側にある鏡には75%と極端に変えた時のスポットサイズ(D80)の大きさを全ての鏡で100%とした時 のスポットサイズと比較した。結果として、外側の鏡の反射率を低くしたことによって、スポットのコ マ収差の成分を持つ光子が減少し、反射率を全ての鏡で100%とした時よりもスポットサイズが小さく なることが分かった。これは、分割鏡配置のさらなる最適化の検討の余地を示す結果となった。

Abstract

The prototype of first Large-Sized Telescope (LST1) proposed for Cherenkov Telescope Array was built in October 2018 and now it's commissioning, and LST 2nd to 4th are being developed. The LST mirrors consist of 198 segmented mirrors, which have a hexagonal shape of 1.51 m in a large diameter. Optimum layout of segmented mirrors which have suitable radius of curvature for its positions is needed for LST because it has a parabolic shape. It is necessary to decide arrangements of mirror segments for the LST 2nd to 4th in order to make their optical performance the same performance compared with LST1.

In this thesis, we report on decision of arrangements of mirror segments for LST 2nd to 4th and estimation of these optical performance.

目 次

第1章	はじめに	5				
第2章	Cherenkov Telescope Array 計画					
2.1	大気チェレンコフ技術によるガンマ線観測	6				
	2.1.1 空気シャワー	6				
	2.1.2 チェレンコフ光	8				
	2.1.3 解像型チェレンコフ望遠鏡のガンマ線検出原理	9				
2.2	CTA 計画概要	11				
	2.2.1 概要	11				
	2.2.2 目標性能	12				
2.3	大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope, LST)	13				
	2.3.1 大口径望遠鏡仕様	13				
	2.3.2 主鏡光学系仕様	14				
	2.3.3 球面分割鏡	16				
	2.3.4 球面分割鏡の要求仕様の測定方法	18				
	2.3.5 能動的ミラー制御システム (Active Mirror Control, AMC)	22				
	2.3.6 検出器とライトガイド	23				
第3章	LST2-4 号基の分割鏡配置の決定と結像性能の検証	24				
3.1	目的	24				
3.2	LST 初号基の分割鏡選定と配置方法................................	25				
3.3	LST2 から 4 号基の分割鏡選定	26				
	3.3.1 分割鏡の製造、設置状況	26				
	3.3.2 分割鏡の分配方法	26				
	3.3.3 望遠鏡に搭載する 198 枚の分割鏡の選定と選定結果	29				
3.4	光線追跡シミュレーションによる結像性能の検証...............	34				
	3.4.1 シミュレーションセットアップ	34				
	3.4.2 シミュレーション結果	35				
3.5	まとめ	38				
第4章	LST1-4 号基の主鏡反射率の評価	39				
4.1	目的	39				
4.2	ミラーピースによる LST1 から 4 号基の主鏡反射率の評価............	39				
	4.2.1 ミラーピースの反射率データの分類について	39				
	4.2.2 LST1 から 4 号基に搭載する分割鏡に対する反射率データの分布	40				
	4.2.3 ミラーピースによる LST1 から 4 号基の平均の反射率の見積もり......	41				
	4.2.4 650 nm での平均の反射率の接続方法と LST1 から 4 号基の平均の反射率	43				
4.3	分割鏡反射率の場所依存性測定	44				
	4.3.1 セットアップ	44				

	4.3.2 結果と考察	47
4.4	分割鏡反射率の場所依存性とミラーピース反射率の関係............	58
	4.4.1 現実的な分割鏡反射率の定量的理解	59
	4.4.2 84 点の平均の反射率を用いたミラーピースの反射率の補正	59
4.5	LST1 から 4 号基のより現実的な望遠鏡反射率の見積もり	62
	4.5.1 ミラーピースによる鏡の反射率の傾向の変化の把握	62
	4.5.2 LST1 から 4 号基のより現実的な望遠鏡の反射率の決定	63
第5章	反射率を考慮したさらなる LST 光学性能の検証	67
5.1	目的	67
5.2	反射率を搭載した LST での ROBAST による望遠鏡シミュレーション	67
5.3	結果と考察	69
	5.3.1 結果	69
	5.3.2 考察と展望	72
第6章	まとめ	73
Appen	dixA	74
謝辞		86

第1章 はじめに

高エネルギーガンマ線天文学においてチェレンコフ望遠鏡を用いた超高エネルギーガンマ線の観測は、 近年大きく発展を遂げている分野である。それは、初めて観測が行われた 1967 年当初から長らくの間、 高エネルギーガンマ線は大気による吸収を回避するために宇宙空間に飛ばした衛星によって検出されて きたからである。しかし、TeV を超えるようなエネルギーを持つ VHE ガンマ線は到来頻度も少なく、 検出器の重量や有効面積が限られてしまう人工衛星での観測は困難であった。そこで、本来ガンマ線を 吸収してしまう大気を検出器の一部として使用し、地上に置かれた大気チェレンコフ望遠鏡で観測する 手法が考案された。1989 年には Whipple 望遠鏡がイメージング法によって大気チェレンコフ望遠鏡技 術を実用化し、かに星雲からの TeV ガンマ線を初めて検出した。以来、世界各地で大気チェレンコフ 望遠鏡による VHE ガンマ線の観測が行われ、2000 年代からは H.E.S.S.[1]、VERITAS[2]、MAGIC[3] といった望遠鏡が活躍している。図 1.1 に現在までに観測された高エネルギー天体の全天マップを示す。 MAGIC 望遠鏡は 2019 年 1 月 14 日にスイフト衛星とフェルミ衛星からのアラートを受信し、チェレン コフ望遠鏡として世界で初めてガンマ線バーストを捉えた [4]。



図 1.1: 現在までに観測された 50 GeV 以上の高エネルギーガンマ線天体のソースマップ [5]。200 以上の 高エネルギー天体が発見されている。図の中心は銀河中心で、中心から左右に高エネルギー天体の密度 が高くなっており、銀河面を表している。

2000 年代に入り、世界中の各地で IACT による高エネルギーガンマ線観測が行われる中で、次世代の IACT 計画として Cherenkov Telescope Array(CTA)計画が始動した。CTA は口径が異なる大気チェ レンコフ望遠鏡を計 100 台以上配置することで、現行の望遠鏡に対して感度を 10 倍向上し、観測可能エ ネルギー領域を 20 GeV から 300 TeV まで拡大することを目指す国際共同実験計画である。これによっ て、1000 を超える高エネルギー天体の検出が期待される。

第2章 Cherenkov Telescope Array 計画

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、北サイトのスペイン領カナリア諸島ラパルマと南サイ トのチリのパラナルに解像型チェレンコフ望遠鏡を設置することでガンマ線の全天観測を行い、現行の HESS、VERITAS、MAGIC 望遠鏡に比べて 10 倍以上の感度の達成し、観測可能エネルギー領域を 20 GeV から 300 TeV に拡大することを目指す、31 か国 1500 名以上が参加する国際共同実験である。CTA では大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope, LST)、中口径望遠鏡(Medium-Sized Telescope, MST)、 小口径望遠鏡(Small-Sized Telescope, SST)の異なる 3 種類の口径を持つ望遠鏡を計 100 台以上配置 する。日本チームが大きく貢献しているのは LST の建設で、鏡やカメラなど開発からガンマ線のシミュ レーション解析などの各分野で世界の技術者に負けない活躍をしている。本章では、地上の望遠鏡によ るガンマ線解析の手法である大気チェレンコフ技術について述べ、CTA 計画の概要、並びに本研究に最 も関係深い大口径望遠鏡光の学系仕様について述べる。

2.1 大気チェレンコフ技術によるガンマ線観測

高エネルギーガンマ線は大気に入射した際に、大気との相互作用によって空気シャワーを形成するため地上で直接観測することは不可能である。よって、ガンマ線の観測は地球大気圏外に人工衛星を打ち上げることで行われてきた。しかし、ガンマ線のエネルギーが上がるとガンマ線の到来頻度が減少するため、有効面積が限られる人工衛星での観測が困難になる。そこで、地球大気を検出器の一部として活用し、ガンマ線由来の電磁シャワーが放射するチェレンコフ光を地上の解像型チェレンコフ望遠鏡で観測する方法が開発された。一方で、ガンマ線観測ではバックグラウンドとなる宇宙線も地球大気に入射した際に2次粒子を介してガンマ線を放出し、カスケードシャワーを発生してしまうため、ガンマ線と宇宙線由来のシャワーを区別する手法が必須である。その手法として、ガンマ線と宇宙線のシャワーイメージの違いを用いて区別する技術が開発され、イメージング法と呼ばれる。以下では、ガンマ線や荷電粒子が大気に入射した時に空気シャワーを形成しチェレンコフ光を放出するまでの過程と発生するチェレンコフ光について、また発生したチェレンコフ光のイメージ解析による地上の解像型チェレンコフ望遠鏡でのガンマ線検出原理について述べる。

2.1.1 空気シャワー

宇宙空間から到来した高エネルギー粒子(1次粒子)が地球大気に入射した場合、大気中の原子核と相 互作用するによって2次粒子を生成する。この2次粒子もまた原子核と相互作用を起こし、さらに粒子 を生成する。このように連鎖的に粒子が増大し、大気中で大量の2次粒子が生成される。この現象を空 気シャワーと呼び、入射粒子がガンマ線や高エネルギー電子・陽電子の場合電磁シャワー、ハドロンの 場合ハドロンシャワーと呼ぶ。以下では、電磁シャワーとハドロンシャワーの発展過程について述べる。

電磁シャワー

地球大気に入射したガンマ線が 2m_ec² 以上のエネルギーを持つ時、式 2.1 に示すように大気中の原子 核と相互作用することによって電子と陽電子を放出する電子対生生を起こす。

$$\gamma + (\ensuremath{\mathbb{R}}\ensuremath{\mathbb{F$$

生成された電子と陽電子は大気中の原子核の電場と相互作用することで制動放射を起こす。制動放射 によって電子と陽電子はエネルギーの一部を失いガンマ線を放出する(式 2.2)。

$$e^{\pm} + (\bar{\mu} + \bar{\lambda}) \rightarrow e^{\pm} + (\bar{\mu} + \bar{\lambda}) + \gamma$$
(2.2)

電子対生成と制動放射を次々と繰り返すことで粒子数は指数関数的に増大し、ガンマ線または電子に よるカスケードシャワーを電磁シャワーと呼ぶ。電子、陽電子の制動放射は電離損失によるエネルギー ロスが支配的になる約 83 MeV のエネルギーになるまで続く。

ハドロンシャワー

陽子が大気に入射した時のシャワーは電磁シャワーと大気中での発展過程が異なる。宇宙からの高エネルギー陽子(宇宙線)が大気に入射すると、大気の原子核と相互作用し、陽子や中性子、パイオン、ケイオンなどの 2 次粒子が生成される。2 次粒子の大部分はパイオンである。生成されるパイオンは π^0 、 π^+ 、 π^- の3種類に分類される。 π^0 は 8.4×10⁻¹⁷ 秒で 2 つのガンマ線を生成し崩壊する。 π^+ 、 π^- は 2.6×10⁻⁸ 秒でミューオンとニュートリノに崩壊する。

$$p + (\text{BFK}) \to p' + (\text{BFK})' + \pi^0 + \pi^+ + \pi^-$$
 (2.3)

$$\pi^0 \to \gamma + \gamma \tag{2.4}$$

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \tag{2.5}$$

$$\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu_\mu} \tag{2.6}$$

 π^+ 、 π^- の崩壊によって生成されたミューオンは、2.2×10⁻⁶ 秒でまた崩壊し、電子とニュートリノを 生成する。

$$\mu^+ \to e^+ + \nu_e + \bar{\nu_\mu} \tag{2.7}$$

$$\mu^- \to e^- + \bar{\nu_e} + \nu_\mu \tag{2.8}$$

高エネルギー陽子が地球大気に入射した場合の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。ハドロンシャワーは、図 2.1 で表されるように電磁シャワーと異なり横方向に特徴的な広がり を持つ。



図 2.1: 左図は電磁シャワーの発達の様子であり、右図はハドロンシャワーの発達の様子である。[6]

2.1.2 チェレンコフ光

シャワー中の荷電粒子が屈折率 n の大気(媒質)中の光速 *c/n* よりも早い速度で運動する場合、図 (2.2)のように衝撃波としてチェレンコフ光が生じる。この現象をチェレンコフ放射と呼び、チェレン コフ光が生じる時の荷電粒子の速度 v は

$$v > \frac{c}{n} \tag{2.9}$$

で表される。地球大気の屈折率はおよそ n = 1.0003 であるから、チェレンコフ光を放射するためのしき いエネルギーは電子の場合、 $\beta = \frac{v}{c} > 1/1.0003$ として計算すると、 $\frac{m_e}{\sqrt{1-\beta^2}}c^2 \simeq 20$ MeV となる。

チェレンコフ光は特有の角度を持って照射され、その角度をチェレンコフ角と呼ぶ。チェレンコフ角 θ_c は

$$\theta_c = \arccos\left(\frac{c}{\mathrm{nv}}\right) = \arccos\left(\frac{1}{\beta\mathrm{n}}\right)$$
(2.10)

で表され、この範囲内に円錐状に放射される。式 2.10 より、 $\beta = 1$ とすると、n=1.0003 の場合、チェレンコフ光は荷電粒子の進行方向に対して 1.4°の放射角をなす。 また、大気の屈折率は高度に依存するため、10 km 上空では屈折率はより小さくなり、 $\theta_c \simeq 0.8^\circ$ となる。この時の地上でのチェレンコフ光の広がり S [m²] は

$$S = \pi \times (10 \text{ km} \times \tan(1^\circ)) \simeq \pi \times (170 \text{ m})^2 \simeq 10^5 \text{ m}^2$$
 (2.11)

となり、これをライトプールと呼ぶ。高度に対するチェレンコフ角の変化とライトプールの広がりを図 2.3 に示す。

空気シャワー中の電荷 Ze の荷電粒子が単位距離 L[m] 移動したときに、波長 λ_1 [nm] から波長 λ_2 [nm] の間で放出される光子数 N は、

$$N = 1 \times 10^9 \pi \alpha L Z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\sin^2 \theta_c}{\lambda^2} d\lambda$$
(2.12)

で表される。ここで、 $\alpha = e^2/4\pi\varepsilon_0\hbar c = 1/137$ は微細構造定数である。例えば相対論的な電子が1m走ったと過程すると、 $\theta_c=1^\circ$ で 300 nm から 500 nm の波長帯の光子は約 20 個放出される。



図 2.2: チェレンコフ光の発生のイメージ図。荷電粒子の速度 v が空気中の光速 c を超える時に衝撃波と なってチェレンコフ光が θ 方向に放出される。



図 2.3: チェレンコフ光の高度に対する放射角の変化とライトプールの広がり [7]

2.1.3 解像型チェレンコフ望遠鏡のガンマ線検出原理

前節までに、ガンマ線は大気と相互作用することでチェレンコフ光を放出し、その放射角度はおよそ 1ºで、ライトプールと呼ばれる円盤状に放出されることを述べた。地上に置かれたチェレンコフ望遠鏡 では、チェレンコフ光を反射鏡を用いてカメラ面で集光し、ガンマ線のイメージとして捉える。 Whipple 望遠鏡は、1982 年からガンマ線観測を試みたが、当初はガンマ線観測においてノイズとな る宇宙線のイベント数がガンマ線のイベント数に対して非常に多く、ガンマ線のシャワーイメージと宇 宙線のシャワーイメージを判別することが困難であった。そこで、1985 年に Hillas は、宇宙線とガンマ 線のシャワーの発達過程の違いに着目し(図 2.1)、カメラ面でのシャワーイメージの広がりをパラメー タに置き換え、ガンマ線と宇宙線のイメージを判別する方法を提唱した。ガンマ線と宇宙線のシャワー イメージの違いを図 2.4 に示す。この方法はイメージング法と呼ばれ、判別に用いられるパラメータは Hillas パラメータと呼ばれる。1989 年に、Whipple 望遠鏡はイメージング法を実用化し、98%のバック グラウンド成分の除去に成功した上で、チェレンコフ望遠鏡として初めてガンマ線を検出した。イメー ジング法は、その後も発展をとげながら、現在のチェレンコフ望遠鏡においても使用されている。

