修士学位論文

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 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

> 14NM154S 小野 祥弥

Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画は次世代ガンマ線天文台として既存のチェレン コフ望遠鏡の 10 倍の感度で、20 GeV から 100 TeV 以上の広いエネルギー帯において高エ ネルギーガンマ線の地上観測を目指す国際共同プロジェクトである。CTA 計画で建造、運用 するのは口径の異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡で、北半球にはスペインのラ・パルマ 島、南半球にはチリのパラナルにそれぞれ数十台ずつ設置して全天を観測する。CTA の日 本グループは大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope, LST)を精力的に開発している。

本研究ではLSTのカメラ部分に1855個搭載するライトガイドという光学素子を開発して いる。LSTに搭載するライトガイドの役割は、cut-off angle と呼ばれる境目の角度より小さ い入射角をもって飛来した光を集めながら cut-off angle の外から来た光を跳ね返すことで、 入射面が円形状である光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) 同士の隙間を埋めると同 時に、バックグラウンドとなる視野外の光を排除することである。LST は PMT をハニカム 状に倣って配置するため、その隙間を埋めるべくライトガイドの入口部分は正六角形、内面 はテーパー状の反射面とすることで入射した「ライト」を PMT まで「ガイド」する。

ライトガイドの性能の指標として「Relative Anode Sensitivity (RAS)」を定義している。 これは入射した光量に対する、検出した光量の比を PMT 応答の特性を加味したうえで算出 している。RAS を高めるためにはライトガイド形状の最適化や使用する材料の選定が必要と なる。既存のチェレンコフ望遠鏡のライトガイドの場合、内面の鏡には反射率が 90 % 程度 のアルミコーティングを使用してきたが、LST のライトガイドの内面には可視光用の高反射 フィルムに対して、紫外領域の波長をピークにもつチェレンコフ光の反射に特化するための コーティングを施したものを採用した。完成した反射材の反射率を測定したところ、その値 は紫外領域において 90 % 程度、可視領域では 95 % と、アルミコーティングを上回る結果 が得られた。

ライトガイドの内側曲面形状については共同研究者である名古屋大学の奥村氏が光線追跡 シミュレーションを用いてLST向けに最適化した。PMTに光子が入射する際は、その入射 角度によってその検出効率が変化するため、著者が形状最適化に必要な検出効率の入射角度 依存性を10本のPMTについて実際に測定し、LST初号機用ライトガイドを設計した。最 適化した形状をもつライトガイドと、既存の望遠鏡で採用されてきた形状をもつライトガイ ドを試作したところ、実験から前者の方がcut-off angle 直前の入射角における集光効率が高 いことが分かった。

ライトガイドの材料である反射材の選定と曲面形状の最適化を終えた後、本研究は量産及 び性能評価の段階に入り、プラスチックの射出成形によりライトガイドの型 2000 個が造形済 みで、これにフィルム状の反射材を手作業で糊付けする。糊付けの際はライトガイドの内面 形状と対をなす「オス型治具」を利用することで作業効率を上げると同時に手作業による製 作精度の個体差を抑えている。2016 年 2 月の時点で 900 個のライトガイドが完成しており、 このうちおよそ 150 個の性能を測定したところ、波長 365 nm の光に対して RAS の平均値が 88.0 %、波長 465 nm に対しては 94.6 %を達成していることがわかった。これらの量産品の 一部は東京大学の宇宙線研究所に納品済みで、ここでは LST に搭載する 2 m サイズのカメ ラの小型版であるミニカメラの一部として試験が行われている。

今後はライトガイド完成品の性能評価から得られた LST 初号機用ライトガイドの改善点 を、LST の第二号機以降に向けたライトガイドの製作に活用する。

目 次

第1章	高エネルギー天体の観測	8
1.1	ガンマ線の飛来と観測の意義	8
1.2	Imaging Air Cherenkov Telescope (IACT)	9
	1.2.1 人工衛星による観測と地上観測	9
	1.2.2 空気シャワー	10
	1.2.3 IACT の観測原理	12
第2章	Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画	14
2.1	CTA 計画の概要	14
2.2	Large-Sized Telescope (LST)	16
	2.2.1 LST 開発の概況	16
	2.2.2 LST による観測	20
第3章	LST 初号機用ライトガイドの試作	22
3.1	ライトガイドの役割	22
3.2	先行研究	25
	3.2.1 ライトガイドの設計の基礎	25
	3.2.2 ライトガイドの試作方法	28
3.3	形状の最適化	30
	3.3.1 PMT の特性	30
	3.3.2 ライトガイドの形状決定	35
3.4	LST 初号機用ライトガイドの設計	36
3.5	試作品の性能評価.................................	45
	3.5.1 ライトガイドの試作	45
	3.5.2 ライトガイド性能評価の準備	52
	3.5.3 Okumura Cone と Winston Cone の性能比較	56
第4章	ライトガイドの量産	58
4.1	量産に向けた準備.................................	58
	4.1.1 ライトガイドの材料	58
	4.1.2 ESR の反射率	61
	4.1.3 ライトガイドの製作方法	64
4.2	量産品の管理	70
第5章	ライトガイドの性能評価	72
5.1	量産品の性能評価に向けた準備	72
5.2	量産したライトガイドの性能評価	75

	5.2.1	RASの入射角度依存性測定	75
	5.2.2	波長ごとの測定	77
	5.2.3	品質管理	83
	5.2.4	第一段と第二段の性能差......................	88
	5.2.5	ESR 先端の歪みによる影響	90
第6章	今後の	D予定	93
6.1	これま	そでに量産したライトガイド	93
6.2	デジタ	ペルカメラを用いた性能評価	94
	6.2.1	評価方法	94
	6.2.2	測定結果	96
第7章	まとめ	6	97
付録A	ライト	ヽガイドの型の設計詳細	98

図目次

1.1	これまでに発見されたガンマ線源のスカイマップ
1.2	フェルミガンマ線宇宙望遠鏡
1.3	MAGIC 望遠鏡
1.4	シミュレーションによるシャワー発達の比較
1.5	チェレンコフ光放射の概要図 11
1.6	ガンマ線のエネルギー差によるライトプール内の光子密度の違い 11
1.7	チェレンコフ光を観測するチェレンコフ望遠鏡のイメージ図 12
1.8	望遠鏡一台での観測と二台での観測のイメージ
1.9	観測されるシャワーイメージの比較 13
2.1	CTA の完成イメージ図
2.2	観測エネルギー範囲における各望遠鏡の目標感度曲線
2.3	高エネルギー天体発見数の年代変化 15
2.4	LST 完成イメージ図 16
2.5	コールドスランプ法模式図
2.6	分割鏡のハニカム構造 17
2.7	スパッタリング法模式図 17
2.8	宇宙線研究所に納品された分割鏡
2.9	LST で使用する PMT R11920-100 19
2.10	PMT で電子数を増倍するイメージ図
2.11	PMT の入射窓
3.1	PMT 7 本すべてにライトガイドを装着するイメージ 22
3.2	LST の模式図
3.3	ライトガイドの役割イメージ 23
3.4	ライトガイド先端の厚みによるデッドスペース
3.5	反射材のはみ出しによるデッドスペースの低減
3.6	R11920 – 100の入射窓
3.7	六角形の出口をもつライトガイドを PMT に取り付ける際に生じる隙間 27
3.8	PMT 入射窓の形状に合わせたライトガイド 27
3.9	ESR の切断図面の例 28
3.10	糊付けに用いるオス型治具 29
3.11	オス型を使用してライトガイドに反射材を貼るイメージ 29
3.12	ライトガイドに糊を塗布する様子 29
3.13	ライトガイドにオス型を押し込む様子
3.14	完成した試作品
3.15	double crossing の模式図

3.16	PMT の入射角度依存性測定に使用した機器						31
3.17	PMT の入射角度依存性測定のセットアップ概要図						31
3.18	波長 465 nm の LED のスペクトル						31
3.19	DRS4 でサンプリングした波形						32
3.20	PMT の入射窓をピンホール付きのマスクで覆った状態.....						32
3.21	PMT 入射角度依存性測定結果						33
3.22	PMT 入射角度依存性解析結果						34
3.23	PMT 入射位置依存性						35
3.24	カメラから見た主鏡のイメージ図...............						35
3.25	ライトガイドプレートの設計図						36
3.26	ライトガイドの設計図						38
3.27	Okumura Cone の座標						40
3.28	プラスチックコーンの設計 a-データ点の挿入を選択						41
3.29	プラスチックコーンの設計 b-Okumura Cone のスケッチ						41
3.30	プラスチックコーンの設計 c-曲線のコピー						42
3.31	プラスチックコーンの設計 d-外径の決定						42
3.32	プラスチックコーンの設計 e-プラスチックコーンの向かい合う曲面						43
3.33	プラスチックコーンの設計 f-プラスチックコーンの全体像						43
3.34	ライトガイド7個とプレートの嵌合イメージ図						44
3.35	AGILISTA-3000						45
3.36	AGILISTA-3000 の造形原理						46
3.37	AGILISTA-3000 による造形品の例						46
3.38	Winston Cone 用の ESR 切断図面						47
3.39	Okumura Cone 用の ESR 切断図面						47
3.40	x、y、z 軸の定義と曲面の位置関係						48
3.41	z 軸方向から見た場合のイメージ						48
3.42	<i>z</i> ′ の座標の求め方.........................						49
3.43	Okumura Cone 向け ESR のレーザーカット用座標						50
3.44	Winston Cone と Okumura Cone の写真						51
3.45	Winston Cone と Okumura Cone の鏡面						51
3.46	スーパー XL ブラック No. 8008						51
3.47	ライトガイドの性能評価測定のセットアップ概要図.......						52
3.48	ライトガイド固定用治具設計図						52
3.49	ライトガイド固定用治具設置						53
3.50	六角マスクを取り付けた測定						53
3.51	繰り返し精度確認測定の結果....................						55
3.52	繰り返し精度確認測定の結果拡大図						55
3.53	Okumura Cone と Winston Cone の RAS 測定結果比較						56
3.54	シミュレーションによる Okumura Cone と Winston Coneの RAS 身	靠と	£		•	•	57
4.1	プラスチックコーンの射出成形品..............						58
4.2	ESR の反射率						59
4.3	追加コーティングを施した ESR とガラス						60

1.1	追加コーティングにより生じたシミ	. 60
4.5	ESR 内部における光子反射時の入射角度分布................	. 61
4.6	日立分光光度計 U - 4100	. 62
4.7	U - 4100 のアタッチメント取り付け部分	. 62
4.8	角度可変装置	. 63
4.9	ESR の反射率	. 63
4.10)レーザー加工機 HAJIME 65
4.11	l HAJIME の制御ソフト HARUKA の操作画面	. 65
4.12	2 レーザーカットの様子	. 66
4.13	3 ESR をレーザー加工機にセットする様子 66
4.14	4 レーザーカット後の ESR	. 67
4.15	5 ESR の汚れとその拭き取り....................................	. 67
4.16	5 ESR の反り	. 67
4.17	7 オス型治具と重り	. 68
4.18	8 オス型治具と重りの設計図	. 68
4.19) ライトガイド製作手順の概要	. 69
4.20) ライトガイド完成品	. 69
4.21	1 ナンバリングしたライトガイド	. 70
4.22	2 量産品の管理表	. 70
4.23	3 ライトガイド 7 個を並べた状態	. 71
4 24	4 製作したライトガイド	71
1.21		
5.1	ライトガイド量産品向けに設計したステージの図面..............	. 72
5.2	六角治具の図面....................................	. 73
5.3	測定用治具の完成品	. 73
5.4	PMT とステージに設置したライトガイド	. 74
5.5	版長 365 nm の LED のスペクトル	. 74
5.5 5.6	波長 365 nm の LED のスペクトル	. 74 . 75
$5.5 \\ 5.6 \\ 5.7$	波長 365 nm の LED のスペクトル ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果	. 74 . 75 . 76
5.5 5.6 5.7 5.8	波長 365 nm の LED のスペクトル	. 74 . 75 . 76 . 76
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9	波長 365 nm の LED のスペクトル ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果	. 74 . 75 . 76 . 76 . 76
 5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 	波長 365 nm の LED のスペクトル ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果	. 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11	 波長 365 nm の LED のスペクトル ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果 ライトガイド No. 186 と 187 の ESR 表面 ライトガイド No. 186 の ESR 表面に付着した糊 ライトガイド No. 187 の ESR 表面の歪み シェート・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	. 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12	 波長 365 nm の LED のスペクトル ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果 ライトガイド No. 186 と 187 の ESR 表面 ライトガイド No. 186 の ESR 表面に付着した糊 ライトガイド No. 187 の ESR 表面の歪み シェート・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	. 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13	 波長 365 nm の LED のスペクトル ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果 ライトガイド No. 186 と 187 の ESR 表面 ライトガイド No. 186 の ESR 表面に付着した糊 ライトガイド No. 187 の ESR 表面の歪み シェートガイド No. 187 の ESR 表面の歪み シェートガード No. 187 の ESR 表面の ショートガード No. 187 の ESR 表面の	. 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14	波長 365 nm の LED のスペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	. 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15	波長 365 nm の LED のスペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 78 . 78
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.12 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16	波長 365 nm の LED のスペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 80
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16 5.17	波長 365 nm の LED のスペクトル	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 78 . 80 . 81
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16 5.17 5.18	波長 305 nm の LED のスペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 80 . 81 . 81
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16 5.17 5.18 5.19	波長 305 nm の LED のスペクトル	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 80 . 81 . 82
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16 5.17 5.18 5.19 5.20	波長 365 nm の LED のスペクトル	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 80 . 81 . 82 . 83
5.5 5.6 5.7 5.8 5.9 5.10 5.11 5.12 5.13 5.14 5.15 5.16 5.17 5.16 5.17 5.18 5.19 5.20 5.20	波長 365 nm の LED のスペクトル	 . 74 . 75 . 76 . 76 . 76 . 76 . 77 . 77 . 77 . 78 . 78 . 78 . 80 . 81 . 81 . 82 . 83 . 84

5.22	ライトガイド No.35 の ESR 表面				•							84
5.23	ライトガイド No.3 の ESR 表面							•				84
5.24	ライトガイド No.4 の ESR 表面						•	•				84
5.25	ライトガイド No.9 の ESR 表面							•				84
5.26	ライトガイド No.15 の ESR 表面						•	•				84
5.27	ライトガイド No.23 の ESR 表面											85
5.28	ライトガイド No.28 の ESR 表面											85
5.29	ライトガイド No.81の ESR 表面											85
5.30	ライトガイド No.88 の ESR 表面											85
5.31	ライトガイド No.92 の ESR 表面											85
5.32	ライトガイド No.142 の ESR 表面											85
5.33	光検出モジュール						•					86
5.34	ミニカメラ											86
5.35	ミニカメラに搭載したライトガイド											87
5.36	ESR 同士の干渉によって生じた隙間											87
5.37	量産品第二段の RAS 測定結果ヒストグラム											88
5.38	ESR 表面の歪み											89
5.39	3D プリンタ製の型						•					90
5.40	3D プリンタ製の型によるライトガイドと量産品の比較						•					90
5.41	3D プリンタ製ライトガイドと量産品の RAS 測定結果比較 1											91
5.42	3D プリンタ製ライトガイドと量産品の RAS 測定結果比較 2						•					91
0.4												<u> </u>
6.1	テジカメを用いた性能評価法セットアッフ	•		•	•	•••	•	•	•	•	•	94
6.2	アジカメで取得した画像アータ	•	• •	•	•	• •	•	•	•	•	•	95 95
6.3		•		•	•	•••	•	•	•	•	•	95
6.4	テジカメによる測定と PMT による測定の相関図	•	• •	•	•	•••	•	•	•	•	•	96
.1	データ点の挿入.......................											98
.2	補助用の構築線を追加1................											98
.3	補助用の構築線を追加2											99
.4	補助用の点を追加1											99
.5	補助用の点を追加2											100
.6	曲線のコピー1											100
.7	曲線のコピー2											101
.8	曲線のコピー3											101
.9	外径の決定1											102
.10	外径の決定 2											102
.11	外径の決定3											103
.12	外径の決定4											103
.13	外径の決定5											104
.14	スケッチ1の仕上げ											104
.15	スケッチ1完成											105
.16	曲面押し出し1											105
.17	曲面押し出し2											106

