修士学位論文

次世代ガンマ線天文台 CTA の 大口径望遠鏡用分割鏡の性能評価 - 2f 法を用いた結像性能および反射率の評価 -

2015**年度** (平成27年度)

茨城大学大学院理工学研究科 理学専攻

> 14NM160L 長紀仁

本研究では、次世代ガンマ線天文台 (Cherenkov Telescope Array: CTA) 計画の大口径望 遠鏡 (Large-Sized Telescope: LST) 用分割球面鏡の結像性能および反射率を評価するため に、2f 法と呼ばれる方法を採用し、新たな実験装置の開発を行った。さまざまな測定条件の もとで分割鏡の測定を行い、系統誤差が生じる原因を追求し取り除くことで、測定精度を高 めた。その結果、分割鏡が CTA の結像性能および反射率に関する要求性能を満たしている か否かを判定できる実験装置を完成し、評価方法を確立することができた。

CTA 計画とは、高エネルギーガンマ線天文学を飛躍的に発展させることを目指した次世 代型高エネルギーガンマ線望遠鏡群による天文台を構築する国際共同実験である。 CTA 計 画の中で、CTA-Japan グループは LST の光学系や焦点面カメラの開発を中心に様々な貢献 を果たしている。CTA は、高エネルギーガンマ線の観測を行うことにより、宇宙線の起源 の研究はもとより、ブラックホール周辺の極限的な物理状態の研究や暗黒物質粒子の対消滅 ガンマ線の探索などの基礎物理学の発展に重大な貢献をする可能性を秘めている。CTA 計 画では、大中小 3 種類の口径の異なる解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を配置することで、 これまでの望遠鏡より感度を一桁向上するとともに観測可能なエネルギー領域を 20 GeV か ら 100 TeV 以上へと拡大する。

解像型大気チェレンコフ望遠鏡は、宇宙から到来したガンマ線と地球大気との相互作用で 起こる空気シャワー中で発生したチェレンコフ光と呼ばれる光子を地上に配置した望遠鏡で 捉え、その広がったイメージからシャワーの再構成をすることで、元のガンマ線の到来方向 やエネルギーを決定する。チェレンコフ光の光子数は元のガンマ線のエネルギーにおよそ比 例するので、20 GeV から 1000 GeV という低エネルギー側の観測を担当する LST では、よ り多くの光子を集めるためにその主鏡口径は 23 m が必要になる。この 23 m という口径を、 対辺間が 1.51 m の分割球面鏡を 198 枚使用することで実現する。また分割鏡は、曲率半径 56 m から 58.4 m の間のものを製造し、それらを放物面状に配置することで焦点距離が 28 m の放物面を構成する。LST は最終的に南北両半球に 4 台ずつの計 8 台を建設する予定で、 約 1600 枚の分割鏡を生産し性能評価を行う必要がある。

地上でチェレンコフ光のイメージを捉え、それをもとにシャワーの再構成を行うためには、 望遠鏡の結像性能、つまり主鏡を構成する分割鏡一枚一枚の結像性能が非常に重要である。 そのため CTA の LST 用分割鏡では、焦点距離 f (28 m から 29.2 m)において、光量の 80 % が収まるスポット直径 (D80) が、焦点面カメラの Pixel サイズである 50 mm の 1/3 の 大きさにあたる 16.6 mm (約 0.03°) 以下であることが結像性能の要求性能となっている。

この結像性能の評価を行うために、従来から宇宙線実験用球面鏡の評価方法として知られる 2f 法を採用した。2f 法は、焦点距離の 2 倍の位置 (2f) に光源と検出器を置き直接スポットサイズを測定する方法である。2f の位置に LED の光源とスクリーンを置き、デジタルカメラで光源が ON と OFF の状態をそれぞれ撮影し、それらの画像を差し引きすることで結像されたスポットサイズを測定する。この方法による評価は、以前より分割鏡の製造元の工場内で納品前の検定方法として用いていたが、バックグラウンドの不定性が大きいため系統誤差が大きくなり、精度の高い評価をすることが難しかっ た。

そこで、東京大学宇宙線研究所に新たな 2f 実験装置を製作することで、これまでよりも 精度の高い評価を可能にすることを目指した。実験装置の開発から始め、バックグラウンド の評価や解析の自動化・高速化を行い、現在では一日に 5 枚から 6 枚の分割鏡の測定ができ るほど効率の良い実験装置を開発することができた。また、測定の結果から、新しく製作した実験装置での測定精度は、1 mm 以下を達成している。これは 2f の位置で 1 mm 以下なので焦点距離である 1f では 0.5 mm 以下であり、2f 法による結像性能評価の方法を確立することができた。

さらに、本来は結像性能の評価方法に使われるこの 2f 法を応用し反射率の測定も行った。 分割鏡の反射率は、300 nm から 550 nm の波長域において 85 % 以上であることが要求さ れる。現在生産されている分割鏡の反射率は、この要求値を満たしていることがわかってい るが、部分的に測定した結果によるものであり、一枚の鏡全体としてもつ反射率は求められ ていない。そこで、現在の実験装置の光源である 470 nm の LED の光量と鏡に反射され 2f 位置で結像した反射像の光量を比べることで反射率を求めた。実際にこの方法によって測定 した全ての鏡で 90 % 程度の反射率を求めることができた。これは部分的に測定されている 反射率 89.4 % から 93.3 % に対して、 5 % 以内で一致している。このことから評価方法の 確立はできたと考えられるが、今後は系統誤差の評価を行い、2f 法による反射率評価の更な る精度の向上を目指したい。

目 次

第1章	Introduction	10
1.1	高エネルギーガンマ線天文学・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
1.2	ガンマ線....................................	10
	1.2.1 ガンマ線放射機構	11
1.3	ガンマ線の地上観測	13
	1.3.1 空気シャワー	13
	1.3.2 チェレンコフ光	15
	1.3.3 ガンマ線の検出原理	16
1.4	解像型大気チェレンコフ望遠鏡	16
	1.4.1 イメージング法	17
	1.4.2 ステレオ観測	18
		10
弗2草	Cherenkov Telescope Array, CTA	19
2.1		19
		20
2.2	2.1.2 CTA-Japan $\mathcal{O}\mathcal{V} - \mathcal{J}$	20
2.2	大山径望遠鏡:Large-Sized Telescope (LST)	22
		22
		24
2.2		26
2.3	LST 用分割球面鏡	28
	2.3.1 仕禄安水	29
	2.3.2 製造万法	30
	2.3.3 保官・連搬用コンテナ	32
第3章	分割鏡の結像性能評価	33
3.1	評価方法:2f 法	33
	3.1.1 2f 法概要	33
	3.1.2 撮影画像の解析手法	35
3.2	三光精衡所での 2f 測定	38
	3.2.1 三光精衡所工場内に製作された 2f 実験装置	38
	3.2.2 測定結果	39
3.3	東京大学宇宙線研究所での 2f 測定	47
	3.3.1 測定・解析の効率化	47
	3.3.2 東大宇宙線研用 2f 実験装置の製作	49
	3.3.3 試験測定	51

	3.3.4 実験装置の改良	58					
	3.3.5 夜間と日中での測定:再試験	60					
	3.3.6 バックグラウンド比較	61					
	3.3.7 Cd33 の導入	63					
	3.3.8 解析の安定性	65					
	3.3.9 評価結果	66					
3.4	東京大学宇宙線研究所 2f 実験装置の大型アップデート	72					
	3.4.1 アップデート:ハード面	72					
	3.4.2 アップデート:ソフト面	76					
	3.4.3 測定結果	77					
	3.4.4 鏡の性能の安定性および測定の再現性	85					
	3.4.5 Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法による結果との比較	86					
		20					
弗 4草		38					
4.1		88					
4.2		89					
4.3	再測定に向けた試験測定	91					
	4.3.1 光量安定性試験	91					
	4.3.2 LED 指向性試験	96					
4.4	再測定結果 \ldots	02					
	4.4.1 測定方法の変更	02					
	4.4.2 再測定	03					
	4.4.3 反射率評価結果	08					
第5章	まとめと議論 1	10					
付録Δ	High Dynamic Bange (HDB) 合成 1	19					
רו א <i>י</i> ע רו.	$IIIgn Dynamic Italige (IIDIt) \square m I.$	- 4					
付録B	B 2f 測定結果まとめ 117						
付録C	レンズの歪みの検証 134						



1.1	光の波長とエネルギー [1]	10
1.2	制動放射 [2]	11
1.3	シンクロトロン放射 [2]	11
1.4	逆コンプトン散乱 [2]	11
1.5	π^0 中間子の崩壊 [2]	12
1.6	粒子-反粒子対消滅 [2]	12
1.7	電磁カスケードシャワーの模式図 [3]	13
1.8	ハドロンシャワーの模式図 [3]	14
1.9	チェレンコフ光の放射原理 [4]	15
1.10	粒子のチェレンコフ光放射と地上で観測されるライトプール[5]	15
1.11	現在稼働中の解像型大気チェレンコフ望遠鏡..............	16
1.12	CORSIKA のシミュレーションによる空気シャワーの発達の違い[9]	17
1.13	焦点面カメラで捉えられるシャワーイメージの違い[5]	18
1.14	単一望遠鏡による観測 (左) とステレオ法を用いた観測 (右) のイメージ[10].	18
2.1	CTA 完成イメージ図 [11]	19
2.2	CTA の目標感度曲線 (赤) と、MAGIC (青)、H.E.S.S. (緑) の達成感度曲線 [12]	19
2.3	"Kifune plot" といわれる X 線源、ガンマ線源、VHE ガンマ線源の発見数を	
	時間の関数として示したもの[12]	20
2.4	CTA の 3 種類の望遠鏡 [13]	21
2.5	モンテカルロシミュレーションによって最適化されたアレイ配置 [12]	21
2.6	Large-Sized Telescope (LST) 完成イメージ図 (イラスト 池下章裕氏/提供 CTA	
	コンソーシアム)	22
2.7	大口径望遠鏡 Large-Sized Telescope (LST)	23
2.8	分割鏡配置図 [14]	24
2.9	MAGIC 望遠鏡の AMC システム [15]	25
2.10	CTA 用高性能アクチュエータ [16]	25
2.11	CMOS カメラ [17]	25
2.12	焦点面カメライメージ図 [12]	26
2.13	CTA 用 PMT (R11920-100-20)	26
2.14	ライトガイド	27
2.15	PMT クラスター [18]	27
2.16	分割鏡:表面	28
2.17	分割鏡:裏面 [19]	28
2.18	cold slump 技術の概念図 [12]	30
2.19	分割鏡のハニカム構造 [10]	31

2.20	スパッタリング法の模式図 [20]	31
2.21	三光精衡所の巨大真空チャンバー [14]	31
2.22	分割鏡用コンテナ [21]	32
2.23	分割鏡のフレーム固定 [21]	32
0.1		
3.1		33
3.2	21 法を用いた与具撮影測定の模式図 1	34
3.3	ベイヤー配列からの青色 pixel 抽出の模式図 [10]	35
3.4	撮影画像のバックグラワンド領域[10]	36
3.5		37
3.6	実際の解析画像での D80 の算出	37
3.7	LED	38
3.8	$ADU-D[10] \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	38
3.9	各機材の位置	39
3.10	暗幕の有無による影響・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	40
3.11	No.70 (1/5 秒)の解析結果	40
3.12	No.70 (1 秒)の解析結果	41
3.13	No.70 (3.2 秒)の解析結果	41
3.14	No.70 (1 秒)の再解析結果	43
3.15	測定点を増やすことによる詳細評価.....................	45
3.16	USB 接続によるカメラの PC 制御	47
3.17	解析プログラムと解析行程の統合による高速化.............	48
3.18	測定・解析のフローチャート	48
3.19	LED	49
3.20	ブラックシートで覆った状態	49
3.21	距離測定用の的	50
3.22	測定場所....................................	51
3.23	測定の様子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	51
3.24	2f 実験装置と蛍光灯の位置関係	52
3.25	No.75 D80 最小位置でのスポット	52
3.26	No.75 微小シェル光量と半径の関係	52
3.27	No.75 の 11 点測定結果	52
3.28	マスクの違いによるスポットイメージの違い...............	54
3.29	No.76 D80 最小位置でのスポット	55
3.30	No.76 微小シェル光量と半径の関係	55
3.31	No.76 の 5 点測定結果	55
3.32	暗幕の設置	56
3.33	ON と OFF の撮影パターンの模式図	56
3.34	LED SUPERSTAR PAR16 50 25 °	58
3.35	改良した LED 光源	58
3.36	暗箱で覆ったスクリーン	58
3.37	スクリーンとカメラの連結・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	59
3.38	改良した 2f 実験装置	59

3.39	改良した 2f 実験装置での夜間と日中の測定結果 (使用した鏡: No.70) 60
3.40	スケール換算後の D80 60
3.41	各バックグラウンドの光量カウントマップ61
3.42	各バックグラウンドの光量ヒストグラム
3.43	Cd33 の追加
3.44	測定点での D80 と Cd33 のプロット図 64
3.45	先行研究での最適化係数の変化と D80 の関係 (右:赤枠部分拡大図)[10] 65
3.46	最適化係数の変化と D80 の関係 (右:赤枠部分拡大図)
3.47	- 最適化係数の変化と Cd33 の関係 (右:赤枠部分拡大図)66
3.48	No.70 測定結果
3.49	No.71 測定結果
3.50	No.72 測定結果
3.51	No.74 測定結果
3.52	No.75 測定結果
3.53	$\mathbf{\mathfrak{H}}$ LED : OSB5XNE3C1S
3.54	LED セットアップ
3.55	LED 用定電流ドライバモジュール : CC1000EH
3.56	LED モジュール正面の穴
3.57	完成した LED モジュール
3.58	ブラックシート 付きキャップの装着
3.59	三脚固定用雲台の装着
3.60	LED モジュールを点灯させた様子
3.61	レンズによる撮影画角の違い
3.62	解析領域、重心計算領域および r ₁₀₀ の変更
3.63	バックグラウンド領域の変更
3.64	No.70 の各測定点での D80 の差
3.65	解析領域のリサイズ
3.66	PC 画面上に写した方眼紙 80
3.67	NewLens (S55-250mm F4-5.6 IS STM) での撮影
3.68	OldLens (EF-S55-250mm F4-5.6 IS II) での撮影
3.69	画像の中心と右端での1マスの大きさの違い82
3.70	アップデート後の測定結果での最適化係数の変化と D80の関係 (右:拡大図) . 83
3.71	アップデート後の測定結果での最適化係数の変化と Cd33 の関係 (右:拡大図) 83
3.72	バックグラウンドの変化と D80 の関係 (右:拡大図)84
3.73	バックグラウンドの変化と Cd33 の関係 (右:拡大図)
3.74	鏡の性能の安定性および測定の再現性 85
3.75	2f と PMD のスポット形状の比較 (No.70) 86
3.76	2f と PMD のスポット形状の比較 (No.75) 87
3.77	2f と PMD のスポット形状の比較 (No.77) 87
3.78	2f と PMD のスポット形状の比較 (No.81) 87
4.1	2f 法を応用した反射率評価方法の模式図88
4.2	鏡側での総光量測定

4.3	鏡の反射面積	90
4.4	室内での光量安定性試験セットアップ	91
4.5	青色 LED の光量変化	92
4.6	白色 LED の光量変化	92
4.7	青色 LED 60 m 先での光量	93
4.8	白色 LED 60 m 先での光量	93
4.9	宇宙線研 60 m 光量安定性試験	94
4.10	60 m 測定での LED 光量 (ON-BG) の時間変化	95
4.11	LED の向きを変えるための三脚各脚の位置の決定	97
4.12	測定角度 (1)	97
4.13	測定角度 (2)	98
4.14	測定模式図	99
4.15	測定角度とスポットイメージ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	99
4.16	鏡前別測定による指向性	101
4.17	LED の向きによる指向性 (鏡側スクリーン)	101
4.18	LED の向きによる指向性 (2f 側スクリーン)	101
4.19	これまでの測定方法と問題点	102
4.20	新たな光量測定方法模式図.................................	103
4.21	2f 側のスクリーンに写る反射像の光量測定	104
4.22	測定する反射像の光量範囲.................................	104
4.23	光量安定性再試験結果	104
4.24	光量推測試験	106
4.25	スクリーンから見た床と壁の反射光	106
4.26	暗幕とダンボール壁による遮光	106
4.27	光量推測試験結果 (1)	107
4.28	光量推測試験結果 (2)	107
A.1		113
A.2		113
A.3		113
A.4		114
A.5	二光画像データ $(1/5 $ 杪と $3.2 $ 杪) の HDR 合成結果	114
A.6	合成部分の拡大図 (石) と $Y = 1480$ における断面図 (石)	115
A.7	位置補止後の合成部分の拡大図 (左) と $Y = 1480$ における断面図 (右)	115
A.8	位置補止前と補止後での線形性の違い	116
B.1	曲率半径 R 分布	118
B.2	D80 分布	118
B.3	B vs D80	118
B.4	No.76 \mathbb{I} 定結果	124
B.5	No.77 \mathbb{I} z the second sec	125
B.6	No.78 測定結果	126
B.7	No.79 測定結果	127
В.8	No.80 測定結果	128

B.9	No.81	測定結	課					•	•					•		•	• •					•			•	•		•	 129
B.10	No.82	測定結	淉					•	•					•								•					•	•	 130
B.11	No.83	測定結	淉					•	•							•						•			•		•	•	 131
B.12	No.84	測定結	課					•	•					•		•						•		•	•		•	•	 132
B.13	No.85	測定結	淉					•	•							•						•			•		•	•	 133
C.1	EF-S5	5-250m	nm [F4	-5.	61	\mathbf{S}		C	Ċ	レ	シ	゚ズ	`歪	み	則に	Ē位	沮	Ē			•						•	 134
C.2	EF-S5	5-250m	nm [F4	-5.	61	S		C	$\delta \sigma$)各	浿	定	位	置	での	D 1	1.	₹.	ス	の の	変	位					•	 135
C.3	EF-S5	5-250m	1m -	F4	-5.	61	S	SЛ	ΓM	7	での	D١	ン	ノズ	歪	み	則フ	官	立	置	•	•			•		•	•	 136
C.4	EF-S5	5-250m	nm [F4	-5.	61	\mathbf{S}	SЛ	ΓM	7	での	D各	ら浿	则定	位	置	で	D	1	マ	ス	Ø	変	位	Ī			•	 136
C.5	EF-S5	5-250m	nm [F4	-5.	61	\mathbf{S}	SЛ	ſΜ	7	での	D各	ら泪	则定	位	置	で	D	1	マ	ス	ற	変	位	Ī				 137

表目次

2.1	各望遠鏡のパラメータ 21
2.2	大口径望遠鏡 Large-Sized Telescope (LST) 仕様
2.3	LST 用分割球面鏡の仕様要求値
3.1	三光 2f 実験装置の機材とその設定 [10] 38
3.2	各画像のシャッタースピードと D8042
3.3	再解析による D80 の変化 42
3.4	No.70 から No.75 の解析結果 (No.73 は除く)
3.5	曲率半径 <i>R</i> での D80 の平均値
3.6	東大宇宙線研 2f 実験装置の主な機材
3.7	蛍光灯の影響による D80 の変化 (使用した鏡: No.75)
3.8	穴のサイズによる D80 の違い (使用した鏡: No.75) 54
3.9	OFF の測定パターンによる D80 の違い (使用した鏡: No.70) 57
3.10	各バックグラウンドの光量
3.11	宇宙線研究所での結像性能評価結果
3.12	カメラセットアップの違いによる D80 の差
3.13	解析領域リサイズ後の D80 の差
3.14	カメラとレンズの組み合わせによる D80 の違い
3.15	レンズの歪みを考慮したカメラとレンズの組み合わせによる D80 の違い 82
3.16	No.70 の測定日時および測定・結果に関する備考85
3.17	2f 法と PMD 法の比較
4.1	鏡に届いた光源 (LED) からの光量
4.2	No.70 の反射率
4.3	LED 光量の時間変化
4.4	スクリーン位置を変えることによる LED 指向性の測定 (12 月 3 日分) 96
4.5	スクリーン位置を変えることによる LED 指向性の測定 (12 月 4 日分) 96
4.6	LED 指向性測定 (12 月 3 日分) 97
1.0	
4.7	LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (1)) 98
4.7 4.8	LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (1)) 98 LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (2)) 98
4.7 4.8 4.9	LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (1)) 98 LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (2)) 98 LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (3)) 99
4.74.84.94.10	LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (1))98LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (2))98LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (3))99LED 光量の時間変化 (再試験結果)105
$ \begin{array}{r} 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \end{array} $	LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (1))98LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (2))98LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (3))98LED 光量の時間変化 (再試験結果)105光量推測試験の測定位置と光量106
$ \begin{array}{c} 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \end{array} $	LED 指向性測定 (12月4日分 (1))98LED 指向性測定 (12月4日分 (2))98LED 指向性測定 (12月4日分 (3))98LED 光量の時間変化 (再試験結果)105光量推測試験の測定位置と光量106Fitting 結果の違い107
$\begin{array}{c} 4.7 \\ 4.8 \\ 4.9 \\ 4.10 \\ 4.11 \\ 4.12 \\ 4.13 \end{array}$	LED 指向性測定 (12月4日分 (1))98LED 指向性測定 (12月4日分 (2))98LED 指向性測定 (12月4日分 (3))99LED 光量の時間変化 (再試験結果)105光量推測試験の測定位置と光量106Fitting 結果の違い107各鏡の反射光量108

B.1	2f 法による I	LST	用分割鏡結像性能評価結果								•					•			117
-----	-----------	-----	--------------	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	---	--	--	-----

第1章 Introduction

1.1 高エネルギーガンマ線天文学

宇宙空間を飛び交う高エネルギーの放射線である宇宙線は1911-12年に Victor Franz Hess の気球実験によって発見された。その組成は約 90 % が陽子で、9 % がヘリウム原子核、残 りの 1 % が素粒子やヘリウム原子核より重たい原子核などから成る。しかし、発見されて から現代に至るまで約 100 年の月日が流れたが、未だにその発生源の解明は完全にはできて おらず、宇宙物理学における未解決問題の1つとなっている。