イメージング法では、カメラ面で捉えたシャワーイメージを楕円形状で近似することで、パラメータ を取得する。また、シャワーイメージの楕円の長軸はガンマ線の到来方向を表す。これを利用して、2台 以上の解像型大気チェレンコフ望遠鏡でガンマ線のシャワーイメージを取得し、複数のイメージの長軸 を延長した交点からガンマ線天体の位置を推定することができる。2台以上の大気チェレンコフ望遠鏡 を用いた観測をステレオ観測と呼ぶ。主な Hillas パラメータとステレオ観測によるガンマ線到来方向の 推定の概念図を図 2.5 に示す。ガンマ線観測に使用される主な Hillas パラメータは以下である。

- width:シャワーイメージを楕円形状に近似した時の短軸方向の広がり(標準偏差)
- length:シャワーイメージを楕円形状に近似した時の長軸方向の広がり(標準偏差)
- distance:シャワーイメージの重心とカメラ中心の距離



• size: イメージに含まれる全光量

図 2.4: H.E.S.S. により取得されたガンマ線と宇宙線のシャワーイメージ [6]。左図が 1 TeV のガンマ線 のイメージで、右図が 2.6 TeV の宇宙線のイメージ。



図 2.5: イメージング法による Hillas パラメータの推定とステレオ観測による到来方向推定の概念図 [8]。

2.2 CTA 計画概要

2.2.1 概要

前にも述べたように、CTA 計画とは北サイトのラパルマとい南サイトのパラナルに口径の異なる解像 型チェレンコフ望遠鏡を計 100 台以上設置することで、ガンマ線の全天観測行い、現行のチェレンコフ 望遠鏡に比べて 1 桁感度を向上し、20 GeV から 300 TeV の 4 桁に及ぶエネルギー領域のガンマ線を検 出することを目指す、国際共同実験計画である。CTA の北サイトの完成予想図を図 2.6 に示す。図 2.6 の左に見える特別大きな望遠鏡が大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope, LST)であり、その周りに中口 径望遠鏡(Medium-Sized Telescope, MST)、小口径望遠鏡(Small-Sized Telescope, SST)がアレイ配 置(図 2.7)されて並ぶと想定される。以下の表 2.1 に CTA の各望遠鏡の仕様を示す。現在、北サイトに 建設された望遠鏡は 2018 年に完成した LST 初号基のみである。2021 年から北サイトの LST2 号基以降 の建設が順次始まり、2024 年には LST1 から 4 号基用いた観測がスタートする予定である。図 2.6 の右 に見える 2 台の特徴が異なる望遠鏡は MAGIC 望遠鏡で、2009 年から 2 台での観測を行っている。2018 年に LST 初号基が完成してから LST2 号基以降が完成するまでの間に、LST 初号基は 2 台の MAGIC 望遠鏡とステレオ観測を行い、ガンマ線の到来方向の推定などに役立っている。



図 2.6: Cherenkov Telescope Array (CTA)の完成予想図 [9]



図 2.7: CTA で建設予定の望遠鏡の配置場所。左は北サイトの望遠鏡配置で、右は南サイトの望遠鏡配置を表している。[10]

衣 2.1: しIA の合至逸蜆の土安な11	表 2.1	2.1: CTA の各望遠	髢鏡の主要な仕
------------------------	-------	---------------	---------

	大口径望遠鏡	中口径望遠鏡	小口径望遠鏡	
口径	23 m	12 m	4 m	
観測エネルギー領域	20 Gev から 3 TeV	80 GeV から 50 TeV	1 TeV から 300TeV	
カメラ視野	4.5°	8°	$9^{\circ}-10^{\circ}$	
設置台数(北サイト)	4基	15 基	0基	
設置台数(南サイト)	4基	25 基	70 基	

2.2.2 目標性能

CTA の目標性能を下に示す。

• 感度 CTA では現行のチェレンコフ望遠鏡と比べて、全てのエネルギー領域で 10 倍の感度の向上 を目指す。50 時間観測を行う時の CTA の目標感度曲線を図 2.8 に示す。



図 2.8: CTA の目標感度曲線 [10] と現行の大気チェレンコフ望遠鏡の達成積分感度曲線。

- 観測エネルギー領域大中小の3つの口径を持つ望遠鏡を建設し、それぞれの望遠鏡で観測エネル ギー領域を分けることで20 GeV から300 TeV の4桁に及ぶエネルギー領域を観測する。
- 角度分解能現行のチェレンコフ望遠鏡の角度分解能は 0.1°(6 分角)程度である。CTA では複数の望遠鏡をアレイ配置することで、ガンマ線の到来方向の推定の精度を向上することができる。これによって、1 から 2 分角の角度分解能の達成を目標としている。

2.3 大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope, LST)

大口径望遠鏡の開発には日本のチームが大きく貢献している。以下では、大口径望遠鏡の仕様と大口 径望遠鏡を構成している光学系の仕様について述べる。

2.3.1 大口径望遠鏡仕様

LST は口径 23 m の焦点距離 28 m の巨大な光学系を持つ世界最大の大気チェレンコフ望遠鏡である。 その主鏡面積は 368 m² に広がり、低エネルギーガンマ線が放出する少ないチェレンコフ光を効率よく集 光する。観測可能エネルギー領域は 20 GeV から 3TeV のエネルギー帯をカバーすることを目標として いる。また、この巨大な構造を持ちつつも、重量を全体で 100 トン以下に抑え、20 秒以内に 180° の回転 を可能にしている。これによって、衛星のアラートを受信後に高速でポインティングでき、貴重な情報 を持つ突発天体への対応が可能になっている。以下の表 2.2 に、大口径望遠鏡の主な光学系仕様を記す。

表 2.2: 大口径望遠鏡 光学系仕様

口径	23 m
焦点距離	28 m
主鏡面積	368 m^2
主鏡面形状	放物面
視野	4.5°
カメラ 1pixel の大きさ	50 mm (0.1°)

2.3.2 主鏡光学系仕様

LST は低エネルギーのガンマ線を観測するため、低エネルギーガンマ線によって放出されるチェレン コフ光の光量が減少してしまい、夜光などのノイズ成分を取り除くことが求められる。そこで、夜光を 取り除く一つの手段として、LST の主鏡ではチェレンコフ光の信号の積分時間が短くなるように、光の 同時性能力が高い放物面形状が採用されている。放物面は、光軸に対して並行に入射する光の焦点面ま での距離(光路長)が等しくなるため、同時性が高くなり、ノイズとなる夜光はチェレンコフ光の信号 の積分時間中に入りにくくなる。しかし、LST は口径が 23 m の巨大な構造体であるため、精度の良い 放物面の単一鏡を製造するのは技術面でもコストの面でも難しい。そこで、198枚の球面分割鏡を用い て全体で放物面形状を形成している。図 2.9 に 198 枚の分割鏡の設置位置を示す。さらに、図 2.10 の左 図に口径 23 m、焦点距離 28 m の放物面における中心からの距離に対する理想的な曲率半径の大きさを 示す。図 2.10 の左図より、口径が 23 m の望遠鏡の製造には 56 m から 58.4 m の曲率半径の鏡が必要で あることが分かる。分割鏡の設置位置(r)に対して、放物面での理想的な曲率半径の値に近い曲率半径 を持つ分割鏡の設置が必要となる。望遠鏡の分割鏡の中心の設置位置(r)における理想的な曲率半径 (R)は1対1対応し、これを0.2 mごとのbinで分けた時の曲率半径の分布は図2.10の右図で表され、 これを望遠鏡の製造に必要な放物面での理想的な曲率半径の分布とした。3章では、曲率半径のパラメー タを一つの指標として LST2 から 4 号基の分割鏡の選定を行い、放物面での理想的な曲率半径の分布を 満たすかを示す。

また、LST の光学性能としてスポットサイズがある。大気チェレンコフ望遠鏡ではガンマ線由来のチェ レンコフ光をイメージとして捉えるため、平行光が入射した時に反射された光子がカメラの 1pixel(50 mm)以内に効率よく入ることが求められる。カメラの 1pixel に入らない光子が多くなるとガンマ線のイ メージがぼやけてしまい、ガンマ線と宇宙線のイメージが区別できなくなるからである。そこで、CTA の要求仕様として、「Off-Axis Angle(光軸に対する光線の入射角度)が 1.2° においてスポットサイズ (D80)が 0.11° 以下」を満たす LST の建設が求められる。3 章では、LST2 から 4 号基で決定した分割 鏡を配置し、ROBAST による光線追跡シミュレーションを行いスポットサイズの仕様を満たすかを検 証した。

加えて、低エネルギーガンマ線由来のチェレンコフ光は光量が少ないため、望遠鏡の反射面は 地上 で受ける時のチェレンコフ光の特徴的なピーク波長(300 nm から 550 nm)に対して、望遠鏡全体で高 反射率の性能を持つ望遠鏡の建設が求められる。加えて、ガンマ線が放出するチェレンコフ光で間接的 にガンマ線を見ているチェレンコフ望遠鏡において、ガンマ線のエネルギーを精度良く求めるためには 放出された光子を効率よく集光することが必要であり、正確な反射率を理解することが求められる。望 遠鏡の仕様は、「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」と定められ、4章 では LST1 から 4 号基に搭載する分割鏡の反射率を用いて現実的な望遠鏡全体の反射率を求めた結果を 示す。

次節では、LST の放物面を構成する球面分割鏡とその仕様について説明する。



図 2.9: LST の 198 枚の分割鏡の設置位置。横軸縦軸の単位は m で、望遠鏡の X 軸 Y 軸の中心からの距離を表す。[11]



図 2.10: 左図:横軸に望遠鏡中心からの距離 [m]、縦軸に放物面の曲率半径 [m] をとり、LST の光軸中心 からの距離に対する分割鏡の理想的な曲率半径の計算値をプロットした図。右図:分割鏡の設置位置に対 する理想的な曲率半径の分布。

2.3.3 球面分割鏡

球面分割鏡とは、LST の主鏡を 198 枚の球面鏡で分割することによって放物面を形作ることを可能に した対辺間距離が 1.51 m の六角形形状の鏡である(図 2.11)。LST は 198 枚の球面鏡で放物面を形成 するため、最も理想的な分割鏡は 1 枚 1 枚に対して非球面の鏡を製造することである。しかし、LST を 4 台以上建設することを目指す CTA において、非球面の鏡を精度良く製造、量産することはコストや 技術面で困難である。そこで、Mold と呼ばれる決まった曲率半径の型を用意し、アルミハニカムをガ ラスシートで挟んだサンドウィッチ構造の構造体を上から押し付けることで曲率半径を定着させる cold slump 法と呼ばれる方法を行った。そして、図 2.10 で表される理想的な曲率半径の分布を満たすように 分割鏡を製造した。この方法は MAGIC の鏡の製造にも用いられた実績ある方法である。Mold の曲率 半径の型を合計 6 種類用意することで、放物面の理想的な曲率半径の分布を満たすことが可能になった。 このようにして鏡は全部で 1000 枚製造された。また、分割鏡の製造の精度はスポットサイズの大きさに も関係し、分割鏡のスポットサイズは望遠鏡のスポットサイズの性能に直結するため非常に重要なパラ メータである。イメージング解析の精度を上げるため、高い集光性能が求められる。図 2.12 の左図に製 造方法の概念図を示し、2.3.4 節で製造した鏡の曲率半径とスポットサイズの評価方法を述べる。

また、低エネルギーガンマ線から放出された少ない光量のチェレンコフ光を効率よく集光するために 高い反射率が求められる。分割鏡の反射膜は、図 2.12 の右図に示すようなスパッタリングと呼ばれる手 法でコーティングされている。この手法では、真空のチェンバー内にコーティングしたい金属の薄膜を ターゲットとして配置し、高電圧をかけて、プラズマ化したアルゴンガスや窒素ガスなどを金属ターゲッ トに照射する。これによって、ターゲットの金属原子が弾き飛ばされ、対象に金属の膜をコーティング する。LST の分割鏡は、ガラスシートの上に Cr と Al の反射膜、SiO₂、HfO₂、SiO₂ の保護膜をスパッ タリングしている。

曲率半径、スポットサイズ、反射率が測定された鏡は、図 2.18 で示す Rack と呼ばれる金属製の棚に 分割鏡が製造された順に収納される。前述したように、分割鏡の製造は 6 種類の Mold を使用すること で、ある程度狙った曲率半径を持つ鏡を製造している。このことから、製造後に Rack に収納される分 割鏡は ID が近いものが収納されており、かつ、曲率半径も近い値を持つ分割鏡が収納されている。

また、望遠鏡構造体の重量を決定する要因として鏡の重さの寄与が大きい。LST はガンマ線バースト などの突発天体に対応するため、天球のどこでも 20 秒以内で向けられることが要求され、そのためには LST の重量を軽量化する必要がある。そのため、分割鏡は重量が 1 枚 50kg 以下の仕様となっている。



図 2.11: 分割鏡の表面の写真。金属製の Rack に収納されている。写真の下方で三角の分割鏡の切り落 としが見られるが、これは AMC のために CMOS カメラの取り付け位置である。



図 2.12: 分割鏡の製造方法の概念図 [12]。左図は鏡の曲率半径の定着を行う cold slump 技術の模式図。 右図はスパッタリングによる反射膜の成膜方法の模式図 [13]。

分割鏡要求仕様

分割鏡の要求仕様を以下の表 2.3 に示す。

表 2.3: 分割鏡要求仕様

外形	対辺間距離 1.51 m の正六角形形状で、1 つの頂点に AMC のためのカットオフがある。				
重量	総重量が 50 kg 以下である。				
厚み	分割鏡の厚みが 80 mm 以下であることが求められる。分割鏡は厚さ 60 mm のアルミ				
	ハニカムを厚さ 2.7 mm のガラスシートでアルミハニカムを挟む構造になっている。				
焦点距離、曲率半径	口径 23 m の放物面の製造に必要な分割鏡の焦点距離は 28 m から 29.2 m の間で要求				
	されている。				
反射率	地上で観測されるチェレンコフ光の特徴的なピーク波長である 300 nm から 550 nm				
	のにおいて 85%以上の反射率が求められる。				
スポットサイズ	平行光を分割鏡に照射した時の反射光のスポットの全光量のうち、80%の光子が入る				
	範囲を D80 と定義し、D80 の大きさがカメラ 1pixel の 1/3 の大きさである 16.7 mm				
	以内であることが求められる。				
運用期間	分割鏡は10年の屋外での運用が求められ、耐候性に優れた分割鏡が必要である。				
	外形 重量 厚み 焦点距離、曲率半径 反射率 スポットサイズ 運用期間				

2.3.4 球面分割鏡の要求仕様の測定方法

分割鏡の性能の要求仕様には焦点距離、スポットサイズ、反射率の3つがある。それぞれの性能は納入された全ての鏡において、三光精衡所で測定され納入されている。焦点距離とスポットサイズは2f法 測定と呼ばれる方法で測定され、反射率はミラーピースによって測定された。また、納入された鏡の焦 点距離とスポットサイズの性能が正しいことを確認する目的で、納入された一部の鏡で2f法を宇宙線研 究所で再測定している。以下では、2f法とミラーピース測定について述べる。

2f 法測定による球面分割鏡の性能評価

まず、球面鏡の光学的な性質について述べる。球面鏡は球面の性質上、球面鏡の曲率半径離れた光軸 上の位置に置かれた点光源から照射された光は、球面で反射して同じ光路を通り点光源の位置に戻る。 続いて、並行光線が入射した時の模式図を図 2.13 に示す。曲率半径 R、焦点距離 f を持つ球面鏡に光軸 からh離れて入射した平行光は、平行光が入射した球面鏡の交点との法線方向に対して正反射をして、 焦点を結ぶ。法線方向と光線が進む方向のなす角を図 2.13 のようにθとすると、以下の式が成り立つ。

$$h = R\sin\theta = (R - f)\sin2\theta \tag{2.13}$$

光軸に近い位置では、 $\sin\theta \simeq \theta$ 、 $\sin 2\theta \simeq 2\theta$ と近似できるため、式 2.13 は、

$$h \sim R\theta = (R - f)2\theta \tag{2.14}$$

$$R \sim 2f \tag{2.15}$$

となり、入射した並行光線が光軸に十分近い場合、焦点距離fの2倍の位置は曲率半径 R を表すことになる。



図 2.13: 球面鏡に平行光を入射した時の反射の模式図 [18]。

2f 法とは、前述した球面鏡の性質を利用して、曲率半径 (2f) 離れた位置に点光源とスクリーンを置き、 球面鏡の集光性能(スポットサイズ)を測定する方法である。図 2.14 に 2f 法測定の模式図を示し、続け て、2f 法の具体的な方法を述べる。