.18	曲面押し出し3 10	6
.19	曲面切り取り1	17
.20	曲面切り取り2 10	17
.21	曲面切り取り3	18
.22	嵌合部 1	8
.23	嵌合部 2	9
.24	嵌合部 3	9
.25	嵌合部4	.0
.26	円形状コピー1	.0
.27	円形状コピー2 11	.1
.28	円形状コピー3 11	.1
.29	嵌合部の作成1	2
.30	嵌合部の作成 2	2
.31	嵌合部の作成3	.3
.32	嵌合部の作成4	.3
.33	嵌合部の作成5	.4
.34	嵌合部の作成6	.4
.35	嵌合部の作成7	.5
.36	嵌合部の作成8	5
.37	嵌合部の作成9	.6
.38	嵌合部の作成9	.6
.39	嵌合部の作成 10	7
.40	嵌合部の作成 11	.7
.41	嵌合部の作成 12	.8
.42	嵌合部の作成 13	.8
.43	嵌合部の作成 14	9
.44	嵌合部の作成 15	9
.45	嵌合部の作成 16	20
.46	嵌合部の作成 17 12	20
.47	設計終了	21

第1章 高エネルギー天体の観測

1.1 ガンマ線の飛来と観測の意義

これまで人類は地球上またはその周辺であらゆる天体の情報を獲得してきたが、宇宙には 我々が未だに知らない謎満ちている。その1つとして人類が作り上げた加速器によって高い エネルギーを得た粒子ですら比べ物にならないほど高いエネルギーをもつ宇宙線が飛来して いるということが挙げられる。この高エネルギー現象は熱放射によるものとは考えづらく、 何らかの加速機構が宇宙に存在すると考えられている。

1911年に Victor Franz Hess が宇宙線を発見してから 100年以上経った現在でもこの宇宙 線の加速源問題は未解決である。宇宙線は宇宙空間において不規則な磁場によって進行方向 を曲げられてしまうため、その発生源の決定が困難である。一方、先述の宇宙線を放射する 高エネルギー天体は同時に高エネルギーガンマ線も放射している。ガンマ線とは電磁波の中 で最も高いエネルギーをもつ光子で、そのエネルギーは 100 テラ電子ボルト (Teraa Electron Volt, TeV)にも及ぶ。可視光領域の波長をもつ光子のエネルギーは 1 eV 程度なので、先述の 光子は可視光の 10¹⁴倍もの高いエネルギーをもっている。ガンマ線は宇宙線とは異なり電気 的に中性であり、宇宙空間中の磁場の影響を受けない。そのためガンマ線を観測することは 高エネルギー天体の様子を探ることに直結し、先述の加速機構の解明も可能となるだろう。 これまでに発見されたガンマ線源のスカイマップを図 1.1 に示す。現在のところガンマ線天 体の発見数は 200 程度であり、観測機器の発達次第でこの数が更に増えると期待できる [1]。



図 1.1: これまでに発見されたガンマ線源のスカイマップ [2]

1.2 Imaging Air Cherenkov Telescope (IACT)

1.2.1 人工衛星による観測と地上観測

数十ギガ電子ボルト (Giga Electron Volt, GeV)程度以下のガンマ線については人工衛星を 用いた観測が行われている。中でも図1.2に示すフェルミガンマ線宇宙望遠鏡が2008年から 稼働してからこれまでに3000以上の高エネルギー天体を発見してきた。一方、数十 GeV か ら TeV にわたる超高エネルギー領域のガンマ線については到来頻度の低さ故に宇宙に打ち上 げられる程度の大きさの検出面積をもつ衛星では観測が難しい。そこで人工衛星を用いた宇 宙での観測とは別にガンマ線を間接的に地上で観測する方法がある。超高エネルギーガンマ 線は地球に到来すると大気中の原子と衝突してしまい地表までは届かないが、この際に発生 するチェレンコフ光を観測することで到来したガンマ線の角度やエネルギーの大きさを算出 する。これを大気解像型チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Air Cherenkov Telescope, IACT) と 呼び、現在はスペインのラ・パルマ島にある MAGIC (図 1.3) などが稼働している [3]



図 1.2: フェルミガンマ線宇宙望遠鏡 [4]



図 1.3: MAGIC 望遠鏡 [5]

1.2.2 空気シャワー

電磁シャワーとハドロンシャワー

宇宙から到来した高エネルギーガンマ線が大気中の原子に入射すると電子陽電子対生成と 呼ばれる相互作用を起こし、これによって文字通り電子と陽電子が生成される¹。これら電 子と陽電子がそれぞれ大気中の原子核のクーロン力により運動の方向を曲げられることでガ ンマ線を放射するという制動放射を起こす。これによって発生したガンマ線によって再度電 子陽電子対生成が発生する。この過程の連鎖を電磁シャワーと呼ぶ。

一方、ガンマ線ではなく宇宙線の到来によって発生するシャワーをハドロンシャワーと呼び、両者を合わせて空気シャワーと呼ぶが、電磁シャワーとハドロンシャワーはその発達の始まり方が異なるため、シャワーの形状が異なる。ハドロンシャワーはπ⁰崩壊などによるシャワー形成の際、到来した陽子の進行方向大して垂直な速度成分が比較的大きいため、図 1.4 右に示すように電磁カスケードシャワーよりも広がりをもつシャワーとなる。



図 1.4: シミュレーションによるシャワー発達の比較、電磁カスケードシャワー (左) とハドロンシャ ワー (右)[3] ハドロンシャワーの方が広がりが大きい。

¹電子陽電子対生成を起こすのに必要なガンマ線のエネルギーの大きさは 1.022 MeV である。これは電子と 陽電子の静止エネルギーが 0.511 MeV であることによる。

チェレンコフ光

物質中を荷電粒子が運動する際、その速さが物質中の光速を超えている場合チェレンコフ 光を放射する。宇宙から到来したガンマ線や陽子によって発生した空気シャワー中の電子、 陽電子は空気中の光速 c/n (c は真空中の光速、 n は大気の屈折率)を超え、大気中に紫外か ら可視光領域の波長をもつチェレンコフ光を生じる。チェレンコフ光と電子、陽電子の運動 方向のなす角を θ 電子、陽電子の速さを v としたときの関係式を 1.1 に、チェレンコフ光放 射の概要図を 1.5 に示す。

$$\theta = \arccos(\frac{c}{nv}) \tag{1.1}$$

式中にある大気の屈折率nが高度によって変わることにより、チェレンコフ光の発生高度に 関わらず地表に到達するころにはおよそ直径 300 mの広がりを持つ。この直径 300 m 程度の 領域をライトプールと呼ぶ。図 1.6 に示す通り、ライトプール全体の光子数は到来したガン マ線のエネルギーに依存するが、同一のライトプール内における光子数密度は場所によって 大きく変わることはない。このことから、到来したガンマ線によるライトプール内でチェレ ンコフ望遠鏡がチェレンコフ光を観測した場合、その光子数からガンマ線のエネルギーを算 出することが出来る。



図 1.5: チェレンコフ光放射の概要図



図 1.6: ガンマ線のエネルギー差によるライトプール内の光子密度の違い [17]。横軸がライトプール の中心からの距離を、縦軸が光子密度を表している。

1.2.3 IACT の観測原理

大気中に生じたチェレンコフ光をIACT で観測することでガンマ線のエネルギーの大きさ 及び到来方向を見積もることができる。

エネルギーの大きさ

この望遠鏡は放物面などの形状をもつ反射鏡を用いてライトプールに降り注ぐチェレンコ フ光を集めて、その焦点面に位置するカメラで光子を検出する。チェレンコフ望遠鏡がチェ レンコフ光を観測するイメージを図 1.7 に示す。先述の通りライトプール内において光子数 密度が到来したガンマ線のエネルギーの大きさに依存することと、プール中心からの距離に よらずほぼ一定であることから直径 300 m のプールのうち一部を観測出来れば到来したガン マ線のエネルギーの大きさを見積もることが出来る。



図 1.7: チェレンコフ光を観測するチェレンコフ望遠鏡のイメージ図 [6]

到来方向

チェレンコフ望遠鏡で検出したチェレンコフ光のイメージから空気シャワーの発達イメー ジを形成することで、到来したガンマ線の到来方向を求める。この際ライトプール内のチェ レンコフ光を複数の望遠鏡で観測することでより高い精度で到来方向を予想することが出来 る。これをステレオ観測と呼び、2台以上の望遠鏡のシャワーイメージの軸の交点からガン マ線の到来方向がわかるというものである。1台及び2台の望遠鏡で観測するイメージを図 1.8 に示す。



図 1.8: 望遠鏡一台での観測(左)と二台での観測(右)のイメージ[7]

バックグラウンドとの区別

IACT はガンマ線により発生した空気シャワーである電磁カシャワーのチェレンコフ光を観 測目標としており、その際宇宙線により発生するハドロンシャワーのチェレンコフ光がバック グラウンドとなるが、両者のシャワーの発達の違いから望遠鏡で検出されるシャワーイメー ジの形が異なるためこれらを区別することが出来る。両者のイメージを図1.9 に示す。



図 1.9: 観測されるシャワーイメージの比較 [11]。陽子起源のシャワーはばらつきが大きいのに対し、 ガンマ線起源のシャワーは線に近い形である。

第2章 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画

2.1 CTA 計画の概要



図 2.1: CTA の完成イメージ図 [12]

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、図 2.1 のように地上に口径の異なるチェレ ンコフ望遠鏡を北半球と南半球に 1 か所ずつ大規模配列することにより、既存のチェレンコ フ望遠鏡に比べて 10 倍高い感度で超高エネルギーガンマ線の地上観測を目指す次世代の国 際共同プロジェクトである。望遠鏡を配列する場所として北半球はスペインのラ・パルマ島、 南半球はチリのパラナルに決定している。いずれも既に望遠鏡が現役で稼働しているという 実績をもつ。本プロジェクトは 32ヵ国から総勢約 1200 名の研究者や学生らが参加しており、 2021 年のフル観測開始を目指して開発が進んでおり、その後約 20 年にわたり全天を観測す る。2015 年末には北半球の観測地であるラ・パルマ島で建造に向けた着工式が執り行われ、 2016 年現在はこれまでの基礎研究を基にプロトタイプの建造に向けて各部品の製造、組み立 てや性能評価を進めている。

CTA では図 2.2 に示すように、ガンマ線の各エネルギー帯を分担させた大中小と口径の異なる望遠鏡を数十台配列することで 20 GeV から 100 TeV 以上にわたる広いエネルギー幅の ガンマ線観測に加え、観測感度を向上させることで図 2.3 で示すように 1000 以上の超高エネ ルギーガンマ線天体を新たに発見すると期待できる。



図 2.2: 観測エネルギー範囲における CTA の目標感度曲線を赤、既存のチェレンコフ望遠鏡である MAGIC 及び H.E.S.S. の達成感度曲線をそれぞれ緑、青で表している [1]。



図 2.3: 高エネルギー天体発見数の年代変化。横軸が年代、縦軸が発見された天体の数で、X 線源を 緑、ガンマ線源を青、超高エネルギーガンマ線源を赤で表している [1]。

2.2 Large-Sized Telescope (LST)



図 2.4: LST 完成イメージ図、池下章裕氏/提供 CTA コンソーシアム

2.2.1 LST 開発の概況

CTAの日本グループが精力的に開発をしている Large-Sized Telescope (LST)とは、CTA 計画で建造し運用する最も大きいチェレンコフ望遠鏡で、その集光用の主鏡サイズは直径に して 23 m、面積にしておよそ 400 m² である。LST の完成イメージを図 2.4 に示す。LST は ガンマ線によって生じたチェレンコフ光を主鏡でカメラに集めてこれを光検出モジュールで 検出する。以下では LST 主鏡を構成する分割鏡及び光検出器について述べる。

分割鏡

口径 23 mに及ぶLST の巨大な放物面鏡を対辺間距離が 1.51 m の正六角形の鏡およそ 200 枚で構成する。これを分割鏡と呼んでおり、CTA 日本グループではこれを三光製衡所で製作 している。分割鏡を製造する際にはガラス板で挟んだアルミハニカムを固定し、これを曲率 つきのマスターモールドで形作るというコールドスランプ法を採用している。コールドスラ ンプ法の概要図を図 2.5 に、完成したハニカム構造を図 2.6 に示す。これによって完成した分 割鏡の表面には図 2.7 に示すスパッタリングという手法によりコーティングが施される。こ れは真空のチェンバーに設置したコーティング材料に向けて、イオン化した希ガスや窒素ガ スを衝突させることでコーティング材料を原子単位で弾き飛ばし、コーティング対象の表面 に成膜させるという手法である。

このようにして製造された分割鏡およそ 40 枚が既に東京大学の宇宙線研究所に納品されている。実際に納品された分割鏡を図 2.8 に示す。



図 2.5: コールドスランプ法模式図 [10]



図 2.6: 分割鏡のハニカム構造 [7]



図 2.7: スパッタリング法模式図 [8]



図 2.8: 宇宙線研究所に納品された分割鏡 [9]。

光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT)

LST の場合はカメラの光検出器として図 2.9 に示す光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT)を用いてこの光を検出する。PMT は図 2.10 のように入射した光によって引き起こさ れた光電効果により発生した光電子を最終的に4×10⁴倍の電子に増幅させる。これをPMT 背後のプリアンプを経た後に読みだし回路でサンプリングする。ここで注意したいのは、光 電効果が確率的に起こる現象ということである。この確率を量子効率 (Quantum Efficiency, QE)という。PMT に入射した光子のうち光電効果が起こらなかったものについては検出が 出来ないということであり、QE が低ければ実際に検出できる光子数はその分少なくなって しまう。LST に使用する PMT は CTA の日本グループが浜松ホトニクス株式会社と共同開発 した R11920-100 であり、我々の用途に特化させ地表で観測できるチェレンコフ光の強度が 最も高い波長350 nmの光子に対して QE が最も高くなるように設計されている。この PMT は QE を高めるために図 2.11 で示すように入射窓をスリガラスにするという工夫が施されて いる。これにより入射した光子の一部が散乱されてから PMT の光電面に入ることで、光検 出効率が高まるのである。この詳細は3.3.2で述べる。これによる QE の向上は数 % に過ぎ ないが、90 %程度の反射率をもつ主鏡の精度を数%高めることよりも、QE が数 % 向上する 方が重要である。これはチェレンコフ光の検出能力が、主鏡の反射率と QE の積算に比例す るためである。



図 2.9: LST で使用する PMT R11920-100



図 2.10: PMT で電子数を増倍するイメージ図。光電効果によって発生した光電子が内部電圧にとって加速してから第一ダイノードに衝突し複数の電子を弾く。これを二次電子と呼び、これらが内部電圧で加速され第二ダイノードに衝突し更に多くの電子を弾き出す。この過程により電子数を増倍する。



図 2.11: PMT の入射面。表面はスリガラスで出来ており、入射した光子を散乱させることで QE を 高めている。

2.2.2 LST による観測

LST は CTA の観測エネルギー帯域で最も低い範囲を担当することとなり、観測するガン マ線の閾値は 20 GeV を目標としている。

口径の大きい望遠鏡が低いエネルギー帯を担当するのはチェレンコフ光の観測からガンマ 線の到来方向を決定する際のメカニズムと関係している。1.2.3 で述べた通りガンマ線の到来 方向を算出する際にはチェレンコフ光を検出するが、この算出をするには統計的に 50 以上 の光子検出が必要であり、これを稼ぐためには主鏡を大きくするのが最も典型的な方法とい える。また検出する光子数が多い程ガンマ線の到来方向の決定精度が高まるため、チェレン コフ望遠鏡はより多くの光子を観測することが重要である。