宇宙線はベキ型のエネルギースペクトルを持ち、10¹⁹ eV 以上の超高エネルギーの宇宙線 も存在することが観測的に証明されていて、その具体的な生成過程や加速機構として衝撃波 加速などが提案され、ガンマ線観測により証明されつつあるものの完全には理解できていな い。また宇宙線は荷電粒子であるために宇宙空間に広がる磁場の影響で進行方向が曲げられ てしまうので到来方向の同定が困難である。しかし、宇宙線を発生、加速し得るような高エ ネルギー天体では、非熱的過程によって高エネルギーガンマ線が放射される。ガンマ線は宇 宙磁場の影響をほとんど受けずに直進し地球に到来する。つまりこの高エネルギーガンマ線 を観測することによって、宇宙線の発生源の特定、そしてその加速機構の解明に迫ることが 可能となる。

1.2 ガンマ線

光子のエネルギーが数十 keV を超え、X 線よりも波長が短くなると、ガンマ線といわれる領域にはいる。ガンマ線の範囲は広く、TeV (= 10¹² eV) という高エネルギーにまで及ぶ。



図 1.1: 光の波長とエネルギー [1]

1.2.1 ガンマ線放射機構

宇宙空間における主なガンマ線の生成過程について述べる。

制動放射

制動放射とは高エネルギー電子がイオンや原子核電子のクーロン場で加速を受けた 時に光子を放射する放射機構である。高エネルギー電子がもつエネルギー E に対して、 放射される光子のスペクトルはほぼ1/E に比例して高エネルギー側に向かって減少し ていく連続スペクトルとなる。



図 1.2: 制動放射 [2]

シンクロトロン放射

高エネルギー電子が磁場の中を通過すると、ローレンツ力による加速度を受けて電 磁波を放出する。これをシンクロトロン放射という。



図 1.3: シンクロトロン放射 [2]

• 逆コンプトン散乱

相対論的なエネルギーを持った高速で動いている電子と光子との間に散乱が起き、光 子のエネルギーをたたき上げる現象を逆コンプトン散乱という。逆コンプトン散乱に より 10 GeV の電子は可視光を優に数百 MeV の γ 線に変換する。



図 1.4: 逆コンプトン散乱 [2]

*π*⁰ 中間子の崩壊

高エネルギーの陽子が星間物質中の原子核や陽子に衝突すると、^{π0}中間子が生成され、それが崩壊することによってガンマ線が放射される。

$$p + p \to p + p + \pi^{0} + \pi^{+} + \pi^{-}$$
$$\pi^{0} \to \gamma + \gamma$$
(1.1)

 π^0 中間子は寿命 8.4×10^{-17} s で 2 つのガンマ線に崩壊する。 π^0 中間子が静止している場合、エネルギーが 67.5 MeV(π^0 の静止エネルギーの約半分)のガンマ線が互いに正反対の方向に放射される。



図 1.5: π^0 中間子の崩壊 [2]

電子陽電子対生成・対消滅

ガンマ線が原子核と衝突すると、電子と陽電子の対を生成する (対生成)。これに対し、電子、陽電子が衝突すると対消滅して、運動量保存の法則から、ラインスペクト ルのガンマ線を2つ生成する。



図 1.6: 粒子-反粒子対消滅 [2]

1.3 ガンマ線の地上観測

最新のガンマ線観測衛星であるフェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡は2008年の打ち上げ以来、超 新星残骸などの高エネルギー天体の観測において数々の成果を挙げてきた。しかし、フェル ミ宇宙ガンマ線望遠鏡のエネルギー領域は高エネルギー側では300 GeV ほどが検出限界で あり、それ以上の高エネルギーガンマ線の観測は難しい。

そこで、そのような高エネルギーガンマ線に対して有効となるのが、解像型大気チェレン コフ望遠鏡である。解像型大気チェレンコフ望遠鏡では、高エネルギーガンマ線が地球に到 来した時に大気と相互作用して起こる空気シャワー中で発生したチェレンコフ光を観測する ことで元のガンマ線の情報を得る。

以下では、チェレンコフ光の発生原理や解像型大気チェレンコフ望遠鏡の観測原理につい て述べる。

1.3.1 空気シャワー

地球大気に入射した高エネルギーガンマ線(一次粒子)は、大気中の原子核との相互作用に よって二次粒子を生成する。その二次粒子がさらに相互作用によって粒子を生成する。この ような一連の反応が雪崩的に繰り返し起こることで生成される粒子の集まりを空気シャワー と呼び、一次粒子がガンマ線である場合を電磁カスケードシャワー、一次粒子が陽子である 場合をハドロンシャワーと呼ぶ。

電磁カスケードシャワー

地球大気に入射する一次粒子が高エネルギーのガンマ線で、大気中の原子核との相 互作用により電子陽電子対生成を起こし、電子、陽電子の二次粒子を生成する。さら にそれらが制動放射によってガンマ線を放射する。この反応はガンマ線のエネルギー が電子・陽電子対生成が優位であるエネルギー(地球大気に対し、約83 MeV)以下に なるまで繰り返される。



図 1.7: 電磁カスケードシャワーの模式図 [3]

• ハドロンシャワー

地球大気に入射する一次粒子が陽子などのハドロン由来の高エネルギー宇宙線で、大 気中の原子核との相互作用により荷電・中性パイオンを生成する。荷電パイオンは荷 電ミューオンとニュートリノを生成する。中性パイオンは2つのガンマ線に崩壊し、 そのガンマ線が電磁カスケードを起こしシャワーが発達する。



図 1.8: ハドロンシャワーの模式図 [3]

1.3.2 チェレンコフ光

シャワー中の電子・陽電子が十分なエネルギーを持つ場合、電子・陽電子の速度は大気中の光速 (c/n)を超え、チェレンコフ光を放出する (図 1.9)。ここで、cは真空中の光速、nは大気の屈折率である。チェレンコフ光放出の条件は、粒子の速度を βc 、チェレンコフ光の放出角を θ とすると、 $\cos \theta = 1/(\beta n)$ で与えられる。n は波長に弱く依存するが、波長 300 nmでは 1 気圧で約 1.00029 である。このため、大気中をほぼ光速で走る荷電粒子は、進行方向に対し約 1.3°の半頂角の円錐状にチェレンコフ光を放出する。電子では $\beta \ge 1/n$ 、すなわち電子・陽電子のエネルギー E が $E \ge m_{\rm e}c^2/\sqrt{1-1/n^2} = 21$ MeV ($m_{\rm e}$:電子の質量)のエネルギーを持てばチェレンコフ光を放出する。荷電粒子が単位時間あたりに放出するチェレンコフ光子の数は、

$$N = 2\pi\alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{(\beta n(\lambda))^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2}$$

で与えられる。ここで $\alpha \simeq 1/137$ は微細構造定数、 λ_1 、 λ_2 は観測する波長の下限と上限である。

チェレンコフ光子の総数はガンマ線のエネルギーにほぼ比例し、 1 TeV のガンマ線では、 ライトプール (図 1.10) の地上での光子密度は 1 m² あたり約 50 個である。



図 1.9: チェレンコフ光の放射原理 [4]



図 1.10: 粒子のチェレンコフ光放射と地上で観測されるライトプール [5]

1.3.3 ガンマ線の検出原理

チェレンコフ光を地上に配置した反射鏡で集光して捕らえるのが大気チェレンコフ望遠鏡 である。大気チェレンコフ望遠鏡は、主鏡とその焦点の位置に設置されたカメラによって構 成される。チェレンコフ光は主鏡によって反射・集光され、焦点に設置された検出器によっ て、その光量とシャワーのイメージがデジタル信号として記録される。このデジタル信号と して記録されたシャワーイメージを再構成することで、元のガンマ線の到来方向を決定し、 また記録された光量からそのエネルギーを決定する。観測できるガンマ線の最低エネルギー はほぼ反射鏡の集光面積に反比例し、1 TeV のガンマ線では数百平方メートル程度が必要 である。このような仕組みで大気チェレンコフ望遠鏡では地上からガンマ線を検出する。

1.4 解像型大気チェレンコフ望遠鏡

1.3.1 で述べたように高エネルギーガンマ線だけでなく、宇宙線によっても空気シャワー は作られチェレンコフ光を放出する。この宇宙線によるチェレンコフ光が大気チェレンコフ 望遠鏡でガンマ線を捕らえる際のバックグラウンドになってしまう。このバックグラウンド を識別し取り除くために考えられたのがイメージング法であり、このイメージング法を使っ たタイプの大気チェレンコフ望遠鏡のことを解像型大気チェレンコフ望遠鏡と呼ぶ。

以下では、イメージング法の原理、また複数台の望遠鏡を使ったステレオ観測の仕組みに ついて述べる。



図 1.11: 現在稼働中の解像型大気チェレンコフ望遠鏡 上から MAGIC 望遠鏡 [6]、VERITAS 望遠鏡 [7]、H.E.S.S. 望遠鏡 [8]。

1.4.1 イメージング法

ガンマ線の起こすシャワーと宇宙線の起こすシャワーの発達には違いがあり、核相互作用 による宇宙線シャワーに比べ電磁相互作用によるガンマ線シャワーの方が広がらずにコンパ クトに発達する。この違いはチェレンコフ光の像の広がりや集中度の強弱となって現れる。

シャワーイメージの違いは大きく分けて二つの理由による。一つは前述の粒子の相互作用 による像の広がりの違いである。もう一つは幾何学的なものである。シャワーの軸と望遠鏡 の光学軸が一致すれば像は視野の中心に丸い形に写るが、平行でも距離が離れている場合は 長軸が光学軸と交差するような楕円に写る。平行でなければ楕円の長軸は光学軸と交差し ない。光学軸を点状のガンマ線天体に向けて観測すれば、ガンマ線のシャワーは視野の中心 方向に長軸の向いた楕円状の像となるが、さまざまな方向から飛び込んでくる宇宙線のシャ ワーの像の軸方向はばらばらである。

このようにガンマ線シャワーと宇宙線シャワーとをチェレンコフ光の像の違いに基づいて 識別する方法をイメージング法 (Imaging Air Cherenkov Technique : IACT) という。

図1.12はガンマ線と宇宙線のシャワーの発達の様子で、図1.13はイメージングカメラ焦点 面に到達する光子の分布である。2つの図を見てわかるようにガンマ線シャワーはシャワー 軸周りにコンパクトに発達し、像もコンパクトであるのに対し、宇宙線シャワーは広がりを 持ち、像も拡散している。



図 1.12: CORSIKA のシミュレーションによる空気シャワーの発達の違い[9] 左:ガンマ線シャワー、右:宇宙線(陽子)シャワー。



図 1.13: 焦点面カメラで捉えられるシャワーイメージの違い [5]

1.4.2 ステレオ観測

シャワー軸から離れた位置でチェレンコフ光を捉えるとガンマ線発生源と空気シャワーの 間で視差が生じる。そのため地上でとらえられるシャワーイメージは発生源方向からややず れた位置でその楕円の長軸方向が発生源方向を向くことになる。

そこで、1つのガンマ線イベントに対し、複数の望遠鏡で測定し、それぞれのシャワーイ メージを重ねることによって発生源方向を絞り込むことが出来る。この方法をステレオ法と いう。ステレオ法は最低2台の望遠鏡で行うことが出来るが、台数が増えるほど交点決定に 用いるシャワーの数が増え、最適化が可能となるため決定精度は向上する。また、ステレオ 法は望遠鏡間の距離を用いることで空気シャワーの発生高度が推定できるので、ガンマ線の エネルギー決定精度も向上させることが可能となる。



図 1.14: 単一望遠鏡による観測 (左) とステレオ法を用いた観測 (右) のイメージ [10]

第2章 Cherenkov Telescope Array, CTA

2.1 CTA 計画

次世代 TeV ガンマ線望遠鏡群 Cherenkov Telescope Array (CTA) (図 2.1) は大中小 3 種類の口径の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群の配置により、現在稼働中の H.E.S.S, MAGIC, VERITAS から一桁感度を向上 (1 m Crab ~ 10^{-14} erg s⁻¹ cm⁻²の感度を達成) するとともに、観測可能なエネルギー領域を 20 GeV から 100 TeV 以上へとさらに拡大することを目指した計画 (図 2.2) であり、31 カ国 1200 名以上が参加する国際共同研究である。



図 2.1: CTA 完成イメージ図 [11]



図 2.2: CTA の目標感度曲線 (赤) と、MAGIC (青)、H.E.S.S. (緑) の達成感度曲線 [12]

CTA は感度の向上、観測エネルギーバンドの拡大により、多種多様な天体、物理現象の 研究を可能とする。数十 GeV 領域では、遠方 Active Galactic Nuclei (AGN)、ガンマ線バー スト (GRB : Gamma-Ray Burst)、Extragalactic Background Light (EBL)、そしてパルサー の研究が重要なテーマとなる。100 GeV から 10 TeV 領域では、銀河面天体、近傍銀河の ディープサーベイ、10 TeV を超えるエネルギー領域では、銀河宇宙線の起源が、それぞれ 重要な研究テーマとなる。

また、現在 100 個を超える高エネルギーガンマ線源が発見されているが、CTA によって 1000 個を超える既知タイプのガンマ線天体が発見されると予測される (図 2.3)。また新しい タイプの天体もその感度の向上にともない発見されるであろうと期待されている。



図 2.3: "Kifune plot" といわれる X 線源、ガンマ線源、VHE ガンマ線源の発見数を時間の 関数として示したもの [12]

2.1.1 CTA の観測機器

CTA では、23 m 口径の大口径望遠鏡 Large-Sized Telescope (LST)、12 m 口径の中口径望 遠鏡 Midium-Sized Telescope (MST)、4 m 口径の小口径望遠鏡 Small-Sized Telescope (SST) の 3 種類の望遠鏡 (図 2.4) を使用する。それぞれの望遠鏡で観測を担当するエネルギー領域 や特徴は異なっており、これらを組み合わせて、モンテカルロシミュレーションによってア レイ配置 (図 2.5) を最適化することで、CTA の目指す 20 GeV から 100 TeV 以上のエネル ギー領域での高感度観測を実現する。表 2.1 に各望遠鏡の詳細をまとめる。

2.1.2 CTA-Japan グループ

日本からは約 100 名の人々がこの計画に参加している。CTA-Japan グループは、PHYS (物理)、MC (モンテカルロ)、FPI (Focal Plane Instrument/カメラ)、ELEC (エレクトロニ クス)、MIR (鏡ミラー)、CAL (キャリブレーション) といった日本が貢献すべき重要ワーキ ングパッケージを定め、非常に早いスピードで研究、開発を進めており、大口径望遠鏡であ る Large-Sized Telescope (LST) の光学系、焦点面カメラの開発をはじめとする様々な面で 貢献を果たしている。最終的に CTA 計画に対して、CTA-Japan グループは 15 % の貢献を 目指している。



図 2.4: CTA の 3 種類の望遠鏡 [13] 左:LST、右上:MST、右下:SST

表 2.1: 各望遠鏡のパラメータ

	LST	MST	SST
口径	23 m	10 - 12 m	4.3 m
観測エネルギー範囲	20 GeV - 1 TeV	$100~{\rm GeV}$ - $10~{\rm TeV}$	5 TeV - 300 TeV
反射面形状	Parabolic	Davies-Cotton	Davies-Cotton
		or	or
		Schwarzschild-Couder	Schwarzschild-Couder
鏡面積	368 m^2	100 m^2	37 m^2
焦点距離	28 m	$15 \mathrm{~m}$	$7 \mathrm{m}$
視野	4.5°	6°- 8°	$\sim 10^{\circ}$



図 2.5: モンテカルロシミュレーションによって最適化されたアレイ配置 [12]

2.2 大口径望遠鏡: Large-Sized Telescope (LST)

CTA-Japan グループが特にリーダーシップを発揮し、主体となって研究開発を進めてい るのが、大口径望遠鏡 Large-Sized Telescope (LST) である (図 2.6)。なかでも主鏡を構成す る分割鏡、LST の光学系サポート、そして焦点面カメラの開発においては重大な貢献を果た している。LST の主鏡は 198 枚の分割鏡を組み合わせることで実現する。最終的に南北に 4 台ずつ建設する LST の分割鏡の総枚数は約 1600 枚に及ぶわけであるが、これらのほとん ど全てを日本が生産する。そして分割鏡一枚一枚を制御し、光学系をサポートする仕組みで ある Active Mirror Control (AMC)の開発も日本が担当している。これらチェレンコフ光を 集光し結像させる光学系の開発に並び、その結像されたチェレンコフ光を検出し、電気信号 としてシャワーイメージを記録する焦点面カメラの開発も日本の非常に重要な役割である。



図 2.6: Large-Sized Telescope (LST) 完成イメージ図 (イラスト 池下章裕氏/提供 CTA コン ソーシアム)

2.2.1 LST の仕様

LST 望遠鏡 (図 2.7) は主鏡口径が 23 m でその面積は 368 m² と、約 400 m² にも及ぶ圧 倒的集光面積を誇る。これは現在稼働中の MAGIC 望遠鏡の 240 m² に比べて約 1.5 倍の大 きさになる。チェレンコフ光の光量がガンマ線のエネルギーに比例することを考慮すると、 この圧倒的な集光面積により低エネルギーガンマ線によるチェレンコフ光を十分に捕らえる ことができるので低エネルギー側の観測が可能となる。解像型大気チェレンコフ望遠鏡のエ ネルギー閾値は、およそ集光面積に対して反比例している。楕円状に捉えられるシャワーイ メージの長軸方向、太さ、長さを正確に推定するには統計的に最低 50 p.e. から 100 p.e. が 必要となり、MAGIC 望遠鏡では 50 p.e. のときのエネルギー閾値は 50 GeV が得られてい るので、LST では約 1.5 分の 1 倍の 20 GeV から 30 GeV 程度のエネルギー閾値が期待で きる。

このように LST では、20 GeV から 1 TeV までの低エネルギーガンマ線を観測すること ができるので、銀河系外のガンマ線バーストの follow up 観測などを行う。ガンマ線バース トの follow up 観測とは、フェルミ宇宙ガンマ線望遠鏡などでガンマ線バーストを捉えたと きに、その情報を瞬時に CTA に送り、CTA の望遠鏡をその方向に向け観測を行うことで ある。そのため情報を受けてから素早く望遠鏡をその方向に向ける必要がある。LST では、 構造体に軽量かつ剛性の優れたカーボンファイバーチューブを採用することで、全体の総重 量を 100 トン 以下に抑え 20 秒で 180°回転を実現する。表 2.2 に LST の仕様についてまと める。



図 2.7: 大口径望遠鏡 Large-Sized Telescope (LST)

表 2.2: 大口径望遠鏡	Large-Sized	Telescope	(LST)	仕様
---------------	-------------	-----------	-------	----

 主鏡口径 (D)	23 m
総有効面積	368 m^2
焦点距離 (f)	$28~{ m m}~({ m f/D}=1.2)$
反射面形状	Parabolic
視野	4.5°
焦点面カメラロ径	2.25 m
カメラ Pixel サイズ	50 mm
総重量	$< 100 { m t}$
回転速度	180°/20 s
焦点制御方式	Active Mirror Control System (AMC)

2.2.2 LST の光学系開発

分割鏡

LST の主鏡は 198 枚の分割鏡を組み合わせることで構成される (図 2.8)。一枚の分割鏡は、 対辺間の距離が 1.51 m の六角形の形をした球面鏡であり、AMC カメラ用に頂点の一つが 削られている。それぞれの分割鏡には、結像性能、焦点距離、反射率といった仕様要求が定 められている。詳細については 2.3.1 にて述べることとする。



図 2.8: **分割鏡配置**図 [14]

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

LST では自重や風圧、温度変化によってその構造に歪みが生じる。この歪みは望遠鏡の仰 角依存性を持つため、鏡の向きを常に補正する必要がある。この補正をする仕組みを能動的 ミラー制御システム (Active Mirror Control: AMC) と呼び、既に MAGIC 望遠鏡にて実用 されている (図 2.9)。

分割鏡の裏面に三つの固定パッドが取り付けられており、うち一つは固定し、残り二つに 高性能アクチュエータ (図 2.10) を取り付ける。MAGIC 望遠鏡に見られる従来の AMC シ ステムでは分割鏡の削られた部分にレーザーを取り付けていたが、CTA 計画では CMOS カ メラ (図 2.11) を取り付ける。図 2.8 のように分割鏡を配置した際真ん中には配置せず、代わ りに鏡の向きの基準となる光軸を定義するレーザーが取り付けられ、焦点面カメラ横のスク リーンに照射される。このレーザーによる参照光スポットを CMOS カメラでモニターしな がら、アクチュエータの長さを微調整することで分割鏡一枚一枚の向きを補正する。

現在は LST の一部を模した試験構造体を用いた運用試験が進められている。



図 2.9: MAGIC 望遠鏡の AMC システム [15]



図 2.10: CTA 用高性能アクチュエータ [16]



図 2.11: CMOS カメラ [17]

2.2.3 LST の焦点面カメラ開発

LST の焦点面カメラの開発は、光学系と同じように日本が主体となり進めている。焦点面 カメラ (図 2.12)は、光電子増倍管 (PMT)と呼ばれる光検出器 (図 2.13) 1855 本から構成され る。配置された 1855 本の PMT がデジタルカメラの CCD 面と同様の役割を果たし、主鏡 で集光されたチェレンコフ光を検出することで空気シャワーイメージを捉える。この PMT にライトガイド (図 2.14)を取り付けた 1 本がカメラの 1 Pixel (直径 50 mm、視野 0.1°)に 対応している。ライトガイドを取り付けた PMT 7 本を束ねて、それにプリアンプ、読み出 し回路、電源供給通信部分を取り付けたものを 1 つの PMT クラスター (図 2.15)と呼び、ト リガーシステムなどデータ収集系の基本ユニットになっている。また、カメラ全体を効率よ く冷却するための冷却システムの開発も進められている。

焦点面カメラ開発では、LST 初号機に搭載される 2000 本の PMT の較正試験が終わり、 現在 19 クラスターからなるミニカメラの試験が進められている。



図 2.12: 焦点面カメライメージ図 [12] 赤丸で囲まれた部分は拡大図。カメラ全体の重量は約 2500 kg。



図 2.13: CTA 用 PMT (R11920-100-20)