図 2.14: 2f 法の模式図 [14]

① 球面鏡から曲率半径離れた位置に点光源とスクリーンを置き、反射された像が一番小さくなる位置を目視で決定する。そこにスクリーンを移動し、基準点 (0 m) とする。

② 基準点 (0 m) と基準点から ±0.2 m、±0.4 m、±0.6 m 離れた位置にスクリーンを移動させ (0.2 m 間隔で計 7 点測定)、光源が「ON」の時と「OFF」の画像を CMOS カメラで撮影する。

③ ②で測定した7点の「ON」と「OFF」の画像から、バックグラウンド成分を取り除いたスポット のイメージを取り出し、それぞれのスポットのイメージにおいて、光量重心から数えて全光量の80%の 光量が入る円の直径をD80というパラメータとして取得する。このD80がスポットサイズを評価する パラメータである。

④ 測定した7点の分割鏡からの距離とスポットサイズをプロット(図 2.15)し、双曲線フィッティン グを行う。フィッティングによって得られる曲線から、スポットサイズが最も小さい点を求め、その時 の分割鏡からの距離をその分割鏡の曲率半径とする。



図 2.15: 2f 法によって得られたスポットのイメージと測定値のフィッティング結果。[14]

この 2f 法によって、集光性能を表すスポットサイズと分割鏡の曲率半径が測定された。2f 法での鏡の 性能の測定は、分割鏡の製造を行った三光精衡所で製造された全ての 1000 枚の鏡について行われた。ま た、納入された分割鏡の測定値を確かめるために、そのうちの 200 枚を超える分割鏡について東京大学 宇宙線研究所で追加測定がされた。2f 法測定によって得られた全ての分割鏡の曲率半径とスポットサイ ズの分布を示す。ただし、製造された 1000 枚の分割鏡のうち、1 枚の分割鏡は LST1 号基搭載時に破損 してしまったため除いている。



図 2.16: 2f 法によって測定された分割鏡の曲率半径とスポットサイズ(D80)の分布図。

ミラーピースによる球面分割鏡の反射率測定

分割鏡は対辺間距離が 1.51 m と大きく、通常の反射率測定器で精度よく測定するのは難しい。そこ で、ミラーピースと呼ばれる、分割鏡の製造時に分割鏡の横に置いて同時にスパッタリングすることで 製造された小さな鏡の反射率を測定することで、それを分割鏡の反射率としている。ミラーピースの写 真を図 2.17 に示す。



図 2.17: ミラーピースの写真

保管方法

ラパルマ島での分割鏡保管場所から望遠鏡設置サイトまでの鏡の輸送はトラックによって行われる。 鏡を輸送時の揺れなどによる損傷や破損から守るために、図 2.18 のように Rack と呼ばれる金属製の棚 に鏡を収納し保管している。鏡は金属製の枠に固定され、その枠を Rack に収納しネジで固定すること で、安全な輸送ができている。鏡の品質保持のため鏡はなるべく直接触れず、鏡の移動の際には金属製 の枠ごと移動を行う。よって、Rack 間での鏡の移動が多いような分割鏡の LST2 から 4 号基の分配方法 では肉体的な負担が大きくなる。3 章で述べる Rack ごとの鏡の分配によって鏡の入れ替え回数は大きく 減少し、トラックの輸送の回数が減ることで作業や輸送の効率化が達成できている。



図 2.18: 東京大学宇宙線研究所で Rack に納められ保管されている鏡。

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

LST は口径が 23 m の主鏡を持ち、カメラは主鏡中心から焦点距離 28 m 離れた位置に設置されてい る。このように LST は巨大な構造体を持つため、望遠鏡の向いている方向や風圧、温度変化によって構 造体に歪みが生じてしまい、本来の鏡やカメラがあるべき位置からズレが生じてしまう。そこで、望遠 鏡の光軸中心からレーザーをカメラ面に照射し、分割鏡のカットオフ位置に取り付けられた CMOS カ メラを用いてそのレーザーを検知し、分割鏡 1 枚 1 枚でズレが補正されるように背面に取り付けられた アクチュエータを用いて分割鏡を能動的に動かす。これが AMC の機能である。

2.3.6 検出器とライトガイド

現在運転中の LST のカメラの光検出面には 1855 本の PMT が搭載され、主鏡で反射したチェレンコ フ光を検出する。PMT を並べた時に PMT が円筒形状であることで生じるデッドスペースを埋めるため に、ライトガイド(図 2.19)と呼ばれる六角形形状の集光器を取り付ける。このライトガイドは対辺間 距離が 50 mm で、これは焦点距離 28 m から見ると約 0.1 ° である。ライトガイドは、視野内から入射 する光子は PMT に導くが、視野外から来た光は外に反射し出ていくようになっている。



図 2.19: ライトガイド集光器。PMT のデッドスペースを埋めるために六角形形状になっている。

第3章 LST2-4号基の分割鏡配置の決定と結像性能 の検証

3.1 目的

LST の重要な光学性能の一つとしてスポットサイズがある。スポットサイズとは、分割鏡の曲率半径 の放物面からのズレや分割鏡がきちんと焦点を向いていない影響、分割鏡の表面に凹凸があり完全な球 面鏡でないこと、光線に入射角がある時に生じるコマ収差の影響など様々な要因によって生じる焦点面 での像の広がりを指す。IACT はイメージング法によって、カメラ面に置かれた PMT で受光したチェレ ンコフ光からシャワーイメージを解析し、ガンマ線とハドロンを判別する。LST は CTA の中で低エネ ルギー側を担当しているため観測対象のガンマ線に対してノイズとなるハドロン由来のチェレンコフ光 も数多く検出する。ガンマ線とハドロンを精度良く判別するためには、シャワーの一点から放出された チェレンコフ光は一つの PMT(直径 50 mm, 0.1°)に入射する必要がある。スポットサイズが大きくな り、一点から放出されたチェレンコフ光が複数の PMT に入ってしまうとシャープなガンマ線のイメー ジの幅が大きくなり、ハドロンシャワーのイメージの判別が困難になる。

そこで、LST のスポットサイズの仕様には「Off-Axis Angle(光軸に対する光線の入射角度)が 1.2° でスポットサイズ(D80)が 0.11°以下」が設けられている。現在 LST 初号基はすでに建設が完了し、 安定運転を行っている。初号基の分割鏡配置は東京大学宇宙線研究所の稲田知大氏が担当し [11]、分割 鏡の結像性能の測定・分割鏡配置の最適化の検討などを行った。LST は放物面を 198 枚の球面分割鏡で 形作っているため、分割鏡の設置位置に対して理想的な曲率半径を持つ分割鏡が存在し、この理想的な 曲率半径に近づくように分割鏡の配置が必要である。LST1 号基では、分割鏡の LST の放物面での理想 的な曲率半径を「分割鏡の設置位置の中心からカメラ面までの距離」と定義している。図 3.1 に、LST での分割鏡の設置位置に対する定義した放物面での理想的な曲率半径をプロットしたものを示す。LST2 から 4 号基の分割鏡配置の決定においても、LST での理想的な曲率半径の定義は LST1 号基と同じ「分 割鏡の設置位置の中心からカメラ面までの距離」を用いている。

本研究では、LST2から4号基の分割鏡配置を決定する。La Palma 島にある 741 枚の分割鏡からLST2 から4号基に搭載する198枚×3基分(594枚)の分割鏡を選定し、安定運転中であるLST 初号機と遜色 のない光学性能を持つ望遠鏡を建設し、要求仕様の「Off-Axis Angle が1.2°でスポットサイズ(D80) が0.11°以下」をLST2から4号基全てで満たすことを目指した。



図 3.1: 分割鏡の LST での設置位置に対する理想的な曲率半径を「分割鏡の設置位置の中心からカメラ 面までの距離」と定義し、その理想的な曲率半径を分割鏡の設置位置の光軸中心からの距離に対してプ ロットした図。

3.2 LST 初号基の分割鏡選定と配置方法

LST 初号基の分割鏡の選定は、前節の通り宇宙線研究所の稲田知大氏が行ったが、選定時はまだすべ ての分割鏡の製造が終わっていない段階であった。当時、La Palma に輸送済みの約 600 枚の分割鏡のみ では望遠鏡の理想的な放物面の曲率半径の分布を十分に満たすことはできず、日本から新たに納品され た 100 枚の分割鏡をそのまま LST 初号基に搭載するということを行った。この輸送する 100 枚の鏡は足 りていない曲率半径の分布をちょうど満たすような鏡であった。したがって、輸送した 100 枚の鏡の曲 率半径の分布を作成し、残りの 98 枚はこの分布で足りていない曲率半径の鏡を La Palma にある約 600 枚から選ぶことで選定された。スポットサイズの条件については、以下の表 3.1 に示したように、「分割 鏡の曲率半径が望遠鏡の理想的な曲率半径である 56 m から 58 m の間の鏡ではスポットサイズ(D80) が 33.4 mm 以下、望遠鏡の理想的な曲率半径の範囲外の 56 m より小さい鏡と 58.4 m より大きい鏡は より条件を厳しくしてスポットサイズが 30 mm 以下」とした。スポットサイズの条件の 33.4 mm とは、 2.3.3 の分割鏡の要求仕様で示した 1f の地点で D80 が 16.7 mm の 2f 地点での値である。選定された LST 初号基の曲率半径の分布とスポットサイズの分布を図 3.2 に示す。LST 初号基では、このようにして選 定された分割鏡を曲率半径の小さなものから順に望遠鏡の内側に置く配置方法をとっている。設置する 分割鏡の曲率半径は、設置位置に対して理想的な放物面の曲率半径からのズレが ±0.35% 以内となって いる。こうして 2018 年 10 月に LST 初号基は完成し、現在安定運転中である。LST2 から 4 号基の分割 鏡選定は LST 初号基の選定方法をベースとして行っていく。



表 3.1: 搭載する分割鏡の曲率半径に対するスポットサイズの条件

3.3 LST2から4号基の分割鏡選定

3.3.1 分割鏡の製造、設置状況

分割鏡はすでに LST 初号基に設置済みのものを含めて、合計 1000 枚製造された。1000 枚の全ての分 割鏡は、小節 2.3.3 の 2f 法によって曲率半径とスポットサイズが測定され、ミラーピースの測定によっ て 250 nm から 650 nm の波長に対する反射率が測定されている。以下の表 3.2 に 1000 枚の鏡の設置・ 保管状況についてまとめた。LST2 から 4 号基の選定は La Palma 島にある 741 枚の分割鏡で行う。

表	3.2:	製造された鏡と	保管されてい	ヽる鏡の枚数

	製造された全ての	LST 初号基に搭載	LST 初号基搭載時	La Palma 島にあ	東京大学宇宙線研
	鏡	した鏡	に破損した鏡	る鏡	究所で保管する鏡
枚数	1000	198	1	741	60

3.3.2 分割鏡の分配方法

口径 23 m の望遠鏡には 56 m から 58.4 m の曲率半径を持つ球面分割鏡を搭載する。図 2.10 の右図に 示したように、望遠鏡の設置位置に対する放物面での理想的な曲率半径の分布は決まっている。この分 布の bin 幅は、小節 2.3.3 の 2f 法測定によって、D80 が最小となる点から曲率半径が 0.2 m 程度離れた 位置での D80 は大きく広がらない(~1% 程度)という 2f 法測定の結果から 0.2 m の bin 幅が決定され

図 3.2: LST 初号基で選定された分割鏡 198 枚の曲率半径の分布とスポットサイズの分布

た。放物面での理想的な曲率半径の分布に近づくように、分割鏡を選定することが必要となる。また、 スポットサイズの条件については LST 初号基と同じ条件「曲率半径が 56 m から 58 m の間の鏡ではス ポットサイズ (D80) が 33.4 mm 以下、56 m より小さい鏡と 58.4 m より大きい鏡はスポットサイズが 30 mm 以下」を用いた。La Palma 島にある 741 枚の分割鏡について曲率半径とスポットサイズの散布 図を図 3.3 に示す。この散布図よりスポットサイズの条件を満たす鏡は 677 枚あることが分かった。こ の 677 枚の鏡を用いて、LST 2から 4 号基それぞれで放物面での理想的な曲率半径の分布を満たす 198 枚の分割鏡を選定する。



図 3.3: La Palma にある 741 枚の分割鏡の曲率半径と Spot size(D80)の散布図。赤の網掛け部分が 「曲率半径が 56 m から 58 m の間の鏡ではスポットサイズ(D80)が 33.4 mm 以下、56 m より小さい 鏡と 58.4 m より大きい鏡はスポットサイズが 30 mm 以下」の条件を満たす範囲であり、この範囲にあ る鏡は 677 枚あった。

LST1 基の建設に必要な鏡は 198 枚である。677 枚の分割鏡を LST2 から 4 号基に分配する場合、その 組み合わせはおよそ $_{677}C_{198} \times _{479}C_{198} \times _{281}C_{198} \simeq 41 \times 10^{387}$ 通りあり、この中で最適な配置を見つけ ることは至極困難である。そこで、LST2 から 4 号基の選定では、分割鏡が最大5 枚で 1 セットになって 格納され保管されている Rack と呼ばれる金属製の棚を 3 つの LST にランダムに分配するという方法を 行った。677 枚の鏡は 142 個の Rack に収納されていて LST1 基に対し約 40 個の Rack を用いることか ら、分割鏡選定の組み合わせを $3^{142} \simeq 5.6 \times 10^{67}$ 通りまで減らすことができる。また、La Palma 島の 鏡が保管されている場所から望遠鏡サイトまでは Rack ごとに輸送されるため、この方法によって大幅 な Rack 間の鏡の交換などの作業をする必要がなくなり、輸送や作業の効率化ができるようになる利点 がある。

以下にLST2から4号基の分割鏡の分配方法の手順を示す。

① Rack ごとに 1 から 3 の乱数を振り、出た数に対して 142 個の Rack を LST2 から 4 号基に分配する。



② 分配した分割鏡の曲率半径の分布図と望遠鏡の放物面での理想的な曲率半径の分布図の1binごとの 枚数の差を表す分布図をLST2から4号基それぞれで作成する。以下に作成した図を示す(図3.4)。



図 3.4: 左図:142 個の Rack を分配することでできた LST1 基分の曲率半径の分布図。中図:理想的な放物 面での曲率半径の分布図。右図:分配してできた曲率半径の分布図と理想的な放物面の曲率半径の分布図 の差を表した分布図。

③ 作成した LST2 から 4 号基のそれぞれの分布図で不足している曲率半径の合計枚数が 12 枚以下になったら終了、12 枚より大きい枚数の場合は① に戻って繰り返す。以下には例として、分配をやり直す場合の LST2 から 4 号基の分布図を示す。



図 3.5: Rack のランダムな分配で理想的な放物面の曲率半径の分布を満たすことができなかった場合。 どの分布でも不足している曲率半径の合計枚数が 14 枚で、12 枚以下を満たしていない。

12 枚以下で終了としたのは、上記したように全体の通り数は膨大であり、完全に放物面での曲率半径 の分布に一致する分布を満たすことは難しいためである。8 枚以下の条件も試したが 10 万回の試行回数 を超えても条件を満たすような分布図は得られなかった。上記の方法では、放物面での理想的な曲率半 径の分布を完全に満たすことはできないため、足りていない bin の曲率半径の鏡は隣の bin の鏡から移 動することで補う。

3.3.3 望遠鏡に搭載する 198 枚の分割鏡の選定と選定結果

前節の方法で得られたLST2から4号基の分割鏡の曲率半径の分布図を図3.6に示す。以下では、Rackのランダムな分配によって得られたLST2から4号基の曲率半径の分布から、最終的に搭載する198枚の鏡の選定について述べる。



図 3.6: 前節の Rack をランダムな分配による選定方法によって得られた LST2 から 4 号基の分割鏡の曲 率半径の分布図(赤)と放物面での理想的な曲率半径の分布図(青)を同時にプロットした図(上)。ま た、その分布図の差(赤の分布図 - 青の分布図)をとった分布図(下)。