チェレンコフ光の観測について光子数や主鏡面積の具体的な数値を踏まえて述べる。1 TeV のガンマ線によって生じるチェレンコフ光はライトプールの内部において、光子密度にして およそ 50 photons / m² で降り注ぐ。現役のチェレンコフ望遠鏡の 1 つである MAGIC を例 に考えると、その主鏡面積およそ 200 m² に降り注ぐ光子数は 10,000 であり、このうち正し く反射・集光しさらに光電効果を経て検出されるのは 10 % である。即ち MAGIC 望遠鏡が 1TeV のガンマ線を観測する場合はおよそ 1,000 の光子を検出することになる。これはガンマ 線の到来方向を算出するのに充分な数である。一方、ガンマ線のエネルギーと発生するチェ レンコフ光の光量が比例することから、MAGIC 到来方向の算出に必要な 50 個の光子を検出 することが出来るガンマ線エネルギーの最低値、すなわちエネルギー閾値は 50 GeV である ことがわかる。

LST の主鏡は MAGIC の約2倍の面積をもつ。そのため LST が MAGIC と同程度の集光 能力・検出能力をもつと仮定した場合のエネルギー閾値は 25 GeV と期待できる。更に、最 新のチェレンコフ望遠鏡として、MAGIC よりも集光能力や検出能力が高ければ 25 GeV よ りも低いエネルギーのガンマ線観測を実現することができる [1]。さらに光子を多く集めるた めの具体的な方法として以下が考えられる。

QE の向上

主鏡に降り注いだ光子数と、そのうち最終的に検出される光子数の差が大きい原因は QE が 30 から 40 % 程度であることにある。これが跳ね上がれば話は早いが、原理的 に難しい事であり、大幅な技術革新が無い限り考えづらい。

主鏡面積の拡大

LST は MAGIC のおよそ 2 倍の面積をもつ。光子をより多く観測する最も単純な方法 といえるが、広大な面積の鏡を支える強力な構造、生産や運搬の際の費用といった現 実的な問題が多くある。

鏡の反射率向上

光子が鏡で反射する際にその鏡の反射率分は正しく反射できるが、それ以外の光子を 失ってしまうため、反射率を高めることは観測可能な光子数の増加に直結する。望遠 鏡に使用する反射鏡の材料の選定が重要である。

鏡の集光能力向上

集光力とは入射した光子を正しい方向へ反射させる能力を差す。反射鏡の形状の精度 が問われる。尚、ここでは反射率とは区別する。 これらを考慮すると、鏡の反射率や集光能力を高めることこそが観測する光子数を増やし エネルギー閾値を下げるために現実的で有効な手段であると言える。そのため現在に至るま で主鏡の反射率や集光能力の研究がされており、特に茨城大学では鏡の経年による劣化試験 や、三光製衡所で製作された分割鏡の結像性能及び反射率の評価が行われている [7][8][9]。

ライトガイド

高い反射率及び集光能力が求められるのは分割鏡によって実現する主鏡の他にもある。そ れが本研究で扱っているライトガイドという光学素子である。ライトガイドの性能を高める ことも、望遠鏡運用において光子をより多く集める方法の要素の1つとなる。ライトガイド の形状を入射窓が円形状のPMT向けに最適化することは以前まで行われていなかった。一 方、先に挙げた光子をより多く集める方法はいずれも現実的に難しい。次章からライトガイ ドを題材としている本研究の本質に入る。

第3章 LST初号機用ライトガイドの試作

3.1 ライトガイドの役割

23 mの口径をもつLST の焦点には主鏡で反射したチェレンコフ光を捉えるカメラとして 1855本ものPMT を配置する。このPMT は 2 章でも述べた通り入射窓が円形であるために、 これを敷き詰めても隙間を生じてしまう。デッドスペースとなるこの隙間に入射した光は検 出できずに失ってしまうこととなる。2.2.2. で述べた通り LST はエネルギー閾値を下げるた めに少しでも多くの光子を稼ぎたいため、デッドスペースは最小限に抑えたい。そこでこの スペースを埋めるために PMT 1 つ1 つに対してライトガイドという光学素子を取り付ける。 LST のカメラには PMT をハニカム構造に倣った形で配置するため、これの隙間を埋めるた めにライトガイドは六角形の入口をもったテーパー形状とし、その内側を反射面にすること でライトガイド入口から入射した「ライト」を出口に位置する PMT まで「ガイド」する。 これにより PMT 同士の隙間を埋めることが出来る。ライトガイドを PMT に取り付けるイ メージを図 3.1 に示す。



図 3.1: PMT 7本すべてにライトガイドを装着するイメージ

また、LST の焦点に位置するカメラは主鏡のみを視野とすることで、主鏡から反射してき たチェレンコフ光のみを検出するのが理想だが、実際には主鏡の外からも地面や LST 自身 の骨組みによる照り返しが入射しバックグラウンドとなってしまうことが考えられる。ライ トガイドの形状次第では、このバックグラウンドの低減も可能である。尚、ここで言うカメ ラの視野とは図 3.2 に示すように LST 焦点のカメラから主鏡の縁までを見渡す範囲を指して おり、LST のガンマ線天体に対する視野¹とは異なるので注意したい。

以上をまとめると、LST に搭載するライトガイドの役割とは主鏡で反射したチェレンコフ 光を集めると同時に主鏡の外から入る光を跳ね返すことで、デッドスペースとなる PMT 同 士の隙間を埋めつつバックグラウンドを低減するということである。このイメージを図 3.3 に示す。

¹LST のガンマ線天体に対する視野は 4.5 度である。



図 3.2: LST の模式図。カメラの端から主鏡の反対側の縁までの角度を θ としておりこの値を求める と 25.2 度となる。



図 3.3: ライトガイドの役割イメージ。各矢印は光子の軌跡を表しており、緑はライトガイドとは無関係に直接 PMT に入射する例、赤はライトガイド内部での反射により PMT 間のデッドスペースに入射するのを回避して PMT まで導いた例、青は視野外の光子をライトガイド内部での複数反射により弾いた例である。

ライトガイド形状最適化の必要性

MAGIC 望遠鏡などのライトガイドの曲面形状には Winston Cone [13] が採用されている。 この曲面は、放物線の軸と平行に入射した光が全て焦点に集まるという性質を応用したも ので、設計の際に定めた値より小さい角度で入射した光を検出器まで導く一方、それより大 きい角度で入射した光を跳ね返すのが特長である。この境目の角度を cut-off angle と呼ぶ。 LST の場合はライトガイドを搭載するカメラから見た主鏡の縁までの角度 θ が図 3.2 の値か ら 25.2 度と求まることから、LST 用ライトガイドの cut-off angle はこれより大きくする必要 がある。ただしこの Winston Cone が先述のような理想的な性質を実現するのは 2 次元にお ける話であり、これを六角形の入口形状をもつライトガイドの曲面とした場合 2 次元平面で は存在しなかった回転方向を加味する必要性があり、実際にライトガイド内側の向き合う辺 同士を Winston Cone にすることが LST にとって最善であるかどうかは自明ではない。LST に特化したライトガイドを作るためには形状の最適化が必要となる。

3.2 先行研究

本研究は先行研究者である黒田氏 [15] 及び田中氏 [16] から引き継いだものである。ここで は先行研究での成果や当時の時点で決定していた事項を簡潔に述べる。

3.2.1 ライトガイドの設計の基礎

ライトガイドの量産に向けた設計

望遠鏡1台につきおよそ 2000 個必要になるライトガイドは、試作品設計の段階で量産を 前提とした寸法決めが必要となる。寸法決めにおいて注意を払わなければならないのが公差 である。公差とはある設計を基として物を作る際に生じる寸法上のばらつきを指し、設計の 段階で公差を把握しておく必要がある。LSTに並べる PMT の中心間の距離が 50 mm である ことから、公差が大きい方向に振れた場合でもライトガイド入口の外径がこれより小さい必 要がある。仮に 50 mm を超えた径をもつライトガイドが並んだ場合は互いに押し合い、結 果的に焦点面に歪みを生じたり、一部のライトガイドが外れて落下してしまうことが考えら れる。このような事態を避けることを前提にライトガイドの型を造形する射出成形による公 差を加味した寸法決めについては 3.4 で詳しく述べる。

ライトガイド自身によるデッドスペースを低減するための設計

図 3.4に示すように、ライトガイドを焦点面に搭載した際、ライトガイド先端の縁の厚み がデッドスペースとなってしまう。縁の厚みはライトガイドを作る材料によって変わる(詳 細は後述)が、例えばこの厚さを 0.5 mm とした場合は縁によって焦点面に 4 %のデッドス ペースを生じることとなる。これは即ち、200 枚の分割鏡で構成する約 400 mm² の主鏡で焦 点面に集める光のうち 4 %はデッドスペースによって失ってしまうということである。この 4%を主鏡で換算すると 200 枚の分割鏡のうちの 8 枚分に相当する。

そこで、先端の厚みを最小限にするために考案されたのが、図3.5に示すようにライトガ イド先端から反射材を飛び出させるような設計である。後にライトガイドの反射材として採 用が決まったスリーエムジャパン株式会社が販売している高反射フィルムである Enhanced Specular Reflector (ESR)に追加コーティングを施した物の厚みである 0.1 mm を縁の厚み として計算すると、デッドスペースを 0.8 %にまで抑えることが出来る。



図 3.4: ライトガイド先端の厚みによるデッドスペース [16]。ライトガイド先端の厚さを仮に 0.5 mm とした場合、ライトガイドの両端合わせて 1 mm がデッドスペースとなる。対辺間距離 50 mm をも つ正六角形のうち 1mm が縁になる場合、面積で考えると全体のうち 4 %がデッドスペースとなる。



図 3.5: 反射材のはみ出しによるデッドスペースの低減 [16]。反射材の厚みを 0.1 mm とした場合、 デッドスペースを 0.8 %に抑えることが出来る。尚、反射材をはみ出させる長さ h はライトガイドの 高さ L を含む曲面形状によって決まる。これの具体的な値は 3.4 で記す。

PMT 入射窓に合わせた設計

ライトガイドの入口は六角形であるが、出口をこれと同じように六角形としてしまうと図 3.6 に示す PMT の入射窓の形状に合わず、ライトガイドを PMT に取り付けても図 3.7 に示 すように隙間を生じてしまう。これでは PMT とライトガイドの隙間から光子を漏らしてし まうため、PMT の入射窓がライトガイドに「めり込む」ような設計をした。この設計の結 果ライトガイドと PMT が隙間なく取り付けられている様子を図 3.8 に示す。



図 3.6: R11920 – 100の入射窓 [16]



図 3.7: 六角形の出口をもつライトガイドを PMT に取り付ける際に生じる隙間 [16]。PMT とライト ガイドの間に隙間が生じてしまい、ここから光子 が漏れてしまう。



図 3.8: PMT 入射窓の形状に合わせたライトガイド [16]。これにより光子の漏れを防ぐことが出来る。

3.2.2 ライトガイドの試作方法

ESR の切断

ライトガイドの型に反射材 ESR を貼り付ける際には、ライトガイドの内側曲面に合わせて ESR を切断する必要がある。ライトガイドの曲面に合わせて精確に切断するために、レーザーカッターによる加工を東京紙器株式会社(以下東京紙器社)に依頼した。

ESR をレーザーカットするにあたり、切断用の図面が必要となる。ESR をライトガイド の内面 6 枚分に切断する必要があるが、ここで ESR をすべてバラバラに切断するのではな く、6 面のうち隣り合う面の先端部分だけは切断せずに繋げたままにしておくことで、ESR を型に貼り付ける作業を簡単にすることができる。先端部分を繋げたままにする図面の例を 図 3.9 に示す。



図 3.9: ESR の切断図面の例 [16]。先端部分を数 mm だけ繋がったままにしておくことでライトガイ ドの型に貼り付ける際の扱いを簡単にする。

ESR の貼り付け

レーザーカッターによって切断した ESR をライトガイドの型に貼り付ける工程は手作業 で行う。ただし、接着面に糊を広げる作業を指で行うと糊が均一に広がらず、結果的にライ トガイドの鏡面の歪みを招いてしまうことがわかった。そこでライトガイドの内側表面に合 わせて設計した「オス型治具」を作りこれを使用することで、ESR を貼り付ける際に糊が比 較的均一に広がるようになった。オス型を用いたライトガイドの試作の様子を図 3.10 から図 3.14 に示す。尚、ここで使用しているオス型やライトガイドの型は 3D プリンタ製である。 この 3D プリンタについては 3.5.1 で詳しく述べる。



図 3.10: 糊付けに用いるオス型治具 [16]



図 3.11: オス型を使用してライトガイドに反射材 を貼るイメージ[16]。右側にあるライトガイドの型 に向けてオス型を押し込む。





図 3.12: ライトガイドに糊を塗布する様子 [16]。 全体に糊を塗布してから反射材をセットする。 図 3. [16]。

図 3.13: ライトガイドにオス型を押し込む様子 [16]。全体を均一に押すことが出来る。



図 3.14: 完成した試作品 [16]。先端から ESR がはみ出している。

3.3 形状の最適化

3.3.1 PMTの特性

LST では光検出器として浜松ホトニクス社と共同開発した R11920-100 という PMT を使 用する。PMT は入射した光子を光電効果により光電子に変換し内部の電場で加速後ダイノー ドに衝突させることで、より多くの電子をはじき出す。この電子がさらに内部で加速され、 次のダイノードに衝突した際にさらに多くの電子を弾き出す。この繰り返しにより電子数を 増やすことで、光子がたった1個からでも検出することができるのが PMT の強みである。

R119020-100 は光の入射角度によって出力値が変わるよう設計されている。PMTの光電 面で起こる光電効果は確率的に発生するものであり、光子の入射角によっては図 3.15 に示す ように光電面を2回通過しうる。これは double crossing と呼ばれ、光電効果が発生する機会 を2回得るため実効的な量子効率が上がる [18]。double crossing を意図的に起こすことで量 子効率を高められるようなライトガイドの形状が完成すれば結果的に光検出系の効率を高め ることが出来る。そこでライトガイドの形状を最適化するにためのシミュレーションに使用 するために、PMT 出力の入射角度依存性を測定した。ここでは 3.16 に挙げた機器を使用し て図 3.17 のセットアップで測定した。また、光源には 3.18 に示す通り、波長 465 nm をピー クに持つ LED を使用した。



図 3.15: double crossingの模式図。光子の入射角度によっては光電面を2回通過する機会を得ることがあるため、光電効果を起こす確率が高まる。

	型番	メーカー
LED	NSPB346KS	日亜化学工業
diffuser	#49-158	Edmond Optics
Pulse Generator	3390型	KEITHLEY
Voltage Supply	GPD-3303D	GW-INSTEK
Rotation Stage	SGSP-60YAW-0B	シグマ光機
Stage Controller	GSC-02	シグマ光機
DRS4	ver4	PSI

図 3.16: PMT の入射角度依存性測定に使用した機器



図 3.17: PMT の入射角度依存性測定のセットアップ概要図。光源から PMT までの距離を 2.4 m 確保したこのセットアップにより PMT に入射する光の広がりを 1 度以内としている。



図 3.18: 波長 465 nm の LED のスペクトル [20]



図 3.19: DRS4 でサンプリングした波形。LED 光による出力を積分する。

ここでは PMT を用いた測定によって得られるデータとその解析方法について述べる。パ ルスジェネレーターから LED には周波数 1 kHz、振幅 5.0 V、幅 100 nm のパルス信号を入 力し、TTL 信号を DRS4 にトリガーとして入力した。LED の光が PMT に入射し光電効果 の後に内部電圧で増幅した電気信号が出力され、これをさらにプリアンプである PACTA で 増幅した信号を DRS4 に出力する。この信号を電圧値として DRS4 がサンプリングスピード 1.982 GHz でデジタル変換し、PC ヘデータを送信している。これにより得られた波形を図 3.19 に示す。この波形の値を積分することで PMT が検出した光量に対応する量が得られる。 尚、測定の際は上記のパルスを 500 イベント繰り返したデータを使うことで、PMT 出力の 不安定性などによる測定結果のばらつきを抑えている。これらを全て積分して平均した値を PMT 出力値と呼ぶ。

PMT の入射角度依存性測定



図 3.20: PMT の入射窓をピンホール付きのマスクで覆った状態

図 3.20 のように PMT の入射窓にピンホール付きのマスクを取り付けて入射口を中央の直径 5 mm 程度の円に絞ることで、半球状である PMT の入射窓を平面に近い状態にした。さ