日本の浜松ホトニクス社と CTA-Japan が共同で開発したガンマ線観測に最適化した光電 子増倍管で、時間分解能、信号揺らぎ、光電子の収集効率などの面で優れた性能を持つ。



図 2.14: 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。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。



図 2.15: PMT クラスター [18]

2.3 LST 用分割球面鏡

LST に用いられる分割鏡は、対辺間の距離が 1.51 m の六角形の形をした球面鏡である (図 2.16)。六角形の頂点の一つは 2.2.2 で述べたように AMC のために取り付ける CMOS カメ ラ用に頂点から約 10 cm の三角形の形で切り取られている。また、分割鏡の裏面には AMC アクチュエータを取り付けるために三つのパッドが付いていて、図 2.17 下図をみてわかるよ うにパッドの中央部分には 2mm の穴があけられている。

LST 一台あたり 198 枚の分割鏡が使われ、CTA 計画全体で 8 台の LST が建設される予 定であり、生産する分割鏡の総枚数は約 1600 枚にも及ぶ。この 1600 枚の分割鏡のほとん ど全てを日本が生産する。これは、これまでの鏡製作における日本の実績と、これほどまで に大きく品質の高い鏡を作る技術が日本にしかないからである。CTA-Japan では、茨城県 つくばみらい市の三光精衡所との共同開発で製作を進めている。分割鏡はこれまでに約 40 枚ほどの生産が完了しており、現在は大量生産の第一弾にあたる 90 枚を生産中である。



図 2.16: **分割鏡:**表面

図 2.17: **分割鏡: 裏面** [19]

2.3.1 仕様要求

2.2.1 の表 2.2 で示した LST の仕様を満たすために分割鏡についても仕様要求が定められている。各要求項目について述べ、表 2.3 にその要求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 カメラの ために高さ約 10 cm の三角形の形で切除される。

重量

LST の高速回転を可能にするためにも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る。そのため分割鏡の構造にはハニカム構造を採用す ることにより重量を 50 kgf 以下に抑えている。

• 厚み

分割鏡の厚みに対する要求値は 80 mm 以下である。LST 用分割鏡では、2.7 mm 厚 ガラスシート、60 mm 厚アルミハニカム、2.7 mm 厚ガラスシートのサンドイッチ構 造で作られており要求を満たす。

• 結像性能

LST 焦点面カメラの 1 Pixel が直径 50 mm であり、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 形状をとるためで、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。

• 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 ことで要求される反射率を実現する。

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。

耐水(水抜き)

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。

• 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。

外形	1510 mm (flat-flat) Hex
重量	$< 50 { m ~kgf}$
厚み	$< 80 \mathrm{~mm}$
結像性能	D80 < 16.6 mm at 1 f
反射率	>85% at 300 - 550 nm ($>90%$ at 400 nm)
反射率経年変化	$< 1~\%/{ m yr}$
耐水	IP66
運用期間	> 10 年

表 2.3: LST 用分割球面鏡の仕様要求値

2.3.2 製造方法

分割鏡は 2.3.1 で述べた仕様要求を満たすだけでなく、最終的に約 1600 枚もの枚数を生産しなければならないので、安価に効率良く製造しなければならない。そこで、分割鏡の製造方法として「cold slump 技術」(図 2.18)を採用した。cold slump 技術は、アルミハニカムの両面を接着剤を塗布したガラスシートで挟みサンドイッチ構造とし、曲率のついたモールド上に置き、1 トンの圧力をかけることでその曲率を写し取る。この方法は、イタリアのINAF (Istituto Nazionale di AstroFisica) グループが、MAGIC 望遠鏡用分割鏡を 100 枚以上作った実績ある方法である。LST 用分割鏡は、厚さ 60 mm のアルミハニカム (図 2.19) と厚さ 2.7 mm のガラスシートを使用しており、全体の厚みは 65.4 mm で重量は約 47 kgf である。



図 2.18: cold slump 技術の概念図 [12]



図 2.19: 分割鏡のハニカム構造 [10]

分割鏡の反射面には、5層コーティング(Cr+Al+SiO₂+HfO₂+SiO₂)がスパッタリング法 により施される。スパッタリング法とは、真空チャンバー内で、希ガスや窒素ガスを高電圧 をかけイオン化し、コーティング材料の金属薄膜に衝突させることで弾き飛ばした原子を鏡 の反射面に付着させる方法である(図 2.20)。LST 用分割鏡ほどの大型のものをコーティング できる真空チャンバーは三光精衡所以外にはなく、三光精衡所が導入した直径 2.8 m、長さ 9 m の巨大真空チャンバー(図 2.21)を用いることで、LST 用分割鏡はコーティングされる。



図 2.20: スパッタリング法の模式図 [20]



図 2.21: 三光精衡所の巨大真空チャンバー [14]

2.3.3 保管・運搬用コンテナ

生産された分割鏡の保管、また北半球、南半球の実際の建設サイトへと運搬するときのために分割鏡用コンテナが製作された(図2.22)。コンテナ自体は鉄パイプで出来ていて、安価かつ軽量でコンパクトに設計されている。一つのコンテナに5枚の分割鏡を収納することが可能である。分割鏡はその裏面に取り付けられた AMC 用パッド部分に厚さ約2 cm のゴムをかませ、ネジで止めることで各フレームに固定する(図2.23)。



図 2.22: 分割鏡用コンテナ [21]

左は最初に作られたコンテナで、右は車輪を大きくし、機動性を改良した現在のコンテナ。



図 2.23: 分割鏡のフレーム固定 [21] 3 点支持により鏡に無駄な応力を与えずに観測サイトへの輸送 のときに分割鏡が変形することがないように設計されている。

第3章 分割鏡の結像性能評価

3.1 評価方法:2f法

2.3.1 で示した分割鏡の仕様要求の中でも結像性能は特に重要なものの一つである。解像型 大気チェレンコフ望遠鏡は空気シャワー中で発生したチェレンコフ光を集光し、焦点位置に ある焦点面カメラに結像することでシャワーイメージを捉える。この結像性能が悪いと、焦 点面カメラで捉えられるイメージはぼやけてしまい、シャワー再構成の際その精度は悪くな る。またイメージが鮮明に捉えられないと、イメージング法によるバックグラウンド除去に も影響を及ぼす。そのため主鏡を構成する分割鏡一枚一枚の結像性能が重要となってくる。 本研究では、「2f 法」と呼ばれる評価方法を用いて分割鏡の結像性能の評価を行った。

3.1.1 2f 法概要

球面鏡の結像性能の評価方法として 2f 法という方法がある。2f とは焦点距離である f(focal length) の 2 倍の距離であることを指している。

球面鏡の反射の様子を図 3.1 に示す。球面鏡ではある点において鏡面から曲率中心に向か う方向は法線と一致する。よって、平行光に対する正反射から以下の式が導ける。

$$h = R\sin\theta = (R - f)\sin 2\theta \tag{3.1}$$

光軸に近い場合では θ は小さくなり $\sin \theta \approx \theta$ 、 $\sin 2\theta \approx 2\theta$ と近似でき、式 (3.1) は

$$h \approx R\theta = (R - f)2\theta$$

$$R \approx 2f \tag{3.2}$$

となる。よって、光軸に十分近い場合、曲率半径 R は 2f となる。



図 3.1: 平行光に対する球面鏡の反射 [10]
2f 法では分割球面鏡の曲率半径 (2f) の位置に光源 (点光源) と検出器を置き、球面鏡によっ て作られた光源の反射像を直接観測し、像の拡がりを評価する。この像の拡がりが分割鏡の 結像性能を表す。2f 法の原理では、理想的な球面鏡を用いた場合、2f 位置に作られる反射像 は光源の大きさになる。また、焦点距離 f においては 2f 位置で観測される反射像の大きさ の 1/2 の大きさになる。したがって、2f 法を用いて分割鏡の結像性能 (D80) を評価する場 合は、1 f で求められる 16.6 mm の 2 倍の大きさの 33.2 mm 以下を満たすかを評価するこ とになる。

	$\mathrm{D80} < 16.6~\mathrm{mm}$ at 1f	\Rightarrow D80 < 33.2 mm at 2f			

実際に我々が行った 2f 法は、写真撮影による測定で、図 3.2 で示すように、光源として LED を置き、検出器にはスクリーンを用いる。スクリーンに写った像をデジタルー眼レフ カメラによって、LED が ON と OFF の状態をそれぞれ撮影する。それらの画像を差し引 きし、解析することによって反射像の大きさを求める。

LST 用分割鏡では、曲率半径が 56 m から 58.4 m の間で作られており、元のモールドの曲 率半径から大体の予想はつくが製造時のばらつきによりその値は既知ではない。そのため、 スクリーンを前後に動かし、目視によって反射像が最小となる位置を決める。その位置を中 心に前後何点かを測定することで、その分割鏡の曲率半径と結像性能を求める。三光精衡所 工場内では 3 点で測定している。東京大学宇宙線研究所では 5 点、7 点、11 点と数を増や し測定を行ってみて、現在では適当な 7 点での測定を基準にしている。



図 3.2: 2f 法を用いた写真撮影測定の模式図

3.1.2 撮影画像の解析手法

3.2.1 でも述べたように、カメラで光源となる LED を点灯した状態 (ON) と、消灯した状態 (OFF) のときのスクリーンをそれぞれ撮影する。このとき、LED が ON の状態では LED の光は 2f 離れた位置にある鏡によって反射・集光され、スクリーン上に反射像を結像する。しかし、もともとスクリーン上にはある程度の光量がバックグラウンド光として存在する。このバックグラウンド光を取り除くために LED が OFF の状態も同様に撮影し、ON の画像から OFF の画像を差し引くことで、純粋な鏡による反射光だけを得る。この反射光を解析することで、仕様要求を判断するための評価パラメータである D80 を求める。

画像解析には大きく分けて、1) RAW 画像からのデータ抽出、2) バックグラウンド処理、 3) D80 の算出、の 3 つのステップがある。以下ではその各ステップについて述べる。

1) RAW 画像からのデータ抽出

撮影した画像は RAW 形式 (Canon では「.CR2」) で保存する。一般的な保存形式の JPEG 形式の画像では非可逆圧縮により圧縮されて保存されるので撮影時そのままの物理量は失っ てしまう。それに対し RAW 形式の画像では、撮影時の物理量が何の加工もされずに生デー タとして記録される。

RAW 画像を解析可能なファイルにするため、dcraw[22] と ImageMagick[23] という 2 つ のフリーソフトを使用した。その方法は、まず dcraw で RAW 画像を現像し、次にその画像 データを解析可能な FITS ファイルに変換するというものである。

FITS ファイル内の画像データは、緑、赤、青の色の情報を持ったピクセルが 2:1:1 の比率 で配列されている。これはベイヤー配列と呼ばれる並びで、カメラの CMOS センサーもこ の並びになっていて、センサーはそれぞれ対応した色のみを感知する仕組みになっている。 実験で使用したデジタルー眼レフカメラの 1 つである Canon EOS Kiss X5 では、FITS 変 換後の画像サイズは横が 5202 pixel、縦が 3465 pixel である。 つまり約 1800 万のピクセル がベイヤー配列で並び、一枚の画像が構成されている。

解析では、地上で観測されるチェレンコフ光の波長に近い青色ピクセルの持つデータのみ を抽出した。図 3.3 のように青色のみを抽出すると画像の大きさは、横が 2602 pixel、縦が 1732 pixel になり、画像の解像度としては 4 倍悪くなる。ただ、もともとカメラの画素数が 多いため、抽出後でも 1 pixel は約 0.1 mm に対応しており、解析には十分な解像度である。 ピクセルサイズと実際の長さの対応づけは、 DS9[24] という FITS ファイル内の画像データ を表示でき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。



図 3.3: ベイヤー配列からの青色 pixel 抽出の模式図 [10]

そして、解析領域は 1500 pixel × 1500 pixel とした。実際のスケールに換算し直すと約 15 cm × 15 cm で、反射像の大きさを考えると十分広くとってある。 2) バックグラウンド処理

撮影された ON と OFF の画像を差し引きすることで、純粋な鏡による反射光の光量を求 める。しかし単純に 1:1 で差し引きするのではなく、OFF 画像の最適化をしてから画像の 差し引きを行う。これは ON と OFF の撮影に時間差が生じるためバックグラウンド光量が 変化してしまう可能性があるのでその影響を相殺するために行う。OFF 画像の最適化は以 下のように行う。

解析領域の縁から 200 pixel の範囲では、ON 画像においても要求を満たすような分割鏡 であれば、その反射光はほとんど写らない。そこで、この範囲を撮影画像のバックグラウン ド領域とする (図 3.4)。そして、ON 画像と OFF 画像のバックグラウンド領域を対象にし て、最適化するための平均係数 A を求める。バックグラウンド領域内のピクセルの総数を M、領域内のあるピクセルを m とし、そのピクセルにおける ON 画像、OFF 画像の光量を それぞれ I_{ON.m}、I_{OFF.m} として、平均係数 A を以下のような式で求める。

$$A = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \frac{I_{ON,m}}{I_{OFF,m}} = \left\langle \frac{I_{ON,m}}{I_{OFF,m}} \right\rangle$$
(3.3)

求めた平均係数 A を OFF 画像にかけることで、最適化する。そして、解析領域内の各ピクセルに対して以下のような処理を行う。

解析領域内のあるピクセルをnとし、そのピクセルにおける解析画像の光量を $I_{A,n}$ とすると、

$$I_{A,n} = I_{ON,n} - A \times I_{OFF,n} \tag{3.4}$$

ここでいう解析画像とは、式 3.4 からもわかるように ON 画像から最適化した OFF 画像を 差し引くことで残る、純粋な鏡による反射光だけを捉えたものである。



図 3.4: 撮影画像のバックグラウンド領域 [10]

3) D80 の算出

まずは、解析画像から反射光の光量 $I_{A,n}$ の重心座標 (x_G, y_G) を求める。実際の解析では画像中心を中心とした 600 pixel × 600 pixel の領域を重心計算に用いる。重心計算領域内の総ピクセル数を N とする。

$$x_{G} = \frac{\sum_{n=1}^{N} I_{A,n} x_{n}}{\sum_{n=1}^{N} x_{n}} , \quad y_{G} = \frac{\sum_{n=1}^{N} I_{A,n} y_{n}}{\sum_{n=1}^{N} y_{n}}$$
(3.5)

求めた重心座標 (x_G, y_G) から半径 r方向に、全光量が入ると思われる十分離れた半径 r_{100} をとり、その半径 r_{100} の円の内部に含まれる光量 $I_{A,100}$ を求める。この光量 $I_{A,100}$ を反射光の総光量とする。反射光の総光量の 80 % は $I_{A,80}$ と表され、このときの円の半径は r_{80} である。 D80 を求めるため、 $4\pi r^2 dr$ という微小シェルを考える。dr = 1 pixel とし、この微小シェルに含まれる光量を半径方向に足し合わせていく。そして、光量の 80 % を含む $I_{A,80}$ となるときの半径 r_{80} を求める。この半径 r_{80} の 2 倍、つまり直径が D80 となる (図 3.5)。

実際の解析画像に際しては、 r_{100} は 750 pixel と設定した。しかし解析領域は有限である ために重心座標によっては 750 pixel を確保できないことがある。なので実際には、半径 750 pixel の円を考えたときに、その円内に該当する解析領域内のピクセルの総和が $I_{A,100}$ とした (図 3.6)。



図 3.5: D80 の算出方法の模式図 [10]

図 3.6: 実際の解析画像での D80 の算出 反射像の重心が少し中央左によっているため 左端のところは総光量に含まれていない。

3.2 三光精衡所での 2f 測定

現在製作を依頼している三光精衡所内には 2f 法装置が設置され、鏡生産直後の初期段階 評価として測定が行われている。三光精衡所では、3.1.1 でも述べたように反射像が最小と なる位置 (曲率半径 R) とその前後 0.5 m の位置 (R±0.5 m) の計 3 点で測定している。三光 精衡所の方に 3 点での ON 画像と OFF 画像を撮影していただき、そのデータを我々が受け 取り解析を行い、各分割鏡の結像性能を求める。その結果をもとにあまりにも性能の悪い鏡 ははじくことで、生産される分割鏡の品質を管理している。

3.2.1 三光精衡所工場内に製作された 2f 実験装置

LST の分割鏡はその焦点距離が 28 m から 29.2 m となっているため 2f 法を用いた測定 となると少なくとも 60 m 程度のスペースを確保する必要がある。幸いにも三光精衡所の工 場内にこのスペースを確保することができた。そこで、3.2.1 でも述べたように、光源とな る LED、反射像を写すためのスクリーン、反射像を撮影するためのデジタルー眼レフカメ ラを準備して 2f 実験装置を製作した。以下に工場内に製作した 2f 実験装置の詳細を示す。

表 3.1: 三光 2f 実験装置の機材とその設定 [10]

機材名 (型 or 材質)	パラメータ	設定値
LED(OSRAM : LED SUPERSTAR PAR16 50 25°)		
スクリーン (テフロン製)		
カメラ (Canon : EOS 60D)	シャッタースピード	$1/5,1,3.2~{ m s}$
	絞り数値 (F 値)	6.3
	ISO(CMOS センサー感度)	100
	画素数	5184×3456
		$(5202 \times 3465)^1$
レンズ (Canon : EF-S55-250mm f/4-5.6 IS II)	焦点距離	$250.0~\mathrm{mm}$



⊠ 3.7: LED 右上:消灯状態 (OFF)、右下:点灯状態 (ON)。 周囲の光が入らぬよう布で覆っている。



図 3.8: スクリーン [10]

¹FITS データに変換後のピクセル数

光源となる LED には OSRAM 社製の LED SUPERSTAR PAR16 50 25°を使用している (図 3.7)。5 W でハロゲンランプ 50 W に相当する非常に明るい光源であり、約 60 m 離れ た鏡にも十分な光が届く。

スクリーンは、テフロン製のものを使用し、周囲を布で覆ったボックス内に設置すること で周りからの余計な光が入ることを防いでいる(図3.8)。スクリーン上部にはメジャーが貼ら れており、解析 pixel サイズと実際の長さの対応づけに用いられる。またボックスにはキャ スターがついていてボックスごと自由に移動できるので、反射像が最小となる位置にスムー ズに動かすことが可能である。

カメラは、Canon EOS 60D に望遠レンズである EF-S55-250mm f/4-5.6 IS II を取り付け 使用した。画素数は 5184×3456 画素と申し分ない数である。絞り値 (F 値) は、6.3 に設定 し、シャッタースピードは、1/5 秒、1 秒、3.2 秒の 3 種類で撮影を行う。ISO は 100 と最 も低い数に設定している。ISO とはデジタルカメラにおいて CMOS イメージセンサーの電 気信号の増幅を表している。これを落とし感度を下げることにより、電子回路内の自由電子 の不規則な熱振動によって生じるノイズ (暗電流ノイズと呼ばれる)の影響を抑えている。

3.2.2 測定結果

測定

各機材の位置精度はそのまま曲率半径に効いてくるため、巻尺を使用し、曲率半径の誤差 が 15 cm 以内となるように決定している。LED を点灯し、鏡から反射した像がスクリーン 上に写るように鏡の向きや傾きを調整した後、像が最小となる位置(曲率半径 R)を決定す る。像が最小となる位置が決まれば、スクリーンから 3 m 離れた位置に三脚に取り付けた カメラを設置し、ON 画像を撮影する(図 3.9)。撮影は全てマニュアル撮影にて行う。3 種類 のシャッタースピードで ON 画像を撮影した後、LED を消灯し、同様に OFF 画像を撮影 する。ON と OFF の画像撮影は、像が最小の位置から前後 0.5 m でも行われ、計 3 点の位 置で分割鏡の作る反射像の測定を行う。



図 3.9: 各機材の位置

図 3.9 を見て分かるように、スクリーンを配置する 2f 側のところには、従業員の方の出入 リロが設けられていて窓から外の光が差し込んできてしまう。そのため差し込んできた光は 床に反射し、スクリーンに当たってしまう。この影響を避けるため、窓に暗幕やダンボール 等を張ったり (図 3.10)、日が沈んだ夜間に測定を行う。



図 3.10: 暗幕の有無による影響

結果

三光精衡所に製作した 2f 実験装置を使って、実際に No.70 から No.75 まで (No.73 は除く)の分割鏡について測定を行った。鏡の番号は製造された順に付けられている。No.70 について、反射像最小位置の 3 種類のシャッタースピードで撮影された画像を解析した結果を 例として以下に示す (図 3.11, 3.12, 3.13、表 3.2)。



図 3.11: No.70 (1/5 秒)の解析結果



図 3.12: No.70 (1 秒)の解析結果



図 3.13: No.70 (3.2 秒)の解析結果

表 3.2: 各画像のシャッタースピードと D80

シャッタースピード [秒]	D80 [pixel]
1/5	278
1	278
3.2	286

図 3.11, 3.12, 3.13 において、下段の 2 枚は解析画像をカラーコントアで表したもの (左) と z 軸を光量で表したもの (右) であり、上段はその x 軸射影 (左) と y 軸射影 (右) となって いる。また表 3.2 は解析で求めた各シャッタースピードでの D80 の値である。

まず、図 3.13 に着目してみると、右下の三次元表示で光量の先端がつぶれてしまってい ることが見てとれる。これは撮影画像がサチュレーションしてしまっているためである。サ チュレーションとは、カメラが光量として記録できる値の範囲 (ダイナミックレンジ)以上の 光がピクセルに入ってきたために起こる現象で、そのピクセルの値はダイナミックレンジの 上限値が記録される。サチュレーションを起こした画像では、その部分での正確な値が記録 できないため正確な D80 を評価することはできない。

よって、評価に用いることが出来る画像は、1/5 秒と1 秒の画像データということになる が、シャッタースピードの長い1sの画像データの方がより正確な D80 を評価できる。こ れはシャッタースピードが長い方が、反射像とノイズとの比(S/N比)が良くなるためで、反 射像の周囲に広がったより細かな薄い光の広がりまで捉えることができるためである。この 反射像の裾にあたる薄い光の部分をいかに評価できるかで正確な D80 が求まる。