この分配方法でできた分布は放物面での理想的な曲率半径の分布に対して、LST2 と LST3 の分布で は9枚の不足、LST4の分布では10枚の不足となった。それぞれの LST で不足している bin の鏡は、そ の LST の分布の中で、余っている隣の bin の鏡で補うことで満たす。しかし、LST3 号基の 58 m から 58.2 m の bin の 2 枚の鏡と LST4 号基の 56.8 m から 57 m の bin の 1 枚の鏡は隣の bin で補うことがで きない。そのため、この不足している 3 枚の鏡は、他の LST の Rack に収納されている鏡を Rack 間で 鏡を入れ替えることで補うことにした。bin の中ではできるだけ同じ Rack に鏡が収まるように 198 枚を 選び、Rack 間の移動を終えた後の LST2 から 4 号基の分布を以下の図 3.7 に示す。



図 3.7: 決定した LST2 から 4 号基の 198 枚の曲率半径の分布(赤)と放物面での理想的な曲率半径の 分布(青)を同時にプロットした図。理想的な曲率半径の分布図に対して不足している bin の鏡は隣の bin で補えるようになっている。

以上のように、曲率半径のデータを用いて LST2 から 4 号基の 198 枚の分割鏡を決定した。以下に LST1 から 4 号基の 198 枚の分割鏡について、設置した分割鏡の曲率半径と設置位置での理想的な曲率 半径の差をカラーマップで表した図を示す(図 3.8)。LST 初号基の選定時よりも選定の自由度が上がっ たため、LST 初号基の曲率半径の分布よりも LST2 から 4 号基の曲率半径の分布は理想的な曲率半径に 近づいており、理想的な放物面の曲率半径からのズレは最大で 0.22% 以内となっている。また、LST 初 号基の理想的な放物面の曲率半径からのズレの標準偏差は 0.08 m なのに対し、LST2 から 4 号基では最 大で 0.038 m であり、50%以上理想的な放物面の曲率半径に近づいている。



図 3.8: LST1 から4号基の分割鏡の曲率半径と設置位置での理想的な曲率半径からの差を –0.2 m から +0.2 m の範囲のカラーマップで表した図。選定した分割鏡を曲率半径の小さな分割鏡から順に望遠鏡 の内側から置く方法で配置した。

LST2から4号基に搭載する分割鏡を決定し、その曲率半径の分布がLST初号基の分布よりも理想的な曲率半径の分布に近い分布になっていることを示した。

続いて、決定した LST2 から 4 号基の分割鏡の 2f 法測定によるスポットサイズの分布図を図 3.9 に、 分割鏡を LST2 から 4 号基に配置した際のスポットサイズの分布をカラーマップで表した図を図 3.10 に 示す。198 枚の決定は曲率半径のパラメータのみで行ったが、スポットサイズの平均値はどの LST でも ≃ 27 mm となっており、結果的に LST2 から 4 号基でスポットサイズのばらつきが少ない分布を達成で きた。



図 3.9: 決定した LST2 から 4 号基の 198 枚の 2f 法測定による焦点距離の 2 倍の位置でのスポットサイズの分布図



図 3.10: 曲率半径の小さな分割鏡から順に望遠鏡の内側から置く方法で配置した時の LST1 から 4 号基の分割鏡のスポットサイズの分布を 18 mm から 34 mm の範囲のカラーマップで表した図

3.4 光線追跡シミュレーションによる結像性能の検証

選定した LST2 から 4 号基の分割鏡を望遠鏡に搭載した時の集光性能を検証するために光線追跡シミュ レーションを行い、焦点面でのスポットサイズを安定運転中の LST 初号基と比べると共に、スポットサ イズが CTA の仕様である「Off-Axis Angle が 1.2° においてスポットサイズ(D80)が 0.11° 以下」を満 たすかについて検証した。

光線追跡シミュレーションソフトには ROBAST(ROOT-Based Simulator for Ray Tracing)[15] を 用いた。ROBAST とは、名古屋大学教授の奥村氏によって開発された光学系シミュレーションソフト で、ROOT[16] を元に C++言語で書かれている。ROBAST は CTA など様々な望遠鏡の光学系の再現 に用いられ、宇宙線・ガンマ線領域では最も使用されている光学系シミュレーションソフトウェアの一 つである。ROBAST では ROOT のジオメトリライブラリを使用することで望遠鏡の複雑な三次元構造 体を組むことができようになっている。今回のシミュレーションには ROBAST-3.2.0 を用いた。

3.4.1 シミュレーションセットアップ

集光性能を調べるために、198枚の分割鏡と焦点面カメラ、それらを支持するマストを ROBST によっ て形作り、LST の光学系を再現した(図 3.11)。そして、LST2 から 4 号基それぞれで搭載する鏡に対応 した曲率半径とスポットサイズを鏡の性能として持たせ、光線追跡シミュレーションを行った。光線追 跡シミュレーションの方法は、安定運転中である LST 初号基の集光性能を検証した時に使用したシミュ レーションと同様のことを行っている。以下にシミュレーションのセットアップを記述する。

• 光学系のセットアップ

望遠鏡放物面の鏡の搭載位置(x、y、z座標)に対して、それぞれのLSTで決定した198枚の球面 鏡を配置する。曲率半径は設置された分割鏡それぞれが持つ値である。望遠鏡の口径は23 mで、 放物面の中心から焦点距離28 mの位置にカメラとしてスクリーンを置き、主鏡で反射された光線 を捉える。

• 照射する光線のセットアップ

チェレンコフ光は望遠鏡に対して十分遠方で放出されると仮定し、ここで主鏡に照射する光線は平 行光を照射する。望遠鏡全面に満遍なく照射するために半径 15 m の円の中のランダムな位置から 50 万本の光線を照射した。また、望遠鏡の視野は 4.5° であるため、光軸からの Off-Axis Angle を 望遠鏡の X 軸方向に 0° から 2.5° まで 0.5° 刻みで変えて光線を照射し、スポットサイズの変化を 調べた。加えて、仕様として求められる Off-Axis Angle が 1.2° におけるスポットサイズを調べた。

分割鏡の結像性能

小節 2.3.3 の 2f 法によって測定された各分割鏡のスポットサイズを分割鏡の反射のばらつきとして シミュレーションに組み込む。球面分割鏡に当たった光線は入射角に対して正反射をする。スク リーン(焦点面)で受光した時に、各鏡の 2f 法で測定されたスポットサイズの大きさに対応する 分散を求め、2 次元正規分布で受光した光線の位置をばらつかせるという操作をしている。分散は x、y 方向で等しい値を仮定している。以下に、スポットサイズ D を持つ鏡に当たった光線を焦点 面でばらつかせるために必要な 2 次元正規分布の分散 σ の求め方を示す。

まず、x、y 方向の分散 σ が等しく、平均が 0 の 2 次元正規分布 f(x,y) は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \, dx \, dy = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \, dx \, dy = 1 \tag{3.1}$$

を満たす。これを曲座標変換すると、動径r、角度θで分散σの2次元正規分布は、

$$\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} f(r,\theta) r dr d\theta = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\infty} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} r dr d\theta = 1$$
(3.2)

となる。

ここで、θの積分を計算し、動経方向について0からrまでの積分をとると、

$$\frac{1}{2\pi\sigma^2} \int_0^{2\pi} \int_0^r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} r dr d\theta = \int_0^r \left(-e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}\right)' dr = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}$$
(3.3)

となり、スポットサイズ(D80)の定義は全体の光量の 80%が入る直径の大きさなので、

$$1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} = 0.8$$
$$\frac{r}{\sigma} \simeq 1.7938$$
$$\sigma \simeq \frac{2r}{3.6}$$
(3.4)

より、各分割鏡のスポットサイズ D80(=2r)を 3.6 で割った値を分散 σ として、スクリーン(焦 点面)に当たった光線の分布が 2 次元正規分布になるようにする。

分割鏡の反射率

LST に搭載した分割鏡の曲率半径やスポットサイズの影響を検証するため、鏡の反射率は全ての鏡で 100%の反射率とした。よって、鏡に当たった光線の吸収は起こらず、全ての光線は反射される。



図 3.11: ROBAST で望遠鏡光学系を再現し、並行光線(黄線)を Off-Axis Angle が 0° から 2.5° まで 0.5° 刻みで照射した場合の全角度での光線を一度に表した光線追跡シミュレーションの様子。焦点面の スクリーン(赤)に集光しているのがわかる。

3.4.2 シミュレーション結果

LST1 から4号基それぞれで実際に搭載する分割鏡の曲率半径とスポットサイズを持たせ、光軸からの Off-Axis Angle を0°から2.5°まで0.5°刻みで変えて並行光線を照射し光線追跡シミュレーションを
行ったたときのスポットのイメージを図 3.12 に示し、さらに Off-Axis Angle が 1.2° でのシミュレーショ ン結果を加えて、Off-Axis Angle に対するスポットサイズの変化を焦点距離 28 m に対する角度で表し たものを図 3.13 に示す。図 3.13 より、今回の鏡の選定、配置方法で LST2 から 4 号基全てで CTA の仕 様である「Off-Axis Angle が 1.2° でスポットサイズ(D80)が 0.11° 以下」を満たし、LST 初号基と変 わらないスポットサイズの性能を持つ望遠鏡の製造ができることが分かった。また、図 3.14 に LST 初 号基のスポットサイズに対する LST2 から 4 号基のスポットサイズの大きさの比をプロットしたものを 示した。この図より、コマ収差の影響が小さいと考えられる Off-Axis が小さな場合では、LST 初号基よ り曲率半径の分布が理想に近い LST2 から 4 号基のスポットサイズがよくなっていることが分かり、各 Off-Axis Angle での LST1 から 4 号基でのスポットサイズの差は最大でも 1%以内で収まっている。

表 3.3: Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで変化させた時の LST1 から 4 号基のスポットサイズの大きさ [mm] の変化

入射角 LST	0°	0.5°	1.0°	1.5°	2.0°	2.5°
LST1 号基	23.250	30.126	45.550	63.847	82.359	101.704
LST2 号基	23.087	30.066	45.437	63.603	82.310	101.984
LST3 号基	23.104	30.041	45.449	63.264	82.325	101.726
LST4 号基	23.102	30.029	45.422	63.649	82.310	101.991



図 3.12: 光軸からの Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで 0.5° 刻みで変化させた時の光線追跡シミュレー ションによる望遠鏡のスポットのイメージ図。LST2 号基のスポットイメージを表している。



図 3.13: 光軸からの Off-Axis Angle が 0、0.5、1.0、1.2、1.5、2.0、2.5° の時の焦点距離に対する LST1 から 4 号基のスポットサイズの大きさ(D80)を角度で表した図。LST 初号基を黒、LST2 号基を赤、LST3 号基を青、LST4 号基を緑でプロットしているが、LST1 から 4 号基でスポットサイズがほとんど 変わらないため、重なって見えている。点線は仕様である Off-AxisAngle が 1.2° の時のスポットサイズ が 0.11° 以下を示しており、全ての LST で仕様を満たしていることが分かる。



図 3.14: LST 初号基のスポットサイズに対する LST2 から 4 号基のスポットサイズの比を Off-Axis Angle に対してプロットした図。LST 初号基のスポットサイズを1とした時の LST2 号基のスポットサイズを 赤、LST3 号基のスポットサイズを青、LST4 号基のスポットサイズを緑でプロットしている。

3.5 まとめ

本章では、安定運転中である LST 初号基の分割鏡の選定方法をベースとして、La Palme 島にある 741 枚の分割鏡から LST2 から 4 号基に搭載する 594 枚(198 枚×3 基分)の分割鏡を選定し、光線追跡シ ミュレーションを用いて LST2 から 4 号基の結像性能が CTA の要求仕様を満たすことを示した。LST2 から 4 号基の分割鏡の選定では、分割鏡鏡が収納されている Rack ごとに各 LST に分配するという方法 を確立し、それぞれの LST で分割鏡の性能に偏りのない分布を達成すると共に、輸送や作業の効率化が できるようになった。

また、決定した分割鏡の曲率半径とスポットサイズを分割鏡の性能としてシミュレーションに組み込み、光線追跡による望遠鏡の集光性能の評価を行った。結果として、曲率半径が小さな鏡から順に望遠鏡の内側に置く配置方法で、CTAの望遠鏡の仕様である「Off-Axis Angle が 1.2°においてスポットサイズ(D80)が0.11°以下」をLST2から4号基全てで満たし、LST初号基と遜色のない性能をもつ望遠鏡を製造可能であることを示した。本章でLST1から4号機に搭載する分割鏡を決定したことから、次章では決定した分割鏡の反射率を用いて望遠鏡全体での反射率の見積もりを行った結果を示す。

第4章 LST1-4号基の主鏡反射率の評価

4.1 目的

3章では、分割鏡の曲率半径とスポットサイズの値を用いて LST2 から 4 号基の分割鏡の選定と配置 を決定し、その集光性能が CTA の要求仕様を満たすことを示したが、望遠鏡の重要な性能としてもう 一つ反射率がある。LST は CTA において低エネルギー側のガンマ線を観測し、少ない光子を効率よく 取得するために高い反射率が求められる。そこで、望遠鏡の反射率の仕様として、観測されるチェレン コフ光の波長である 300 nm から 550 nm で 85% 以上を満たすことが求められる。また、解像型チェレ ンコフ望遠鏡では、モンテカルロシミュレーションで事前に入射ガンマ線のエネルギーに対して得られ る光量を知ることで、実際に受光したチェレンコフ光の光量から入射ガンマ線のエネルギーを推定する。 このようにガンマ線エネルギーの推定に直結するため、望遠鏡は高い反射率を持つだけでなく、実際の 鏡の反射率に則した反射率をモンテカルロシミュレーションに搭載することが必要である。

LST には1基につき198 枚の分割鏡が搭載される。分割鏡は対辺が1.51 m あるため通常の反射率測定 器で全面を精度良く測定することは困難である。そこで、ミラーピースと呼ばれる分割鏡の製造時に分 割鏡の横に置き、同時にスパッタリングされ製造された小さな鏡の反射率を測定することでおおよその 反射率を見積もっている。これまでにモンテカルロシミュレーションに搭載していた望遠鏡の反射率デー タは、LST1 号基に搭載した分割鏡のミラーピースデータから求めた198 枚の平均の反射率である。私 が3章で LST2 から4号基に搭載する分割鏡を決定したことから、ミラーピースの反射率を用いて LST1 から4号基それぞれの198 枚の平均の反射率(主鏡の平均的な反射率)を求めることが可能になり、モ ンテカルロシミュレーションに搭載する LST1 から4号基の反射率データの更新が求められた。そこで、 私は LST1 から4号基に搭載した全ての分割鏡に対応するミラーピースの反射率データを整理し、その データを用いて LST1 から4号基それぞれの198 枚の平均の反射率を決定した。また、LST1 号機の平均 の反射率はミラーピースの反射率結果によって求められたが、分割鏡の反射率はミラーピースで見積も ることができるぐらい一様な反射率を持つのかが Critical Design Revie によって議論された。そこで、 分割鏡の反射率測定を分割鏡全面で84点行うことにより、分割鏡の反射率場所依存性を調べた。多くの 鏡は La Palma に輸送済みであったため、測定は日本で保管されている分割鏡の中で8枚の鏡について 行い、その結果を用いてより現実的な LST1 から4 号機の反射率の見積もりを行った。

4.2 ミラーピースによる LST1 から 4 号基の主鏡反射率の評価

4.2.1 ミラーピースの反射率データの分類について

分割鏡の反射率は、CTA の要求仕様として「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率 が 85% 以上」が求められている。分割鏡は対辺が 1.51 m あるため通常の反射率測定器で全面を精度良 く測定することは困難で、ミラーピースと呼ばれる分割鏡と同時にスパッタリングされ製造された鏡の 反射率を測定することでおおよその反射率を見積もっている。ミラーピースは、製造された 1000 枚の分 割鏡のうち初期に製造された分割鏡を除いた 991 枚の鏡について反射率が測定された。この受け取った 991 枚の反射率データは測定波長や波長間隔に一貫性のないもので、250 nm から 650 nm まで 1 nm 間 隔で測定されたデータ、250 nm から 650 nm まで 0.5 nm 間隔で測定されたデータ、250 nm から 850 nm まで1 nm 間隔で測定されたデータの3種類のデータがあることが分かった。これは、製造や測定を行った三光精衡所で測定日や製造日、測定者の違いなどによるヒューマンエラーの影響と推測される。991枚のデータを測定波長帯と波長間隔で分類し、そのデータの種類に該当する枚数を表 4.1 にまとめた。