らに回転ステージで PMT の向きを調整することで、PMT 入射面と入射する光子の進行方 向のなす角を1度ずつ変えながらその時々のPMT出力値を記録した。PMT 10本について 入射角度依存性を測定した結果が図 3.21 である。尚、測定に使用した PMT は実際に LST 初号機に使用する予定の個体の中から無作為に選んだものである。結果を見ると、同じ入射 角でも個体によって他と出力値が大きく異なるものがあることが分かる。PMT のシリアル ナンバー ZQ 3202 などが該当するが、これは PMT に取り付けている増幅器の倍率が他と異 なるためである。また、入射角の絶対値が大きくなるほど PMT 出力が小さくなるのは光源 から見た PMT の入射口であるピンホールの面積が cos に従って小さくなっていくためであ る。しかし、測定結果は cos 曲線と完全には一致しておらず、20 度付近や 60 度付近の入射 角度においては、数%から十数%高い値となっている。これが入射角度依存性によるもので ある。先の説明の通り、ある程度の角度をもって入射した光子は入射面で光電効果を起こす 機会を2度得ることがある。これによる実効的な量子効率の高まりによる PMT 出力の入射 角度依存性を図 3.22 に示す。これは先述の測定結果を PMT 10 本それぞれについて入射角 0度における出力値を1として相対値化したうえで cos で補正をかけた結果である。複数あ るプロットが PMT 10 本分の結果であり、それらを平均化したものを黒の破線で、これを更 に+, - 方向について平均化したものを実線で表している。

この測定結果から、定量の光子がPMTに入射する場合はその入射角が60度程度であると 最も多くの光子を検出することが出来ることがわかる。すなわちライトガイドの曲面を設計 する際はライトガイド内部で反射した光子が角度60度でPMTに入射するような形状にする べきだといえる。



図 3.21: PMT 入射角度依存性測定結果



図 3.22: PMT 入射角度依存性解析結果。各 PMT での測定結果を入射角 0 度を基準に相対値化した うえで、cos による補正を掛けている。この結果から、光子が正面入射する場合よりも 60 度程度の角 度で入射する場合の方が出力が高いことが分かる。すなわち、60 度付近で PMT に入射する光子数が 多いようなライトガイドの曲面を設計するのが好ましいといえる。
3.3.2 ライトガイドの形状決定

実験から得られた PMT の入射角度依存性や、図 3.23 に示す入射「位置」依存性のデータ (浜松ホトニクス提供)を用いて、名古屋大学の奥村曉氏が光線追跡のシミュレーションから ライトガイドの曲面形状を最適化した。この際、ライトガイド内側の向かい合う面は Winston Cone をベースとし、少しずつ面の湾曲具合を変えながら集光効率をシミュレーションで算 出し、我々の目的に合った形状を導き出した [14]。

曲面形状の最適化の結果、ライトガイドの入口径を50 mm、出口径を22 mm、cut-off angle を25.8 度とした。これが図3.2 で示した25.2 度より大きいのは、光子をより多く検出するの に重要である cut-off angle 直前の角度から来た光子に対する検出効率を高めるためである。 望遠鏡に搭載したライトガイドカメラから任意の主鏡を見た方向とライトガイド光軸のなす 角度を θ とする。このときある角度 θ 付近がつくる微小立体角の延長上に含まれる鏡の面積 は sin θ に比例する。即ち、主鏡からライトガイドに入射する光の角度が大きいほどその光 量は多いということであり、cutt-off angle 直前の入射角をもつ光子に対する集光能力がより 重要である。そのため Okumura Cone は cut-off angle 直前の光子をより多く集められる形状 とした。



図 3.23: PMT の入射位置依存性。横軸が PMT 中心から表面に沿った距離で縦軸が PMT 出力の相対値である。尚、 ϕ の値である 22 mm とは、最適化したライトガイドの出口直径である。浜松ホトニクス提供。



図 3.24: カメラから見た主鏡のイメージ図。微小立体角に含まれる鏡面積を比べると内側(青)より も外側(赤)の方が大きい [19]。

3.4 LST 初号機用ライトガイドの設計

ここまでライトガイドの形状のうち、本質的な箇所である内側の曲面について述べてきた。 ここでは望遠鏡のカメラの一部品であるライトガイドが他部品と嵌合するための構造につい て述べる。光検出モジュールはPMT 及びライトガイド7個ずつを1セットとしており、これ らをまとめて保持するための部品であるライトガイドプレートの設計と平行してライトガイ ドの嵌合部を設計した。設計の際にはAutodesk社のコンピュータ支援設計ツール (Computer Aided Design, CAD) である Autodesk Inventor Professional 2015 というソフトを使用した。 ライトガイドプレート及びライトガイドは互いに嵌合する関係にあるので、これらを実際に 製作したときの公差によらず正しく嵌合する様に寸法を決めた。これについて以下で両者の 設計の詳細を述べる。

ライトガイドプレートの設計



図 3.25: ライトガイドプレートの設計図

図 3.25 の中央から左側はライトガイドプレートを正面及び側面から見た設計図である。右 側はライトガイドとの嵌合部分を拡大した図である。ここから各箇所の寸法について説明す る。尚、長さの単位は全て mm である。

- 145 ライトガイドプレートの外径。PMT 及びライトガイドを3組並べた上で両端に肉厚を 確保しながら光検出器モジュールをカメラとして組み立てる際に邪魔にならない値と した。
- 5 ライトガイドプレートをプラスチックで製作する場合における肉厚の上限値。PMT に取 り付けられたバネによりライトガイドが押されるため、これによる変形を避けるため

出来るだけ厚くした。ただし厚さ5mmのプラスチックでも強度不足が懸念されたため、最終的にはより強度の高いアルミで製作した。

1.8 ライトガイドのツメ(後述)の大きさに合わせた値。

39.38 ライトガイド下部を入れるための穴。

- **40.23** 39.8 mm の穴とライトガイドのツメの長さ 0.85 mm を足した値。
- **50** PMT 及びライトガイド同士の中心間の距離。ライトガイドの外径がこれより大きくなら ないように設計する必要がある。
- 3.2 ライトガイドプレートを保持する柱を通す為の穴の径。

2.99 ライトガイドのツメ入口。

0.85 ライトガイドのツメ奥行き。

2.52 ライトガイドのツメ先端部の幅。

ライトガイドの型の設計

ライトガイドはプラスチックで射出成形した型(以下、プラスチックコーン)とフォイル 状の高反射材で製作する。射出成形とはプラスチック製品の量産に広く用いられている成形 方法で、先に製作した金型に熱して液状となっているプラスチックを流し込んでから冷却し て個体となったプラスチックを金型から取り出すという方法である。この成形方法では金型 の製作に数十万円掛かるが、その後プラスチック製品を成形するのは数百円程度で済むため、 製作する個数が多い程1個あたりの値段が安く済むことから大量生産の手法として広く用い られている。大口径望遠鏡1台に必要なライトガイドは1855個であり、1個1個をドリル などの削りだしで製作するよりも射出成形の方が遥かに安価であることから、射出成形を前 提に設計をした。

プラスチックコーンの射出成形はプロトラブズ株式会社(以下プロトラブズ)に依頼した。 射出成形を前提に設計するにあたって考慮するべき公差の原因は大きくわけて2つある。公 差は金型加工時とプラスチック成形の際の冷却時に生じる。プロトラブズに依頼する場合、 前者による公差は± 0.08 mm で、後者は使用するプラスチックによって異なる。プラスチッ クコーンの材料として Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)を最も薄い肉厚 0.5 mm が実 現可能な材料として決定した。尚、ポリプロピレンも同じ厚さで成形可能だったが、こちら は接着剤が貼り付きにくいという先行研究の結果 [16] から却下した。ABS の公差は± 0.002 mm / mm である。これは1 mm の製品を作った際の公差が最大 0.002 mm であることを表 している。嵌合ヶ所についてはこれらの公差が偏った場合でも正しく嵌合が出来るような値 としている。

49.32 ライトガイドの入口径 (50 mm) から決めた値。詳細は後述

22.2 ライトガイドの出口径。尚、ここに反射材を貼り付けることで完成品の出口径は 22 mm となる

5 ライトガイドプレートの厚さに合わせた。



図 3.26: ライトガイドの設計図

- 1 ツメの飛び出し部分。
- 43 ライトガイドプレートの嵌合穴に収まる値。
- 39.92 下部の径 38.92 mm とツメの飛び出し部分 1 mm の和。
- 0.5 射出成形での最小肉厚。
- 1.5 ツメの厚さ。プレートに取り付けやすいような程よいしなりと、一度取り付けた後は外 れないようにするだけの強度が必要である。そこで 1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm の厚さ にした試作品で強度を確認したところ 1.5 mm が最適と判断した。

2.43 ツメの付け根。

2.52 ツメの先端。

ライトガイド外径の決定

ライトガイドの直径には制限がある。PMTの中心間の距離が 50 mm であることから、ラ イトガイド先端から飛び出した ESR の対辺間の距離を 50 mm とした。これが LST カメラ のピクセルサイズに相当する。また、ESR を支える型にも同じように制限がかかる。先述 の通り、型の造形に採用した射出成形の際に生じる公差を考慮し、仮に設計から公差の最大 値で造形された場合でも隣のライトガイドと干渉しないようにするために設計する必要があ る。ライトガイドの出口径 50 mm に対して ABS の成形公差は 0.1 mm で金型の成形公差で ある 0.08 mm と合わせると 0.18 mm の公差となる。これに熱膨張²やライトガイドを光検出 モジュールの一部品として組み立てる際に必要な隙間として 0.5 mm の余裕を設けて、ライ トガイドの型の対辺の外壁間の距離を 49.32 mm とした。

ライトガイド曲面の設計

CAD を用いてライトガイドの曲面を設計する方法を簡潔に記す。奥村氏が最適化した曲 面形状である Okumura Cone を図 3.27 に示すように 101 個の座標で表し、この座標を CAD に取り込む。Autodesk Inventor Professional 2015の場合、図.1のように EXCEL ファイル から曲線を作成することができる。これによって描いた曲線は図3.29に示すように一番上の 点が中心軸からの距離24.9 mmの位置にある。これを反射材の表面とするために反射材自身 とこれを貼り付けるための糊の厚みの和である0.1 mm³だけ中心軸から離した位置を始点と する曲線をコピーした。さらに、型の肉厚を3mmとするための曲線も追加して図3.30に示 すように中心軸からの距離が25mmと28mmを始点とする曲線が完成した。引き続き先に 述べた型の外径の制限である 49.32 mm を考慮すると、これの半径にあたるライトガイド中 心軸から外壁までの距離が 24.66 mm となる。これとプラスチックの最小の肉厚が 0.5 mm であるという条件を合わせた結果、25 mm を始点とする曲線上かつライトガイドの中心から 24.16 mmの距離の位置がプラスチックの上端にあたることになる。ここより上側は3.2.1 で 述べた通り ESR がはみ出すことになり、Okumura Cone の場合このはみ出しの長さはおよ そ 15.3 mm となる。これらの寸法を載せた設計の途中の様子を図 3.31 に示す。これを左右 対称に向かい合う曲面として作成し、そこに反射材を貼り付けたイメージを図 3.32 に示す。 この手順で完成した曲面を六角対称にし、さらにプレートとの嵌合部を付け加えて完成した プラスチックコーンの全体像を図 3.33 に示す。また、反射材を貼り付けて完成したライトガ イド7個とプレートを組み合わせたイメージを図3.34に示す。

²外径 50 mm に対し熱膨張は 0.26 mm 以内。

³ESR を試験的にアクリル板に貼り付けて厚さをマイクロメータで測定した。

No.	x	z	1	No.	х	z		No.	х	z
1	24.9	68		35	22.3044	36.2586		69	17.4624	14.6575
2	24.8573	66.8841		36	22.1932	35.4981		70	17.2877	14.1347
3	24.8124	65.7803		37	22.0801	34.7464		71	17.1111	13.617
4	24.7655	64.6886		38	21.9651	34.0032		72	16.9328	13.1044
5	24.7166	63.6088		39	21.8482	33.2685		73	16.7527	12.5969
6	24.6655	62.5409		40	21.7293	32.5421		74	16.5708	12.0942
7	24.6124	61.4846		41	21.6085	31.824		75	16.3871	11.5963
8	24.5573	60.44		42	21.4858	31.1141		76	16.2016	11.1031
9	24.5	59.407		43	21.3611	30.4122		77	16.0144	10.6145
10	24.4408	58.3853		44	21.2346	29.7183		78	15.8254	10.1304
11	24.3794	57.375		45	21.1061	29.0322		79	15.6346	9.6507
12	24.3161	56.3759		46	20.9758	28.3539		80	15.4421	9.17526
13	24.2507	55.3879		47	20.8435	27.6832		81	15.2478	8.704
14	24.1832	54.4109		48	20.7094	27.0201		82	15.0518	8.23682
15	24.1138	53.4449		49	20.5733	26.3644		83	14.854	7.77362
16	24.0423	52.4896		50	20.4354	25.7161		84	14.6545	7.3143
17	23.9688	51.5451		51	20.2956	25.075		85	14.4532	6.85875
18	23.8932	50.6112		52	20.1539	24.4411		86	14.2503	6.40687
19	23.8157	49.6877		53	20.0104	23.8141		87	14.0455	5.95857
20	23.7361	48.7747		54	19.865	23.1942		88	13.8391	5.51373
21	23.6546	47.872		55	19.7177	22.581		89	13.6309	5.07226
22	23.571	46.9795		56	19.5686	21.9746		90	13.421	4.63405
23	23.4854	46.0971		57	19.4176	21.3748		91	13.2094	4.199
24	23.3979	45.2246		58	19.2647	20.7816		92	12.9961	3.76701
25	23.3083	44.3621		59	19.11	20.1948		93	12.7811	3.33798
26	23.2168	43.5094		60	18.9535	19.6143		94	12.5643	2.91181
27	23.1233	42.6663		61	18.7951	19.04		95	12.3459	2.48839
28	23.0278	41.8329		62	18.6349	18.4718		96	12.1258	2.06762
29	22.9303	41.0089		63	18.4729	17.9097		97	11.904	1.64941
30	22.8309	40.1943		64	18.309	17.3535		98	11.6805	1.23364
31	22.7295	39.389		65	18.1433	16.8031		99	11.4554	0.820216
32	22.6262	38.5929		66	17.9758	16.2584		100	11.2285	0.409037
33	22.5209	37.8058		67	17.8065	15.7193		101	11	0
34	22 4136	37 0278		68	17 6353	15 1857	I '			

図 3.27: Okumura Cone の座標。x はライトガイドの中心軸からの距離を、z は曲面の最下点からの 高さを表している。No.1 がライトガイド入口、No.101 がライトガイド出口の座標に対応している。



図 3.28: データ点の挿入を選択し、座標ファイルを読み込む。この際オプションにある「スプライン を作成」にチェックを入れておく。



図 3.29: Okumura Cone のスケッチが完了した。反射材の表面がこの曲面に沿うようにする必要があるため、ここから反射材及び糊の厚みを考慮する必要がある。



図 3.30: 曲線の始点を 25 mm、28 mm とした位置にコピーする。反射材及び糊の厚み 0.1 mm だけ 曲面を外側に動かしたのが始点 25 mm の曲線で、28 mm は型の肉厚を 3 mm とするための寸法決め である。尚、24.9 mm を始点とする曲線は使用しないため削除する。



図 3.31: ここで外径を決定する。型の外径が 49.32 mm であることと、プラスチックの最小厚みが 0.5 mm であることから中心軸からの距離 24.16 mm がライトガイド内側の半径となる。



図 3.32: プラスチックコーンの向かい合う曲面



図 3.33: プラスチックコーンの全体像



図 3.34: ライトガイド 7 個とプレートの嵌合イメージ図

3.5 試作品の性能評価

LST 初号機用ライトガイドの形状として決定した Okumura Cone と、既存のチェレンコ フ望遠鏡に採用されてきた形状である Winston Cone の性能を比較した。

3.5.1 ライトガイドの試作

性能の比較にあたり試作品を製作する必要がある。ここの試作には、ライトガイドの型に は3Dプリンタで造形したもの、反射材にはスリーエム社が販売する ESR を材料とした。 ただし、試作品の段階では測定のセットアップの都合上、ライトガイドの型の外径を50 mm 以内に抑える必要が無いため、ここでの型の設計はライトガイド先端の ESR 飛び出しが無 いような設計とした。