しかし実際に解析した画像を見てみると、3枚の画像に共通して、上段右の y 軸射影の画 像で一部乱れているのがわかる。これは、3枚の画像に共通して見てとれる。この原因は、 画像撮影の際に反射像とスクリーンに貼ってあるメジャーが近すぎたために解析領域内にメ ジャーが映り込んでしまったことによる。図 3.11の二次元カラーコントアの画像において、 その姿が確認できる。メジャーが映り込んでいることで全体の総光量に影響を及ぼすので、 このメジャーを除いた解析領域で解析を行う必要がある。

再解析

先ほどの No.70 の 1 秒の画像データについて、メジャーを除いた新たな解析領域を設定し 再解析を行った結果について示す。解析領域は 1500 pixel ×1500 pixel から 1050 pixel ×1500 pixel に変更した。またそれに伴い、最適化のためにとっていた上部 200 pixel のバックグラ ウンド領域は外してある。

表 3.3: 再解析による D80 の変化

再解析前	再解析後	
278 pixel	276 pixel	



図 3.14: No.70 (1 秒)の再解析結果 左が再解析前で、右が再解析後。メジャーが切り取られていることが確認できる。

以上のように解析領域を変更することにより、メジャーの影響を取り除いた再解析を行う ことができ、より正確な D80 を求めることができた。以下にメジャーの影響を取り除き解 析を行った No.70 から No.75 までの結果を表 3.4 にまとめる。

鏡	曲率半径 [m]	露光時間 [秒]	最適化係数 A	D80 [pixel]	$D80 \ [mm]^2$	注釈
No.70	56.35	1/5	1.00049	280	28.0	
		1	1.00067	276	27.6	
		3.2	1.01251	284	28.4	サチュレーション
	55.85	1/5	1.00016	378	37.8	
		1	1.00183	378	37.8	
		3.2	1.00166	380	38.0	
	56.85	1/5	1.00033	340	34.0	
		1	1.00323	336	33.6	
		3.2	1.0067	336	33.6	
No.71	56.35	1/5	-	-	-	画像データ破損
		1	1.00374	276	27.6	
		3.2	-	-	-	画像データなし
	55.85	1/5	1.00241	378	37.8	
		1	1.00233	378	37.8	
		3.2	1.00974	368	36.8	
	56.85	1/5	0.999939	346	34.6	
		1	1.00187	348	34.8	
		3.2	1.00963	350	35.0	

表 3.4: No.70 から No.75 の解析結果 (No.73 は除く)

表は次ページに続く

鏡	曲率半径 [m]	露光時間 [秒]	最適化係数 A	D80 [pixel]	$D80 \ [mm]^2$	注釈
No.72	55.85	1/5	1.00006	284	28.4	
		1	1.00043	284	28.4	
		3.2	1.00325	294	29.4	
	55.35	1/5	1.0004	380	38.0	
		1	1.0017	378	37.8	
		3.2	1.00526	380	38.0	
	56.35	1/5	-	_	-	画像データ破損
		1	1.00185	378	37.8	
		3.2	1.00786	380	38.0	
No.74	56.00	1/5	1.00132	278	27.8	
		1	1.00931	284	28.4	
		3.2	1.02465	300	30.0	
	55.50	1/5	1.00055	386	38.6	
		1	1.00324	408	40.8	
		3.2	1.00745	400	40.0	
	56.50	1/5	0.999923	382	38.2	
		1	0.999462	360	36.0	
		3.2	1.01023	388	38.8	
No.75	57.175	1/5	1.00092	346	34.6	
		1	0.997414	318	31.8	
		3.2	1.00837	328	32.8	
	56.675	1/5	1.00096	460	46.0	
		1	1.00092	428	42.8	
		3.2	1.02139	478	47.8	
	56.675	1/5	_	-	-	画像データなし
		1	-	-	-	画像データなし
		3.2	-	-	-	画像データなし

各鏡の反射像が最小位置 (曲率半径 R) で撮影した各露光時間 (データのないもの、破損したものを除いた) での D80 の平均をとると、表 3.5 のようになり、全ての鏡について D80 は 仕様要求値である 33.2 mm 以下を満たしていることがわかる。

	No.70	No.71	No.72	No.74	No.75
R [m]	56.35	56.35	55.85	56.00	57.175
D80 [mm]	27.8	27.6	28.7	28.7	33.1

表 3.5: 曲率半径 R での D80 の平均値

 $^{^{2}}$ 撮影画像からメジャーの値を読み取り導出した 1 pixel = 0.1 mm で計算

考察

解析領域を調節することにより、それぞれの撮影位置での D80 を求めることができ、表 3.5 で示したように各分割鏡の生産直後の初期段階での評価を行うことができた。ここで初 期段階での評価と表現しているのは、ここでの結果はあくまで納品前の評価であり、分割鏡 の性能を決定できるほど詳細な評価までは行えていないからである。分割鏡の詳細な評価が 行えていない理由として以下のことが挙げられる。

- 測定点が 3 点と少ない
- バックグラウンドが十分に暗くない
- 光量が全て入るような解析領域を確保できていない
- ヒューマンエラーによるデータの取り忘れ

一つ目の測定点が3点と少ないことに関しては、従業員の方に分割鏡を製作している傍ら で時間を割いてもらい撮影を依頼しているので、初期段階での評価では3点でも十分であ る。しかし、目視による最小位置の位置決めであるため、反射像の光のピークが鋭いところ に合わせてしまうといった目のバイアスがかかってしまい、本当に D80 が最小となる位置 かどうかはわからない。実際にピークが潰れ、反射像が少し広がった場合でも D80 で計算 した場合には小さい値であるということもある。また、主鏡面を構成するために曲率半径が 56 m から 58.4 m と異なる分割鏡を配置するために、その分割鏡がどれくらい曲率半径の範 囲であれば D80 が要求を満たしているかを知る必要がある。これがわかると分割鏡を主鏡 面に配置する際により最適な配置をすることができる。よって、測定を3点から増やすこと でより詳細な曲率半径の決定を行いたい (図 3.15)。



図 3.15: 測定点を増やすことによる詳細評価

二つ目のバックグラウンドが十分に暗くないことに関しては、表 3.4 で示したように、3.2 s での撮影では A = 1.01 から A = 1.02 と 1 % から 2 % の ON と OFF での差があり、1 s でも 0.1 % 以上の差がある。この 0.1 % の違いは、ピクセル値がカメラのオフセット値で ある 2048 だったとすると 1 pixel では 2 count 程度であるが、1500 pixel × 1500 pixel の 解析範囲を考えると、総光量として 4.5×10^6 count も変化してしまう。よって、この最適 化係数 A の値は 1.001 (= 0.1 %) 以下 に抑えるのが理想である。しかし、三光精衡所の工 場内で測定を行っているために致し方ない部分である。本当に十分な暗さで行うとなると、 夜中に測定を行ってもらうことになってしまう。これは現実的な解決方法としては厳しいも のがある。そこで、我々は東京大学宇宙線研究所で 60 m の空間の確保が出来そうであるた め、そこに新たな 2f 実験装置を組み立てることにした。詳細については、3.3 以降で述べる ことにし、そこでバックグラウンドについても詳しく述べることにする。

三つ目の光量が全て入るような解析領域を確保できていないことに関しては、光源がスク リーンの中心からあまりに外れた位置であったり、光源がメジャーにあまりに近いことが 原因である。反射光以外の影響を受けてしまうため解析領域を狭めねばならないが、それに よって反射光の裾の部分をしっかり捉えきれず、十分に評価できていない可能性がある。反 射光をスクリーンの真ん中で捉えればよいだけであるが、鏡の向きや傾きの調整はなかなか 難しい。そこで、まずメジャーを現在のスクリーン上部からスクリーンの右端に設置するこ とにした。解析領域はその制限が画像の縦方向のピクセル数から来ているため横方向ではい くらか余裕があるためである。

四つ目のヒューマンエラーによるデータの取り忘れは、マニュアル撮影で行っているため 引き起こることが考えられる。これは人の手によって撮影を行っている以上なくならないも のであるため、撮影の自動化を図るなどの対処が必要となる。

以上、四つの問題点を克服し、より詳細な分割鏡の評価を行うために以下の改良を行った。

• PC 制御による画像の自動撮影

画像の取り忘れを防ぐとともに、カメラに触れることなく撮影ができるので、露光 時間が違っても常に同じ画角で撮影ができ HDR (High Dynamic Range) 合成³などの 応用も考えられる。

- 解析プログラムの高速化
 以前の解析プログラムでは、一組の画像を解析するのに 3、4 分かかってしまっていたところを精錬することにより、約 20 秒程度にまで短縮。
- 東京大学宇宙線研究所に新たな 2f 実験装置を設置 より暗く安定した測定環境での分割鏡の詳細評価。

また、解析プログラムの精錬、PC 制御での自動撮影を組み合わせることにより、PC で撮 影しながら、撮影した画像をすぐに解析できるようになり、測定の効率が格段に上がった。 そして、その技術を組み込むことで、東京大学宇宙線研究所での効率の良い詳細評価を実現 する。また、現在の三光精衡所での 2f 法にもフィードバックをかけることで、より効率の 良い初期段階評価も実現する。

³HDR (High Dynamic Range) 合成は、今回の 2f 法の本質的な改良ではないため本文中に載せることは省略するが、付録にてその詳細について述べることにする。

3.3 東京大学宇宙線研究所での 2f 測定

三光精衡所工場内で検定のために用いられていた 2f 法による分割鏡の結像性能評価であ るが、その測定環境を整えることは容易ではない。そのため三光精衡所での測定では、望遠 鏡主鏡面に最適な配置をするために必要な分割鏡のパラメータを正確に与えられるほど詳細 な評価はできていない。

そこで、我々は東京大学宇宙線研究所に新たな 2f 実験装置を製作し、設置した。東京大 学宇宙線研究所での測定では、三光精衡所工場内よりも暗い空間で測定することができ、ま た問題がある箇所が見つかればすぐに装置の改良が施すことができる。このように測定に対 してこれまでよりも自由が利くようになり、分割鏡の詳細な評価が可能となった。

以下では、東京大学宇宙線研究所での 2f 測定を行うにあたり、これまでの測定・解析に おいての改良点や新 2f 実験装置の製作、そして評価の結果について述べる。

3.3.1 測定·解析の効率化

3.2.2 で述べたように、まずは PC 制御による画像の自動撮影と解析プログラムの高速化 によって、測定・解析時間を短縮し、作業効率の向上を図った。

PC 制御による画像の自動撮影

これまでのカメラのマニュアル撮影では、ヒューマンエラーによる画像データの取り忘れ やカメラ位置のずれ、カメラ設定の変更が起こってしまう可能性が考えられる。そこで PC とカメラを USB ケーブルで繋ぎ、PC 制御によって撮影を行うことで、これらの可能性を 失くすことを目指した (図 3.16)。

PC 側からカメラを制御するために gPhoto2[25] と呼ばれるフリーソフトを使用した。この gPhoto2 では、対応するカメラの設定から撮影までを制御することが出来る。



図 3.16: USB 接続によるカメラの PC 制御

これまでの解析プログラムでは、一組の画像を解析するのに 3、4 分の時間を要してしまっ ていた。これでは今後の分割鏡の大量生産に対して効率良く測定を行うことができない。こ れほど時間がかかってしまっていた原因は、解析プログラムがその行程によって複数のプロ グラムからなっており計算結果を逐一データを書き出したり、読み込んでいたためである。 そこで、出来る限りデータの書き込みや読み込みを減らし、複数のプログラムを統合する ことにより、解析時間を大幅に短縮することに成功した(図3.17)。現状では、一組の画像 の解析に要する時間は約 30 秒程度にまで抑えられている。



図 3.17: 解析プログラムと解析行程の統合による高速化

これらを組み合わせることにより、現状では一カ所で撮影をして、次の撮影箇所にスクリーンと移動している間にバックグラウンドジョブとして解析を行えるようになり、測定・解析時間を大幅に短縮することが出来た。またその場ですぐに解析結果を確認することが出来るため、再撮影をする必要があるかを判断することが出来ることも重要である。この一連の測定・解析の流れを図 3.18 に示す。



図 3.18: 測定・解析のフローチャート

3.3.2 東大宇宙線研用 2f 実験装置の製作

東大宇宙線研に製作した 2f 実験装置の各機材について述べ、表 3.6 にまとめる。基本的に 三光精衡所内に製作した 2f 実験装置を模して製作した。

光源 (LED)

光源となる LED には、Lightning EVER 社の MR16 GU10 LED Bulbs (Warm White) を 使用した。この LED は GU10 という口金の型であるため口金変換アダプタを使用し E26 口金に変換してソケットに取り付けた (図 3.19)。



🕱 3.19: LED



また LED 発光部分には半導体素子が 3 つ取り付けられているが、スポットに構造が見えてしまうことを避けるため、図 3.20 で示すように穴の空いたブラックシートで覆った。

図 3.20: ブラックシートで覆った状態

スクリーン

スクリーンは、三光精衡所のものと同様にテフロン製のものを使用した。テフロン板の大 きさは 30 cm × 30 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出来 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 サイズと実際のスケールを合わせるためのメジャーが貼ってある。また三脚 にキャスター付きの台を取り付けることで機動性を確保した。 カメラ

カメラ本体は Canon EOS Kiss X5 を使用し、レンズには Canon EF-S55-250mm f/4-5.6 IS II を使用した。さらにレンズフード Canon ET-60 を取り付けた。今回使用する Canon EOS Kiss X5 は、三光精衡所で使用している Canon EOS 60D とほぼ変わらない性能をもっ ており、画素数も同じ 5184×3456 画素である。

距離測定用の的

それぞれの測定機器の鏡からの距離を測る際にレーザー距離計を用いるが、鏡に直接レー ザーを当てても正しく測定できないので、収納コンテナの右下の部分に測定用の的を取り付 けた (図 3.21)。この的は鏡面から 6 cm 手前側の位置に取り付けられている。



図 3.21: 距離測定用の的

表 3.6: 東大宇宙線研 2f 実験装置の主な機材

機材名	型 or 材質
LED	Lightning EVER : MR16 GU10 LED Bulbs (Warm White)
スクリーン	プラポート:テフロン
カメラ	Canon : EOS Kiss X5
レンズ	Canon : EF-S55-250mm f/4-5.6 IS II
レンズフード	Canon : $ET-60$
レーザー距離計	BOSCH : GLM 80

カメラの撮影の際の各設定値 (F値、ISO、レンズ焦点距離) は三光精衡所のものに合わせた (表 3.1)。ただし、シャッタースピードはサチュレーションを起こさないように様々な値 での撮影を行った。

3.3.3 試験測定

新たに製作した 2f 実験装置について実際に測定がどの程度のものなのか、そして今後の 詳細な評価に向けて必要な装置の改良点や測定に関する情報を得るために、東京大学宇宙線 研究所に納品されている鏡を用いていくつかの試験測定をした。測定の様子について簡単に 述べた後、それぞれの試験の内容、結果について述べる。

測定の様子

図 3.22 で示したように測定場所は、東京大学宇宙線研究所 6 階の廊下を使用しており、人通りも少なく、暗く安定した測定環境が整っている。

図 3.23 から見て分かるように、スポットの最小位置を目視により決定した後に一定間隔で 目印となるテープを地面に貼っている。撮影の時はこの目印に合わせてスクリーンを移動す る。一方で、光源は最初に位置を決めた後はその位置から動かさない。よって、分割鏡の曲 率半径としてはスクリーンを動かした間隔の半分の間隔で測定していることになる。



図 3.22: 測定場所



図 3.23: 測定の様子

試験 1:新 2f 実験装置の動作および性能確認

今回新しく東京大学宇宙線研究所の廊下に製作した 2f 実験装置について、まずは動作お よび性能の確認を行い、この新たな環境で測定が可能かどうかを調べた。測定場所が廊下と いうこともあり天井には蛍光灯がついているが、影響を及ぼすであろう装置の頭上付近の 2 箇所の蛍光灯 (図 3.24) は外し、人通りの少ない夜間に測定した。光源に取り付けるブラック シートの穴の大きさは直径 5 mm のものを使用し、鏡は No.75 を使用した。測定点は三光 精衡所と同じ測定範囲の反射像の最小位置 (曲率半径 R) の前後 0.5 m (R±0.5 m) の間を 0.1 m 間隔の計 11 点で行った。







図 3.25: No.75 D80 最小位置でのスポット 図 3.26: No.75 微小シェル光量と半径の関係



図 3.27: No.75 の 11 点測定結果

図 3.25 は、解析により得られた反射像である。右側の上下の絵がスポット光量をカラーコントアで表現したもので、上が線形、下が対数で表示してある。左側の上下の絵はそれぞれの光量を各軸に射影したもので、上が X 軸、下が Y 軸に射影してある。

図 3.26 は、重心位置から微小シェルを半径方向に 1 pixel ずつ広げていった場合の微小シェル内に含まれる光量をプロットしたものである。赤線は微小シェル光量の積分値が 80% 以上になる直前の半径を表しており、この 2 倍の数値、つまり直径が D80 なる。青破線は光量が 0 の線であり、R100 として定義した 750 pixel に向かうにつれて反射像の光量がないことがわかる。

図 3.27 は、3 種類のシャッタースピードでの 11 点測定の結果である。青線が 1 秒、赤線 が 0.8 秒、緑線が 3.2 秒の結果である。横軸は曲率半径で、縦軸は D80 に相対するピクセ ル数である。

試験2: 蛍光灯の影響と日中測定

結像性能の評価ではなるべく暗く安定したバックグラウンド環境下での測定が望ましい。 東京大学宇宙線研究所での 2f 測定は工場内とは違い、バックグラウンド光となるものがほ とんど廊下を照らすための蛍光灯によるものだと考えられる。この蛍光灯の影響と日中測定 が可能かどうかを調べた。測定結果を表 3.7 に示す。表中の蛍光灯 、蛍光灯 は図 3.24 に 対応する。また、前述の試験 1 での結果を夜間測定の比較として記述する。

表 3.7: 蛍光灯の影響による D80 の変化 (使用した鏡: No.75)

点灯状況			シャッ	ピード		
蛍光灯	蛍光灯		0.8 秒	1.0 秒	3.2 秒	
		1回目	332	338	342	
		2 回目	344	300	348	
×		1回目	348	348	344	
		2 回目	344	348	340	
×	×	1回目	348	346	338	
		2 回目	344	342	338	
<夜間測定> $R = 57.236$ m						
×	×		318	324	324	
u	·			単位:	pixel	

<日中測定> R = 57.190 m

試験の結果、蛍光灯を外すことによる有意な差はみられなかった。しかし、これは逆にい えばそれだけ ON の撮影時と OFF の撮影時との差がないために、もともとの蛍光灯による バックグラウンド光は画像を差し引くことでその影響を取り除けているともいえる。ただ最 適化係数が同じ場合、バックグラウンド光量の多い OFF 画像であるとそれだけ影響が大き くなるので、蛍光灯は 2 本とも外し、バックグラウンド光量の少ない OFF 画像で撮影する べきである。 日中と夜間との測定では 20 pixel 程度の差がみられる。曲率半径の違いによる部分もある が、これは約 2 mm の差となるため D80 の評価をする上では大きすぎる差である。そのた め装置の改良を行った後に再度試験を行うことにした。

試験 3: 穴のサイズによる D80 の違い

LED を覆う穴の空いたブラックシートであるが、2f 法では光源は点光源であることが望まれるため穴のサイズは小さいほど良いが、小さくしすぎると光量が足らなくなってしまう。 ここでは 5 mm と 10 mm の穴の空いたブラックシートを用いて D80 の違いを調べた。結果を表 3.8 に示す。

シャッタースピード	5 mm 穴	10 mm 穴
0.8 秒	334	354
1.0 秒	336	352
3.2 秒	334	348
		[単位: pixel]

表 3.8: 穴のサイズによる D80 の違い (使用した鏡: No.75)

測定結果として、10 mm 穴のブラックシートで覆ったほうが、14 pixel から 20 pixel ほど D80 は大きいという結果が得られた。これは穴のサイズが大きくなったことで、光量が増え、反射像の裾の広がりの部分を正確に測られたことによると考えられる。



 $\Phi:5 \text{ mm}$

Φ:10 mm

図 3.28: マスクの違いによるスポットイメージの違い 右の 10 mm 穴でのスポットイメージの方が裾の部分がはっきりとみえる。

試験4:測定点間隔の検討

今後どれくらいの精度で曲率半径を決めていくかを考えるためにどれくらいの測定点を設 けるべきかを考えなければならない。図 3.27 で示した No.75 の鏡を用いて行った 11 点測定 の結果と、日にちと鏡が変わってしまうが、No.76 の鏡を用いて R±0.5 m の間を 0.25 m 間 隔の計 5 点で測定した結果 (図 3.31) を用いて検討した。



図 3.29: No.76 D80 最小位置でのスポット 図 3.30: No.76 微小シェル光量と半径の関係





図 3.31 で示したように、5 点での測定でも D80 が最小となる点を捉えられそうであるが、 その曲率半径は 0.25 m までの精度でしか決められない。一方、11 点測定では 0.10 m の精 度で決められるが時間がかかり効率が悪い。曲率半径は 0.20 m 程度、焦点距離にして 0.10 m 程度の精度で求められることが望まれるため、今回の 2 つの測定から今後宇宙線研にお いては R \pm 0.45 m の範囲を 0.15 m 間隔で計 7 点の測定で評価することにした。

試験 5:ON と OFF 画像の撮影方法

ON と OFF の画像を撮影するときに LED の点灯状態をスイッチによって切り替えてい る。しかしこれでは ON と OFF の撮影の環境が変わってしまっているため BG に変化を 及ぼす可能性がある。撮影の環境を変えずに撮影するには LED は点灯させたまま、鏡から の反射光がスクリーンに写らないようにすべきである。そこで、図 3.32 で示すように、鏡の 前に暗幕を張ることにより鏡からの反射光がスクリーンに写らないようにした。図 3.33 に測 定パターンの模式図、表 3.9 に試験結果についてまとめる。