表 4.1: ミラーピースの反射率データの種類と枚数

測定波長帯(測	250 nm から 650 nm	250 nm から 650 nm	250 nm から 850 nm	合計
定データ間隔)	(0.5 nm 間隔)	(1 nm 間隔)	(1 nm 間隔)	
枚数	377枚	393 枚	221 枚	991枚

表 4.1 から 650 nm 以降の反射率データが無いミラーピースは全体の約 8 割であることが分かる。モ ンテカルロに渡す LST1 から 4 号基の平均の反射率は 650nm 以降も必要であり、大きく足りていない反 射率データをどのように補間するかの考慮が必要となる。

4.2.2 LST1から4号基に搭載する分割鏡に対する反射率データの分布

反射率データは3種類あることが分かり、この影響がLST1から4号基の反射率の決定にどのような 影響が出るかを理解するために、LST1から4号基で決定した198枚の分割鏡のうち該当する反射率デー タの種類に対応する鏡が枚数あるかを調査し、その結果を表4.2に示す。

表 4.2	2:	ミラ	シービ	ース	の反	射率·	デージ	タの	锺類	に対	応す	る
	LS'	T1	から	4号	基に打	苔載さ	される	分割	削鏡の	り枚数	友	

測定波長帯	LST1	LST2	LST3	LST4	合計
250 nm から 650 nm	58 枚	89 枚	78 枚	80枚	305 枚
(0.5 nm 間隔)					
250 nm から 650 nm	122枚	71 枚	73枚	79 枚	345 枚
(1 nm 間隔)					
250 nm から 850 nm	18枚	38枚	47枚	39 枚	142 枚
(1 nm 間隔)					

この表より、データの種類に対する鏡の枚数は、LST2 から 4 号基のデータの種類に対する分布は大 まかに一致しているのに対し、LST 初号基の分布は LST2 から 4 号基の分布の傾向と異なることが分か る。これをより理解するために、LST1 から 4 号基に搭載する鏡の ID に対するデータの種類の分布を調 査した。その結果を図 4.1 に示す。この図より、データの種類の傾向はおおよそ鏡の製造時期に一致し、 250 nm から 650 nm まで 0.5 nm ごとの反射率データがある鏡(緑の分布)は 200 番から 700 番の初期 に製造された鏡が分布し、250 nm から 650 nm まで 1 nm ごとの反射率データがある鏡(紫の分布)は 700 番から 1000 番の中期に製造された鏡が多く分布し、250 nm から 850 nm まで 1nm ごとの反射率 データがある鏡(青の分布)は 1100 番を超える新しい鏡が多く分布することが分かった。さらに、LST 初号基では ID が 700 番から 1000 番の中期に製造された鏡を多く搭載されており、分割鏡の製造途中で あったため ID が 1100 番を超える新しい鏡は少ないことが分かる。



図 4.1: LST1 から 4 号基に搭載する分割鏡 ID に対してデータの種類ごとに色分けした分布図。 分布は積み上げて表している。bin 幅は ID を 25 ごとに区切っている。 緑:250 nm から 650 nm まで 0.5 nm ごとの反射率データがある鏡の分布。 紫:250 nm から 650 nm まで 1 nm ごとの反射率データがある鏡の分布。 青:250 nm から 850 nm まで 1 nm ごとの反射率データがある鏡の分布。

4.2.3 ミラーピースによる LST1 から 4 号基の平均の反射率の見積もり

ここまで、LST1から4号基に搭載する鏡のIDに対応するミラーピースの反射率には測定波長の範囲 や測定間隔の違いが生じていることを理解し、650nm以降の反射率を見積もるためにデータの種類ごと の鏡の分布を調査した。続いて、この分布の違いが反射率にどのように影響するかを調べるために、そ れぞれのデータの種類ごとに反射率の平均を取り、プロットした。その結果を図 4.2 に示す。



図 4.2: LST1 から 4 号基のデータの種類ごとに平均の反射率を取り同時にプロットした図。 赤:250 nm から 650 nm まで 1 nm ごとの各望遠鏡ごとの 198 枚の平均の反射率。 オレンジ:250 nm から 650 nm までは各望遠鏡の 198 枚の標準偏差で、650 nm 以降では各望遠鏡ごとの 650 nm 以降のデータがある鏡の枚数の標準偏差を 1σ でプロットしたもの。 緑:250 nm から 650 nm まで 0.5 nm ごとの反射率データがある鏡での平均の反射率。 紫:250 nm から 650 nm まで 1 nm ごとの反射率データがある鏡での平均の反射率。 青:250 nm から 850 nm まで 1 nm ごとの反射率データがある鏡での平均の反射率。

図 4.2 から、250 nm から 650 nm まで 0.5 nm 間隔の測定データがある鏡での平均の反射率は 198 枚 の平均の反射率に比べて反射率が小さい傾向があることが LST1 から 4 号基全てで分かる。これは、250 nm から 650 nm まで 0.5 nm 間隔でデータがある鏡が、図 4.1 の緑の分布で示したように、初期に製造 された鏡が多い原因であると考えられる。また、LST2 から 4 号基では 250 nm から 650 nm での平均の 反射率と 650 nm 以降の平均の反射率はほぼ一致して、標準偏差の差も少ないことが分かり、少しの補正 を行うのみで平均の反射率を求められる。一方で、LST 初号基では 650 nm での 198 枚の平均の反射率 (赤)と 650 nm 以降の反射率データがある 18 枚の平均の反射率(青)で反射率の差が生まれているこ とが分かる。これは、LST 初号基では 650 nm 以降の反射率データがある鏡の枚数が 18 枚と他の LST に比べ半分以下で少ないことが原因だと考える。これを示すために、LST 初号基の各データの種類ごと に、平均の反射率と鏡1枚1枚の反射率を同時にプロットし、その結果を図4.3に示す。LST 初号基で は表4.2で示したように、中期に製造されたと思われる250 nm から650 nm を1 nm 間隔で測定された 反射率データを持つ鏡は122枚で他のLST に比べて1.5倍以上あり、かつ、図4.3より反射率が高い鏡 が少ないわけではないことが分かる。よって、LST 初号基では650 nm 以降で反射率が極端に落ちてい るわけではなく、他のLST と同様に250 nm から650 nm の198枚の反射率とスムーズに繋がるような 反射率カーブを650 nm 以降でも持つことが妥当であると結論づけた。よって、LST 初号基の反射率は 650 nm 以降の反射率を上げ、250 nm から650 nm の198枚の反射率とスムーズに繋がるように補正を 行うことに決定した。



図 4.3: LST 初号基のミラーピース1枚1枚の反射率をデータの種類ごとにプロットした。

左図:250 nm から 650 nm まで 0.5 nm 間隔で測定された反射率データを持つ 58 枚の鏡を灰色でプロットした図

中図:250 nm から 650 nm まで 1 nm 間隔で測定された反射率データを持つ 122 枚の鏡を灰色でプロット した図

右図:250 nm から 850 nm まで 1 nm 間隔で測定された反射率データを持つ 18 枚の鏡を灰色でプロット した図

同時に各データの種類での平均の反射率をプロットした。

4.2.4 650 nm での平均の反射率の接続方法とLST1 から 4 号基の平均の反射率

ミラーピースの反射率データは複雑なものであったが、データの分類を行い、LST1から4号基の平 均の反射率を求めることが可能であることを示した。本節の最後に、LST1から4号基の1台ごとの平 均の反射率を同時にプロットしたものを図4.4に示す。図から、CTA要求仕様である「300 nmから550 nmの波長帯で望遠鏡の平均の反射率が85%以上」をLST1から4号基全ての望遠鏡で満たし、3章で示 したLST2から4号基の分配で十分な性能を持つ望遠鏡の建設が可能であることの裏付けとなっている。



図 4.4: 搭載した分割鏡の反射率を元に作成した、LST1 から 4 号基の 1 台ごとの平均の反射率。標準偏 差は LST1 から 4 号基に用いた全ての鏡で計算し、250 nm から 650 nm の範囲では 792 枚(198 枚×4 基分)の標準偏差、650 nm 以降では補正等を行う前の反射率で計算した 142 枚の標準偏差を灰色で表し ている。CTA の要求仕様である「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」 を黒の点線で示し、全ての LST で満たしていることが分かる。黒:LST 初号基の平均の反射率。赤:LST2 号基の平均の反射率。青:LST3 号基の平均の反射率。緑:LST4 号基の平均の反射率。

4.3 分割鏡反射率の場所依存性測定

これまで、ミラーピースの反射率を用いてLST1から4号基の平均の反射率を求めた。しかし、分割 鏡の製造初期の鏡であるが、分割鏡には鏡面全体で製造時のスパッタリング由来の反射率のムラがある ことが2014年に茨城大学修士を卒業した馬場浩則さんの研究[18]で示されている。したがって、分割 鏡と同時にスパッタリングされたミラーピースの反射率で求めたLST1から4号基平均の反射率は、分 割鏡全体の反射率を表してると断定できない。そこで、現在LSTに搭載されている分割鏡と同様の製造 時期の分割鏡を用いて、反射面全面をハンディタイプの測定器で84点反射率測定することで、反射率の 場所依存性を測定し、より現実的な分割鏡の反射率を見積もるという実験を行った。以下では、実験の セットアップと測定結果、考察を述べる。

4.3.1 セットアップ

分割鏡の鏡面全体で 84 点の反射率測定を行い、スパッタリングの反射膜のムラがどのように反射率に 影響しているかを調べた。以下に、測定機器、測定した鏡の ID、測定方法などのセットアップを示す。

• 測定機器

反射率測定器には KONICA MINOLTA の分光測色計 CM-2600d を用いた。これはハンディタイ プの反射率測定器で、対辺 1.51 m ある分割鏡でも測りたい場所を的確に捉え、反射率測定が可能 である。360 nm から 740 nm までの波長帯を測定することができる。図 4.5 に使用した測定器の 写真を載せる。





図 4.5: 左図:測定に用いた KONICA MINOLTA の分光測色計 CM-2600d の写真。PC とコードで繋が れているが、3 m ほどであれば自由に動かすことができる。右図:実験の様子。鏡を傷つけないように測 定器と鏡の間に布を置いて測定している。

• 測定した鏡

反射率測定は、ID が 520、558、560、1167、1179、1247、1308、1318 の計 8 枚の分割鏡に対して 行った。表 4.3 にそれぞれの鏡の分類と簡単な測定結果を述べる。ほとんどの分割鏡はラパルマ島 に輸送済みであり、自由に ID を選んで反射率の傾向を調べることができない状況であった。日本 に残っている測定可能な鏡から、製造が古い分割鏡の代表として 520、558、560 番の 3 枚の鏡、製 造が新しい分割鏡の代表として 1167、1179、1247 番の 3 枚の鏡を選択し測定を行った。1308 番 と 1318 番の 2 枚の分割鏡は納入前の鏡でミラーピースの反射率データがない鏡であり、場所依存 性の測定は行ったがミラーピースの反射率との比較はできなかった。

測定した鏡の ID	分類	ミラーピースのデータ	反射率非一様性	ピースの反射率と 84
				点の平均の反射率の
				差
1308、1318	納入前の鏡	なし	長波長側で大きい	ピラーピースの反射
				率データがないため
				測定不可能
1167、1179、1247	製造が新しい鏡	あり	長波長側で大きい	400 nm より長波長側
				で最大 4%
520, 558, 560	製造が古い鏡	あり	短波長側で大きい	500 nm より長波長
				側ではおおよそ一致、
				500 nm より短波長側
				では最大 2%

表 4.3: 測正した頭の分頬と測定結

• 測定方法

分割鏡の全面を測定するため、図 4.6 のように分割鏡を 15 cm 間隔で 84 点に分割し、360 nm から 740 nm まで 10 nm 刻みで反射率を測定した。測定器は全測定で同じ機器を使用し、キャリブレーションはマニュアルに沿って、各測定日で測定前に1度行っている。

• 測定日、測定者、測定場所

反射率場所依存性の測定は2020年2月10日から2020年9月30日まで計4回に分けて行われた (表4.4)。長期に渡って測定が行われているのは、84点の測定を複数枚測定するのに時間がかかる ことも要因の一つであるが、2020年の新型コロナウイルスの流行によって測定が滞ったことが最 大の原因である。したがって、2020年3月11日のID1247の鏡と2020年7月13日のID558の鏡 とID1167の鏡は私が直接測定に関わることはできず、共同研究をしている宇宙線研究所の稲田知 大さん他に測定を行っていただいた。

測定日	測定した鏡のID	測定者	測定場所
	顔足 じた跳り ID	视人	(別人し物)))
2020年2月10日	1308、1318	小原、稲田	三光精衡所
2020年3月11日	1247	稻田他	宇宙線研究所
2020年7月13日	558、1167	稻田他	宇宙線研究所
2020年9月30日	520, 560, 1179	小原、稲田他	宇宙線研究所

表 4.4: 測定の詳細



図 4.6: 測定した分割鏡の 84 点の位置を青色で示した。bin 幅は 15 cm である。上端の黒の三角形で表 したものは AMC のためにカットオフした箇所を表している。[17]

4.3.2 結果と考察

360 nm から 740 nm までの 84 点の反射率の測定結果を 85%から 95%の範囲で 2 次元カラーマップで 表した図を示す。また、この結果より分割鏡の場所によって反射率の傾向があることが分かった。これ をより詳しく理解するために、分割鏡の特徴的な 13 点を選び、その場所での波長に対する反射率を 360 nm から 590 nm でプロットした図を作成した。13 点の選び方は馬場氏の修論 [18] を元にし、図 4.7 に 示した。



図 4.7: 特徴的な 13 点の場所の図。向かって左側が AMC のカットオフサイドである。

まず、製造が新しい納入前の鏡である ID1308 と ID1318 の 84 点の反射率測定の結果を述べる。また、 測定を行った多くの鏡には反射膜のコーティングのムラによるものと考えられる色の違いが肉眼で確認 でき、その位置と鏡の反射率の関係を私が関わった測定で写真等で分かる範囲で述べる。 • ID1308の反射率測定結果

ID1308 の鏡は、三光精衡所で保管されていた鏡である。保管状況があまり良くない鏡で、図 4.7 の 12、2、10 の縦のラインと 5 の位置に水垢のようなものが肉眼で確認できた(図 4.8)。また、 図 4.7 の 1 と 12 の間の位置では、図 4.9 に示すように、肉眼で青白く反射しているのが確認でき た。これらは、図 4.10、図 4.11 の反射率にも反映され、同じ位置(1,2,5,10,12 の位置)で反射率 が落ちているのが確認できる。



図 4.8: ID1308の写真。図の赤円で囲んだ範囲に白く水垢のようなものが確認できる。



図 4.9: ID1308 の写真(2)。図の左上(AMC のカットオフサイド)で青白く反射しているのが肉眼で確認できる。



図 4.10: ID1308 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)ま での 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.11: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID1308 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプ ロットした図。

• ID1318の反射率測定結果

ID1318の鏡は、搭載する鏡と同様に保管され、ID1308のような水垢などは見られなかった。しかし、ID1318 も図 4.12 で示すように、赤から青白く反射しているのが肉眼で確認できた。これは、図 4.13、図 4.14 の 1,2,10,12 の位置での反射率が他の位置に比べて低い値を示していることに繋がっていると考えられる。



図 4.12: ID1318 の写真。写真の左側(写真の鏡の奥側、 AMC のカットオフサイド)で赤から青白く反 射しているのが確認できる。



図 4.13: ID1318 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)ま での 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.14: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID1318 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプロットした図。

以上の二つの測定によって、まず、分割鏡の鏡面全体には反射率のムラがあることが分かり、分割鏡 の位置と波長によって反射率は大きく変化することが分かった。長波長側では最大 10%を超える反射率 の差があり、反射率のムラが大きいことが分かった。また、短波長側では反射率のムラが小さいことが 分かった。加えて、分割鏡の反射率の場所依存性と肉眼で確認できる反射光の色には関係性があること が分かり、コーティングされた膜の厚さが原因と考えられる。よって、反射率のムラはスパッタリング のムラが原因であると推測される。

反射率のムラが、LST に搭載されている鏡と同時期に製造された鏡でも存在することが分かり、ミ ラーピースを分割鏡の反射率とみなして LST1 から 4 号基の反射率を見積もることは、現実的な望遠鏡 から大きく離れた反射率を見積もっている可能性が示唆された。そこで、分割鏡の場所依存性測定の追 加測定をミラーピースの反射率データがあり、かつ、LST に搭載されている鏡に近い(500 番台の製造 の古い鏡と 1100 から 1200 番台の比較的製造が新しい鏡)で行い、84 点の平均の反射率と対応するミ ラーピースの反射率を比較すること行った。これによって、より現実的な望遠鏡の反射率を見積もるこ とができると考える。