使用した3Dプリンタは株式会社キーエンス製のAGILISTA-3000である。AGILISTA-3000 の外観を図 3.35 に示す。AGILISTA-3000 は透明の樹脂である AR-M1 を図 3.36 のようにイ ンクジェットヘッドから水平面内で吐出してから、鉛直方向へ移動しその平面内でインクを 吐出するという課程を繰り返すことで立体的な造形を実現する。この際の造形精度は、積層 ピッチ 15 µm[23] と一般的に販売されている3Dプリンタの中でも比較的高精度である上、 プラスチックの削りだしによる加工などよりも安価で済む。AGILISTA による造形品の例を 図 3.37 に示す。

ESR についてはこの時点では UV に特化した高反射の追加コーティングを施したものが 準備できなかったため、追加コーティング無しのもの即ち市販の ESR を使用した。この際、 ESR をライトガイドの曲面に沿った形状に精確にカットするのは手作業では不可能なので、 田中氏の先行研究 [16] に倣い東京紙器社に依頼した。図 3.38 及び図 3.39 のように CAD で 作った図面と合わせて ESR を渡し、レーザーカット加工をしてもらうことでライトガイド曲 面の形状に合わせた ESR を入手した。この時のカットは 6 面分の ESR のうち、3 面を 1 組 として先端部分が 2.2 mm だけ繋がっている。これは 3.2.2 で述べた通り、糊付けの際にフィ ルム状の ESR を扱いやすくするためである。尚、繋がっているのが 6 面全てではなく3 面ず つなのは、当時入手した ESR のサイズ上の制限によるものである。



図 3.35: AGILISTA-3000[23]



図 3.36: AGILISTA-3000 の造形原理 [23]。ステージ上でインクジェットヘッドが X, Y 方向に移動し ながら樹脂を吐出し、UV によって硬化させ一層分の造形が終わったら Z 方向へ移動する。これの繰 り返しにより立体物を造形する。



図 3.37: AGILISTA-3000 による造形品の例 [23]。



図 3.38: Winston Cone 用の ESR 切断図面



図 3.39: Okumura Cone 用の ESR 切断図面



図 3.40: x、y、z 軸と曲面の位置関係。青線で示 図 3.41: z 軸方向から見た場合のイメージ。曲面 した縁を平らに伸ばした座標が必要となる。 が正三角形の一部に見える。

ESR カット用図面の作り方

ここでは ESR をカットするための図面の作り方について述べる。ライトガイドの曲面形 状である Winston Cone や Okumura Cone を設計図上に描く際は先述の通り、基となってい る曲線を 101 個の点で表した座標データを CAD に取り込んでいる。x と z で表したこの座 標データは曲面を真横から見たときの座標に相当するが、さらにこの奥行きを y 方向と定義 する。ここまでに定義した 3 軸とプラスチックコーン曲面の位置関係を図 3.40 と図 3.41 に 示す。

ESR のカット用図面を作成するには図 3.40 の曲面に青で示した縁を図 3.42 に示すように 平らに伸ばしたときの座標 z'とが必要となる。ここで図 3.27 における x や z の n 番目を x_n などと表すと、 z'_n は、 $z_1 = z'_1 = 68$ であることに注意しながら式 3.1 のように表すことが出 来る。

$$z'_{n} = z'_{n-1} - \sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (z_n - z_{n-1})^2}$$
(3.1)

一方、y座標については図 3.41 で示した通り、曲面は上から見ると正三角形であることに 注意すると以下のように表すことが出来る。

$$y = \frac{x}{\sqrt{3}} \tag{3.2}$$

式3.1及び式3.2より、ESR レーザーカット用図面の作成に必要となる外枠の座標は図3.43 と求められる。これらの座標を用いて3.4 で述べた手順と同じようにすることで ESR レー ザーカットの曲線を描くことができる。



図 3.42: z'の座標の求め方。左側は Okumura Cone を横から見た図で、これを平らに伸ばしたのが右 側である。 $z'_n \ge z'_{n-1}$ の差を x_n 、 x_{n-1} 、 z_n 、 z_{n-1} を用いて三平方の定理で表すのがポイントである。

No.	z'	y(=x/√3)	N) .	z'	y(=x/√3)		No.	z'	y(=x/√3)
1	68.0000	14.3760	3	85	36.1381	12.8775		69	13.9724	10.0819
2	66.8833	14.3514	3	86	35.3696	12.8132		70	13.4212	9.9811
3	65.7786	14.3254	3	37	34.6094	12.7480		71	12.8742	9.8791
4	64.6859	14.2984	3	88	33.8573	12.6816		72	12.3314	9.7762
5	63.6050	14.2701	3	<mark>89</mark>	33.1134	12.6141		73	11.7929	9.6722
6	62.5358	14.2406	4	0	32.3773	12.5454		74	11.2583	9.5672
7	61.4782	14.2100	4	1	31.6491	12.4757		75	10.7276	9.4611
8	60.4321	14.1782	4	2	30.9287	12.4048		76	10.2007	9.3540
9	59.3976	14.1451	4	3	30.2158	12.3328		77	9.6775	9.2459
10	58.3741	14.1109	4	4	29.5105	12.2598		78	9.1578	9.1368
11	57.3620	14.0755	4	5	28.8125	12.1856		79	8.6415	9.0266
12	56.3609	14.0389	4	6	28.1218	12.1104		80	8.1286	8.9155
13	55.3707	14.0011	4	7	27.4381	12.0340		81	7.6189	8.8033
14	54.3914	13.9622	4	8	26.7616	11.9566		82	7.1122	8.6902
15	53.4229	13.9221	4	9	26.0919	11.8780		83	6.6086	8.5760
16	52.4649	13.8808	5	i 0	25.4291	11.7984		84	6.1078	8.4608
17	51.5176	13.8384	5	j1	24.7730	11.7177		85	5.6097	8.3446
18	50.5806	13.7947	5	52	24.1234	11.6359		86	5.1144	8.2274
19	49.6539	13.7500	5	53	23.4802	11.5530		87	4.6215	8.1092
20	48.7374	13.7040	5	j 4	22.8435	11.4691		88	4.1311	7.9900
21	47.8310	13.6570	5	55	22.2128	11.3840		89	3.6430	7.8698
22	46.9346	13.6087	5	i 6	21.5884	11.2979		90	3.1572	7.7486
23	46.0481	13.5593	5	57	20.9699	11.2108		91	2.6734	7.6265
24	45.1712	13.5088	5	i 8	20.3573	11.1225		92	2.1916	7.5033
25	44.3041	13.4571	5	i 9	19.7504	11.0332		93	1.7117	7.3792
26	43.4465	13.4042	6	60	19.1492	10.9428		94	1.2336	7.2540
27	42.5982	13.3502	6	51	18.5535	10.8514		95	0.7571	7.1279
28	41.7594	13.2951	6	62	17.9631	10.7589		96	0.2823	7.0008
29	40.9296	13.2388	6	63	17.3781	10.6653		97	-0.1911	6.8728
30	40.1090	13.1814	6	64	16.7983	10.5707		98	-0.6631	6.7437
31	39.2973	13.1229	6	55	16.2235	10.4750		99	-1.1339	6.6138
32	38.4945	13.0632	6	6	15.6536	10.3783		100	-1.6035	6.4828
33	37.7004	13.0024	6	67	15.0886	10.2806		101	-2.0720	6.3509
34	36.9151	12.9405	6	68	14.5282	10.1817	'			

図 3.43: Okumura Cone 向け ESR のレーザーカット用座標

反射材の貼り付け

これらの材料を用いて ESR を 3 D プリンタ製の型に貼り付けることで完成した試作品を 図 3.44 と図 3.45 に示す。貼り付けには図 3.46 のセメダイン株式会社のスーパー XL ブラッ ク No. 8008 というシリコン系の糊を使用した。ESR を型に貼り付ける際に粘度が低いほど 糊がよく広がるため、比較的粘度が低い⁴この糊を選んだ。



図 3.44: Winston Cone (左) と Okumura Cone (右)の写真。Winston Cone の方が背が高いことがわかる。



図 3.45: Winston Cone (左) と Okumura Cone (右)の鏡面



図 3.46: スーパー XL ブラック No. 8008

⁴スーパー XL ブラック No. 8008 の粘度は 19.0 Pa・s / 23 ℃

3.5.2 ライトガイド性能評価の準備

セットアップ

Winston Cone と Okumura Cone 形状のライトガイドの試作品が完成したところで、図3.47 のセットアップでの実験を通して両ライトガイドの性能を評価した。ここで使用した装置及 びセットアップは3.3.1 に載せた PMT の特性について実験した時とほぼ同じである。違いは PMT の入射窓にライトガイドを取り付けたことであり、このとき回転ステージの回転軸と ライトガイドの入口が一致するようにセットした。六角の外壁をもつライトガイドを LED の光軸上に精確に設置するために専用の治具(先行研究者の田中氏が設計)を使用した。そ の設計図を図 3.48 に、使用している様子を図 3.49 に示す。尚、この治具はライトガイドの 中心軸まわりの回転方向について 10 度ごとに向きを変えて設置が出来るよう設計されてい るが、本研究ではライトガイドの中心軸まわりの回転をさせた測定をしておらず、今後の測 定課題である。



図 3.47: ライトガイドの性能評価測定のセットアップ概要図



図 3.48: 田中氏が設計したライトガイド固定用治具 [16]。



図 3.49: ライトガイド固定用治具を設置(左)し、ライトガイドを載せた状態(右)。

ライトガイドの性能の指標の定義

本研究ではライトガイドの集光能力をPMT で測定するにあたり、その性能の指標を定義 する必要がある。再度の確認になるが、ライトガイドの本質は光軸とのなす角度が一定以内 から入射した光を検出器へ「ガイド」し、それより大きい角度で入射した光を弾き返すこと にある。この境となる角度を cut-off angle と呼ぶ。これを踏まえてライトガイドの性能を評 価するにあたり、その指標は「ライトガイド入口に入射した光の量と出口まで導いた光の量 の比較」がライトガイドの光軸とのなす角ごとに必要である。仮にライトガイドの入口と出 口での光量をそれぞれ正確に測定できれば、ライトガイドの性能の指標として集光効率を式 3.3 のように定義できる。

集光効率
$$(\theta) \equiv \frac{\mathrm{出 \Box \mathcal{H} \pounds}(\theta)}{\mathrm{\Lambda \Box \mathcal{H} \pounds}(\theta)}$$
 (3.3)



図 3.50: 六角マスク(左)を PMT の入射窓に取り付けた状態(右)。この測定値を相対値の基準と する。

あらゆる入射角での性能を表現するため、集光効率をθの関数として定義している。その ため右辺の出口光量及び入口光量はθに依存する。しかし、実際はライトガイドの入口を通 過した光量と出口まで達した光量を同時に測定することができない。そこで出口での測定 と入口での測定を別個に行うことで 3.3 の式を算出している。集光効率を算出するために図 3.47 のように光源から 2.4 m 離れた位置にある回転ステージにライトガイドと PMT をセッ トすることでライトガイドで集めた光量を -40 度から+40 度の入射角で測定するのに加え、 相対値の基準として図 3.50 のようにマスクを装着した PMT を光源から 2.4 m の位置に置い て正面入射のみ測定する。ただしここでのマスクとは、3.2.1 で述べたような中央に穴の開 いたピンホールのマスクではなく、ライトガイドの出口と同じように六角形の穴が開いたも の(以下六角マスク)である。六角マスクを取り付けることにより相対値の基準を測定する 際に使用する PMT の入射面を、ライトガイドを取り付けて測定する時のそれとほぼ同じに 絞っている。これらの測定結果を用いて、ライトガイドの性能の指標として Relative Anode Sensitivity (RAS) を式 3.4 のように定義している。

$$RAS(\theta) \equiv \frac{PMT \, \text{ll} \, \text{l} \, \, \text{l} \, \text$$

PMT 出力値_{LG}(θ): ライトガイドを取り付けたときの PMT 出力値 PMT 出力値_{mask}(0): 六角マスクを取り付けたときの入射角度 0 度での PMT 出力値

 S_{pixel} : LST カメラのピクセル面積

S_{Mask}:六角 Mask の穴面積

出口光量に代わる PMT 出力値は θ に依存する測定値である一方、入口光量に代わる PMT 出力値が θ 正面入射のみであるのは、各入射角で測定するかわりに θ だけ傾いたときの射影 分を1/cos θ との積算により補正しているためである。また、ピクセル面積とはLSTのカメ ラのピクセル面積を表しており、このピクセルとは対辺間距離が 50 mm の正六角形に相当 する。一方、六角穴マスクの面積とは PMT の入射窓に取り付けるマスクの六角穴面積のこ とで、CAD で設計したときの値を使用している。これらの値から $S_{Mask}/S_{pixel} = 3.73$ とな る。光量の比からなる式 3.3 とは異なり、式 3.4 は double cross の効果を加味したものとなっ ており、この計算結果が 100%を超えることもある。

RASの繰り返し測定精度

ここでは実際に製作したライトガイドの性能として測定した RAS について、繰り返し測 定の再現性について述べる。

繰り返し測定精度を確かめるため、1つのライトガイドについて RAS を 10 回算出するた めに、六角マスク及び1個体のライトガイドを取り付けてそれぞれ 10 ずつ測定した。その 測定結果を図 3.51 に示す。縦軸を 80 - 100 %の範囲で拡大したグラフを図 3.52 に示す。こ の測定結果から、本測定による RAS の算出は下限から上限までのばらつきが± 1.5 %以内 に抑えた安定性をもつことがわかった。更に、RAS の入射角度毎の結果が入射角度の±方向 について対称でないことも見て取れる。これについては第5章で詳細を述べる。



図 3.51: 繰り返し測定精度確認測定の結果。横軸がライトガイド及び PMT の光軸方向と光源のなす 角で、縦軸が RAS である。10回分の測定結果を色分けして表している。全体を見て大きな乱れが無 いことが確認できる。尚、1 セットの測定で –40 度から+40 度までを2回往復しており、その間に4 回分の測定データが得られる。その平均値を1 セット分の測定としてグラフ化している。各曲線のエ ラーバーは、この4回測定の最小値から最大値を表している。



図 3.52: 繰り返し測定精度確認測定の結果の縦軸 80 から 100 %のみを拡大した図。測定結果のばら つきが ± 1.5 % 程度であることがわかった。また、測定結果が左右非対称であることもわかる。

3.5.3 Okumura ConeとWinston Coneの性能比較

3 D プリンタで造形した型に ESR を貼り付けることで試作した Okumura Cone と Winston Cone の性能を測定した結果を図 3.53 に示す。本測定ではマスクを取り付けた測定をしなかっ たため、RAS は入射角度 0 度の値を基準とする相対値で表した。この測定結果から、Okumura Cone は cut-off angle より手前の入射角における RAS が高いことがわかる。ただし、視野外の ノイズがカットしきれていないという欠点をもっているが、より多くの光子を集めることを 優先した。ライトガイドを含むカメラから見た LST 主鏡の視直径からライトガイドの cut-off angle を決定しているが、主鏡の中央付近に比べて主鏡の外側の方がライトガイドから見た 単位角度あたりの鏡面積が大きい。すなわち、ライトガイドに正面入射する光よりも cut-off angle 手前から入射する光をより多く集められることが重要である。この点からも Okumura Cone が Winston Cone にくらべて cut-off angle 直前の性能が高いという点は、形状最適化の 大きな成果といえる。

また、測定による性能評価以外にも最適化の成果がある。それは Okumura Cone の背が低 いということである。同じ cut-off angle で設計する場合、Okumura Cone の高さが 68.0 mm であるのに対し、Winston Cone は 73.8 mm であり、それぞれについてプラスチックコーン の設計をした場合、ESR 先端が飛び出す長さは Okumura Cone が 15.3 mm、Winston Cone が 23.5 mm と前者の方が短く済む。今回の試作品は 2 つの形状による差を精確に比較する ために ESR 先端の飛び出しがない設計をしたが、本番の量産の段階では、ESR 先端がむき 出しになる。Okumura Cone は背が低いことによって、プラスチックの型に比べて強度が低 い ESR がむき出しになる部分を短くすることが出来、ライトガイド本体の強度向上をもた らした。