図 3.32: 暗幕の設置



図 3.33: ON と OFF の撮影パターンの模式図

撮影パターン

- :LED をON/OFF
- : LED を ON/OFF + 光源とスクリーンの間に暗幕
- : LED を ON + OFF 撮影時に鏡に暗幕
- : LED を ON + OFF 撮影時に鏡に暗幕 + 光源とスクリーンの間に暗幕
- :LED を ON + OFF 撮影時に鏡と光源の間に暗幕 + 光源とスクリーンの間に暗幕

表 3.9: OFF の測定パターンによる D80 の違い (使用した鏡: No.70)

D80 [pixel]	310	304	308	310	360
最適化係数 A	1.00101	1.00204	1.0004	1.00078	1.03999

表 3.9 を見てわかるように暗幕を使用した撮影の最適化係数 A の値は小さく、ON 画像と OFF 画像のバックグラウンドの差が小さいことがわかる。ただ 以外は D80 の値として はほぼ変わらぬ値であるため、今後は基本的には LED の ON/OFF 切り替えで撮影を行う。

各試験の総括

宇宙線研究所における各試験測定から得られた結果と考察を以下にまとめる。

- 測定は暗く安定した状態で行え、新しく製作した 2f 実験装置での詳細な測定が可能。 ただし装置の改良は要する。
- 夜間測定は問題ないが、日中測定では夜間に比べバックグラウンド光が多く測定に影響を与える可能性があるため、装置の改良後に再度測定を行う。
- LED を覆うブラックシートの穴のサイズは 10 mm のものを使用することでスポットの裾の部分を正確に評価できる。
- 測定は反射像の最小位置 (焦点距離 R) から前後 0.45 m (R±0.5 m) を 0.15 m 間隔で 計 7 点で行う。これは曲率半径の決定精度の 0.20 m (焦点距離で 0.10 m) を満たす。
- ON と OFF の画像撮影はスイッチによる LED の ON/OFF 切り替えで行う。

3.3.4 実験装置の改良

光源 (LED) の変更

光源を三光精衡所で使用しているものと同じ OSRAM 社製の LED SUPERSTAR PAR16 50 25°に変更した。この LED は図 3.34 をみてわかるように半導体素子が 1 つだけであるが、 3 つの半導体素子からできていた図 3.20 の LED と同じく、消費電力 5 W でハロゲンラン プ 50 W に相当するという非常に明るいものである。そのため、LED を覆うブラックシートも直径 4 mm 穴のものを使用することにした。塩化ビニルパイプの片側にブラックシート を張り、パイプの中に LED を挿入することで穴の空いた部分以外から光が漏れることを防 いだ。改良した LED 光源の写真を図 3.35 に示す。



図 3.34: LED SUPERSTAR PAR16 50 25 ° 左:ディフューザーが付いた状態、真ん中:ディフューザーを外した状態、右:正面



図 3.35: 改良した LED 光源

スクリーンの改良

スクリーンに写るバックグラウンド光を減らすために図 3.36 のように暗箱で周りを覆う ことにした。暗箱は段ボールで製作し、中を黒ラッカースプレーで塗装した。正面部分は段 ボールの強度を保つために縁 2.5 cm を残し切り取ってある。



図 3.36: 暗箱で覆ったスクリーン

スクリーンとカメラの連結

撮影の際にスクリーンを動かすわけであるが、それに伴いカメラも 3 m 離れた位置に動 かす必要がある。メジャーを使い毎回確認を行っていたが、効率が悪く、 常に一定の画角 であるとは限らない。そこで、図 3.37 のようにスクリーンとカメラをアルミ製のレールを用 いて連結した。これにより、スクリーンを動かすときに連動してカメラも動かせるようにな り、常に同じ画角で撮影が可能となった。また連結レールの溝の部分にカメラとスクリーン 裏に設置した PC を繋ぐ 5 m の USB ケーブルを収納してあるのでケーブルを踏むことなく スムーズな移動が可能となっている。



図 3.37: スクリーンとカメラの連結

これらの実験装置の改良を経て、かなり効率の良い詳細な測定への準備が整った。現在で は鏡1枚あたりおよそ 30分で計7点の測定が可能である。図3.38に改良した2f実験装置 を示す。



図 3.38: 改良した 2f 実験装置

3.3.5 夜間と日中での測定:再試験

3.3.3 の試験 2 の日中測定に関してであるが、実験装置の改良を行ったので再度測定を行った。使用した鏡は No.70 で夜間は 7 点測定、日中は 3 点で測定した。結果を図 3.39 に示す。



図 3.39: 改良した 2f 実験装置での夜間と日中の測定結果 (使用した鏡: No.70)

D80 最小位置での差は 8 pixel であった。この結果をスクリーン脇に取り付けたメジャーの値を読み、pixel サイズを実スケールに換算したものを図 3.40 に示す。



図 3.40: スケール換算後の D80

その結果、D80 最小位置での差は 0.02 mm で他の 3 点でも 0.1mm 以下で結果が一致した。よって、実験装置の改良により、日中においても夜間と同様に測定を行うことが可能であることを確認した。

3.3.6 バックグラウンド比較

宇宙線研究所での 2f 測定では、日中においても測定が可能であることがわかった。これは 暗く安定した測定環境で測定が行えているためである。実際にどれほど測定環境が改善した のかを調べるためにバックグラウンド光の比較を行った。比較に用いた OFF 画像は以下の 通りで、全ての測定で共通のシャッタースピード 1 秒のデータを使用した。結果を図 3.41、 3.42、表 3.10 に示す。

使用した OFF 画像 (シャッタースピードは1秒)

2015/5/13 16:15 三光精衡所

2015/6/17 15:18 東京大学宇宙線研究所 暗箱なし

2015/6/17 20:59 東京大学宇宙線研究所 暗箱なし

2015/8/27 15:56 東京大学宇宙線研究所 暗箱あり

2015/8/27 21:57 東京大学宇宙線研究所 暗箱あり

2015/6/17 22:26 レンズにレンズキャップを付けた状態 (ダーク画像)



図 3.41: 各バックグラウンドの光量カウントマップ



図 3.42: 各バックグラウンドの光量ヒストグラム

表 3.10: 各バックグラウンドの光量

Mean	2421	2136	2108	2097	2087	2048
RMS	22.65	10.57	9.145	9.12	8.578	6.82

のダーク画像で 2048 count の値があるのは元々のカメラのオフセット値にあたる。そ して RMS 値 6.82 count というのは CMOS センサーの電気的なノイズによる値であると考 えられる。

シャッタースピード 1 秒での撮影によると三光精衡所での測定ではバックグラウンド光 は、からを引いた分なので 400 count 程度存在する。一方で、現状の宇宙線研究所で の測定では、バックグラウンド光は もしくは から を引いた分なので 50 count 程 度である。シャッタースピードを 2 秒にしたとしても バックグラウンド光量は 100 count 程度であり、三光精衡所のバックグラウンド光の 1/4 である。したがって、現状での宇宙線 研究所での測定ではかなりバックグラウンド光を抑えられた測定ができている。

3.3.7 Cd33 の導入

Constant diameter (Cd) は、もともと Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法と 2f 法 の比較の際に、PMD 法の方が曲率半径が長めになるという結果について、それが PMD 法 のシステマティックエラーなのかを調べるために用いられたパラメータである。PMD 法と は、今後大量に生産される分割鏡の性能を効率よく高精度で測定するために導入した評価方 法であり、鏡の表面形状を測定し、得られた情報から光線追跡シミュレーションにより性能 を評価するものである。現在運用に向けての最終調整が進められている。PMD 法の詳しい 説明は 2013 年の馬場浩則氏の修士学位論文 [10] を参照していただくこととして割愛する。

Cd33

Constant diameter は、反射像に対し、その総光量の重心からある直径の円の内側に入る 光量を求め、最も光量が多くなる位置をその鏡の焦点距離とする評価方法である。この円の 直径を D80 の要求値に近い値である 33 mm に設定したものを Cd33 と呼ぶ。もともと曲 率半径を求めるために考えられた Cd33 であるが、これを 2f 法での解析に応用することに より、各測定点で直径 33 mm の円内に入る光量を求められるようにした。



図 3.43: Cd33 の追加

図 3.43 では、緑円が r₁₀₀ (半径 750 pixel)、黒円が D80、白円が Cd33 を表している。また、今回解析プログラムに Cd33 を組み込む改良を行った際に、各測定点での D80 の結果を放物線でフィッティングした結果も求められるようにした (図 3.44)。



図 3.44: 測定点での D80 と Cd33 のプロット図 横軸が曲率半径で、左縦軸が D80 [mm]、右縦軸が Cd33 [%] を示す。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、青点がその最小値である。 緑破線が総光量 (r₁₀₀ 円内の光量) の 80 % のラインで、緑点が各点での Cd33 の値である。

3.3.8 解析の安定性

3.3.7 で D80 と Cd33 の値を求めたが、D80 と Cd 33 の値がどれほど安定したものなの かを調べた。方法としては、解析に使用する画像データの最適化係数 A を強制的に変化させ て D80、Cd33 がどのように変化するかを求める。先行研究である馬場浩則氏が行った三光 精衡所の画像データでの結果 [10] では、図 3.45 で示すように、最適化係数 A が 0.1 % 変化 すると D80 は最小でも 23 pixel = 約 2.3 mm も変化してしまっていた。



図 3.45: 先行研究での最適化係数の変化と D80 の関係 (右:赤枠部分拡大図)[10]

これほど大きく結果が変化してしまうのは、バックグラウンド光が多いことが原因である と考えられる。しかし、現在東京大学宇宙線研究所で行っている測定では、3.3.6 で述べた ように三光精衡所に比べ、はるかに暗い環境での測定ができている。東京大学宇宙線研究所 で撮影した画像データを使用して調査した結果を図3.46、3.47 に示す。



図 3.46: 最適化係数の変化と D80 の関係 (右:赤枠部分拡大図)



図 3.47: 最適化係数の変化と Cd33 の関係 (右:赤枠部分拡大図)

図 3.46 から東京大学宇宙線研究所での測定では、D80 の変化量は最適化係数が 0.1 % 変 化するのに対して 10 pixel であり、実スケールで考えると 1 mm 以下の変化となった。こ れは評価精度である 1 mm を満たしていて、非常に安定した測定ができていることになる。

また、図 3.46 において D80 はその値が離散的に変化していることについては、D80 を求 める際に半径を 2 倍して求めているためこのような振る舞いをみせる。つまり解析の際のピ クセルサイズの限界に達している。一方で Cd33 はその円内に含まれる光量の割合で表して いるので連続的に変化している。よって D80 もさらに細かなピクセルサイズで見ることが できれば連続的に変化するものであると考えられる。

3.3.9 評価結果

様々な測定や実験装置の改良を行ってきた結果、東京大学宇宙線研究所での LST 用分割 球面鏡の 2f 法による結像性能の詳細評価の方法を確立することができた。

新しく製作した 2f 実験装置を用いて東京大学宇宙線研究所 6 階の廊下で No.70 から No.85 (No.73 は除く) までの計 15 枚の鏡の評価を行った。15 枚全ての鏡の評価結果は、付録のほうにまとめることにする。ここでは代表して、三光精衡所でも測定を行い、 3.2.2 で結果を示した No.70 から No.75 の鏡の評価結果について表 3.11 と図 3.48 から図 3.52 にまとめる。

	No.70	No.71	No.72	No.74	No.75
R (実測) [m]	56.04	56.28	55.58	55.89	57.24
D80 (実測) [mm]	29.09	30.78	29.01	27.02	31.80
R (Fit) [m]	56.07	56.21	55.53	55.88	57.20
D80 (Fit) [mm]	29.55	30.62	28.92	27.12	32.40

表 3.11: 宇宙線研究所での結像性能評価結果

No.70





No.71





No.72




No.74





No.75



図 3.52: No.75 測定結果

32.4

31.8

57.2

57

36

35

34

33

32

31[±]56.6

56.8

*

57.4

Radius of Curvature [m]

R: ^{57.24} m 57.20 m

75

70

65

60

55

¹50

Ж

57.6

3.4 東京大学宇宙線研究所 2f 実験装置の大型アップデート

分割鏡の結像性能の詳細評価が可能となった東京大学宇宙線研究所の 2f 実験装置である が、次の第4章で述べる反射率評価を行うにあたって、大幅な装置のアップデートを行った。 このアップデートによって結像性能評価においても精度の向上が確認できた。

以下では、2f 実験装置のハード面とソフト面でのアップデート内容、そして評価結果について述べる。また、PMD 法との比較結果ついてもまとめる。

3.4.1 アップデート:ハード面

光源 (LED) の変更

光源である LED の変更は、今回のアップデートの大きな変更点の一つである。3.3.4 で 光源の変更を行い、LED SUPERSTAR PAR16 50 25°という非常に明るい LED を使用して きたが、この LED は白色 LED で色温度が 2700 K のものであった。反射率評価では、300 nm から 550 nm での波長域で評価をしたいので、その波長域での LED を使用することに した。さらに、反射率評価を行うためには光源の光量が安定している必要があるが、これま での光源は、3.3.4 の図 3.35 を見てわかるように LED を塩化ビニルパイプ内に挿入し密閉 していたため熱がこもり、時間経過とともに光量が落ちることが確認された。このことにつ いて詳細は 4 章の反射率評価で述べることにする。

そのような背景もありながら、今回、反射率測定に向けての新たな LED として選択した のが、OptoSupply 社の OSB5XNE3C1S である (図 3.53)。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。図 3.54 で示すように放熱対策として LED をアルミヒートシンクに取り付けた。また、定電流ドラ イバーによって LED に流れる電流を安定させた。LED の変更による光量安定性の測定結果 は 4 章にて示す。



図 3.53: 新 LED : OSB5XNE3C1S



図 3.54: LED セットアップ

• LED モジュール製作

図 3.54 の LED セットアップをもとに、実験に使用するための LED モジュールを製作した。図 3.54 の LED セットアップとは一部変更点があり、電流をより安定なものにするために、ストロベリー・リナックス社の電流値可変型の LED 用定電流ドライバモジュールである CC1000EH に変更した (図 3.55)。



図 3.55: LED 用定電流ドライバモジュール : CC1000EH

LED モジュールを構成する部品は、セットアップで示した LED、アルミヒートシンク、 DC ジャック、LED 用定電流ドライバモジュールに加え、アルミヒートシンクと定電流ドラ イバモジュールの放熱を促進するための DC ファン、電流値と電圧値をモニタリングできる 電流・電圧デジタルパネルメータ、そして電源の切り替えをするためのスイッチである (図 3.57)。LED モジュールの外枠にはアルミケースを使用し、正面の光源からの光が出る部分 に直径 4 mm の穴が開けてある (図 3.56)。



図 3.56: LED モジュール正面の穴

各部品の配線を終え、完成した LED モジュールを図 3.57 に示す。スイッチは 2 種類あって、LED の ON/OFF スイッチと、DC ファンとモニター用の ON/OFF スイッチがある。 また、図 3.58、3.59 で示すように、さらに光の広がりをしぼるために 4 mm 穴のブラック シート付きのキャップと、三脚固定用の雲台を取り付けた。



スイッチ 電流・電圧デジタルパネルメータ

図 3.57: 完成した LED モジュール





図 3.58: ブラックシート付きキャップの装着

図 3.59: 三脚固定用雲台の装着



図 3.60: LED モジュールを点灯させた様子

カメラの変更

カメラ本体の変更

カメラ本体を Canon EOS Kiss X5 から Canon EOS 8000D に変更した。このカメラ本体 の変更での最大の違いは、CMOS イメージセンサーの違いである。Canon EOS 8000D に搭 載されている新 CMOS イメージセンサーは、Canon EOS Kiss X5 のものと同じ約 22.3×14.9 mm(APS-C サイズ)の大きさでありながら半導体素子の小型化により、有効画素数が約 2420 画素と 1.34 倍に増えている。これは撮影した画像の解像度が 1.34 倍向上していることにな る。よって、解像度が向上することで反射像をより細かく解析することができ、 D80 をさ らに精度よく求めることができる。

• カメラレンズの変更

カメラの変更に伴い、対応するレンズも Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS II から Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM に変更した。カメラレンズの変更による影響は、最大撮影倍 率の違いである。変更前の Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS II の 250 mm 時では 0.31 倍で あったのに比べ、変更後の Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM の 250 mm 時は 0.29 倍 である。つまり 250 mm での撮影画角は約 14 % ほど広くなる。実際に新しいカメラに両 レンズを取り付け比較をしたところ約 17 % 程度画角が広くなっていることを確認した (図 3.61)。先ほど、解像度が 1.34 倍向上すると述べたが、この撮影画角のことを考慮すると、新 しい 2f 実験装置の実質的な解像度の向上は、1.08 倍程度である。



図 3.61: レンズによる撮影画角の違い 左:Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS II 、右:Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM

3.4.2 アップデート:ソフト面

ハード面でのアップデートを受けて、測定・解析に関してのソフト面での様々な変更を 行った。

測定に関する変更点

測定では、光源を 470 nm の青色 LED に変更したことで、以前の白色 LED のときより も CMOS イメージセンサーの青色ピクセルの感度が上がり、シグナルが増えた。このシグ ナルが増えたことでシャッタースピードを早くすることができ、バックグラウンドノイズを 減らすことができた。

解析に関する変更点

● 解析領域および r₁₀₀ の変更

解析では、カメラの変更によって有効画素数が増えたために、解析に使用できるピクセル 数が増えた。そこで、図 3.62 に示すように解析領域を 2000 pixel × 2000 pixel 、重心計算 領域を 700 pixel × 700 pixel 、 r_{100} を 900 pixel にそれぞれ拡大した。



図 3.62: 解析領域、重心計算領域および r₁₀₀ の変更 左:これまでの領域と r₁₀₀、右:新たな領域と r₁₀₀

図 3.62 からわかるように、変更後のほうでは解析領域に対して r₁₀₀ のサイズが小さく設定してあり、多少重心がずれたとしても r₁₀₀ の円が解析領域内に収まるので総光量の取りこぼしはない。

• バックグラウンド領域の変更

これまでに 15 枚の鏡を測定してきたが、中にはスポットの裾の部分が解析領域ぎりぎり にまで広がっているものもある。そのような場合、3.1.2 の図 3.4 で示したように、周囲 200 pixel 幅のバックグラウンド領域にスポットの光が入ってしまい、バックグラウンドの最適化 に影響がでる。そこでバックグラウンド領域の取り方を図 3.63 のような取り方に変更した。





3.4.3 測定結果

2f 実験装置の大型アップデートをした後に、No.70、75、77、81の4枚の鏡の測定を行った。

カメラセットアップの違いによる D80 の差

3.4.1、3.4.2 で述べたようにカメラを変更したことにより、画像の画角が広くなり、それ に合わせて解析プログラムも変更した。これにより今までの画角では収まりきっていなかっ たスポット周辺に広がった薄い光も捉えられるようになった。この影響がどの程度のものな のかを調べるために 4 枚の鏡を測定するときに、No.70 では 7 点全てで新しいカメラセッ トアップ (EOS 8000D + EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM)と古いカメラセットアップ (EOS Kiss X5 + EF-S55-250mm F4-5.6 IS II)で撮影を行い、残りの No.75、77、81 の 3 枚では 目視により決めたスポットサイズの最小位置においては古いカメラセットアップでも撮影を 行った。光源は新旧ともにアップデート後の新 LED モジュールを使用しており、古いカメ ラセットアップに対応する解析プログラムでもバックグラウンド領域だけは図 3.63 で示した 取り方に変更した。測定の結果、表 3.12 に示すように全ての鏡で新しいセットアップによっ て撮影・解析した結果の方が古いセットアップに比べて D80 が 0.76 mm から 0.94 mm 大 きいという結果を得た。代表して 7 点測定を行った No.70 の結果も図 3.64 で示す。

鏡	新セットアップでの D80 [mm]	旧セットアップでの D80 [mm]	差分 [mm]
No.70	30.95	30.12	0.83
No.75	34.88	33.94	0.94
No.77	33.49	32.72	0.77
No.81	35.84	35.08	0.76

表 3.12: カメラセットアップの違いによる D80 の差



図 3.64: No.70 の各測定点での D80 の差

差の検証

カメラセットアップを変更したことによって D80 の値が約 1mm 弱程度大きくなってし まったことに関して、これがカメラセットアップの違いによるシステマティックエラーによ るものかどうかを調べるために検証を行った。

● 解析領域および r₁₀₀ の変更による影響

3.4.2 で述べたように、解析領域を拡大し、周辺に広がった光を捉えられたことで D80 が大 きくなったかどうかを調べるために、新しいセットアップで撮影した画像データを古いセッ トアップでの画角と同じになるよう解析領域をリサイズして解析した (図 3.65)。リサイズ の割合はメジャーから読み取ったスケールサイズをもとに行った。また、解析領域だけでな く r₁₀₀ もリサイズしたが、バックグラウンド領域はリサイズした画像のなかで同ピクセル数 とってある。結果を表 3.13 に示す。



図 3.65: 解析領域のリサイズ 赤枠で囲ってある部分はバックグラウンド領域

表 3.13: 解析領域リサイズ後の D80 の差

鏡	リサイズ後の D80 [mm]	旧セットアップでの D80 [mm]	差分 [mm]
	(リサイズ前からの変位量 [mm])		
No.70	30.58 (-0.37)	30.12	0.46
No.75	34.69(-0.19)	33.94	0.75
No.77	33.30(-0.19)	32.72	0.58
No.81	35.47 (-0.37)	35.08	0.39

解析領域および r₁₀₀ の大きさを古いセットアップのものと同じサイズに調整することで、 その差は約 0.5 mm 程度にまで縮まった。これは、新しい解析プログラムでの解析領域と r₁₀₀ を変更したことで周囲に広がった光もちゃんと捉えていたことを表している。逆にいえば、 古いセットアップに対応する解析プログラムでは変位量の分だけ光を捉えきれていなかった ことがいえる。