以下に、製造が古い鏡として測定した ID520 と ID558、ID560 の結果を示す。

• ID520の反射率測定結果



図 4.15: ID520 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)まで の 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.16: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID520 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプ ロットした図。

• ID558の反射率測定結果



図 4.17: ID558 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)まで の 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.18: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID558 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプ ロットした図。

• ID560の反射率測定結果



図 4.19: ID560 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)まで の 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.20: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID560 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプ ロットした図。

製造が古い鏡では、納入前の ID1308 と ID1318 の鏡の測定結果と比べると、結果は一転して、長波長 側での反射率のムラは小さく、ID558 と ID560 では短波長側での反射率のムラが大きくなっていること が分かった。また、次に述べる製造の新しい 1000 番台の結果と比べて、鏡面での反射率は短波長側では 低いが、長波長側では高いことが分かる。

続いて、製造が比較的新しい鏡として測定した ID1167 と ID1179、ID1247 の結果を示す。



• ID1167の反射率測定結果

図 4.21: ID1167 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)ま での 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.22: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID1167 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプ ロットした図。

図 4.23: ID1179 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)ま での 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。

• ID1179の反射率測定結果



図 4.24: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID1179 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプ ロットした図。



• ID1247 の反射率測定結果

図 4.25: ID1247 の 84 点の反射率を 360 nm から 590 nm までの波長帯で 85%(青)から 95%(赤)ま での 2 次元カラーマップで表した図。85%以下は白で表されている。



図 4.26: 図 4.7 で表した 13 点に対応する ID1247 の反射率を 360 nm から 740 nm まで 10 nm 間隔でプロットした図。

製造の新しい鏡の反射率の傾向は、おおむね ID1308 と ID1318 の鏡と一致し、反射率の一様性は短波 長側で高く、長波長側で低いことが分かる。そして、製造の古い鏡と比べると、反射率は短波長側で高 く、長波長側で低くなっている。一方で、ID1167 は反射率は全体で低く、製造が古い鏡に近い鏡もある ことが分かった。これは、製造が新しくなるごとに反射膜の膜厚を調整し、チェレンコフ光のスペクト ルのピークに合わせて反射率を上げていった結果が反映され、膜厚を変えた結果、分割鏡反射率の一様 性の影響も変化していったと考えられる。

結果として、現在 LST に搭載されている分割鏡は、製造時期によって程度の大小はあるが肉眼で確認 できる程のスパッタリングによる反射膜のコーティングのムラがあり、このコーティングのムラが原因 で反射率の場所依存性が生じていると考えられる。

それぞれの反射率の結果を見ると、製造が古い鏡では、短波長側での反射率は製造が新しい鏡に比べ て低めで、全体の反射率の一様性は短波長側で低く、長波長側で高い傾向であることが分かった。また、 製造の新しい鏡の ID1167 の反射率は、他 2 枚の ID1179 と ID1247 に比べて反射率は全体的に劣り、全 体の反射率の一様性は製造の古い鏡に近い傾向であることが分かった。しかし、1300 番台の 2 枚の新し い鏡の傾向を加味すれば、製造の新しい鏡では、短波長側での反射率は良くなるが、全体の反射率の一 様性は短波長側で高く、長波長側で低い傾向を持つと結論づけることができる。これは、次節の図 4.27 に示す、波長に対する 84 点の反射率の標準偏差を見ても傾向が理解できる。次節では、84 点の反射率 測定の結果から 84 点の平均の反射率を求め、それを分割鏡のより現実的な反射率とみなしミラーピース の反射率との比較を行った結果を示す。

4.4 分割鏡反射率の場所依存性とミラーピース反射率の関係

前節までで、LST に搭載した分割鏡には目視できるほどにスパッタリングによるコーティングのムラ があることが分かり、反射率の一様性は製造の古い鏡で高く、製造の新しい鏡で低い傾向があることが 分かった。本節では、ミラーピースの反射率と分割鏡の反射率を比較し、ミラーピースの現実の反射率 からのズレを定量的に調査した。

4.4.1 現実的な分割鏡反射率の定量的理解

分割鏡の現実的な反射率を定量的に理解するために、ミラーピースの反射率データがある ID520、 ID558、ID560、ID1167、ID1179、ID1247 の 6 枚の鏡について、前節で行った場所依存性測定の結果を 用いて 84 点の平均の反射率と標準偏差を計算した。結果を図 4.27 に示す。



図 4.27: 84 点の反射率の平均とその標準偏差 1σ をミラーピースデータがある 6 枚の鏡についてプロットした図(左図)。左図の右上に ID と色の対応を示す。右にはそれぞれの ID に対する標準偏差 1σ を同 じ色でプロットしたものを示す。

それぞれの鏡の反射率を同時にプロットしたことで、製造が新しい鏡の中で ID1179、1247 の分割鏡 は短波長側の反射率が他の鏡よりも高い値になっていることが分かる。これは、製造が進むにしたがっ て短波長側の反射率をあげるように反射膜の膜厚を変える操作を行った三光精衡所の開発の結果が反映 されていると考えられる。膜厚を変えたことで、長波長側の反射率は下がっている。さらにこのことは、 前節で示した分割鏡の反射率の非一様性が標準偏差をプロットしたことで定量的に理解できる。製造の 新しい分割鏡では反射率のばらつきがおよそ3から4%程あることが分かり、製造の古い鏡では短波長 側でばらつきが大きいことが分かる。ここで示した84点の平均の反射率が、現在示せる中で最も現実的 な分割鏡の反射率を表している。今回場所依存性を測定できた鏡は計8枚で、内ミラーピースの反射率 がある鏡は6枚である。次節では、この6枚の場所依存性の測定データを用いて、4.2節で求めたLST の反射率をできるだけ現実の望遠鏡の反射率になるように補正する方法を考える。以下では、この84点 の平均の反射率とミラーピースの反射率を製造時期に分けて比べ、ミラーピースの反射率の補正の方法 を考察した結果を述べる。

4.4.2 84 点の平均の反射率を用いたミラーピースの反射率の補正

4.2 では、ミラーピースが分割鏡の反射率を表しているものと考えて、搭載した分割鏡に対応するミ ラーピースの反射率から LST の平均的な反射率を求めた。しかし、実際に搭載されている鏡に近い分割 鏡の鏡面ではスパッタリング由来の反射率のムラが存在し、分割鏡の横に置いて同時にスパッタリングざ れ製造されたミラーピースの反射率が分割鏡の平均的な反射率を表すことができているかが問題となっ た。特に、製造が新しい鏡では長波長側で非一様性が大きくなっており、ミラーピースの反射率と鏡面の 平均の反射率と差が生まれてしまう可能性が考えられた。これを調査するため、製造の古い鏡(ID520、 558、560の鏡)と新しい鏡(ID1167、1179、1247)の84点の平均の反射率と対応するミラーピースの 反射率を同時にプロットし、製造に対する反射率の傾向を調査した。以下に結果を示す。



● 製造の古い鏡(ID520、558、560の鏡)

図 4.28: 製造の古い鏡(ID520、558、560 の鏡)の 84 点の平均の反射率と対応するミラーピースの反 射率を同時にプロットした図。1 nm 間隔でプロットされている実線がミラーピースの反射率で、10 nm 間隔で標準偏差のエラーバー付きでプロットされている点のプロットが 84 点の平均の反射率である。色 に対する鏡の ID は図中に示した。

製造の古い鏡のうち、ID558 では測定された全ての波長でミラーピースの反射率と 84 点の平均の 反射率がほぼ一致し、ID520 と ID560 では 450 nm 以降でミラーピースの反射率と 84 点の平均の反 射率がほぼ一致している。これは製造の古い鏡で反射率の一様性が高い影響であると考えられる。

• 製造の新しい鏡(ID1167、1179、1247の鏡)



図 4.29: 製造の新しい鏡(ID1167、1179、1247 の鏡)の 84 点の平均の反射率と対応するミラーピース の反射率を同時にプロットした図。1 nm 間隔でプロットされている実線がミラーピースの反射率で、10 nm 間隔で標準偏差のエラーバー付きでプロットされている点のプロットが 84 点の平均の反射率である。 色に対する鏡の ID は図中に示した。

製造の新しい鏡では、一様性が比較的高かった ID1167 の鏡を含めてどの ID の鏡でもミラーピー スの反射率と 84 点の平均の反射率で差が生まれており、およそ 400 nm まではミラーピースの反 射率と 84 点の平均の反射率の差は小さいが、400 nm 以降では差が大きくなっているのが分かる。

これらの結果からミラーピースの反射率と分割鏡の鏡面の平均の反射率は差があることが分かり、この 差を定量的に調べた。製造の古い鏡(ID520、558、560の鏡)と製造の新しい鏡(ID1167、1179、1247 の鏡)でミラーピースの反射率から 84 点の平均の反射率を引いた値を 360 nm から 740 nm で 10 nm 間 隔でプロットした図を下に示す。また、これまでの結果から製造の古い鏡と製造の新しい鏡では反射率 の傾向が異なることが分かっており、製造時期での傾向を理解するために、ミラーピースの反射率と分 割鏡の 84 点の平均の反射率の差を製造の古い鏡と製造の新しい鏡ごとに 3 枚での平均を求めたものを並 べて示す(図 4.30)。



図 4.30: 左図:ミラーピースの反射率から 84 点の平均の反射率を引いた値を 360 nm から 740 nm で 10 nm 間隔でプロットした図。色に対する鏡の ID は図中に示した。右図:左図の製造の古い鏡(ID520、558、560 の鏡)と製造の新しい鏡(ID1167、1179、1247 の鏡)で平均を求め、360 nm から 740 nm で 10 nm 間隔でプロットした図。

この結果より、製造の古い鏡(ID520、558、560の鏡)では、ミラーピースの反射率と分割鏡の84点 の平均の反射率で差が生じているのは短波長側でその差は1%程度であるが、製造の新しい鏡(ID1167、 1179、1247の鏡)では、400 nm より長波長側でミラーピースの反射率と分割鏡の84 点の平均の反射 率の差が生じており、その差はおよそ4%である。この結果を受けて、ミラーピースの反射率データが ある鏡の場所依存性測定は製造の新しい鏡で3枚しか行うことができなかったが、十分に製造の古い鏡 とは異なる傾向を持つ反射率であることが分かり、製造が新しい鏡に対してミラーピースの反射率を下 げる方向で4.2 節で求めた LST1から4号基の平均の反射率の補正を行うことは妥当であると結論づけ た。この4%のズレは、図4.27の左図で示した新しい鏡の反射率のばらつきとおおよそ一致しており、 ミラーピースの反射率と分割鏡の84 点の反射率のズレは分割鏡の反射率の非一様性の影響と推定でき る。一方で、製造が古い鏡では、一様性が高かったこと、ミラーピースの反射率と分割鏡の84 点の反射 率の差は1%と小さいことを考慮して、今回の結果のみで反射率の補正を行うべきではないと決定した。 次節では、反射率の傾向を掴めた鏡は3枚しかない中で、どのIDの鏡から製造の新しい鏡の傾向であ る 4.30の右図の赤点で示した反射率を引くという補正を行うかを決定し、4.2 節で求めた LST1から4 号基の平均の反射率に対して補正を行った結果を述べる。

4.5 LST1から4号基のより現実的な望遠鏡反射率の見積もり

4.5.1 ミラーピースによる鏡の反射率の傾向の変化の把握

前節より、製造の新しい鏡にはミラーピースの反射率と分割鏡の84点の平均の反射率でおよそ4%の 反射率の差があり、LST1から4号基に搭載した製造の新しい鏡を対象に反射率の補正を行い平均の反 射率を求めることに決定した。しかし、分割鏡は三光製衡所との共同開発で製造されており、企業秘密 な部分、職人技な部分が多く、反射膜のスパッタリング方法がどの鏡からどのように変わっているかを 知ることは難しく、どのIDから製造の新しい鏡と決定するかの明確な基準はない。そこで、分割鏡の反 射率の変遷を推定できる 991 枚のミラーピースの反射率を用いて反射率の傾向の変化を捉えられないか を検討した。製造の ID の古い順に 200 枚ごとの平均の反射率を計算し、図 4.31 に示した。



図 4.31: 製造された 991 枚の分割鏡について、ID が古い順に 200 枚の平均を計算したミラーピースの反 射率。全枚数は 991 枚であるため最後は 191 枚の平均の反射率をとっている。また、全てのミラーピー スで反射率データがある波長帯はは 250 nm から 650 nm の波長なのでその範囲で計算し、プロットし た。オレンジ:ID117 から ID471 の 200 枚の平均。赤:ID472 から 701 の 200 枚の平均。茶:ID702 から 907 の 200 枚の平均。青:ID908 から 1112 の 200 枚の平均。紫:ID1113 から 1317 の 191 枚の平均

この反射率のプロットを見ると、製造が古いオレンジと赤で示したおよそ ID700 番までの鏡では反射 率が低い傾向が見て取れる。これは、4.2 節の図 4.1 で示した鏡のうち、緑で示した分布が多く該当し、 製造の古い段階のものと推測できる。ID が 700 番以前と ID が 700 番以降での平均の反射率は解離して いて、これが製造の古い鏡と新しい鏡で分ける一つの基準であると考える。同じく、4.2 節の図 4.1 で、 700 番以降の鏡では紫の分布と青の分布の大部分が該当し、反射率の測定データの種類が変わった時期 と製造の傾向が変わったのではないかという推測も矛盾のないものである。よって、ID が 700 番以降の 鏡に対してミラーピースの反射率の補正を行うことに決定した。

4.5.2 LST1から4号基のより現実的な望遠鏡の反射率の決定

ID が 700 番以降の鏡を製造の新しい鏡として、4.2 節で決定した図 4.4 で表される LST1 から 4 号基 の平均の反射率に対して補正を行う。ID が 700 番以上の鏡が LST1 から 4 号基で何枚搭載されているか を下の表 4.5 に示す。

表 4.5: LST1 から 4 号基に搭載した ID が 700 番以降の分割鏡の枚数

	LST1	LST2	LST3	LST4
ID700 番以降の鏡	148枚	108枚	118枚	117枚

この表より、LST2 から4号基で搭載している 700 番以降の鏡の枚数は110 枚程で、それぞれのLST での枚数のばらつきも10 枚程度であり、LST2 から4号基ではほぼ同等の反射率が期待される。しかし、 LST 初号基では148 枚の鏡が該当し、LST2 から4号基より30 枚以上多いことが分かった。LST 初号基 ではID が 700 から 1000 の鏡が多く、かつ、ID が 1300 台の最新の反射率の良い鏡を使用していないこ とが原因で、この補正の効果が入ることによって他のLST より反射率が多少下がることが見込まれる。 具体的な反射率の補正を行うための方法と結果を以下に示す。

① 4.4 節の図 4.30 の右図で示した、製造が新しい分割鏡のミラーピースと分割鏡での反射率の差についてスプライン補間によって1 nm ごとの補正のための反射率を出した(図 4.32)。これは、分割鏡反射率の場所依存性測定の実験は10 nm ごとの波長間隔で行われたが、ミラーピースによって求めた LST1から 4 号基の反射率は1 nm ごとにデータがあり、10 nm の間の反射率を得るために行った。



図 4.32: 図 4.30 においてスプライン補間を用いて、1nm ごとの反射率を青線で求めた。

 ② 4.2 節で決定した LST1 から 4 号基の 198 枚の平均の反射率から、図 4.32 で示した 360 nm から 740 nm での 1nm ごとの反射率に各 LST で重みをかけて反射率を差し引く。重みは 198 枚のうちの表 4.5 で示した鏡の割合である。以下の図 4.33 に反射率の補正方法を示す。



図 4.33: 反射率補正の模式図。左図:図 4.4 で示した、ピースによって求めた 250 nm から 850 nm まで の LST1 から 4 号基の平均の反射率。中図:4.32 で示した、 ID700 番以降の分割鏡に対して補正を行う 1nm ごとの値。右表:各 LST に搭載している ID700 番以降の分割鏡の枚数。1nm ごとの補正する反射率 に ID が 700 以降の該当する鏡の重みをかけ、その後ミラーピースによって求めた LST1 から 4 号基の平 均の反射率から引く操作を行う。