図 3.53: Okumura Cone と Winston Cone の RAS 測定結果比較。入射角 0 度で RAS を相対値化し ている。この測定結果から Okumura Cone は Winston Cone に比べて cut-off angle より手前の入射 角に対する性能が高いことがわかる。一方 cut-off angle より大きい角度では光をカットしきれていな いが、望遠鏡搭載時にカメラの視野外から入る不定性の大きいノイズのカットよりも、視野内の主鏡 から入射する光子をより多く集めることを優先した設計である Okumura Cone を採用した。

シミュレーション結果との比較

この測定結果と、ライトガイドの形状を最適化した奥村氏による RAS 測定のシミュレー ション結果について比較する。シミュレーション上のセットアップは実測のそれと同じくラ イトガイドから光源までの距離を 2.4 m とし、RAS の算出方法も同じである。更に、光子が PMT に入射した際の出力値について、3.3.1 で述べた「入射角度依存性」と「入射位置依存 性」も加味している。この条件の下で ESR の反射率を全ての入射角に対して 98 %と仮定し た場合における RAS を Okumura Cone と Winston Cone についてシミュレーションした結 果を図 3.54 に示す。図中にある φ とはライトガイドの中心軸のまわりの回転方向であり、30 度の結果が実測のセットアップと同じ向きである。先に述べた通り実測の結果は相対値で表 していることから RAS の値を比較することはできないが、Okummura Cone の方が、cut-off angle 直前の RAS が高く、その後のノイズが残ってしまっているという点ではよく一致して いるといえる。



図 3.54: シミュレーションによる Okumura Cone と Winston Cone の RAS 算出。奥村氏による。 ESR の反射率を 98 %と仮定している。

第4章 ライトガイドの量産

4.1 量産に向けた準備

4.1.1 ライトガイドの材料

ここでは量産したライトガイドの材料について述べる。本研究で製作しているライトガイドは型であるプラスチックコーンに UV に特化した追加コーティングを施した ESR を糊付けしている。糊付けには試作品で用いたものと同じセメダイン株式会社のスーパー XL ブラック No. 8008 を使用している。

プラスチックコーン

ライトガイドの型にあたるプラスチックコーンについては3.3 に記した設計で射出成形したのを使用している。射出成形による造形はプロトラブズ合同会社(以下プロトラブズ)に依頼した。射出成形によって完成したプラスチックコーンの写真を図4.1 に示す。



図 4.1: プラスチックコーンの射出成形品。ただし右下は1クラスター分に相当する7個を並べた状態で撮影した写真である。

ESR への追加コーティング

ESR はスリーエムジャパン株式会社が販売している反射材で、硬いフィルム状であるため 3.2 で述べたライトガイドの型の先端から反射材が飛び出すような形状を実現できる。プラ スチックコーンに貼り付ける反射材である ESR について各波長における反射率を図 4.2 に示 す。ESR は可視光を反射するように作られてておりその対応波長は 400 nm から 800 nm で ある。一方 CTA が観測するチェレンコフ光の波長は UV 帯である 300 nm にまで及ぶうえ、 300 nm 台にピークを持つためこの波長に対しては反射率が低い ESR を採用した場合はピー クの波長帯を集光できなくなってしまう。そこで、ESR の表面に UV の反射に特化したコー ティングをするにあたり、コーティング処理や光学製品を扱う Bte 社(独)に依頼した。Bte 社は ESR をカプトンテープでガラスに貼り付けて表面を蒸着により SiO₂ と Ta₂O₅ を交互に 54 層コーティングした。コーティングは図 4.3 のように透明なガラス 1 枚につき 2 枚の ESR を貼り付けて、一度に 16 枚のガラスを蒸着窯に入れて行われた。こうして 32 枚の ESR が 1 セットとして、それぞれにバッチがつけられて納品された。尚、これらコーティング済みの ESR は、大きく曲げることで反射表面にひび割れのような線が入ってしまうことがあるため 注意が必要である。

コーティング付きのESR 表面を観察すると図 4.4 に示すように、水滴を垂らした跡のよう なシミが存在することがわかった。ESR そのものにはこのようなシミがない。Bte 社による とコーティング処理をした際にこのシミが生じてしまうというる。これらにより入射した光 に対する反射率、特にここでは正反射成分が1%低下したことから、ライトガイドで狙い通 りの集光が出来なくなってしまうことが考えられる。更にカプトンテープを剥がして ESR をガラスから離すと、ESR が反ってしまうことがわかった。この反りにより、ESR をプラ スチックコーンに糊付けする作業が難しくなるうえ、奥村氏がシミュレーションから最適化 したライトガイドの曲面形状を再現出来なくなる。この反りによる悪影響の詳細は後に述べ る。現在のところ ESR のシミや反りを避ける方法は見つかっていない。



図 4.2: ESR の反射率。スリーエムジャパン株式会社カタログより [25]。ただし、図中の ESR-B 及 び銀反射フィルムはここでは無関係である。ESR の可視光帯における反射率は 98 %以上である。



図 4.3: UV に特化した追加コーティングを施した ESR とガラス



図 4.4: 追加コーティングにより生じたシミ。コーティングの弊害として表面に水を垂らした跡のようなものができてしまうことがわかった。

4.1.2 ESR の反射率

ここではライトガイドの内側に反射材として貼り付けている ESR の性能について述べる。 ライトガイドに入射した光子が内面で反射する際の入射角は大角度に偏っている。ライト ガイド内面で起こる光子の反射について、反射面に対する入射角度の分布を奥村氏がシミュ レーションから求めた結果を図 4.5 に示す。このシミュレーション結果からライトガイド内 面で発生する反射の殆どが大入射角であることがわかる。このことからライトガイドに使用 する反射材の性能は特に大角度入射時の反射率が重要となる。そこで反射率の測定には株式 会社日立ハイテクノロジーズの日立分光光度計 U-4100(図 4.6)を使用した¹。この測定器は 図 4.7 で示す通りセットアップ時に本体内部のアタッチメント取り付け部分に角度可変装置 を取り付けることで反射材サンプルの反射率をあらゆる入射角で測定することができる。こ れは角度可変装置というアタッチメントのサンプルステージ及び積分球をはじめとする光検 出系を回転させられるためである。角度可変装置に反射材を取り付けた状態は図 4.8 の通り である。図 4.7 右のように反射材を置かない状態で光源から積分球に光を直接入射させた場 合に検出する光量と、この状態の光量と図 4.8 のように反射材をセットして任意の角度で反 射させた光を積分球に入射させた場合の検出する光量の比をとることで反射率を算出する。

この装置を用いて市販の ESR と、Bte 社による追加コーティングを施した ESR の反射率 を測定した。図 4.9 に示した測定結果から、追加コーティングの無い ESR は波長 400 nm 付 近を境に短波長の光に対する反射率が落ちている一方、追加コーティング付きの ESR は 300 nm 付近でも 90%程度反射していることがわかる。



図 4.5: ESR 内部における光子反射時の入射角度分布。奥村氏によるシミュレーション結果である。 このシミュレーションではライトガイドの中心軸に対する入射角 θ の範囲を 0.3 度刻みで 100,000 個 ずつの光子を降らせたうち、Okumura Cone をもつライトガイド内面で反射した後に検出面まで到達 した光子について、それぞれの光子がライトガイド内面で反射したときの反射面に対する入射角度分 布を求めている。横軸は光子の ESR に対する入射角を、縦軸は光子のイベント数を表している。30 度以下で反射した光子が検出面に到達することは無い一方、60 度以上の入射角における反射が支配 的である。



図 4.6: 日立分光光度計 U - 4100[24]



図 4.7: U - 4100 のアタッチメント取り付け部分。左がアタッチメント無しの状態で、右が角度可変装置を取り付けた状態。



図 4.8: 角度可変装置を上から撮影。反射材のサンプルステージの向きや積分球の位置を調整することで、20から 70度の入射角における反射率を測定することができる。尚、この写真は入射角を 60度として測定する際のセットアップである。



図 4.9: ESR の反射率グラフ。追加コーティング無しの ESR を実線で、追加コーティング有りの ESR を破線で表している。また、それぞれの反射材について各入射角度で測定した結果を色分けしている。 波長 300 nm から 400 nm の測定結果を比較すると実線は反射率が落ちているのに対し、破線は反射 率 90 %程度を保っている。これが Bte 社の追加コーティングの効果である。しかしコーティング付 きの ESR は入射角が大きくなるほど、反射率が波長によって上下していることがわかる。

4.1.3 ライトガイドの製作方法

反射材 ESR とプラスチックコーンの貼り付けは全て手作業で行っている。ここではライ トガイドの製作方法について述べる

ESR のレーザーカット

Bte 社によって追加コーティングが施された ESR はカプトンテープでガラスに貼り付けた 状態で茨城大学に納品された。まずはこれをライトガイドの曲面形状に合わせてカットする 必要がある。ライトガイドを試作した際はカッティングを外部へ依頼したが、量産に合わせて 名古屋大学がレーザーカッターを購入した。購入したのはオーレーザー株式会社のレーザー 加工機 HAJIME である。HAJIME は炭酸ガスレーザーで加工対象を焼き切る。これを茨城 大学に設置して使用している。HAJIME を図 4.10 に示す。HAJIME で加工する際は、CAD で描いた図面をアドビシステムズ社のソフトである Illustrator にインポートしてから加工用 に線の太さ調整等をした上で HAJIME を制御するソフト HARUKA に取り込みレーザーの 出力や加工速度を自由に選ぶことが出来る。加工における分解能はおよそ0.025 mm である。 HARUKA の操作画面を図 4.11 に、試し切りをしている様子を図 4.12 に示す。HARUKA の 設定及び図 4.13 に示す ESR のセッティングをしてから実際に加工をした。少しずつ値を変 えながら ESR を試験的に切断した結果、切断可能な最小値であるレーザー出力5 %、動作 時のぶれが生じない最高速度として加工速度を 10 mm / s とした²。尚、量産段階での ESR 切断図面はライトガイドの6面分すべてが先端の 2.2 mm だけ繋がっている。これにより切 断後の ESR がまとまり取り扱いが容易になる。加工後の ESR は図 4.14 に示す通り蒸着によ る追加コーティングの影響でガラスに張り付いたままである。さらに表面をよく観察すると 図 4.15 左に示す通り切断箇所付近が白く汚れてしまうことがわかった。これはレーザーカッ トの際に焼き切れたススが付着してしまったものと考えられる。反射面の汚れは鏡の反射率 を下げてしまい、これによりライトガイドが集められる光量が減ってしまう。この汚れをカ メラのレンズクリーニング液と、シルボン紙を用いて綺麗に拭き取ることができた。拭き取 り後を図 4.15 右に示す。引き続きガラスに張り付いた ESR を切断箇所に沿って剥がしたと ころ、図 4.16 に示すように ESR 全体が大きく反ってしまった。これは全ての ESR に共通し ており、Bte 社で追加コーティングをする前の ESR にはこのような反りが見られないことか ら、この反りは追加コーティングによる弊害であることがわかる。この反りにより、ESRの 扱いがこれまでに比べて困難になることでプラスチックコーンに貼り付ける作業が難しくな ることと、ライトガイド完成品の性能が悪くなってしまうことが予想された。その詳細につ いては後に述べる。尚、これら反りによる悪影響を、取り扱いを容易にすることが目的で各 面の先端 2.2 mm を繋げたままにしているということを先に述べたが、結果的にこの工夫に より ESR 同士が束ねられたことで ESR が反るという問題の深刻さの低減をもたらした。

²これより速くした場合、直線と曲線の境目付近で設計には存在しない波線状に加工されることがあった。



図 4.10: レーザー加工機 HAJIME



図 4.11: HAHIME の制御ソフト HARUKA の操作画面。あらゆるイラストに沿った加工が可能で、 レーザーの出力や加工速度の調整も可能である。



図 4.12: レーザーカットの様子。レーザー光源から発せられたレーザーは2回の反射を経てからレ ンズで集光されてカットの対象物に照射される。



図 4.13: ESR をレーザー加工機にセットする様子



図 4.14: レーザーカット後の ESR。蒸着による追加コーティングの影響でガラスに張り付いたまま である。



図 4.15: レーザーカットによって汚れた ESR (左) とそれを拭き取った後の ESR (右)。



図 4.16: ESR の反り。反る方向は全ての ESR に共通している。

オス型治具を用いた糊付け

ライトガイドの曲面に沿った形にカットした ESR を貼り付ける際は図 4.17 に示すオス型 の治具と ESR を押さえるための重りを用いる。これらは CAD で設計した図面を渡し株式 会社ジーテックに渡し加工を依頼した。この図面を図 4.18 に示す。ESR を貼り付ける際に は 3.5.1 でも紹介したセメダイン株式会社のスーパー XL ブラック No. 8008 を使用した。糊 付け方法の概要を図 4.19 に示す。反りの強い ESR を重りで押さえることと、オス型を用い てライトガイド内面全体を同時に押し込む事で圧着することがポイントである。この手順に よって完成させたライトガイドを図 4.20 に示す。尚、糊付け作業にはライトガイド1 個につ きおよそ 15 分を要する。





図 4.17: オス型治具と重り。オス型の曲面はライトガイドの内面と同じ Okumura Cone である。ま た重りはオス型の上にセットして使用する。



図 4.18: オス型治具と重りの設計図



図 4.19: ライトガイド製作手順の概要。ESR を巻き付けるようにしてオス型にセットし(左上)、 ESR が反らないようを重りで押さえつけた状態(右上)で糊を塗布し(左下)、プラスチックコーン を被せてから体重を書けるようにして圧着する(右下)。



図 4.20: ライトガイド完成品。写真上部の角のみ開いた状態になっているのは、ESR を切断する際 6 面全てが先端だけ繋がったままにしているが、その両端にあたる箇所だけは繋げることができない ためである。

4.2 量産品の管理

ライトガイドの製作方法を確立したところで、ライトガイド開発は量産の段階へと移った。 量産においては最初の150個程度のライトガイドは著者が製作したが、それ以降は雇用した アルバイトが製作している。製作したライトガイドは図4.21に示す通り数字を印刷したテプ ラテープを貼ることでナンバリングし個体の識別ができるようにしている。さらに製作した 人及び完成時刻を図4.22のように記録している。これは第5章で述べるライトガイド1つ1 つについての性能評価のためである。これらの完成品が図4.23のように7個で1つのクラス ターとして望遠鏡のカメラの1部品となる。尚、完成日は1つ1つを紙コップに入れてサラ ンラップで蓋をすることで埃の付着を避けている。



図 4.21: ナンバリングしたライトガイド。製作順に応じて全個体に数字を付けている。

	A	В	С	D	E
1	Cone No.	Person	Assistant	Date	Time
2	1	Ono	Okumura	7/16/2015	12:14
3	2	Ono	Okumura	7/16/2015	12:35
4	3	Ono	Okumura	7/16/2015	12:43
5	4	Ono	Okumura	7/16/2015	13:07
6	5	Ono	Okumura	7/16/2015	13:37
7	6	Ono	Okumura	7/16/2015	13:37
8	7	Ono	Okumura	7/16/2015	14:00
9	8	Ono	Okumura	7/16/2015	14:13
10	9	Ono	Okumura	7/16/2015	15:04
11	10	Ono	Okumura	7/16/2015	15:17
12	11	Ono	Okumura	7/16/2015	15:27
13	12	Ono	Okumura	7/16/2015	15:41
14	13	Ono	Okumura	7/16/2015	15:56
15	14	Ono	Okumura	7/16/2015	16:06
16	15	Ono	Okumura	7/16/2015	16:15
17	16	Ono	Okumura	7/16/2015	16:30
18	17	Ono	Okumura	7/16/2015	16:43
19	18	Ono	Okumura	7/16/2015	17:07
20	19	Ono	Okumura	7/16/2015	17:21
21	20	Ono	Okumura	7/16/2015	17:36
22	21	Ono	Okumura	7/16/2015	17:50
23	22	Ono	Okumura	7/16/2015	18:00
24	23	Ono	Okumura	7/16/2015	18:09
25	24	Ono	Okumura	7/16/2015	18:23
26	25	Ono	Okumura	7/16/2015	18:41
27	26	Ono	Okumura	7/16/2015	18:55
28	27	Ono	Okumura	7/16/2015	19:02
29	28	Ono	Okumura	7/16/2015	19:11
30	29	Ono	Okumura	7/16/2015	19:31