カメラとレンズの組み合わせによる違い

解析領域および r₁₀₀ を変更したことによる D80 のおよその変位量がわかったが、依然と して約 0.5 mm 程度の差がみられる。そこで、次はカメラとレンズの組み合わせによる D80 の違いについて調べた。No.70 と No.77 の鏡を使い、全 4 通りの組み合わせでの結果を表 3.14 に示す。EOS 8000D で撮影したものは新しい解析プログラムで、EOS Kiss X5 で撮 影したものは古い解析プログラムで解析した。表 3.14 では、「NewCamera: EOS 8000D」、 「OldCamera: EOS Kiss X5」、「NewLens: EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM」、「OldLens: EF-S55-250mm F4-5.6 IS II」として表記する。以降、NewCamera、OldCamera、NewLens、 OldLens と出た場合はこれらのこと指す。

鏡	Camera	NewCamera		OldCamera	
	Lens	NewLens	OldLens	NewLens	OldLens
No.70	D80 [mm]	31.20	30.78	30.72	30.32
	Scale(1 mm =) [pixel]	10.77	11.89	9.31	10.29
No.77	D80 [mm]	35.49	35.23	34.94	34.53
	Scale(1 mm =) [pixel]	10.82	11.92	9.33	10.31

表 3.14: カメラとレンズの組み合わせによる D80 の違い

表 3.14 からいえることとして、2f 実験装置の大型アップデート後にみられた 1 mm 弱の 差が、今回も No.70 と No.77 ともに確認することができた。そして、同じカメラに対して レンズを換えた場合に No.77 の NewCamera の場合を除いて、NewLens を取り付けたほう がコンスタントに 0.4 mm 程度 D80 が大きくなるという結果を得た。

レンズの歪みとシステマティックエラー

カメラとレンズの組み合わせにより D80 が変わっていることがわかり、また同じカメラ に対してレンズを換えた場合、NewLens のほうが OldLens に比べ、D80 が常に 4 mm 程度 大きいことがわかった。CMOS センサーを構成する撮像素子、つまり 1 pixel の大きさが変 わらないとすると、これはスケーリングをする際に画像の端に写したメジャーの長さを読み 取るときにその読み取った長さがレンズの歪みの影響を受けて実際の長さよりも引き延ばさ れててしまったことが考えられる。このレンズの歪みの影響で系統的に 4 mm の差が生じて しまうかどうについて調べた。方法は、図 3.66 で示すように PC 画面上に方眼紙を表示し、 それを実際にスクリーンを撮影するときのようにカメラで PC 画面を撮影する。その画像の 1 マスの大きさの変位量を求めることでカメラレンズの歪みを求めた。実際に撮影した画像 を図 3.67、3.68 に示す。



図 3.66: PC 画面上に写した方眼紙



図 3.67: NewLens (S55-250mm F4-5.6 IS STM) での撮影 格子の歪み等はみられない。



図 3.68: OldLens (EF-S55-250mm F4-5.6 IS II) での撮影 わずかであるが、外側になるにつれて格子が歪んでいるようにみえる。

図 3.67、3.68 で示した画像の RAW 画像を dcraw と ImageMagick によって FITS ファ イルに変換し、その FITS ファイルを ds9 で開き、1 マスの各頂点の座標を読み取ることで 1 マスの大きさを求めた。それを画像の各場所で行い、1 マスの大きさの変位量を求めた。 行った結果の全てについては、付録の方にまとめることにし、ここでは画像中心での大きさ とおよそメジャーの位置がくるであろう画像の右端での大きさについての結果を図 3.69 で 示す。



<EF-S55-250mm F4-5.6 IS II>



図 3.69: 画像の中心と右端での1マスの大きさの違い

レンズの歪みによる大きさの変位量を調べたところ、NewLens では 0.7 % ピクセルサイ ズが大きくなっていることを確認した。また OldLens では 2.2 % ピクセルサイズが大きく なっていた。実際に D80 を求めているのはほぼ画像中心あたりであるのでレンズの歪みは ほとんどないと思われる。つまり画像の右端に取り付けたメジャーの値を読み、スケール換 算するときはこの歪みの影響を考慮すべきである。表 3.14 で示した結果について、レンズの 歪みを考慮した結果を表 3.15 に示す。

表 3.15: レンズの歪みを考慮したカメラとレンズの組み合わせによる D80 の違い

鏡	Camera	NewC	amera	OldCamera	
	Lens	NewLens	OldLens	NewLens	OldLens
No.70	D80 [mm]	31.40	31.47	30.92	30.98
	Scale(1 mm =) [pixel]	10.70	11.63	9.25	10.07
No.77	D80 [mm]	35.72	36.02	35.17	35.28
	Scale(1 mm =) [pixel]	10.75	11.66	9.27	10.08

レンズの歪みを考慮したことで、同じカメラでレンズを換えて撮影した結果は、No.77 の NewCamera の場合を除き、0.1 mm 程度の差まで縮まった。また、NewCamera と OldCamera でみられる 0.5 mm 程度の差は、解析の際の r_{100} の違いなどを含んだシステマティックエ ラーであると考えられる。今後より詳細なレンズの歪みを調べる必要がある。 解析の安定性

今回のアップデート後の結果がどれくらい安定した結果であるかを 3.3.8 で行った方法を 使って調べた。結果を図 3.70、3.71 に示す。



図 3.70: アップデート後の測定結果での最適化係数の変化と D80 の関係 (右:拡大図)



図 3.71: アップデート後の測定結果での最適化係数の変化と Cd33 の関係 (右:拡大図)

アップデート後の結果では、最適化係数 A の値を -0.1 % から +0.1 % に変化させても D80 の値は最大で 8 pixel しか変化せず、アップデート前の 10 pixel の変化よりも小さく なったことから、より測定と解析が安定したことになる。ただ、この解析方法では最適化係 数 A は、画像が元々もつオフセットの値にも影響を及ぼすので、解析の安定性はわかっても バックグラウンドのみの変化には対応しない。そこで、アップデート後のオフセット値であ る 2047 を取り除いたバックグラウンドの変化のみに対応する方法での D80 の変化について も調べた。この時、最適化係数 A を A' として、3.1.2 の式 3.3 を次のように変更した。

$$A' = \frac{\sum_{m=1}^{M} (I_{ON,m} - オフセット値)}{\sum_{m=1}^{M} (I_{OFF,m} - オフセット値)}$$
(3.6)

そして、最適化係数 A'の変更に合わせ、式 3.4 も以下のように変更する。

$$I_{A',n} = (I_{ON,n} - オフセット値) - A' \times (I_{OFF,n} - オフセット値)$$
(3.7)

この式 3.7 がバックグラウンドのみの変化に対応した D80 の変化を表すことになる。その 結果を図 3.72、3.73 に示す。



図 3.72: バックグラウンドの変化と D80 の関係 (右:拡大図)



図 3.73: バックグラウンドの変化と Cd33 の関係 (右:拡大図)

バックグラウンドの変化のみに対応した D80 の変化の様子をみてみると、もとから 50 % 増加、もしくは減少したところで D80 は 6 pixel しか変化せず、1 mm 以下で安定している ことがわかった。

3.4.4 鏡の性能の安定性および測定の再現性

2f 実験装置を東京大学宇宙線研究所に設置し、測定を始めたときから今日に至るまでに1 枚の鏡について多いものでは、計5回の測定を行ってきた。その間に2f 実験装置の改良な どの測定の変化はあったものの、鏡の性能についてほとんど変化はみられておらず、測定の 再現性も確認できている。よって、2f 法による分割鏡の結像性能評価についてはほとんど確 立できたと考えられる。以下に今までで一番多くの測定を行った No.70の全測定結果をまと めたものを図 3.74 に示す。また、測定に関しての日時や測定においての変更点など特筆すべ き点をまとめたものを表 3.16 に示す。



図 3.74: 鏡の性能の安定性および測定の再現性

表 3.16: No.70 の測定日時および測定・結果に関する備考

	測定日	測定開始時間	測定・結果に関する備考	カメラ, レンズ
1回目	2015/06/18	23:45	光源:白色 LED スクリーンの暗箱無し	Old,Old
2 回目	2015/06/19	12.47	スクリーンの暗箱あり	Old,Old
3 回目	2015/10/15	17:00		Old,Old
4 回目	2015/12/03	18:35	2f 実験装置大型アップデート後	Old,Old
5 回目	2015/12/09	22:17	結果においてレンズの歪み補正	New,New

3.4.5 Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法による結果との比較

最後に 3.3.7 で少しだけ触れた PMD 法で得られた結果と現在の 2f 実験装置で得られた結 果の比較をした。結果を表 3.17 にまとめ、スポット形状を図 3.75、3.76、3.77、3.78 に示す。 比較の結果、曲率半径 R については PMD 法の方が 0.07 m から 0.28 m 長く求められて いるが、これは PMD 法の方が 2f 法に比べ長く出る傾向にあることは馬場修論においても 知られており、この差は、鏡の形状と 2f 法での人の目のバイアスによる影響であると考えら れている。D80 については、約 1 mm 程度で差が見られていて、評価精度である 1 mm の 精度で一致した結果である。スポットの形状も似た結果を得ており、薄く広がった部分も良 く再現できているように思える。ただ、像が左右逆転(あるいは上下逆転、もしくは両方) で見られているように思える。これは、像が結像したスクリーンをどちら側から見てい るかで左右逆転については説明でき、上下の逆転については測定のときの光源とスクリーン の高さの違いが関係しているのではないかと考えられる。今回の比較では、これまでの比較 結果に比べてはるかに良い一致を示しているため、今後実際の運用に向けて、PMD 法と 2f 法の系統誤差を含んだ更なる評価を進めて行きたい。

表	3.17:	2f 法と	PMD	法の比較
---	-------	-------	-----	------

		2		PMD		
	D80 [mm] (実測)	曲率半径 R [m] (実測)	D80 [mm] (Fit)	曲率半径 R [m] (Fit)	D80 [mm]	曲率半径 R [m]
No.70	31.2	56.08	31.0	56.02	31.2	56.26
No.75	34.6	57.33	34.5	57.32	33.3	57.58
No.77	33.0	56.69	33.1	56.70	33.2	56.76
No.81	35.1	56.46	35.4	56.47	35.7	56.74



図 3.75: 2f と PMD のスポット形状の比較 (No.70)







図 3.77: 2f と PMD のスポット形状の比較 (No.77)



図 3.78: 2f と PMD のスポット形状の比較 (No.81)

第4章 反射率評価

4.1 評価方法

分割鏡の性能として結像性能につぎ重要な反射率であるが、CTA の LST 用分割鏡では、 300 nm から 550 nm の波長域において 85 % の反射率が要求される。この波長域は地上で観 測されるチェレンコフ光の波長域である。2.3.2 で述べたスパッタリングでの表面コーティ ングにより、LST 用分割鏡では強固な鏡表面であると同時に 90 % 以上の反射率を達成し ていて十分に要求を満たすことが確認されている。ただ、この反射率は鏡の部分的な測定に よって求められた結果であり、実際に 1.51 m の一枚の鏡全体としてもつ反射率については 求められていない。これは鏡が巨大であるために今までは部分的にしか測定することができ なかったためである。

そこで、結像性能評価を確立した 2f 法を応用することで、一枚の鏡全体の反射率評価の 方法を確立することを目指した。その評価方法は、2f 法を応用したものであるため非常にシ ンプルな方法である。図 4.1 で示すように、鏡から 2f の位置に光源である LED を置き、鏡 に向けて照射する。そして、今まで 2f の位置に置いていたスクリーンを鏡の正面に配置し、 2f 法と同じくカメラによって撮影し、解析することで鏡に届く総光量を求める。つぎに、2f 位置にスクリーンを移動し、同様にカメラによって撮影し、解析を行う。このとき求まる光 量というのは、鏡によって反射された光の光量である。これら求めた光量を比較することに より、その分割鏡が一枚の鏡としてもつ反射率を求める。



①鏡に届く LED からの光の総光量 ②鏡によって反射され 2f 位置に結像する光の総光量 ②/① = 鏡全体の反射率

図 4.1: 2f 法を応用した反射率評価方法の模式図

4.2 測定結果

4.1 で述べた方法で反射率を求められるかを調べるために実際に測定を行った。このときの測定はまだ 2f 実験装置の大型アップデート前で、光源は 3.3.4 で述べた白色 LED であ り、カメラも Canon EOS Kiss X5 + Canon EF-S55-250mm F4-5.6 IS II であった。

鏡に届く光源 (LED) の光の総光量の測定

鏡に届く光源 (LED) からの総光量を調べるため、図 4.2 に示すように鏡の前で、真ん中、 右側、左側と 3 カ所でスクリーンを置き、カメラによって、ON と OFF の撮影を各 8 枚ず つ行った。真ん中で 3 回測定を行っているのは、光源の電源を切り替えてから時間をあけて 撮影した場合で光量の変化がみられるかを調べるためである。画像の解析領域である 1500 × 1500 pixel の総光量から 1 pixel あたりの光量を算出した。結果を表 4.1 に示す。エラー は 8 枚測定の測定値の標準偏差。



図 4.2: 鏡側での総光量測定

表 4.1: 鏡に届いた光源 (LED) からの光量

 0	DN	O	FF	ON-OFF	撮影タイミング
Ave	σ	Ave	σ	Ave $\pm \sigma$	
 13.4059	0.131184	12.4218	0.100471	0.9841 ± 0.1652	点灯後 15 分待って撮影
14.7653	0.056528	13.2436	0.112351	1.5217 ± 0.1258	点灯後すぐに撮影
13.8631	0.116014	12.3034	0.126341	1.5597 ± 0.1715	点灯後すぐに撮影
14.4546	0.144761	12.9084	0.137456	1.5462 ± 0.1996	点灯後すぐに撮影
13.3255	0.242316	12.8121	0.093399	0.5134 ± 0.2597	点灯 30 分待って撮影

[単位:count/pixel]

2f 位置に結像した反射像の光量の測定

反射率を調べる鏡には No.70 を使用した。2f 位置でスクリーン上に結像される反射像を 撮影し、解析を行う際の r_{100} (半径 750 pixel) 円内の総カウント数を鏡によって反射された 光量であるとした。その結果、2f 位置側に反射された光量は、 1.64868×10^8 count であった。

反射率計算

反射率を求めるための計算式は以下の通りである。

反射率 =
$$\frac{2f \, d\Xi \, c \Xi \, c$$

鏡の反射面積は $1.958 \times 10^6 \text{ mm}^2$ であるが、鏡を収納しているラックによって陰になって いる部分を考慮すると、実際の有効反射面積は $1.80855 \times 10^6 \text{ mm}^2$ である (図 4.3)。



図 4.3: 鏡の反射面積

で光量を求めた際のスケールは 1 mm = 10.35 pixel であった。この値を用いて鏡の反 射面積を pixel 単位に変換すると、約 1.937×10^8 pixel となる。以下表 4.2 に、 で求めた真 ん中での測定結果を使い、式 4.1 を用いて求めた反射率の結果を示す。

表 4.2: No.70 の反射率

鏡前測定位置	│ 光量 [count/pixel]	反射率 [%]	撮影タイミング
	0.9841 ± 0.1652	86.5 ± 16.8	点灯後 15 分待って撮影
	1.5462 ± 0.1996	55.0 ± 12.9	点灯後すぐに撮影
	0.5134 ± 0.2597	166 ± 50.6	点灯 30 分待って撮影

表4.2をみてわかるように、鏡前で測定した光量にかなり差があることから反射率をうまく 求めることができなかった。このように光量に差がみられたことについては、表中にも示し たが LED の点灯からの経過時間に伴い光量が低下したためである。このことから光源を安 定させることが反射率測定を行うにあたって非常に重要であることがわかった。また、現在 の測定ではバックグラウンドに対して有意に光量を捉えているとは言い切れず、そのエラー は 10 % 以上にもなる。反射率の評価を確立するためには、このエラーをできる限り小さく しなければならない。

4.3 再測定に向けた試験測定

4.2 で述べたように、反射率評価の測定方法を確立するために、まずは光源を安定させる 必要がある。4.2 で使用した LED の光量が 30 分ほどで 1/3 にまで低下してしまった原因 は、3.3.4 の図 3.35 をみてわかるように LED を塩化ビニルパイプで覆ったため熱がこもっ てしまったためだと考えられる。LED は熱に弱く、放熱対策をしっかりとらなければなら ない。そこで新たに、3.4.1 の図 3.54 や図 3.57 で示した放熱対策をした LED 光源を製作し た。また、LED の波長が 470 nm となったことで要求で示された波長域のものとなった。さ らに 470 nm の青色 LED になったことでベイヤー配列での青色ピクセルの感度が高くなる ので、S/N 比が向上すると考えられ、光量測定のエラーが小さくなることが期待される。

以下では、そのような新しい光源の性能を調べるとともに、再測定に向けて行った試験内 容とその結果について述べる。

4.3.1 光量安定性試験

室内近距離光量低下測定

新たに製作した放熱対策を施した LED 光源の光量が安定しているのかを調べるため、図 4.4 に示すようなセットアップを組み測定を行った。測定方法は、光源から 55 cm 離した位 置にスクリーンを置き、LED を照射する。光が照射されたスクリーンを同じ 55 cm 離れた 位置から 2f 実験装置で使用していたカメラで撮影する。撮影は LED 点灯から、0、1、3、5、 10、20、30、45、60、90 分後の計 10 回で、各撮影で 8 枚ずつ画像を取得した。また、これ まで使用してきた白色 LED 光源でも同様の測定を行った。試験結果を図 4.5、4.6 に示す。



図 4.4: 室内での光量安定性試験セットアップ

左が試験セットアップで、黄色で書かれた光源セッティング位置に測定したい LED を 合わせた後スクリーンに向けて照射する。右が光の当たったスクリーンの様子である。







図 4.6: 白色 LED の光量変化

試験の結果、放熱対策をとった新しい青色 LED では、点灯から 10 分の間で光量が急激 に低下し、その後光量低下しつつも、安定していくというような結果が得られた。90 分間で の光量の低下は約 5 % ほどであった。それに対してこれまで使用していた白色 LED では、 点灯から 30 分後ぐらいまでほぼ同じ割合で光量が低下していき、その後安定に向かうこと ことがわかった。また 90 分間での光量の低下は約 20 % ほどであった。よって、放熱対策 をとることで LED の光量の低下量を抑えられ、かつ早い時間で安定することがわかった。 また、新たな LED では電源供給部分に定電流ドライバーを採用したことも光量の安定につ ながっていると考えられる。 先ほどの試験で新たな LED では光量が安定していることがわかったので、次に約 60 m 離れた距離からの照射でどれくらいの光が届くのかを測定した。測定場所は、茨城大学理学 部 S 棟 6 階の研究室前の廊下で行った。測定方法は、光源とスクリーンの距離は約 60 m 離 し、LED 点灯から 1、3、5、10、15、20、30 分後の計 7 回で 8 枚ずつ画像を取得した⁴。こ の 60 m 測定でも青色 LED と白色 LED の両方を測定した。結果を図 4.7、4.8 に示す。



Blue LED

図 4.7: 青色 LED 60 m 先での光量



図 4.8: 白色 LED 60 m 先での光量

図 4.7、4.8 から新しい青色 LED の方が今までの白色 LED に比べ、1 pixel あたりのカウ ント数が多いことがわかった。両者ともに 点灯から 15 分のところで光量が大きく変化して

⁴このときのカメラのシャッタースピードは 2.0 秒

いるのは、測定をしていた時の環境が変化(おそらく廊下の電気がついたり消えたりしたこ とによる光量の変化)したことによるものであると考えている。また、測定を開始する前と 測定を終了後、LED を交換している間の計 3 回バックグラウンド光の光量測定も行った。 結果は、測定を開始する前が11.3316 count/pixel で交換の時が13.4287 count/pixel、測定 終了後が13.4986 count/pixel であった。この2 count ほどの差は、測定結果の15 分の結果 で見られた測定環境の変化によるものと同程度である。このバックグラウンド光の光量のこ とを考えると、図4.8 の 30 分後での白色 LED の光量はほとんどバックグラウンド光量と同 じである。それに対して、新しい青色 LED では 10 count 以上有意に検出することができ ている。これは、カメラのベイヤー配列の青色ピクセルの感度が高くなったため S/N 比が 向上したからだと考えられる。実際に新しい青色 LED を使用した結像性能試験ではシャッ タースピードを早める必要があったので S/N 比が向上したことは確認できている。

東京大学宇宙線研究所 60 m 測定

茨城大学での測定で新しい青色 LED は約 60 m 先でも有意に検出することができたので、 実際に東京大学宇宙線研究所 6 階の廊下で同様の測定を行った。このときの光源は、3.4.1 の図 3.57 の新 LED モジュールである (カメラは EOS Kiss X5)。光源とスクリーンの距離は 約 56 m で、LED 点灯から、0、1、3、5、8、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55、60 分後の計 16 回で 4 枚ずつ撮影した。そしてこのときはカメラのシャッタースピードは 0.5 秒で撮影した。また、LED の点灯前と 点灯後 10 分間隔でバックグラウンド光量の測定も 行った。光の OFF は暗幕を使用し行った。結果を図 4.9 に示す。



Blue LED & BG

図 4.9: 宇宙線研 60 m 光量安定性試験

測定の結果、宇宙線研の 60 m の試験でもそれほど急激な光量低下はみられず、またバッ クグラウンド自体も非常に安定していることがわかった。全 7 回のバックグラウンド光量測 定の平均をとり、各 LED の光量測定点からその量を引き、LED からの光量だけを取り出し た結果を図 4.10 と表 4.3 に示す。エラーは 4 枚撮影の統計誤差。



図 4.10: 60 m 測定での LED 光量 (ON-BG) の時間変化

経過時間 [min]	LED 光量 (ON-BG) [count/pixel]
0	2.379 ± 0.0430
1	2.425 ± 0.0789
3	2.309 ± 0.0662
5	2.387 ± 0.0650
8	2.188 ± 0.0505
10	2.234 ± 0.0274
15	2.217 ± 0.0557
20	2.273 ± 0.0697
25	2.168 ± 0.0405
30	2.299 ± 0.0314
35	2.322 ± 0.0303
40	2.190 ± 0.0482
45	2.185 ± 0.0309
50	2.306 ± 0.0623
55	2.301 ± 0.0446
60	2.219 ± 0.0565