③ 上図の方法で反射率補正を行った後の LST1 から 4 号基の 1 台ごとの平均の反射率を下の図 4.34 に示す。



図 4.34: ミラーピースの補正を行った後の LST1 から 4 号基の平均の反射率。標準偏差は LST1 から 4 号基に用いた全ての鏡で計算し、250 nm から 650 nm の範囲では 792 枚の標準偏差、650 nm 以降では 142 枚(LST1 から 4 号基に搭載する 792 枚の分割鏡の中で 650 nm 以降の反射率データがある鏡の枚数 は 142 枚である。表 4.2 参照。)の標準偏差を灰色で表している。CTA の要求仕様である「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」を黒の点線で示し、全ての LST で満たしている ことが分かる。黒:LST 初号基の平均の反射率。赤:LST2 号基の平均の反射率。青:LST3 号基の平均の反 射率。緑:LST4 号基の平均の反射率。

場所依存性の実験で測定器の性能によって 250 nm から 740nm までしか測定できなかったことで反射 率の補正を行なえなかった 740 nm 以降で反射率が飛んでしまっている。このままでは現実的な望遠鏡 の反射率とは言えない。740 nm 以降もスムーズに反射率はつながっているという仮定の元で、740 nm の接続を行い。最終のモンテカルロに提出する LST1 から 4 号基のより現実的な平均の反射率を図 4.35 に示す。



図 4.35: ミラーピースの補正を行った後の LST1 から 4 号基の平均の反射率。標準偏差は LST1 から 4 号基に用いた全ての鏡で計算し、250 nm から 650 nm の範囲では 792 枚の標準偏差、650 nm 以降では 142 枚(LST1 から 4 号基に搭載する 792 枚の分割鏡の中で 650 nm 以降の反射率データがある鏡の枚数 は 142 枚である。表 4.2 参照。)の標準偏差を灰色で表している。CTA の要求仕様である「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」を黒の点線で示し、全ての LST で満たしている ことが分かる。黒:LST 初号基の平均の反射率。赤:LST2 号基の平均の反射率。青:LST3 号基の平均の反 射率。緑:LST4 号基の平均の反射率。

結果として、3 枚の場所依存性の測定データしかない、かつ、詳細な鏡の時期による製造過程の変化 やスパッタリングの方法の変化などが分からない中で、ミラーピースの反射率データを整理し傾向を見 ることで、LST1 から4号基のより現実的な平均の反射率を見積もることができた。また、場所依存性 の効果による補正を行い、反射率を下げたLST1 から4号基の平均の反射率でもCTA要求仕様である 「300 nm から550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が85%以上」を満たすことが確認できた。

第5章 反射率を考慮したさらなるLST光学性能の 検証

5.1 目的

3章では LST1 から 4 号基に搭載する分割鏡を放物面での曲率半径の分布を満たすように選定し、分 割鏡を望遠鏡に配置した時の集光性能を ROBAST による光線追跡シミュレーションによって検証し、 CTA の要求仕様を満たすことを示した。しかし、3章3.4のシミュレーションのセットアップで述べた ように、現在のシミュレーションでは分割鏡の反射率を考慮して望遠鏡のスポットサイズを見積もるこ とはしていない。4章では分割鏡1枚1枚の反射率データを整理し、1枚1枚の分割鏡に対して反射率を 組み込みシミュレーションすることが可能となった。LST は口径 23 m 焦点距離 28 m の巨大な構造体で あるため、1 枚の鏡のスポットの形や光量の分布は分割鏡設置位置の放物面の光軸からの距離によるコ マ収差の効果を大きく受けると考えられる。1枚の鏡のスポットが重なり合い1つの望遠鏡のスポット を形作っている LST において、収差の効果が大きく生じる分割鏡の設置位置には、反射率が比較的低い 分割鏡を配置することで、収差による光量の広がりが抑えられスポットサイズを多少小さくできると考 える。スポットサイズが小さくなることによって、カメラ 1pixel の外に入射する光子が減れば、イメー ジング法でガンマ線とハドロンの判別を行うときの精度の向上に繋がるため、この分割鏡の設置位置に 対する反射率の効果を検証することは重要となる。つまり、分割鏡の最適な配置方法は分割鏡の設置位 置に対する曲率半径の効果と反射率の効果の相対的な影響で決まるとも言える。一方で、4 章で示した ように望遠鏡に搭載する1枚1枚の反射率データはミラーピースによって測定されているが、波長依存 性があるため、設置位置に対して適した反射率の傾向が理解できたとしても配置方法最適化の検討を行 うのは簡単な作業ではない。そこで、搭載した分割鏡の反射率を1枚1枚の測定データに変えたような 現実の望遠鏡に近い状態を考える前の第一段階として、望遠鏡の内側に配置されている分割鏡と外側に 配置されている分割鏡の2つに分け、それぞれに異なる反射率を与えた時の焦点面でのスポットサイズ と光量の分布の変化を見た。

5.2 反射率を搭載した LST での ROBAST による望遠鏡シミュレーション

セットアップ

以下にシミュレーションのセットアップを記す。反射率による影響を見るため、3章のシミュレーショ ンセットアップからの変更点は反射率のみにした。

分割鏡の反射率
 鏡の反射率を2パターン用意し、それぞれでのパターンでのスポットサイズの違いを検証した。

パターン1

全ての曲率半径で100%の反射率を代入する。

パターン2

口径 23 m の望遠鏡の面積が半分になる半径(8.1317 m)で内側と外側に分け、内側で 100%、外 側で 75%の反射率を代入した。光軸から大きく離れた角度で並行光線が入射した時には、外側に 設置された鏡の収差がスポットサイズに大きく影響すると考えられる。外側で反射率が悪い鏡を 置いた時には収差の影響が小さくなることが予想され、これによってスポットサイズが小さくな る可能性がある。図 5.1 にパターン2のシミュレーションの模式図を示す。



図 5.1: シミュレーションの反射率のセットアップの模式図。

- ・ 光学系のセットアップ 分割鏡の曲率半径は3章で決定したLST2号基のものを使用した。他は、3章で用いた光学系と同じものを用いた。
- ・ 照射する光線のセットアップ
 光線は平行光を望遠鏡全面に満遍なく照射する。半径 15 mの円の中のランダムな位置から 50 万本の光線を照射した。光軸からの Off-Axis Angle を望遠鏡 X 軸方向に 0° から 2.5° まで 0.5° 刻みで変えて光線を照射し、スポットサイズの変化を調べた。
- 分割鏡の結像性能 分割鏡のスポットサイズはLST2号基に搭載する分割鏡のスポットサイズをそれぞれの分割鏡に ついて代入した。スポットサイズによるシミュレーションの振る舞いは3章で述べている。

上記のように面積が半分になる半径で内側と外側に分けてシミュレーションを行った。図 5.2 に Off-Axis Angle が 2.5°の時の内側(半径 8.13 m 以内)の鏡に当たった光線を抜き出して表示したものを示す。



図 5.2: Off-Axis Angle が 2.5°の時の内側(半径 8.13 m 以内)の鏡に当たった光線を抜き出して表示した図。

5.3 結果と考察

5.3.1 結果

以下の表 5.1 に、Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで変化させた時の 2 つの反射率のパターンでの焦点 面でのスポットサイズの大きさの変化を示す。また、図 5.3 と図 5.4 に、Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで変化させた時の 2 つの反射率のパターンでの焦点面でのスポットのイメージを示す。

表 5.1: Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで変化させた時のスポットサイズの大きさ [mm] の変化

入射角 シミュレーションのパターン	0°	0.5°	1.0°	1.5°	2.0°	2.5°
全面で反射率 100%	23.11	30.00	45.40	63.72	82.36	101.93
内側 100%、外側 75%	22.16	28.83	43.68	60.70	78.37	96.83



図 5.3: 光軸からの Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで 0.5° 刻みで変化させた時の光線追跡シミュレー ションによる望遠鏡のスポットのイメージ図(主鏡全面で反射率 100%を与えた時のシミュレーション)



図 5.4: 光軸からの Off-Axis Angle を 0° から 2.5° まで 0.5° 刻みで変化させた時の光線追跡シミュレー ションによる望遠鏡のスポットのイメージ図(主鏡の内側に配置した鏡で 100%、外側に配置した鏡で 75%の反射率を与えた時のシミュレーション)

表 5.1 より、全面で 100%の反射率を与えた時のスポットサイズの大きさよりも外側で反射率を低くした時のスポットサイズの方が小さくなっていることが分かる。この影響をより詳しく調査するために、スクリーンに当たった光線をスクリーンの x 軸に射映し、望遠鏡の内側の鏡に当たった光線の光量の分布と望遠鏡の外側に当たった光線の光量の分布を同時にプロットした。今回は収差の効果が分かりやすくなるように、入射角が 2.5° の時の分布を図 5.5 に示す。


図 5.5: 入射角が2.5°の時のスポットをスクリーンのx軸に射映した時の光量の分布。左図が全面で100% の反射率を与えた時、右図が内側が100%、外側を75%の反射率を与えた時の分布である。 黒太線:スクリーンで受けた光線の全光量の分布 青細線:内側の鏡で反射された光線の光量の分布 赤細線:外側の鏡で反射された光線の光量の分布

5.3.2 考察と展望

図 5.5 より、外側の反射率を下げた時には、コマ収差による広がりを持つはずだった光子の分布が少なくなる(赤の細線の分布が少なくなる)ためスポットサイズが小さくなったと言える。これによって、 鏡の搭載位置での理想的な曲率半径と分割鏡の曲率半径からのズレによるスポットサイズの広がりと搭 載する分割鏡の反射率によるスポットサイズの広がりの影響を考慮することで、LST の分割鏡配置のさ らなる最適化の検討ができる可能性がある結果と言える。

第6章 まとめ

本研究では、LST2 から 4 号基に搭載する 594 枚の分割鏡を決定した。そして、LST2 から 4 号基全 てで LST 初号基に劣らない集光性能を持ち、かつ CTA の要求仕様である「Off-Axis Angle(光軸に対 する光線の入射角度)が 1.2° でスポットサイズ(D80)が 0.11° 以下」を満たすことを示した。さらに、 決定した LST2 から 4 号基の分割鏡と LST 初号基の分割鏡の反射率データを用いて、LST1 から 4 号基 のそれぞれの望遠鏡の平均の反射率を求めた。LST1 から 4 号基全てで、CTA の要求仕様である「300 nm から 550 nm の波長帯で望遠鏡の平均の反射率が 85% 以上」を満たすことが確認できた。最後に、 LST1 から 4 号基の反射率を決定したことを活かして、LST の反射率を光線追跡シミュレーションに組 み入れたときに焦点面でのスポットの光量やその分布がどのように変化するかの調査を行った。現在は、 その第一歩として、望遠鏡に搭載した分割鏡に対して望遠鏡の内側にある鏡には 100%、外側にある鏡 には 75%と極端に変えた時のスポットサイズ(D80)の大きさを全ての鏡で 100%とした時のスポット サイズと比較した。結果として、外側の鏡の反射率を低くしたことによって、スポットのコマ収差の成 分を持つ光子が減少し、反射率を全ての鏡で 100%とした時よりもスポットサイズが小さくなることが 分かった。

AppendixA LST2から4号基の建設

3章で Rack のランダムな分配による選定方法によって決定した LST2 から 4 号基に搭載する分割鏡 は、3.3.3節で示したように、不足している曲率半径の分布を満たすために LST2 から 4 号基の Rack 間 での何枚かの分割鏡の入れ替え作業が必要である。LST2 から 4 号基の建設前であるため、この Rack 間 での分割鏡の入れ替え作業は 2021 年 3 月 25 日現在未だ行われていない。建設前の分割鏡の入れ替えを スムーズに行うためにもその作業を明記する。

本章では、LST2から4号基を建設するために Rack 間での入れ替えが必要な鏡について、Rack 間で の鏡の入れ替え作業について述べる。そして、Rack 間での入れ替えが終わった後で、LST2から4号基 に搭載する Rack のナンバーとその Rack に収納されている分割鏡の ID を一覧表で示し、搭載する分割 鏡の望遠鏡での配置を図で示す。加えて、分割鏡を LST2から4号基に搭載した後に、La Palma に残る 147枚の分割鏡と日本の東京大学宇宙線研究所に残る 60枚の分割鏡の曲率半径の分布を示す。これは、 CTA の南サイトでの LST の建設時に、搭載する鏡を選定する場合に参考になると考える。

LST2から4号基の建設にむけた分割鏡のRack間での入れ替え作業について

不足している分割鏡の曲率半径の分布を満たすため、かつ建設をスムーズに進めるために、Rack 間 での鏡の入れ替えが建設開始前に必要である。Rack 間での鏡の入れ替えは計 6 枚の分割鏡で必要であ る。以下の表 6.1、表 6.2、表 6.3 で、各 LST ごとに分割鏡の入れ替えが必要な鏡の ID とその分割鏡が 収納されている Rack 番号を示し、LST2 から 4 号基の建設に使用しない入れ替えを行う分割鏡の ID と その分割鏡が収納されている Rack 番号を示す。どの Rack の分割鏡と入れ替えるかは、1 つの Rack に 収まっている 5 枚の分割鏡の曲率半径が①56.8 m 以下、②56.8 m 以上 57.6m 以下、③57.6 m 以上の 3 つの範囲のいずれかを満たすように収納されていることを考えて、入れ替え後でも Rack に収まってい る曲率半径が上記の範囲を満たすようにした。

表 6.1: LST2 号基に搭載する Rack の入れ替えが必要な分割鏡(左)と入れ替えを行う LST2 から 4 号 基に搭載する予定のない分割鏡(右)を表した表。Slot は入れ替え前に鏡が収まっている位置を表して いる。

LST2 号基	表に搭載	載する分割鏡		LST2-4 号基に搭載しない分割鏡				
RackNo	Slot	MirrorID		RackNo	RackNo Slot M			
10	с	447	\leftrightarrow	198	с	1169		

表 6.2: LST3 号基に搭載する Rack の入れ替えが必要な分割鏡(左)と入れ替えを行う LST2 から 4 号 基に搭載する予定のない分割鏡(右)を表した表。Slot は入れ替え前に鏡が収まっている位置を表して いる。

LST3 号基	まに搭載	載する分割鏡		LST2-4 7	搭載しない分割鏡			
RackNo	Slot	MirrorID		RackNo	ackNo Slot Mirror			
48	a	571	\leftrightarrow	28	a	494		
48	с	574	\leftrightarrow	28	b	501		

表 6.3: LST4 号基に搭載する Rack の入れ替えが必要な分割鏡(左)と LST2 から 4 号基に搭載する予定のない分割鏡(右)を表した表。Slot は入れ替え前に鏡が収まっている位置を表している。

LST4 号基	まに搭載	載する分割鏡		LST2-4 7	LST2-4 号基に搭載しない分					
RackNo	Slot	MirrorID		RackNo	Slot	MirrorID				
148	b	894	\leftrightarrow	150	с	932				
148	d	900	\leftrightarrow	150	d	934				
206	е	1219	\leftrightarrow	181	е	1086				

以降では、Rack 間での分割鏡の入れ替えが終了した時を過程し、LST2-4 号基に搭載する分割鏡のリストを示す。

搭載する鏡の ID と収納されている Rack 番号、分割鏡の配置位置について

LST2 号基に搭載する分割鏡

表 6.4: LST2 号基に搭載する分割鏡の ID と分割鏡が収納されている Rack 番号の表①

No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorD	No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID
1	1	155	26	18	413	51	48	562	76	85	178
2	1	381	27	18	422	52	48	565	77	85	180
3	1	250	28	19	445	53	48	568	78	85	171
4	1	254	29	19	465	54	49	577	79	85	183
5	2	248	30	19	440	55	49	584	80	92	1233
6	2	252	31	19	470	56	49	604	81	92	1246
7	2	256	32	19	500	57	49	664	82	92	1251
8	2	258	33	25	226	58	52	625	83	92	1271
9	9	420	34	25	234	59	52	627	84	92	1273
10	9	513	35	25	237	60	52	629	85	94	1245
11	9	429	36	25	238	61	52	626	86	94	1254
12	9	432	37	26	598	62	55	607	87	94	1252
13	9	442	38	26	599	63	55	685	88	94	1270
14	11	458	39	26	446	64	55	694	89	94	1248
15	11	452	40	26	259	65	55	706	90	102	680
16	11	448	41	29	407	66	55	715	91	102	691
17	11	457	42	29	451	67	73	174	92	102	681
18	11	453	43	36	146	68	73	187	93	102	682
19	12	480	44	36	523	69	73	185	94	104	729
20	12	397	45	36	538	70	73	123	95	104	725
21	12	463	46	36	534	71	73	149	96	104	728
22	12	472	47	44	243	72	80	117	97	104	724
23	12	476	48	44	244	73	80	170	98	104	723
24	18	394	49	44	642	74	80	245	99	107	678
25	18	163	50	44	554	75	85	193	100	107	686