図 4.22: 量産品の管理表。個体ごとの製作者や完成時刻を記録している。


図 4.23: ライトガイド7個を並べた状態。これが光検出モジュールの1クラスター分となる。

2015年12月までにおよそ900個を量産した。これはLSTに搭載するライトガイドのおよ そ半数に相当する。完成品は1つ1つを紙コップに入れ、サランラップで蓋をしている。完 成品の一部を4.24に示す。



図 4.24: 製作したライトガイド。1つ1つを紙コップに入れてラッピングをして保管している。

第5章 ライトガイドの性能評価

LST の初号機向けに量産したライトガイド1つ1つについてその性能を評価する必要があ る。この目的は性能が悪い個体を本番で使わないようにすること及び性能個体差をもつPMT との組み合わせを決定し、カメラ全体としてより高効率な光検出またはカメラ全体の感度の 均一化を目指すことである。

5.1 量産品の性能評価に向けた準備

量産品の性能を評価するための測定系は3.5.2 で述べた試作品の評価の時とほぼ同じであ る。ただし、測定対象であるライトガイドの量産品の設計が、試作品とは異なり ESR がプ ラスチックコーンから飛び出すようになっており、3.5.2 の図 3.49 で示したライトガイドを 置くためのステージでは形状が合わない。更に量産品のライトガイドは ESR の先端部分が、 図 4.20 で示したようにコーティングの弊害である反り返りによって広がってしまっているた め設計した 50 mm 径の正六角形を実現できていない。この問題を解決するために新たな治 具を作成した。その設計図を図 5.1 と図 5.2 に、加工を依頼したジーテックから納品された完 成品を図 5.3 に示す。新たにこれらを用いてライトガイドを PMT にセットした状態を図 5.4 に示す.。尚、量産したライトガイドの性能を測定する際は図 5.5 に示す通り 365 nm にピー クをもつ LED である NSHU591B を使用した。チェレンコフ光のピークにより近い波長で測 定するのが目的である¹。



図 5.1: ライトガイド量産品向けに設計したステージの図面。田中氏による設計 [16] を参考にした。

¹試作の時点で 465 nm の LED を使用していたのは、その時点では UV 反射用の追加コーティングを施した ESR の準備が出来ていなかったためである。



図 5.2: ライトガイド先端から飛び出している ESR を保持するための六角治具の図面。ライトガイドのステージに設置できるような設計にした。



図 5.3: 測定用治具の完成品。左上のライトガイドステージと右上の六角治具を組み合わせたのが左下で、さらにこれにライトガイドを取り付けると右下のようになる。これにより量産品ライトガイドの性能評価をするにあたって、ライトガイド試作品の評価とほぼ同じセットアップで測定が可能になった。



図 5.4: PMT とステージに設置したライトガイド



図 5.5: 波長 365 nm の LED のスペクトル [21]

5.2 量産したライトガイドの性能評価

5.2.1 RAS の入射角度依存性測定

量産したライトガイドについて RAS の角度依存性を測定した結果を図 5.6 に示す。測定し たのは量産したライトガイドの No. 181 から No. 190 までの 10 個で、測定方法は 3.4.2 で示 した方法と同じである。測定結果から個体によって RAS の値が異なり、5 %程度のばらつき をもっていることがわかる。また、各個体の結果に着目すると、RAS の値が左右非対称に なっているものがあることがわかる。ここでいう左右非対称とは例えば LG No. 186 の RAS 曲線について、入射角が+20 度での RAS が 94 %であるのに対し、-20 度での RAS は 93 %と値が異なることを指しており、これはライトガイド及び PMT を回転させながら測定し た際に、光源から見たライトガイドと PMT を見た時に右側を向いているのか左側を向いて いるのかで性能が変わってしまうという事である。この原因を確かめるために各ライトガイ ドの ESR 表面を観察したところ、ライトガイドを作る際に誤ってはみ出てしまった糊によ る汚れや、貼り付けが上手くいかずに ESR 表面が歪んでいる箇所が見えている場合の RAS が比較的低くなってしまっていることが分かった。ライトガイド No. 186 および 187 を撮影 した図 5.7 から図 5.9 の写真を用いながら具体例を示す。



図 5.6: ライトガイド No. 181 - 190 の RAS 測定結果。グラフの混雑を回避するためライトガイド 10 個の測定結果を2つのグラフに分けて左上と左下に載せた。右側はそれぞれのグラフの RAS を 80 %から100 %の範囲で拡大した図である。cut-off angle 直前にあるピークでの RAS の平均は93 %を達成した。



図 5.7: ライトガイド No. 186(左)と 187(右)の ESR 表面。186 は糊の付着が目立つ箇所が、187 は ESR 表面の歪みの目立つ場所が確認できる。このような汚れや歪みが光源からよく見える向きにおける RAS が比較的低くなっている。



図 5.8: ライトガイド No. 186 の ESR 表面に付着した糊



図 5.9: ライトガイド No. 187の ESR 表面の歪み

5.2.2 波長ごとの測定

ここまでの測定で使用した光源は波長 365nm の LED である。地表に届くガンマ線起源のチェレンコフ光の波長 は 300 nm から 600 nm 付近までと幅広い。図 4.9 で示し た通り、ライトガイドに使用している反射材の反射率は 光の波長に依存する。このことからライトガイドの性能 も波長に依存すると考えられるため、別の波長の光源で ライトガイドの性能を測定する必要がある。測定にはこ れまでに挙げた 365 nm と 465 nm の光源に加え、図 5.10 に示す通り波長 310 nm をピークにもつ LED、DOWA エ レクトロニクス株式会社の DF 8 VF-1X009 を使用した。 測定結果を図 5.11 から図 5.15 に示す。



図 5.10: 波長 310 nm の LED のス ペクトル [22]



図 5.11: LG No.186 の測定結果



図 5.12: LG No.187 の測定結果



図 5.13: LG No.188 の測定結果



図 5.14: LG No.189 の測定結果



図 5.15: LG No.190 の測定結果

これらの測定結果から 465 nm、 365 nm、 310 nm いずれの場合でも同じ cut-off angle が 出ていることが分かる。また RAS 曲線についても波長によらずおよそ同じ傾向が出ている。 一方、465 nm の測定結果に比べて 365 nm と 310 nm の RAS が低い値であることがわかる。 入射角 0 度で比較するとその差は 5 %から 7 %程度である。これはライトガイドの反射材で ある ESR の反射率の差によるものと考えられる。図 4.5 に示した通り、ライトガイド内部に おける反射は ESR に対して大角度の入射が殆どであり、大角度入射における ESR の反射率 の測定結果は図 4.9 に示した通りで、70 度の入射角に対する光の反射率が 465 nm において 96 %であるのに対し 365 nm や 310 nm では 90 %程度である。以上から波長による RAS の 差は ESR の性能の差が原因であると考えられる。

これまでの測定はライトガイドの光軸に対する回転方向(これを φ とする)を変えていな いため、今後は φ 方向を回転させた状態でも測定をする。

シミュレーション結果との比較

これらの測定結果についても、奥村氏によるシミュレーション結果と比較する。セットアッ プについては3.5.3 で述べた通りだが、ESR の反射率については3.5.3 とは異なる値を使用し ている²。これは図 4.9 に示した追加コーティング付き ESR の反射率の角度依存性の測定結 果を基としている。ただしこの測定結果は測定器の都合上、入射角が 20 度から 70 度の範囲 のみである。ライトガイド内面での反射は、図 4.5 に示した通り反射面に対して 80 度を超え る入射まで存在するため、この大角度での反射率のデータを持ち合わせていなかった。そこ で図 4.5 に示した測定結果を拡張した結果を図 5.16 に示す。これは入射角 50、60、70 度の 実測値を用いて spline 曲線で補間したものである。この際、反射率の波長依存性が入射角を 大きくするにつれて短波長側に遷移するという blue shift³という現象を加味している。ただ し、70 度以下の入射角に対しては実測値を補間するように「内挿」したために信用性が高い と期待できるのに対し、70 度以上の入射角に対しては測定値の無いところを spline 曲線で推 定する形で「外挿」したに過ぎないために信用性が比較的低いと言える。

この過程で得た反射率のうち、実測と同じ310、365、465 nm を採用してシミュレーショ ンした結果を図 5.17、5.18、5.19 に示す⁴。全てのシミュレーション結果に共通して、0 度入 射から cut-off angle にかけて RAS が上昇している構造が出ており、実測の結果と定性的には 一致している。PMT の入射角度や入射位置に対する依存性を加味する以前のシミュレーショ ンにはこのような構造がでていなかったため、これらの導入によりシミュレーションが実測 に大きく近づいたと言える。一方で定量的に見ると、シミュレーション結果は cut-off angle 以内における RAS が全体的に低く、その差は広い範囲において 5 %から 10 %程度である。 この原因としてシミュレーションに盛り込んだ PMT の入射角度依存性が、3.3.1 で述べた通 り PMT の中心部分での測定結果に限られており、それを PMT 入射面全体に適用してる。よ り実測に近いシミュレーション結果を目指すならば、 PMT の中心以外の場所でも入射角度 依存性測定をしたうえで、その結果をパラメータとしてシミュレーションに盛り込むべきだ が、 PMT の位置を細分化して数か所測定する必要があり、それぞれの入射方向を変えなが ら測定する際には動径方向と方位角方向に対する変化の測定が求められる。更に PMT には

²3.5.3 では反射率を 98 %と仮定した。

³blue shift は図 4.9 からも確認できる。Coated ESR の入射角 50 度の反射率測定結果の波長 565 nm 付近 に極小値があるが、入射角 60 度、70 度とより大きい入射角になる程、この極小値が短い波長方向へと移動し ているのが一例である。

⁴φを 0、10、20、30 に変えた結果が載っているが、実測したのは 30 度の時と対応している。

個性があることから複数の個体についてこの測定をした上で平均化しなければならないこと から、これらを全て測定するには多くの時間を要する。そのため現在のところはこれらを測 定する予定は無い。

シミュレーション結果に話を戻すと、365 nm の0度入射に対する RAS が70 %程度と実 測値のそれに比べて 15 %程度低く、これは先に述べた RAS 全体が5 %から 10 %低いこと では説明がつかない。この原因は図 5.16 に示した 365 nm の大角度反射が 50 %程度まで落 ちていることにあると考えられる。先述の通り 70 度以上の入射に対する反射率は存在しな いデータを推測して外挿しているため、信用性は比較的低い。より信用性を高めるために、 80 度や 85 度の入射における反射率を実際に測定した結果で図 5.16 を更新した上で RAS を シミュレーションから算出したいところだが、これほどの大角度の入射に対する反射率を測 定するのはこれまでに使用した測定器では不可能である。

このようにRASの実測値と比べると、シミュレーションによるRASは3.3.1で述べたPMT の特性を導入したことで定性的には似た結果が得られるようになったが、定量的に見ると10 %前後の差が見られており、この差を埋めてシミュレーションと実測の結果を近づけるには 様々な追加測定が必要となるが、時間や原理的な制約から困難である。



図 5.16: ESR 反射率の拡張版。奥村氏による。横軸が波長、縦軸が入射角、色で反射率を表している。365 nm 付近における大角度入射に対する反射率が低い。



図 5.17: 波長 310 nm に対する RAS のシミュレーション結果。奥村氏による。



図 5.18: 波長 365 nm に対する RAS のシミュレーション結果。奥村氏による。



図 5.19: 波長 465 nm に対する RAS のシミュレーション結果。奥村氏による。

5.2.3 品質管理

ここまでの性能検査は全てライトガイドと PMT の向きを変えることで、RAS の入射角度 依存性を測定してきた。しかし、この測定にはライトガイド 1 個につきおよそ 90 分かかり、 量産したライトガイド全てをこの方法で測定するのは膨大な時間を要する。そこで、代表値 として入射角 0 度における RAS のみをライトガイド全数の品質管理として測定することに した。量産したライトガイドのうち、2015 年の 7 月から 9 月の間に著者が製作した個体であ る No.1 から No.146 までを、465 nm と 365 nm の光源を用いて測定した RAS のヒストグラ ムを図 5.20 に示す。尚、No.1 から No.146 までをまとめて「第一段」と呼んでいる。



図 5.20: 入射角 0 度における RAS 測定結果ヒストグラム。 5.2.1 の議論より、cut-off angle 直前の ピーク値は更に 5 %程度高いと期待できる。

この測定からも 465 nm と 365 nm の差が出た。平均値の差が 6.6 % であり、標準偏差にも 違いがあることがわかった。ESR そのものの反射率を測定したところ、365 nm における標 準偏差が 0.21 % で 465 nm では 0.12 % と前者の方がばらつきが大きかった。465 nm の場合 は ESR 本体の性能が効いており、これが追加コーティングに比べて反射率が安定している のに対し、追加コーティングによる反射率は比較的ばらつきが大きいためだと考えられる。

両波長の測定結果には RAS が極端に低い個体が存在する。465 nm 測定において RAS が 88 %の個体と 90 %の個体がこれにあたる。識別番号は No.34、No.35 である。これらは製作 の工程中にあるレーザーカットの際に誤って出力を大きくしてしまったことが原因である。 この出力ミスにより ESR の切断面が広がったことで反射面が狭くなってしまったために RAS が低いと考えられる。格子模様を背景にして撮影したライトガイド No.34 と No.35 の写真を を図 5.21 と図 5.22 に示し、それぞれ 365 nm に対する RAS 測定結果を併記する。これらと 比較するために無作為に取り出したライトガイドの写真を図 5.23 から図 5.32 に示す。

第一段の品質管理を終え、2015 年 11 月には一部の個体を除いたおよそ 140 個を共同研究 機関である東京大学宇宙線研究所に納品した。ここではライトガイドやPMT を含む光検出 モジュールが組み立てられている。さらに光検出モジュールを並べた LST カメラ筐体の小型 版であるミニカメラが完成し、その性能試験が行われている。光検出モジュールの完成品と ミニカメラ組み立ての様子をそれぞれ図 5.33 と図 5.34 に示す。ミニカメラを正面から撮影 した写真を図 5.35 に示す。ミニカメラ組み立て後のライトガイドは図 5.36 に示すようにラ イトガイド先端から飛び出した ESR が隣同士で互いに干渉しあって隙間を生じてしまって いる場所があることが分かった。



図 5.21: ライトガイド No.34 の ESR 表面。 レーザーカットの出力ミスにより ESR の面積が 小さくなっている。RAS = 85.0 %



図 5.23: ライトガイド No.3 の ESR 表面。 RAS = 91.6 %



図 5.25: ライトガイド No.9 の ESR 表面。 RAS = 92.3 %



図 5.22: ライトガイド No.35 の ESR 表面。 No.34 と同じようにこちらも ESR の面積が小さ くなっている。RAS = 82.9 %



図 5.24: ライトガイド No.4 の ESR 表面。 RAS = 91.6 %



図 5.26: ライトガイド No.15 の ESR 表面。 RAS = 92.2 %



図 5.27: ライトガイド No.23 の ESR 表面。 RAS = 92.1 %



図 5.29: ライトガイド No.81 の ESR 表面。 RAS = 84.2 %



図 5.31: ライトガイド No.92 の ESR 表面。 RAS = 84.6 %



図 5.28: ライトガイド No.28 の ESR 表面。 RAS = 84.4 %



図 5.30: ライトガイド No.88 の ESR 表面。 RAS = 84.2 %



図 5.32: ライトガイド No.142 の ESR 表面。 RAS = 95.8 %



図 5.33: 光検出モジュール



図 5.34: 組み立て中のミニカメラ



図 5.35: ミニカメラを正面から撮影した写真。ピクセルの色がまばらに見えるのは PMT の光電面の 色の個体差によるものである。



図 5.36: ESR 同士が干渉して生じた隙間

5.2.4 第一段と第二段の性能差

ESR 表面の再洗浄

第一段の品質管理が終わってから第二段にあたる No.147 から No.279 のライトガイドについて測定した。第二段は 2015 年 11 月にアルバイトで雇用した茨城大学の学生が製作した個体である。測定結果は図 5.37 に示すように RAS の平均値が 84.5%と、第一段に比べて 3.5%低い結果が出た。