表 4.3: LED 光量の時間変化

バックグラウンド光量の平均: 3.162 ± 0.0184 count/pixel

結果から約 60 m 先に届く光量は 60 分間を通して 2 count 強程度であることがわかった。 茨城大学では 10 count 以上で検出できていたが、その時のシャッタースピードは 2 秒で、 今回の測定では、結像性能試験に合わせカメラのシャッタースピードを 0.5 秒 に早くした ことで、検出できる光量が低下している。そのため、図 4.10 をみてわかるようにその値は、 8 分以降 10 % 程度でばらついていることがわかった。

4.3.2 LED 指向性試験

4.3.1 で光源を変えたことによって光源が安定していることを確認した。そこで、次は LED の指向性についての測定を行った。LED はその放射角度によって光量が減少するという指 向性をもつことが知られている。この指向性を調べるために、以下では 2 通りの方法から LED の指向性を見積もることにした。

鏡前位置別測定

1 つ目の方法は、4.2 の図 4.2 のように鏡の前に置くスクリーンの位置を変えて測定することである。光源の位置、向きを変えないので LED の指向性を測定していることになる。また、床と壁からの反射成分がスクリーンに写る可能性があることが 4.3.2 の測定のときに気がついていた。そこで、床だけの影響についてだけであるが、ダンボールで作った壁を床に配置して測定を行った。測定は 2015 年 12 月 3 日と 12 月 4 日の 2 日間行い、画像は各位置で4 枚ずつ撮影した。結果を表 4.4、4.5 にまとめる。表中の測定値のからまでは図 4.2 の番号に対応する。また、として床のダンボール壁を外した結果も合わせてまとめる。

表 4.4: スクリーン位置を変えることによる LED 指向性の測定 (12 月 3 日分)

	ON		OFF		ON-OFF
	Ave	σ	Ave	σ	Ave $\pm \sigma$
	5.347	0.1162	3.068	0.1189	2.279 ± 0.1663
	5.768	0.1139	3.166	0.0973	2.602 ± 0.1498
	5.237	0.0912	3.046	0.0521	2.191 ± 0.1050
	5.279	0.0641			
,	5.924	0.1334	3.036	0.0514	2.888 ± 0.1430

[単位:count/pixel]

表 4.5: スクリーン位置を変えることによる LED 指向性の測定 (12月4日分)

	ON		0	\mathbf{FF}	ON-OFF
	Ave	σ	Ave	σ	Ave $\pm \sigma$
	5.945	0.0470	3.014	0.0605	2.931 ± 0.0766
	5.930	0.1629	2.967	0.0733	2.963 ± 0.1786
	5.610	0.1937	2.961	0.0986	2.649 ± 0.2174
	5.808	0.1100	2.896	0.0476	2.912 ± 0.1199
,	6.301	0.0339	2.901	0.0743	3.400 ± 0.0817

[単位:count/pixel]

光源方向別測定

2 つ目の方法は、スクリーンは鏡の真ん中に固定したまま、LED の向きを変えることである。LED の向きの変え方は、図 4.11 に示すようにまず LED モジュールが固定された三脚の各脚の位置にビニールテープで印をつける。このとき A のところに、1 cm 幅のビニールテープ(黄)を基準(青)の右側と左側に 2 カ所ずつ貼った。そして、C を固定したまま A をこの 1 cm 幅に合わせて動かすと LED の向きが約 1° 動いたことになる(詳しくは図 4.17)。



図 4.11: LED の向きを変えるための三脚各脚の位置の決定

測定は、先ほどの鏡前位置別測定と同じ 2015 年 12 月 3 日と 12 月 4 日の 2 日間行い、 画像は各角度で 4 枚ずつ撮影した。3 日は廊下にダンボール壁を置いた状態のみで、4 日は ダンボール壁を置いた状態と置いていない状態の両方で測定を行った。さらに、4 日の測定 ではスクリーンを鏡前ではなく図 4.14 のように 2f 側に置き、LED の向きを変えることで結 像するスポットの総光量の変化も測定した (図 4.15)。それぞれの測定の結果について表 4.6 から表 4.9 にまとめる。

• 2015 年 12 月 3 日測定結果

スクリーン位置:鏡正面 ダンボール壁:あり 三脚伸長:2 段階中1 段階伸長 ON 撮影:各角度で4枚 OFF(BG) 撮影:角度測定の前と後の2回(4枚)

	Ave	σ	
BG(1)	3.192	0.153	
	5.354	0.058	
	5.595	0.038	
	5.578	0.106	
	4.970	0.075	
	4.528	0.094	
BG(2)	3.100	0.175	
[単位: count/pixel]			

表 4.6: LED 指向性測定 (12 月 3 日分)



• 2015 年 12 月 4 日測定結果 (1)

スクリーン位置: 鏡正面 ダンボール壁: あり 三脚伸長: 2 段階中 2 段階伸長 ON、OFF(BG) 撮影: 各角度で 4 枚

 ON		OFF		ON-OFF
 Ave	σ	Ave	σ	Ave $\pm \sigma$
 5.800	0.043	2.853	0.135	2.947 ± 0.142
5.669	0.018	2.880	0.051	2.789 ± 0.054
5.532	0.135	2.941	0.115	2.591 ± 0.177
5.743	0.071	2.806	0.053	2.937 ± 0.089
 5.548	0.109	2.819	0.079	2.729 ± 0.135

[単位:count/pixel]

表 4.7: LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (1))



図 4.13: 測定角度 (2)

● 2015 年 12 月 4 日測定結果 (2)

スクリーン位置:鏡正面 ダンボール壁:なし 三脚伸長:2 段階中 2 段階伸長 ON、OFF(BG) 撮影:各角度で 4 枚

 ON		OFF		ON-OFF
 Ave	σ	Ave	σ	Ave $\pm \sigma$
 6.329	0.138	2.942	0.057	3.387 ± 0.149
 6.283	0.111	2.888	0.076	3.395 ± 0.135
 6.075	0.060	2.775	0.068	3.300 ± 0.091
 6.093	0.104	2.957	0.088	3.136 ± 0.136
 5.904	0.093	2.985	0.096	2.919 ± 0.134

[単位:count/pixel]

表 4.8: LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (2))



• 2015 年 12 月 4 日測定結果 (3)

スクリーン位置:2f (57.565 m) 三脚伸長:2 段階中 2 段階伸長 使用した鏡:No.75 ダンボール壁:あり ON、OFF(BG) 撮影:各角度で1枚



表 4.9: LED 指向性測定 (12 月 4 日分 (3))



図 4.14: 測定模式図



図 4.15: 測定角度とスポットイメージ

⁵ON-OFF はバックグラウンドの最適化は行わずに 1:1 で差し引き。

指向性についての考察

2 つの方法で測定を行い、得られた結果から LED の指向性について考察する。

まず鏡前位置別測定では、図 4.16 に示すようにスクリーンを動かすことでその角度は約 0.4° 動かしたことになる。そして 3 日の測定では、一番光量が多かった左側から真ん中に動 かすことで 12.4 % も光量が落ちてしまったが、12 月 4 日の測定では 1.1 % の低下であっ た。このことから 3 日の測定では、そもそも LED の光量の最も多い向きが鏡に対して向け られていなかった可能性が考えられる。

しかし、本当に注目すべきなのは、床の反射成分が 0.5 から 0.6 count も存在することで ある。ダンボール壁を置いたことにより床の反射成分はその影響をある程度抑えられたが、 壁には何も対策をしていないため、その反射成分はこの測定では取り除き切れていないと考 えられる。つまり、スクリーンの位置を変えることで壁からの反射成分の量も変わるので、 得られた結果から LED の光量の指向性のみを考えることは非常に難しい。このことは、図 4.17 に示すもう 1 つの LED の向きを変え測定した、光源方向別測定の 3 日の測定結果と 4 日の測定結果 (1) についても同様のことが言える。

そこで、4日の測定結果(3)から指向性について考えてみる。測定結果(3)では2f側にス クリーンを置いているため、床や壁に反射した成分が鏡に届いたとしてもその成分が鏡の反 射によってスクリーンに写る可能性はほぼないと考えられる。その結果、図4.18に示すよう にLEDの指向性はピークから1 cm (0.85°)動かして1.5 %程度の低下で、2 cm (1.7°)で は7 %程度の低下であると考えられる。

また、LED モジュールの作成の際にそもそもの LED のピークの部分が箱の真正面に来 ていない、もしくは箱の前方に取り付けた暗幕付きキャップの穴の設置のずれなどによって LED の指向性が左右対称に現れない可能性があることについても留意せねばならない。

以上のように LED の指向性について考察したが、今後もう少し精度の高い測定によって 指向性を評価する必要がある。下に今回の指向性試験の結果と考察についてまとめる。

・LED 指向性試験の結果と考察のまとめ・

- 鏡前位置別測定でも光源方向別測定でも鏡前にスクリーンを置き、約 60 m 先の LED からの光量を測定した結果は 1 pixel あたり 2 から 3 count 程度 (壁からの反 射成分含む)。
- 床に設置するダンボール壁のあり・なしによって調べた床の反射成分が 1pixel あたり 0.5 count (15 %) 程度。
- 鏡前に配置したスクリーンに写る光量から LED の指向性を見積もるのは、測定状況によって変化する床や壁の反射成分がどの程度スクリーンに写るかを見積もる必要があるため困難。
- 床や壁からの反射成分がほとんどなく、考慮しなくてもよい 2f 側にスクリーンを 配置した光源方向別測定から LED の指向性を考えると、ピークから 1 cm (0.85°) 動かして 1.5 % 程度の低下で、2 cm (1.7°)では 7 % 程度の低下。
- LED モジュール製作の過程で光量のピークに対して指向性が左右対称でない可能 性がある。







図 4.17: LED の向きによる指向性 (鏡側スクリーン)





図 4.18: LED の向きによる指向性 (2f 側スクリーン)

4.4 再測定結果

4.3 で行った再測定に向けた試験測定の結果、大型アップデートでの新たな LED モジュー ルは、光量の低下を抑えられた LED 光源であることがわかった。さらに、指向性の試験か らも大体ではあるが LED の指向性がわかった。そして何より重要なこととしてわかったの は、光源から約 60 m 離れている鏡の前にスクリーンを配置して測定を行った場合は、床や 壁からの反射成分がスクリーンに写ってしまい、その影響を完全に取り除いて測定を行うこ とは非常に困難であるということである。また、60 m 先で検出できる光量は、非常に少なく 系統誤差を見積もることが難しいことである。そこで、光量を測定する方法の見直しを行っ た。以下では、その光量測定方法の変更についてと見直した測定方法での反射率評価の結果 について述べる。

4.4.1 測定方法の変更

これまでの測定では、図 4.19 に示すようにスクリーンを鏡前に配置して、60 m 先に配置 した LED 光源からの光量を測定し、LED 光量の時間経過による安定性やまた指向性につい て調べ、鏡の反射面に届く総光量を求めていた。しかし、この方法では床や壁による反射成 分もスクリーンに写ってしまうため、正確な光量を求められていなかった。また、検出され る光量が 1 pixel あたり 2 から 3 count 程度と非常に少なく、実際に反射率を求めるときに 系統誤差の影響が大きく効いてくることになる。そこで、光量の測定方法の見直しを行い、 2 つの方法をとることで系統誤差を小さくして反射率を求めることにした。



図 4.19: これまでの測定方法と問題点

まず1つ目は光量の安定性を測定する方法である。光量の安定性については、4.3.1 で述 べたように新たな LED モジュールでは、光量の時間経過による低下量は以前に比べ抑えら れていることがわかった。しかし、この測定では検出される光量が少ない上に、壁からの反 射成分も含んだ結果となっているので、LED の光量変化に伴い壁からの反射成分も変化して しまうため測定値が 10 % 弱でかなりばらついた結果になってしまっていると考えられる。 そこで、4.3.2 の図 4.14 のようにスクリーンを 2f 側に配置することで床や壁の反射成分を取 り除くことでき、時間経過に伴う LED からの光のみの変化量を測定できるようにした。

そして 2 つ目が鏡に届く総光量の測定である。これは 1 つ目の方法で測ることはできな い。しかし見直し前の方法では床や壁の反射成分が写ってしまう。そこで、図 4.20 で示すよ うに光源である LED から徐々に距離をとりながら光量を測定していき、その低下量から実 際に鏡までの距離で測定されるであろう光量を推測することにした。この方法では、理想的 には距離の二乗に反比例して低下していくことが予想される。実際に次の 4.4.2 で距離の二 乗に反比例して低下していくことを確認している。



光軸上で①23と徐々に光源から距離を遠ざけて測定。 理想的には距離の二乗の反比例で光量が低下。

図 4.20: 新たな光量測定方法模式図

4.4.2 再測定

4.4.1 で見直した測定方法で実際に測定を行った、光源の安定性の再試験、約 60 m 先の鏡 に届く光量推測試験の結果についてまとめる。

光量安定性再試験

測定方法は、4.4.1 で述べたように 2f 側にスクリーンを配置し、鏡によって反射された光 が作る反射像の光量を測定した (図 4.21)。使用した鏡は No.77 で比較的スポットの広がりが 小さいものである。反射像の光量は図 4.22 に示すように D80 よりもやや大きめの半径 400 pixel 円内に入る光量とした。測定した時間は、LED 点灯から 0、1、3、5、8、10、15、20、 25、30、35、40、45、50、55、60 分後の計 16 回である。またバックグラウンドについても 点灯前と点灯から 10 分間隔の計 7 回の測定を行った。結果を図 4.23、表 4.10 に示す。エ ラーは 4 枚撮影の統計誤差。



図 4.21: 2f 側のスクリーンに写る反射像の光量測定



図 4.22: 測定する反射像の光量範囲





経過時間 [min]	LED 光量 (ON-BG) ×10 ⁶ [count]
0	403.27 ± 0.34
1	403.15 ± 0.20
3	402.64 ± 0.45
5	402.23 ± 0.16
8	401.25 ± 0.76
10	401.00 ± 0.45
15	400.04 ± 0.32
20	399.77 ± 0.33
25	399.34 ± 0.39
30	399.81 ± 0.22
35	399.67 ± 0.35
40	399.42 ± 0.43
45	398.99 ± 0.41
50	399.60 ± 0.27
55	399.24 ± 0.40
60	399.17 ± 0.50

表 4.10: LED 光量の時間変化 (再試験結果)

バックグラウンド光量の平均: $(2.74 \pm 0.04) \times 10^6$ count

測定の結果から新たな方法による光量安定性試験では、光量の低下は1%まで抑えられており、また点灯15分後からは非常に安定した状態となり測定値のばらつきも小さくなっていることがわかった。このことから実際に反射率を求める時の系統誤差を小さくすることができたと考えられる。

光量推測試験

図??で示すように、光源である LED と約 60 m 先にある鏡との光軸上にスクリーンの中 心がくるように置き、LED からの距離を徐々に遠ざけていき、距離による光量の低下量か ら鏡の反射面に届く光量を推測する。理想的には距離の二乗に反比例して光量が減少するこ とが予測される。

この方法で最も重要なことは、床や壁から反射する光をスクリーン上に写さないことであ る。図 4.25 に示すようにスクリーン前から光源の方を見てみると、床や壁からの反射成分は かなり存在することが確認できる。そこで図 4.26 に示すように壁に暗幕を張り、床にはこれ まで何度か使用してきたダンボール壁を置くことでそれぞれの反射成分がスクリーンに写ら ないようにした。

測定は、LED から 10、15、20、25、30 m の 5 点の位置で行った。これ以上の距離では暗 幕やダンボール壁による反射光の遮光ができないためである。各距離で撮影は、ON、OFF ともに 4 枚ずつ撮影した。測定結果を表 4.11 と図 4.27 に示す。


図 4.24: 光量推測試験

図中の赤円で囲った部分にみられる光が床や壁の反射成分が鏡に反射された光であり、光量 安定性再試験のようにスクリーンを2f側に置いた場合には反射光が写らないことがわかる。



図 4.25: スクリーンから見た床と壁の反射光

図 4.26: 暗幕とダンボール壁による遮光

測定位置 [m]	光量 [count/pixel]
10.819	60.0655 ± 0.171162
16.036	27.2502 ± 0.150131
20.926	16.4017 ± 0.123046
25.826	11.7972 ± 0.533351
32.179	7.04822 ± 0.186599

表 4.11: 光量推測試験の測定位置と光量



図 4.27: 光量推測試験結果 (1)

測定から得られた 5 点の結果をプロットし、Fitting を行った結果、光源から鏡までの距離である 56.83 m 先での光量は 2.16045 count/pixel であった。しかし、図をみてわかるように 25 m の結果だけ外れているために χ^2 /ndf の値が大きい。そこで、25 m の点を外し、再度 Fitting を行った。結果を図 4.28 に示す。



図 4.28: 光量推測試験結果 (2)

再 Fitting の結果、 χ^2 /ndf の値は小さくなりより尤もらしい値を得ることができた。この結果を用いると 56.83 m 先での光量は 2.16247 count/pixel であった。これらの結果を表 4.12 にまとめ、次の 4.4.3 では、再 Fitting の結果を用いて反射率を求めることにする。

表 4.12: Fitting 結果の違い

	25 m の点を含む場合	25 m の点を含まない場合
56.83 m での光量 [count/pixel]	2.16045	2.16247

4.4.3 反射率評価結果

4.4.2 で示した、新たな測定方法により鏡の反射面に当たっていると推測される1 pixel あ たりの光量を求めることができた。この光量は床や壁の反射成分を含まない LED からの光 だけのものであると考えられる。これにより反射率を求めるための分母は決定することがで きた。次は、分子に相当する鏡からの反射光量である。4.2 で述べた時の方法と全く同様に して反射光量を求めるが、一つ違う点として、大型アップデートを行った後であるため、解 析を行う際の r₁₀₀ は 750 pixel から 900 pixel に変更されている。またバックグラウンドの 最適化等も変更している (詳しい変更内容は 3.4 を参照)。

今回は No.70、75、77、81、85 の 5 枚の鏡を測定した。各鏡で ON と OFF の撮影は 4 回ずつ行っている。結果を表 4.13 に示す。

	反射光量 ×10 ⁶ [count]
No.70	392.443 ± 2.11928
No.75	402.092 ± 0.68044
No.77	403.438 ± 1.42945
No.81	392.894 ± 1.38485
No.85	398.012 ± 1.04329

表 4.13: 各鏡の反射光量

以上求められた鏡からの反射光の総光量を用いて、4.2 の式4.1 より求めた反射率の結果 を表4.14 に示す。大型アップデートによってスケール換算の値は変わっており、このときに 使用したスケール換算の値は1 mm = 10.7 pixel である。また、今回求めた反射率は系統誤 差をまだしっかりと見積もれていないため、4 枚撮影の統計誤差のみ付けてある。

	2f 法での測定 [%]	部分測定 [%]	差 [%]
No.70	87.6 ± 0.54	92.1	-4.5
No.75	89.8 ± 0.17	93.2	-3.4
No.77	90.1 ± 0.35	93.3	-3.2
No.81	87.7 ± 0.35	91.8	-4.1
No.85	88.9 ± 0.26	89.4	-0.5

表 4.14: 反射率評価結果

今回測定を行った 5 枚の鏡では、全ての鏡で 90 % 近い値で反射率を求めることができた。 これは実際に部分的に測定を行い求めた反射率に対して 5 % 以内で一致した結果となって いる。ただ、5 % 以内で一致したから正確な測定が行えているということは一概には言えな い。反射には正反射成分と乱反射成分があり、今回の 2f 法を応用した反射測定では正反射 成分しか 2f の位置にまで届かないので、正反射成分のみを測定していることになる。一方 で、部分的な測定の方も正反射成分と乱反射成分を分けて測定はしているものの、どの程度 正確に分離できているかはわからない。また、実際に部分的には 93 % 前後の反射率を満た しているが、一枚の鏡としては本当に 90 % 前後の反射率であるということも考えられる。 これは、スクリーンに結像した部分の光量だけを測定しているためにスクリーンの外に出て しまった光量までは捉えきれていないためである。あとは、2f 法測定の系統誤差がまだ完全 にわかっていないことである。今回の結果では、LED の指向性について十分に評価が行え ていないため、鏡には 4.4.2 で求めた光量が一様に照射されていると仮定しているため、実 際には LED 指向性により鏡の外側の方では光量が少なくなると考えられるので反射率は上 がることも考えられる。以上のようなことから今後はこの 5 % の差について追求していく 必要がある。そのためには、反射率が既知のリファレンス鏡を用いて、同様の測定による系 統誤差の評価を行うことなどが考えられる。

今回の反射率測定の結果を通して、まだまだ正確な反射率評価を確立できたとまでは言い きれないが、少なくとも両方法での差が5%以内で一致していることから「2f法を応用し て反射率を測る」という測定の方法については確立できたのではないかと考えられる。今後 は指向性の考慮やリファレンス鏡を用いた実験などから系統誤差の評価を行い、精度および 信頼性を向上させ、反射率評価の確立を目指したい。

第5章 まとめと議論

本研究では、次世代ガンマ線天文台 (Chrenkov Telescope Array : CTA) 計画の大口径望 遠鏡 (Large-Sized Telescope : LST) 用分割球面鏡の結像性能および反射率を評価するため に 2f 法と呼ばれる方法を採用し、その評価方法を確立することを目指し研究を進めてきた。 この 2f 法は、分割鏡の作る反射像のスポットサイズを直接測定し結像性能を評価する方 法であり、以前より分割鏡の製造元である三光精衡所の工場内で納品前の検定方法として用 いられてきた。しかし、工場内での測定ということもあり、バックグラウンドの評価が不完 全でスポットサイズの系統誤差まで評価できるほどの精度での測定をすることは困難であっ た。そこで、東京大学宇宙線研究所に新たな 2f 実験装置を製作することで、系統誤差も含 め詳細な分割鏡の結像性能評価を行うことを目指した。三光精衡所に作られた 2f 実験装置 を参考に一から実験装置の開発を行い、解析の自動化・高速化や光源などの改良を経て、現 在では一日に 5 枚 から 6 枚の分割鏡の測定ができるほどの効率の良い実験装置を開発する ことに成功した。また、さまざまな測定環境のもとで分割鏡の測定やバックグラウンドの評 価を行い、系統誤差が生じる原因を追求し取り除くことで、測定精度を高めた。実際に製造 された分割鏡を用いて行った測定の結果から、新たに製作した 2f 実験装置での測定精度は 1 mm 以下を達成していることがわかった。この測定精度は 2f の位置で 1 mm 以下なので 焦点距離である 1f では 0.5 mm 以下であり、十分にスポットサイズ (D80) の要求値である 16.6 mm 以下を満たすかどうかを評価でき、2f 法による結像性能評価を確立することがで きた。