表 6.5: LST2 号基に搭載する分割鏡の ID と分割鏡が収納されている Rack 番号の表②

No	RackNo	MirrorID									
101	107	687	126	121	744	151	146	883	176	192	1164
102	111	679	127	121	742	152	146	862	177	192	1170
103	111	688	128	121	743	153	146	886	178	192	1151
104	111	697	129	124	753	154	146	892	179	192	1157
105	111	696	130	124	754	155	146	891	180	194	1160
106	111	690	131	124	757	156	158	911	181	194	1166
107	117	761	132	134	843	157	158	916	182	194	1187
108	117	764	133	134	848	158	158	918	183	194	1178
109	117	771	134	134	845	159	158	921	184	194	1181
110	117	776	135	134	844	160	158	923	185	195	1165
111	117	769	136	134	849	161	164	1011	186	195	1171
112	118	777	137	135	847	162	164	1009	187	196	1174
113	118	781	138	135	850	163	164	1013	188	196	1177
114	118	784	139	135	855	164	164	1017	189	196	1198
115	119	803	140	135	853	165	164	1015	190	198	1190
116	119	806	141	135	852	166	170	1034	191	198	1176
117	119	805	142	140	814	167	170	1047	192	198	447
118	119	810	143	140	815	168	170	1038	193	200	1184
119	119	809	144	140	818	169	170	1040	194	200	1196
120	120	768	145	140	816	170	187	1139	195	206	1212
121	120	774	146	140	822	171	187	1142	196	206	1228
122	120	772	147	141	819	172	187	1146	197	206	1226
123	120	775	148	141	817	173	187	1149	198	206	1232
124	121	741	149	141	825	174	187	1148			
125	121	739	150	141	824	175	192	1163			

LST2_Mirror_ID



図 6.1: LST2 に搭載する分割鏡を望遠鏡の中心から曲率半径の小さい順に配置した場合の分割鏡の ID と配置場所の対応を表した図。

LST3 号基に搭載する分割鏡

No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID
1	0	1208	26	24	490	51	38	570	76	63	144
2	0	1205	27	24	495	52	38	573	77	79	142
3	0	1202	28	27	456	53	40	517	78	86	246
4	0	1199	29	27	466	54	40	491	79	86	239
5	3	382	30	28	571	55	40	524	80	86	225
6	3	388	31	28	574	56	40	529	81	86	242
7	3	391	32	28	507	57	42	547	82	106	700
8	6	384	33	28	416	58	42	553	83	106	698
9	6	408	34	33	557	59	42	559	84	106	703
10	8	473	35	33	539	60	42	550	85	106	705
11	8	424	36	33	548	61	53	658	86	106	711
12	8	427	37	33	551	62	53	652	87	110	674
13	8	421	38	33	549	63	53	650	88	110	670
14	8	483	39	34	121	64	53	656	89	110	672
15	10	433	40	34	575	65	53	663	90	110	673
16	13	423	41	34	569	66	54	653	91	122	804
17	13	488	42	34	576	67	54	661	92	122	807
18	22	439	43	34	552	68	54	657	93	122	802
19	22	474	44	35	566	69	54	660	94	122	808
20	22	419	45	35	572	70	54	659	95	122	811
21	22	478	46	35	600	71	56	1016	96	123	786
22	22	434	47	35	563	72	56	1023	97	123	790
23	24	516	48	35	601	73	63	119	98	123	778
24	24	499	49	38	555	74	63	127	99	123	782
25	24	506	50	38	561	75	63	122	100	123	800

表 6.6: LST3 号基に搭載する分割鏡の ID と分割鏡が収納されている Rack 番号の表①

表 6.7: LST3 号基に搭載する分割鏡の ID と分割鏡が収納されている Rack 番号の表②

No	RackNo	MirrorID									
101	125	760	126	149	917	151	171	1072	176	203	1274
102	125	759	127	149	920	152	175	1022	177	203	1239
103	125	763	128	149	924	153	175	1031	178	203	1241
104	125	756	129	152	946	154	175	1037	179	204	1210
105	125	765	130	152	949	155	175	1043	180	204	1209
106	129	854	131	152	956	156	175	1042	181	204	1215
107	129	851	132	152	963	157	184	1113	182	204	1224
108	129	860	133	152	959	158	184	1116	183	204	1221
109	129	858	134	154	960	159	184	1118	184	205	1217
110	129	856	135	154	967	160	184	1122	185	205	1276
111	133	779	136	154	964	161	188	1135	186	205	1235
112	133	798	137	154	969	162	188	1132	187	205	1307
113	133	795	138	157	937	163	188	1112	188	205	1240
114	133	812	139	157	945	164	188	1140	189	209	1272
115	133	875	140	157	939	165	189	1129	190	209	1278
116	138	879	141	157	935	166	189	1138	191	209	1284
117	138	827	142	163	985	167	189	1141	192	209	1257
118	138	832	143	163	984	168	189	1144	193	209	1243
119	138	829	144	163	987	169	189	1147	194	213	1293
120	138	836	145	163	988	170	190	1158	195	213	1297
121	148	896	146	163	991	171	190	1154	196	213	1309
122	148	898	147	171	1054	172	190	1152	197	213	1304
123	148	901	148	171	1060	173	190	1161	198	213	1303
124	149	913	149	171	1063	174	203	1229			
125	149	919	150	171	1066	175	203	1231			

LST3_Mirror_ID



図 6.2: LST3 に搭載する分割鏡を望遠鏡の中心から曲率半径の小さい順に配置した場合の分割鏡の ID と配置場所の対応を表した図。

LST4 号基に搭載する分割鏡

No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID	No	RackNo	MirrorID
1	4	390	26	30	486	51	51	610	76	103	675
2	4	497	27	30	489	52	51	619	77	103	684
3	4	393	28	32	542	53	51	620	78	103	677
4	4	396	29	32	536	54	51	617	79	108	695
5	4	467	30	32	533	55	51	618	80	108	692
6	5	380	31	32	528	56	71	120	81	108	702
7	5	405	32	32	545	57	71	236	82	108	701
8	5	508	33	39	605	58	71	167	83	108	699
9	5	426	34	39	609	59	71	253	84	109	726
10	5	402	35	39	611	60	71	251	85	109	727
11	14	409	36	39	621	61	82	136	86	109	731
12	15	406	37	39	623	62	82	189	87	109	736
13	15	505	38	41	526	63	88	129	88	109	737
14	15	509	39	41	521	64	88	157	89	112	718
15	15	400	40	41	519	65	88	153	90	112	712
16	15	514	41	41	541	66	88	181	91	112	713
17	17	165	42	43	567	67	88	138	92	112	714
18	17	166	43	43	589	68	90	229	93	112	719
19	17	156	44	43	585	69	90	235	94	113	758
20	17	255	45	43	590	70	90	131	95	113	747
21	21	485	46	47	655	71	90	177	96	113	746
22	21	450	47	47	644	72	101	668	97	113	762
23	21	385	48	47	654	73	101	665	98	113	766
24	21	460	49	47	662	74	103	676	99	115	745
25	21	455	50	47	615	75	103	671	100	115	748

表 6.8: LST4 号基に搭載する分割鏡の ID と分割鏡が収納されている Rack 番号の表①

表 6.9: LST4 号基に搭載する分割鏡の ID と分割鏡が収納されている Rack 番号の表②

No	RackNo	MirrorID									
101	115	732	126	144	910	151	172	1071	176	186	1117
102	115	749	127	144	915	152	172	1074	177	186	1120
103	115	750	128	145	887	153	172	1077	178	186	1123
104	127	787	129	145	902	154	176	1052	179	186	1126
105	127	788	130	145	909	155	176	1056	180	193	1159
106	127	789	131	145	907	156	176	1058	181	193	1150
107	127	792	132	145	914	157	177	1073	182	199	1193
108	127	796	133	150	922	158	177	1085	183	199	1175
109	130	857	134	150	927	159	177	1109	184	201	1216
110	130	863	135	150	894	160	177	1134	185	201	1220
111	130	866	136	150	900	161	177	1115	186	201	1214
112	130	869	137	150	929	162	179	1108	187	201	1222
113	130	872	138	151	941	163	179	1095	188	201	1225
114	137	831	139	151	942	164	179	1090	189	211	1287
115	137	837	140	151	943	165	179	1087	190	211	1288
116	137	841	141	151	953	166	181	1070	191	211	1290
117	137	846	142	151	947	167	181	1079	192	211	1313
118	139	830	143	159	1007	168	181	1080	193	211	1294
119	139	833	144	159	1012	169	181	1082	194	212	1289
120	139	880	145	159	1014	170	181	1219	195	212	1292
121	139	884	146	161	1000	171	185	1121	196	212	1296
122	139	881	147	161	1006	172	185	1130	197	212	1268
123	144	904	148	161	1003	173	185	1136	198	212	1301
124	144	906	149	172	1065	174	185	1143			
125	144	908	150	172	1068	175	185	1145			

LST4_Mirror_ID



図 6.3: LST4 に搭載する分割鏡を望遠鏡の中心から曲率半径の小さい順に配置した場合の分割鏡の ID と配置場所の対応を表した図。

LST2から4号基建設後に残る分割鏡について

製造された分割鏡は LST1 号基の搭載時に破損したものを抜いて 999 枚ある。この 999 枚の詳細は表 3.2 で示した。LST1 基には 198 枚搭載することから、LST1 から 4 号基の建設後には 999 枚から 792 枚 (198 枚×4 基分)を引いた 207 枚の分割鏡が残ることになる。2021 年 3 月 25 日現在、207 枚の分割鏡の うち 60 枚の鏡は La Palma に輸送前で日本の東京大学宇宙線研究所で保管され、147 枚は La Palma で 保管されている。この 207 枚の鏡は、CTA の南サイトの LST 建設時の分割鏡の選定に使うことができ る。しかし、この 207 枚の鏡の中には、LST2 から 4 号基の鏡の選定条件である、「曲率半径が 56 m か ら 58 m の間の鏡ではスポットサイズ(D80)が 33.4 mm 以下、56 m より小さい鏡と 58.4 m より大き い鏡はスポットサイズが 30 mm 以下」を満たさない比較的 PSF の悪い分割鏡が入っていることに注意 してもらいたい。この LST2 から 4 号基建設後に残る 207 枚の分割鏡の曲率半径の分布を図??に示す。



図 6.4: 左図:東京大学宇宙線研究所で保管されている 60 枚の分割鏡の曲率半径の分布図。

中図:La Palma で保管されている 147枚の分割鏡の曲率半径の分布図。

右図:LST2 から4号基建設後に東京大学宇宙線研究所とLa Palma に保管されている分割鏡 207 枚の曲 率半径の分布図。

謝辞

本修士論文は様々な方々の支えによって執筆することができました。まず始めに、指導教員である吉 田龍生教授には大変お世話になりました。ゼミや学会の前には夜遅くまで一緒に議論をしていただいた り、新型コロナウイルスの影響で学校にいけない状況でもリモートでミーティングを開催していただい たり、沢山のサポートをしていただきました。こんなに生徒の面倒をみてくださる先生は他にはいない と思っています。また、基礎に立ち返ることの大事さ、研究の流れを常に意識することの重要さなど研 究に対する姿勢・向き合い方を教えていただきました。心から感謝申し上げます。並びに、副指導教員 である片桐秀明准教授にはゼミやミーティングで鋭い見識からいろいろなアドバイスやコメントをいた だき、自分の研究に足りないものは何かを考える手がかりになりました。柳田昭平名誉教授には主にゼ ミでご指導賜り、自分の理解が足りていないことを見透かされているかのような鋭い指摘を受け、物事 を深く考えるきっかけをいただきました。深謝申し上げます。

CTA のミラーグループの皆様には、研究を進める上で多くのサポートをしていただきました。東京大 学宇宙線研究所の野田浩司准教授には研究の方向性を示していただきました。壁にぶつかった時には、 野田さんがおっしゃていたことを思い返すことで、何を進めるべきか考える助けになっていました。野 田さんの頭の回転の早さに、なんとか必死で食らいついて行こうとしたことはミラーミーティングでの 僕の目標でもありました。ありがとうございました。東京大学特任研究員である稲田知大さんには学部4 年生の頃からお世話になりました。LST2-4 号基の鏡の配置方法の検討から ROBAST の扱い方、ミラー の場所依存性反射率の測定の補助など様々な場面でご指導いただき、表し尽くせないほどのサポートし ていただきました。稲田さんの持つ才色兼備で、人当たりの良い人柄は本当に尊敬しております。あり がとうございました。同じく特任研究員である深見哲志さんにはミーティングの際に多くの鋭い質問や 指摘をいただきました。他の方から質問が無い時でも深見さんから積極的に質問していただき、考えを 深めることができました。感謝しています。その他にも、東京大学宇宙線研究所の皆様には鏡の移動や 反射率の測定の補助など様々なお手伝いをしていただきました。重ねてお礼申し上げます。また、出張 で東京大学を訪れた際には仕事が終わった後にフットサルに誘っていただきました。野田さんにはフッ トサルシューズまで貸していただきました。非常に楽しかった良い思い出です。本当にありがとうござ いました。

また、6階7階の宇宙領域の研究室で出会った皆様には、研究をするための活力をいただきました。研 究のモチベーションを保つことができたのは共に研究する仲間がいたからです。新型コロナウイルスの 影響で学校に行けない日々が続いた時には、精神的に研究のやる気を保ち続けることが難しく、改めて 研究室の仲間の大切さに気づきました。特に高エネルギー研究室で同期の野上優人君は一緒に遅くまで 議論をしたり、唯一対等に話せる友人で、私が修士で研究を続けることができたのは彼の存在が大きい です。皆様ありがとうございました。

最後に、私を修士まで進学させてくれた両親に深くお礼申し上げます。常に健康を気遣い、仕送りな ど様々なサポートをしていただきました。ありがとうございました。

参考文献

- [1] H.E.S.S., https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/
- [2] VERITAS, https://veritas.sao.arizona.edu
- [3] MAGIC, https://magic.mpp.mpg.de
- [4] MAGIC Collabolation, Tera electronvolt emission from the γ -ray burst GRB 190114C , Nature, 2019, https://www.nature.com/articles/s41586-019-1750-x
- [5] TeVCat, http://tevcat.uchicago.edu/, 2020.
- [6] Heinrich J. Völk and Konrad Bernlöhr, Imaging very high energy gamma-ray telescopes, Experimental Astronomy, 2009.
- [7] M. de Naurois and D. Mazin, Ground-based detectors in very-high-energy gamma-ray astronomy, Comptes Rendus Physique, 2015.
- [8] F. Aharonian et al., Observations of the Crab nebula with HESS, Astronomy & Astrophysics, 457, 899 – 915, 2006.
- [9] CTA Japan Consortium, http://www.cta-observatory.jp/, 2020.
- [10] CTA Observatory, http://www.cta-observatory.org/, 2020.
- [11] 稲田知大,「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」, 修士論文,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, 2017.
- [12] Baseline Design Document for Large Size Telescopes, https://portal.cta-observatory.org, 2013.
- [13] 加賀谷美佳,「次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA の分割鏡の耐候性評価およびコンプトン 型ガンマ線カメラ γ I (ガンマアイ)の基礎開発」,修士論文,茨城大学大学院理工学研究科理学専 攻, 2013.
- [14] 黒田隼人,「CTA 大口径望遠鏡の光学系性能評価」,修士論文,東京大学大学院理学系研究科物理 学専攻 手嶋研究室, 2018.
- [15] ROBAST, https://robast.github.io/, 2020.
- [16] ROOT, https://root.cern/, 2020.
- [17] 稲田知大, MIRROR-JAPAN グループ会議,2020年3月12日会議資料
- [18] 馬場浩則, 修士論文, 2014.