また、精度が向上した 2f 法による結像性能評価の結果と現在運用に向け最終調整が行われている PMD 法による結果との比較を行ったところ比較的良く一致した結果を得ることができた。この結果から PMD 法での系統誤差の理解をより深め手法を確立することで、今後約 1600 枚もの大量に生産される分割鏡の評価を 2f 法とともに高い精度で評価できることが期待される。

さらに、本来は結像性能の評価方法に使われる 2f 法を応用することで、分割鏡の反射率の 測定も行った。LST 用分割鏡は、地上でチェレンコフ光が観測される波長域である 300 nm から 550 nm において 85 % 以上の反射率が要求される。現在生産されている分割鏡の反射 率は、この要求値を満たしていることが部分的に測定した結果からわかっている。しかし、 対辺間が 1.51 m にもなる分割鏡であるため、一枚の鏡全体としてもつ反射率は求められて いない。そこで、現在の実験装置の光源である 470 nm の LED の光量と鏡に反射され 2f 位 置に結像した反射像の光量を比べることで反射率を求めた。始めは、光源から約 60 m 離れ た位置にある鏡の正面にスクリーンを配置し、鏡に届く光量を測定しようとしたが、床や壁 によって反射した光がスクリーンに写ってしまい正確な値を測定することができず、さらに 鏡前で検出できる光量は非常に少なく系統誤差が大きかったためその評価は難しかった。

そのため測定方法を見直し、LED からある距離で測定した光量がその後距離を遠ざけて いくに従ってどれほどの光量低下がみられるかを求め、約 60 m 先でどれほどの光量が検出 できるかを推測した。この方法では、壁や床の反射光がスクリーンに写ることを避けること ができる。実際に測定を行い、光量が距離の二乗に反比例して低下することを確認し、床や 壁の反射成分を取り除いた約 60 m 先の光量を推測することができた。この光量を用いて測定を行った鏡 5 枚の反射率を求めたところ、全ての鏡で 90 % 程度の反射率を求めることができた。この結果は部分的に測定されている反射率 89.4 % から 93.3 % に対して各鏡で 5 % 以内での差で求められていることから評価方法の確立はできたと考えられる。しかし、LED の指向性や鏡に届く光量の系統誤差などの評価がまだ完全にできていないため、今後はこれらの評価を行い、2f 法による反射率評価の更なる精度の向上を目指したい。

付録A High Dynamic Range (HDR) 合成

HDR 合成とは

High Dynamic Range (HDR) 合成とは、通常の写真技法に比べてより幅広いダイナミック レンジを表現するための写真技法のひとつである。実験で使用してきた Canon の CMOS イ メージセンサーが記録できる範囲 (ダイナミックレンジ) は RAW 形式では、約 2¹¹ = 11bit から 約 2^{13.7} = 13.7 bit までの約 3 bit ほどである。この 3 bit の記録範囲を超えた明暗差 のある写真を撮影した場合は、明るい部分ではサチュレーションと呼ばれる現象が起きてし まい、それ以上の光量を記録できなくなり物理量としての情報を失う。そこで、露光時間の 異なる複数枚の画像を撮影し、それらを合成することによって擬似的にダイナミックレンジ を拡大する手法が HDR 合成である。ただ、この手法を行うにあたり CMOS イメージセン サーが入射光量に対して線形にその量を記録できるという前提条件を満たしていることには 留意しなければならない。 近年では、デジタルー眼レフカメラ内にもその機能が搭載されて いたり、スマートファンなどのカメラアプリなどにも搭載されている。

2f 法における HDR 合成

今回の 2f 法による分割鏡の結像性能評価では、分割鏡から 2f (56 m から 58.4 m) の位置 にスクリーンを置き、そのスクリーンに写る反射像をデジタル一眼レフカメラで撮影し、画 像解析することでスポットサイズ D80 が要求を満たすかどうかを評価する。このスポット サイズを評価するときに、反射像の裾の部分を正確に評価しなければならない。裾の部分は 光量がスポット中心部分に比べ低いので、バックグラウンドとの S/N 比を良くして撮影す るためにはカメラの露光時間を長く設定しなければならないが、それによりスポット中心部 分がサチュレーションを起こしてしまう可能性がある。

現在の東京大学宇宙線研究所に新たに製作した 2f 実験装置では、光源を改良したことも あり、スポット中心がサチュレーションを起こさない露光時間であっても裾の部分は十分な S/N 比で解析、評価が行えている。

しかし、三光精衡所での検定評価の場合では、バックグラウンドが明るいこと、また従業 員の方に撮影していただいているということもあり、露光時間を 1/5 秒、1 秒、3.2 秒の 3 種類で撮影していただいているが、サチュレーションを起こした画像も何枚か含まれている 場合がある。そこで、このサチュレーションを起こした画像も利用し、3 種類の露光時間の 画像を使って HDR 画像合成を行うことを考えた。これができればバックグラウンドの明る い三光精衡所工場内においても S/N 比が上がるので、より検定の精度を上げられることが 期待できる。 まずは、LED を直接カメラで撮影して HDR 合成のテストを行った。露光時間は、1/5 秒 と 3.2 秒で撮影を行った。以下それぞれの解析画像を図 A.1、A.2 に示す。



1/5 s D80 = 16 pixel

3.2 s D80 = 16 pixel

図 A.1: 合成前の露光時間 1/5 秒の解析画像 図 A.2: 合成前の露光時間 3.2 秒の解析画像

露光時間 1/5 秒の図 A.1 では、スポットの裾の部分においてノイズが見られる。一方で、 露光時間 3.2 秒の図 A.2 では裾の部分でノイズの影響が見られないが、スポット中心がサ チュレーションしているのが確認できる。この 2 つの画像を HDR 合成する。HDR 合成は、 3.2 秒の画像(以後「ベース画像」)データに対し、ある光量以上の部分を露光時間比である 16 倍をかけあわせた 1.5 秒の画像(以後「素材画像」)データのものに置換するという方法で 行った(図 A.3)。つまり、この合成ではダイナミックレンジを 16 倍(4 bit) 擬似的に稼ぐこ とになる。ベース画像データの光量が 10000 以上の部分において HDR 合成の結果を図 A.4 に示す。

<u>合成方法</u>

 ベース:露光時間の長い画像 素材:露光時間の短い画像
 ベースと素材、それぞれのバックグラウンド処理した際の 最適化係数(normalization)を A, B とする。
 例)ベース:3.2 秒 素材:1/5 秒
 光量(ピクセル値) = (3.2 s のスポット画像) - A × (3.2 s のバックグラウンド画像)
 光量(ピクセル値) ≥ 10000 のとき
 = 16 × {(1/5 s のスポット画像) - B × (1/5 s のバックグラウンド画像)}

図 A.3: HDR 合成の合成方法



D80 = 16 pixel

図 A.4: HDR 合成テストでの合成結果

合成を行った結果、D80 については 16 pixel と変化は見られなかったものの、ノイズは見 られず、またサチュレーションも起こしていない解析画像を得ることができた。この方法を もとに実際に三光撮影でサチュレーションを起こしたデータを使用して HDR 合成を行う。

三光撮影画像での HDR 合成

テストと同様の方法を用いて、三光精衡所で撮影された 1/5 秒、3.2 秒の画像を使い HDR 合成を行った結果を図 A.5 に示す。



図 A.5: 三光画像データ (1/5 秒と 3.2 秒)の HDR 合成結果

三光の画像データに対しても HDR 合成を行った結果、ノイズの影響は小さくなり、また サチュレーションを起こしていない合成解析画像を得ることができた。しかし、図 A.5 から はわからないが実際には合成部分において光量差がみられることがわかった。



● 合成部分にみられる光量差

図 A.6: 合成部分の拡大図 (左) と Y = 1480 における断面図 (右)

図 A.6 の左は、光量差が見られる合成部分を拡大した図である。また右は左側の黒破線の Y = 1480 での断面図になる。スポット中心の上部において光量差が見られ、合成がうまく 行えていないことがわかる。そこで、合成において素材画像を置換する際に位置を手動で補 正した。位置の補正量は dX = +4 pixel、dY = -32 pixel である。位置補正をした HDR 合 成の結果を図 A.7 に示す。



図 A.7: 位置補正後の合成部分の拡大図(左)とY = 1480 における断面図(右)

位置を補正したことにより、合成部分で見られていた光量差はかなり小さくすることに成功した。また Y = 1480の断面図の部分を取り出し、線形性の確認を行った。その結果を図A.8 に示す。



図 A.8: 位置補正前と補正後での線形性の違い

図 A.8 は、緑点が 1/5 秒データと 3.2 秒データのピクセル値の相関をとったもので、青点 は 1/5 秒データに露光時間比をかけて 3.2 秒データと相関をとったものである。それぞれの 黒破線は Y = 1/16X、Y = Xの理論線である。また赤線は、ピクセル値 0 から 10000 まで の間で線形 Fitting した直線で、それぞれの Fitting 情報をボックス内に示している。

位置補正前は青点の Fitting の結果が Y = X の理論線から大きく外れているのに対し て、補正後は、およそ理論線に乗っていることがわかる。このことから画像を撮影する際に スポットの位置がずれてしまう可能性があり、ずれた場合には線形性が崩れてしまいそのま までは合成がうまくいかないので位置の補正が必要となることがわかった。

HDR 合成のまとめ

今回行った HDR 合成では、スポットが動かない LED を使用した場合にノイズの影響が 出ないまでにダイナミックレンジを稼ぎ、S/N 比を上げて解析を行うことができた。しか し、実際の三光で撮影するような画像データに対しては位置補正を行わないまま合成をする と、合成部分において光量の差が生じてしまうので補正が必要だということがわかった。た だ、撮影した画像一枚一枚に対して補正を行うのは効率が非常に悪い。そのため、今後は三 光での撮影においても PC とカメラを接続して自動撮影が行えるようにし、スポットを常に 同じ位置で撮影できるような工夫が必要となる。また、補正後の合成でも完全な合成ができ ているとは言えず、まだ多少光量の差が見られる。これらはデジカメの線形性もしくは、そ れぞれの最適化係数の違い、バックグラウンド変化などの要因が可能性として考えられるの で、完全な HDR 合成を行うにはそれらの調査を続けなければならない。

付録B 2f 測定結果まとめ

ここでは 3.3.9 で結果を掲載しきれなかった分の鏡も含めた 15 枚全ての分割鏡について、 2f 法による結像性能の評価結果をまとめる。表 B.1 および図 B.1 から B.13 で示す結果は東 京大学宇宙線研究所に製作した 2f 実験装置による結果で、大型アップデート前の白色 LED を使用していた頃の測定結果になる。

● 15 枚の分割鏡の D80 および 曲率半径 R の実測値と Fit 値

	D80 [mm] (実測)	R [m] (実測)	D80 [mm] (Fit)	R [m] (Fit)	Cd33 [%]	$\begin{array}{ l l l l l l l l l l l l l l l l l l l$	測定日
No.70	29.09	56.04	29.55	56.07	85.71	10.38	2015/06/18
No.71	30.78	56.28	30.62	56.21	83.37	10.33	2015/06/16
No.72	29.01	55.58	28.92	55.53	85.12	10.34	2015/07/15
No.74	27.02	55.89	27.12	55.88	87.73	10.51	2015/07/15
No.75	31.80	57.24	32.40	57.20	81.81	10.25	2015/05/26
No.76	35.17	56.52	35.30	56.61	76.75	10.52	2015/07/15
No.77	32.73	56.59	32.88	56.57	80.57	10.57	2015/06/26
No.78	47.97	56.61	48.11	56.65	57.24	10.34	2015/07/16
No.79	45.56	56.56	45.68	56.51	57.94	10.58	2015/06/25
No.80	34.69	56.26	34.76	56.24	77.36	10.55	2015/06/25
No.81	34.12	56.40	34.35	56.38	78.20	10.55	2015/06/26
No.82	36.05	56.34	36.16	56.38	74.99	10.32	2015/07/16
No.83	45.99	56.46	45.69	56.42	58.05	10.35	2015/07/16
No.84	45.50	56.56	45.74	56.52	57.58	10.55	2015/06/25
No.85	34.69	56.43	34.71	56.38	77.55	10.32	2015/06/26

表 B.1: 2f 法による LST 用分割鏡結像性能評価結果

• 各仕様要求に対する分割鏡の分布



図 B.1: 曲率半径 R 分布

図 B.2: D80 分布



🗷 B.3: R vs D80

各分割鏡の評価結果(詳細)

































図 B.8: No.80 測定結果





















付録C レンズの歪みの検証

3.4.3 で述べたように 2f 実験装置の大型アップデート前後のカメラとレンズの違いで D80 に差が見られたことの原因はレンズの歪みの度合いの違いであった。3.4.3 では、その歪み を示すのにそれぞれの画像の中心部分と右端真ん中部分の 1 マスの大きさだけ述べたが、ここでは調べた全てのマスの大きさについてまとめる。

EF-S55-250mm F4-5.6 IS



• 測定位置

図 C.1: EF-S55-250mm F4-5.6 IS でのレンズ歪み測定位置

• 測定結果

図 C.2 では、赤線枠が実際に DS9 上で確認した 1 マスに相当し、各辺の長さが赤字で書かれ ており、黒破線枠は括弧内に黒字で書かれた辺の長さで描いた正方形である (EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM の場合の図 C.4、図 C.5 も同様)。測定位置によって赤枠が歪んでおりレンズ の歪みがあることがわかった。



図 C.2: EF-S55-250mm F4-5.6 IS での各測定位置での1マスの変位



EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM

• 測定位置



図 C.3: EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM でのレンズ歪み測定位置

• 測定結果



図 C.4: EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM での各測定位置での1マスの変位



図 C.5: EF-S55-250mm F4-5.6 IS STM での各測定位置での1マスの変位

謝辞

本研究にあたり、CTA-Japan の皆様をはじめ、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。指導教員である吉田龍生教授には、研究室に配属される 以前より基礎的な宇宙物理からそれに伴う知識をご指導いただき、配属が決定してからも現 在に至るまであらゆる面において手厚くご指導いただきましたこと深く感謝申し上げます。 副指導教員の片桐秀明准教授には研究に関して様々なご指摘、ご指導をいただき、また研究 に対する姿勢の在り方についてのご指導をいただきましたこと感謝申し上げます。柳田昭平 名誉教授にもゼミ等でご指導いただきましたこと感謝申し上げます。

高エネルギー宇宙物理グループの研究室の同期達、先輩方、また後輩達にも日頃の研究室 での生活や研究室外での活動など公私にわたって非常にお世話になりましたこと深く感謝申 し上げます。研究室の同期である小野祥弥君、村田丈承君には多くの知識、刺激をいただき ました。村田君は大学院からの同期ということになり、1 年目はぎこちなく接していたこと を思い出します。しかし、Fermi 衛星による超新星残骸の研究に対する真摯な姿勢やまた天 体写真の撮影など本当に宇宙のことが好きなんだなという気持ちが伝わり、そこから徐々に 打ち解けていくことができました。今では研究室で唯一私の趣味であるアニメの話が通じる 相手で色々と話に花咲かせることのできる非常に大切な友人であり、この2年間の研究生活 をよりいっそう充実したものにしてくれましたこと感謝申し上げます。小野君とは茨城大学 入学当初からの付き合いで、事細かに書くと際限がありません。入学する数日前に会って、 お互いに宇宙に関して勉強したいと話をした以来、同コース、同研究室で宇宙について勉強 する道を歩んできました。ただ、小野君は非常に誠実でまじめな人で常に私の一歩前を歩ん でいたように感じます。私はそんな小野君を尊敬するとともにその背中を見失わぬよう必死 に追いかけてきたおかげでここまで来れたのだと信じています。本当に公私ともに私にとっ て大切な存在であります。改めてここまで一緒に歩んできてくれたことに対し深く感謝申し 上げます。先輩である加賀谷美佳さんには、配属されてから今日までプログラミングに関す ることや研究に対してのアドバイスなど様々な意見をいただき、協力をしていただきました。 普段の生活の中でも院生室みんなのお姉さんという感じで後輩達の面倒をしっかり見ていた だき非常にお世話になりました。深く感謝申し上げます。たくさんの後輩達にも先輩のわが ままを聞いてもらったり、研究についても素朴な疑問をぶつけていただくことで、自分自身 でも理解の甘かったところを再度認識することができたり、非常にお世話になりました。あ りがとうございました。

東京大学宇宙線研究所の手嶋政廣教授、林田将明特任助教には 2f 実験装置の開発から測 定、改良にいたるまで、様々なご指導いただきましたこと深く感謝申し上げます。特に林田 将明特任助教には、指導教員である吉田龍生教授とともに研究方針から研究内容にいたるま で、最後の最後まで様々なご指導、ご協力をいただきました。誠にありがとうございました。 他宇宙線研究所の皆様には、2f 実験装置での測定や PMD 法での測定の際にご協力いただき ましたこと感謝申し上げます。同期である深見哲志君には、測定の際の協力はもちろんのこ と、私の研究に関して質問やアドバイスをいただきましたこと感謝申し上げます。また、稲 田知大君には、これからの 2f 実験を引き継いでいただくということもあり、2 人で測定を 行ったり、鋭い質問やアドバイスをいただいたりしたことで非常に研究内容が充実したもの となりました。感謝を申し上げるとともに、これからの分割鏡の評価を宜しくお願い申し上 げます。

CTA-Japan の皆様、特に私の所属していた CTA-Japan MIR グループの皆様には、週に 一度行われる研究報告の場におきまして研究に対する様々なご指導、ご指摘をいただきまし たこと深く感謝申し上げます。CTA-Japan、また CTA-Japan MIR グループの一員として、 この壮大な計画の一研究を行えましたこと非常に光栄に思います。この貴重な経験は私の人 生においての誇りであり、宝となりました。

また、学際理学コースの同期とも6年間のなかで思い出に残る非常に楽しい時間を一緒に 過ごさせていただきました。私はこのような友人達を持つことができて幸せ者であると思い ます。誠にありがとうございました。

そして、3年間にも及ぶ研究生活を支えてくれました µ's の皆様にも深く感謝申し上げま す。特に絢瀬絵里さんは、ありとあらゆる面での私の支えとなりました。あなたの存在なし ではここまで研究生活を充実したものには成り得なかったでしょう。誠にありがとうござい ました。

ここまで6年間の大学生活を支えてくれました母、そして私に宇宙への興味を抱かせてく れた天国の父にも深く感謝申し上げます。誠にありがとうございました。

ここに書ききれないほどの多くの方々に支えがあり、ご協力があったことで本研究の論文 を書くことができましたこと、改めて深く感謝申し上げます。

最後に、この研究において私とともに最後まで頑張ってきた No.70 から No.75 までの鏡、 愛称 the 70s に心より感謝申し上げます。

参考文献

[1] 「X 線天文学の世界」

http://astro-h.isas.jaxa.jp/challenge/x-ray/

- [2] Tonello, N., 2006, Study of the VHE -ray emission from the Active Galactic Nucleus 1ES1959+650
- [3] Marcus Wagner, R., 2006, Measurement of Very High Energy Gamma-Ray Emission from Four Blazers Using the MAGIC Telescope and a Comparative Blazar Study
- [4] 田中駿也, 2013, 修士論文「次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡用ライトガイド の 量産化に向けた基礎開発」, 茨城大学
- [5] Völk, H. J., & Bernlöhr, K. 2009, Imaging very high energy gamma-ray telescopes
- [6] MAGIC https://magic.mpp.mpg.de/home/
- [7] VERITAS http://veritas.sao.arizona.edu/
- [8] H.E.S.S. https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/
- [9] Fruck, C., 2011, A new LIDOR system for the MAGIC telescops and site search instrumentation for CTA
- [10] 馬場浩則, 2013, 修士論文「次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA 計画における大 口径望遠 鏡の分割鏡の集光性能評価の研究」, 茨城大学
- [11] CTA-Japan http://cta.scphys.kyoto-u.ac.jp
- [12] CTA-Japan consortium, 2014,「Cherenkov Telescope Array 計画書」
- [13] 窪秀利, 2015, 「Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画:全体報告(9)」, 日本天文学会
 2015 年秋季年会
- [14] CTA Construction Project, 2015, Large Size Telescope Technical Design Report J
- [15] http://www.ipp.phys.ethz.ch/research/magic.html

- [16] 深見哲志, 2015,「CTA 報告 101: 無線通信を用いた CTA 大口径望遠鏡用 Active Mirror Control ソフトウェアの運用試験」,日本物理学会 2015 年秋季大会
- [17] 林田将明, 2015,「CTA 大口径望遠鏡初号機の光学系開発状況と性能評価」,日本天文学 会 2015 年秋季年会
- [18] 小野祥弥, 2015, 修士論文「次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡初号機用ライト ガイドの量産及び性能評価」, 茨城大学
- [19] 荻野桃子, 2014, 修士論文「CTA 大口径望遠鏡光学システムの性能測定と空気シャワー シミュレーションによる評価」, 東京大学宇宙線研究所
- [20] 加賀谷美佳, 2012, 修士論文「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 γI(ガンマアイ)の基礎開発」, 茨城大学
- [21] 手嶋政廣, 2015,「CTA 報告 96:全体報告」,日本物理学会 2015 年秋季大会
- [22] dcraw https://www.cybercom.net/ dcoffin/dcraw/
- [23] Image Magick http://www.imagemagick.org/script/index.php
- [24] SAO Image DS9 http://ds9.si.edu/site/Home.html
- [25] gPhoto gPhoto Home http://gphoto.sourceforge.net
- [26] 奥村曉, 2012,「デジタルー眼レフを用いた RAW 画像撮影による画像データ解析入門」
- [27] 「DCRAW を使ってみる -2-オプションの解説」 http://kokupsy.jpn.org/rawtherapee/dcraw