図 5.37: 量産品第二段の RAS 測定結果ヒストグラム

第一段に比べて第二段の RAS が低いという測定結果を得たため、ライトガイド第二段の ESR 表面を観察したところ、第一段に比べて汚れが目立つことが分かった。4章で述べた通 りライトガイドを製作する課程の最後に ESR 表面を洗浄するが、ここでの洗浄が不十分だっ たことが考えられる。具体的には1回目の洗浄の時点では使用する洗浄液の量が不足してい たことが問題で、量を多くすることでより確実に汚れが拭き取れることが分かった。そこで 第二段のライトガイドである No.181 から No.196 の 16 個を改めて洗浄液を多めに使って洗 浄したうえで再測定したところ平均値 86.4 %を得た。これにより第一段との差が 1.6 %に縮 まった。尚、ここで 16 個しか測定していないのは時間上の制約であり、今後は残る個体につ いても洗浄の上再測定する。

第一段に比べて第二段の RAS が 1.6 %低い原因が未だに判明していないが、考えられる候補を以下に述べる。

製作精度

4章で述べた通り、第一段の殆どは著者が製作したのに対し、その後は雇用したアルバイトが製作した。そこで製作精度に差が出た可能性がある。目視による確認でも第一段に比べて第二段の方が糊付けした ESR に歪みが生じている個体や糊がはみ出している個体が多い。図 5.38 に ESR 表面が歪んでしまったライトガイドを示す。

ESR の性能差

第一段のESRと第二段以後のESRは追加コーティングをした時期が大きく異なる。時期の違いによってコーティングに差が出たことや、時間経過による劣化といった可能性が考えられる。



図 5.38: ESR 表面の歪み

5.2.5 ESR 先端の歪みによる影響

量産したライトガイドのESR 先端部が歪んでいる影響がどの程度かを確かめる為に、ESR 全体を型が覆うことでESR の飛び出しをなくしたライトガイドを3D プリンタで試作し RAS を測定した。3D プリンタ製の型を図 5.39 に示す。更にこれに反射材を貼り付けた完成品と、 同日に製作した量産品のうちの1 個を図 5.40 に示す。ESR コーティングは1 枚のガラスに2 枚の ESR を貼り付けて行われるが、図 5.40 に示した両者は同一のガラスに貼り付けられて いた ESR 2 枚を使用しているため、コーティングのバッチは同じである。プラスチックコー ンの型による完成品は ESR 先端が歪んでいるのに対し、3D プリンタ製の型による完成品は ESR 全面を糊付けしたため歪みが殆ど生じておらず 3D プリンタを用いて狙い通りのライト ガイドを試作することが出来た。



図 5.39: 3D プリンタ製の型。上部までプラスチックで覆うような設計にしたことで、ESR が飛び出 さないのが特徴である。



図 5.40: 3D プリンタ製の型によるライトガイド(左)と量産品(右)の比較。量産品はライトガイドの出口付近(写真の手前部分)が歪んでいるのに対し、3D プリンタ製は歪みが比較的少ない。



図 5.41: 3D プリンタ製ライトガイド(赤)と量産品(黒)の RAS 測定結果比較。3D プリンタ製の 方が全体的に RAS が高いことが分かる。



図 5.42: 3D プリンタ製ライトガイド(赤)と量産品(黒)の RAS 測定結果比較。複数のライトガ イド量産品と比較しても 3D プリンタ製の RAS は 0 度入射については同程度、ピークの高まり方が 顕著であることが分かる。

試作した 3D プリンタと量産品の RAS を測定した結果を図 5.41 に示す。光源は 365 nm の LED を使用した。両者の測定結果を比較すると入射角 0 度では 3D プリンタ製の方が 1 %、 cut-off angle 直前のピーク値においては 5 %程度高く、全体的に RAS の値が高まっているこ とがわかる。これが ESR 先端部分の歪みの有無の差であると言える。0 度よりもピークにお ける RAS の上がり方が顕著なのは、0 度よりも cut-off angle 付近の方が現在問題に挙げてい る ESR 先端部分について、光源を視点とした場合の見かけ上の面積が広いことにより影響が 大きいためと考えられる。次にこの 3D プリンタ製のライトガイドの RAS 測定結果を 5.2.2 に記した測定結果である量産ライトガイド No.186 から No.190 のライトガイドの測定結果と 比較したグラフを図 5.42 に示す。ここから 3D プリンタ製のライトガイドの RAS は、0 度入 射については量産品と同程度だが、cut-off angle 直前の入射角にあたるピークについては最 も値が大きく、0 度からピークに向かう RAS の高まり方が顕著であることが確認できる。

本研究において製作したライトガイドの材料及び設計において理想的な結果がこの3Dプ リンタ製の型によるライトガイドのRASである。しかし、想定外のこととしてESRに施し た追加コーティングの影響でESRの反りが発生してしまい、これによってライトガイドの 入口側にある ESR の飛び出し部分が歪んでしまっているために、RAS のピークの上がり方 が弱くなってしまったといえる。以上のことから、今後製作するライトガイドについては、 ESR の反りを解決することで現状以上の性能が出ると言える。方法としては型の設計を変更 することや、現状の型の内面に薄い強化ガラスを装着することで ESR の先端がはみ出さな いような構造にする案が挙がっている。

尚、ここで紹介した 3D プリンタ製のライトガイドは、50 mm の内径の外側を囲うように 3D プリンタの型で覆っている。そのため入口部分の外壁間の距離が 50 mm を超えており、 このままの設計ではピクセルサイズが 50 mm の LST カメラに搭載することができない。仮 にこの試作品の様に ESR 全体を型で覆うことで ESR のはみ出しを無くそうとすると、型の 厚み分だけ入口を小さくした曲面の設計が必要となり、型の厚みと製造公差を考慮するとカ メラ焦点面のうち少なくとも 6.6 % ⁵の面積がデッドスペースとなる。この詳細は 3.2.1 で述 べた通りである。

⁵ESR 全体を型で覆うことでライトガイドの入口径が 48.32 mm となるためである。型の材料として ABS の使用を想定した。

第6章 今後の予定

6.1 これまでに量産したライトガイド

4章でも述べた通り、2015年12月の時点でおよそ900個のライトガイドを製作した。そ のうち150個程度のライトガイドの性能について測定した結果を5章で述べた。これらのラ イトガイドを本番のLSTで使用するかどうかは、2016年2月現在のCTA日本グループ内で 協議をしているところである。ESR全体をプラスチックで覆いESR表面の歪みを改善する ことで、より高性能なライトガイドが作れるのではないかという話が挙がっているためであ る。これについてはLST初号機の建設スケジュールに合わせたライトガイド納品の期限ま でに、具体的な改善方法が見つかるか次第である。

少なくともこれまでに量産したライトガイドはミニカメラの試験用に使用されることとなっ ており、それらがそのまま本番でも使用されるかどうかは、今後の研究・開発次第である。

また、さらにその先の事として LST の第2号機目以降に搭載するライトガイドについて は、今回量産したライトガイドに挙がった、1つ1つを手作りすることによって時間が掛か る点や個体差が大きい点、更には ESR 表面の歪みといった問題を解決するために、材料や 設計、製作方法の再検討が行われる。

6.2 デジタルカメラを用いた性能評価

ライトガイドの品質管理については 5.2.3 で述べた通り、PMT を用いて入射角 0 度におけ る RAS のみを測定している。この測定にはライトガイド 1 個につきおよそ 5 分程度かかる。 LST 1 台につき 1855 本搭載するライトガイドの性能を評価する際は、この測定時間をより 短くしたい。そこで PMT を用いた測定よりも短い時間で性能評価ができる方法として、デ ジタルカメラを用いた方法の確立を目指している。この方法ではライトガイド 1 個につき 1 分 30 秒程度と PMT を用いた方法の 3 倍程度の測定スピードである。ただし、これまでのラ イトガイドは PMT を用いた測定で品質管理をしてきたため、まずはこの測定結果とデジカ メを用いた測定による結果における相関が取れるかどうかを確認する必要がある。

6.2.1 評価方法

は図 6.1 に示すセットアップで、スクリーンに結んだ像をカメラで撮影する。測定には cannon の EOS kiss X5 を使用した。撮影の際は ISO 感度を 100、露光時間を 10 秒、F 値を 10 として設定した。撮影によって得られた画像データを図 6.2 に示す。ライトガイドの形に 対応した正六角形に近い形状が出ているのが分かる。この画像データのピクセル輝度をヒス トグラムにした図 6.3 から、ピクセル輝度 800 以上がライトガイドによって集められた光が 見えているピクセルだと判断し、これより大きい値のピクセル輝度を積分した結果を総光量 と呼び、ライトガイドの集光性能の指標とした。

尚、初回の測定から解析結果にばらつき¹が生じることが分かった。その後はライトガイ ド入口付近にもスクリーンを備えて、ライトガイド入口付近と出口の光量比を算出すること でこの問題を解決した。



図 6.1: デジカメを用いた性能評価法セットアップ。ライトガイドの出口側に立てたスクリーンに LED 光の像を結ばせ、これをカメラで撮影する。尚、PMT による測定では 310、365、465 nm を使用し てきたが、この中でデジカメのセンサが対応している波長は 465 nm のみだったためデジカメを用い た測定では 465 nm の LED を光源として使用した。

¹カメラの暗電流の不定性によるものと考えている



図 6.2: デジカメで取得した画像データ。各ピクセルの輝度を色で表している。



図 6.3: ピクセル輝度のヒストグラム。ピクセル輝度 800 を境にこれより小さい輝度のピクセルが急激に多くなっていくことから、この付近がライトガイドが集めた光によってできた像と背景の境目だと判断した。

6.2.2 測定結果

この方法でライトガイド 30 個について測定した結果を縦軸に、横軸に PMT を用いて測定 した結果を入れた相関図を図 6.4 に示す。この結果から、デジカメによる測定と PMT によ る測定には正の相関があることが確認できた。今後はさらに測定数を増やした場合の相関関 係を確認し、この評価方法が品質管理として PMT を用いた測定の代わりとして適切かどう かを議論していく。



PMT による測定

図 6.4: デジカメによる測定と PMT による測定の相関図

第7章 まとめ

本研究では CTA の LST 用ライトガイドについて材料の選定と形状の最適化を行い、初号 機向けに量産したライトガイドの性能を評価した。

反射材として採用した高反射フィルムである ESR に SiO₂ と Ta₂O₅ の追加コーティングを 施したものは紫外光に対して 90 %、可視光に対して 95%の反射率を達成した。また、シミュ レーションで LST 用ライトガイドに最適な形状を求めるために、PMT の出力特性である入 射角度依存性を測定したところ、PMT の光電面に対して 60 度で入射した光子対する量子効 率が高いことが判明した。このデータを用いて名古屋大学の奥村氏が LST 用ライトガイドの 形状を最適化した。この際、LST カメラから主鏡を見た場合に、主鏡内側にあたる正面方向 よりも主鏡の外側にあたる cut-offangle 直前の方向の方が鏡の面積が多いことから、cut-off angle 直前の角度から入射した光子をより多く集められるような形状とし、これを Okumura Cone と呼んでいる。既存のチェレンコフ望遠鏡である MAGIC のライトガイドなどに採用 されている形状である Winston Cone と、今回最適化した形状である Okumura Cone を試作 し性能を比較したところ、Okumura Cone の方が cut-off angle 直前の RAS が高いというシ ミュレーションの通りの結果を得られた。

量産の段階では、ライトガイドの型をプラスチックの射出成形で造形した。この型にレー ザーカッターで切り取った ESR を、専用の治具を用いて糊付けすることでライトガイドが 完成する。2016年2月の時点でおよそ900個のライトガイドが完成している。これらの完成 品のうちおよそ150個について RAS の測定が完了しており、ライトガイド正面から入射し た波長365 nm の光に対して RAS の平均値が88.0%、波長465 nm に対しては94.6%を達 成していることがわかった。鏡の面積が広い cut-off angle 直前の角度から入射する光に対し ては更に5%高い RAS が期待できる。これらの量産品の一部は東京大学の宇宙線研究所に 納品済みで、ここでは LST に搭載する2mサイズのカメラの小型版であるミニカメラの部 品として試験が行われている。

これらのライトガイド完成品は先述のように 90 %前後の集光性能を達成している一方、 ESR の表面に生じる歪みや製作時のミスにより ESR が汚れてしまっているといった問題が あり、これらの改善により更に性能の高いライトガイドを作ることが可能と考えられるため、 現在までに量産したライトガイドを実際に LST 初号機に搭載するのかどうかをグループ内 で協議している。

今後はより性能の高いライトガイドを製作する方法を材料や設計、製作方法の観点から模 索するとともに、ライトガイドの性能を評価するデジタルカメラを用いた測定による方法の 確立を目指す。

付 録A ライトガイドの型の設計詳細

ここではライトガイドの型を設計する方法をチュートリアル形式で著す。尚、使用している CAD は本文中でも述べた通り、Autodesk Inventor Professional 2015 である。



図 .1: XZ 平面を選択しスケッチを開始。平面データ点の挿入を選択し、座標ファイルを読み込む。 この際オプションにある「スプラインを作成」にチェックを入れておく。



図 .2: 図上部の a と b を用いて c のように中心軸に沿って構築線を描く。



図 .3: 図.1 で描いた曲線の最上部を通るように横線を描く。



図 .4: a の点アイコンを選択してから、b のように横線上かつ中心から 24.9 mm 離れた位置に点を 2 つ書く



図 .5: 寸法アイコンを選択してから中心軸から2つの点までの距離をそれぞれ25 mm、28 mmとする。



図.6: aのコピーアイコンを選択してからbの曲線を選択する。



図 .7: a の基準点アイコンを選択してから b、c の点を選択することで曲線を2本コピーする。



図 .8: ここまでで曲線を3本描いた。ここで中心軸からの距離24.9 mm を始点とする曲線は今後使 用しないため右クリックで削除する。



図 .9: 横線上かつ中心軸からの距離が 24.16 mm の位置に点を描く。



図 .10: a のように 24.16 mm の位置から図の下方向に線分を引く。この時、線分のもう一端は b の ように内側の曲線との交点をもつような位置とする。更に c が 90 deg になっていることに注意する。



図 .11: 図.10 で出来た交点から図右側に 0.5 mm の線分を引く。



図 .12: a で示す 0.5 mm の線分の先端から図下方向に線分を引く。この時、線分のもう一端は b の ように外側の曲線との交点をもつような位置とする。更に c が 90 deg になっていることに注意する。



図.13: 縦線と曲線の交点2箇所に点を打つ。



図.14:2本の曲線の下端同士を線分で結ぶ。



図 .15: スケッチが完成した。スケッチを終了アイコンを選択する。



図.16: aの押し出しアイコンを選択してから、bのスケッチを選択する。



図 .17: a の値を 40 mm にし、b の対称アイコンを選択して c で決定する。



図 .18: 押し出しが完了した状態。


図 .19: XY 平面を選択してスケッチを開始。図のように 60 度をもつ直角三角形を 2 つ描きスケッチ を終了する。



図 .20: a の押し出しアイコンを選択し2つの直角三角形を選択後、b で範囲を全てに変更し c で決定 する。



図 .21: 切り取りが完成した状態。



図 .22: a のジオメトリを投影アイコンを選択し、b を選択する。さらに図に示すような図形を描いて スケッチを終了する。



図 .23: a の回転アイコンを選択し、先に描いたスケッチである b を選択する。さらに範囲を c で角度を 60度に、d の対称アイコンを選択する。



図 .24: a の軸アイコンを選択し、b の Z Axis を選択して回転を決定する。



図 .25: 回転が完了した状態。



図.26: aの円形状アイコンを選択し、bのソリッドをパターン化アイコンを選択する。



図 .27: a の回転軸アイコンを選択し、b の Z Axis を選択してから OK を押すことで円形状にコピーする。



図.28: 円形状コピーが完了した状態。



図 .29: XZ Plane でスケッチを開始し、図のような長方形を描いてスケッチを終了する。



図 .30: a の回転アイコンを選択し、b の切り取りアイコンを選択する。次に c で角度を 20 度にし、d の対称アイコンを選択する。更に e の軸アイコンを選択し、f の Z Axis を選択してから OK を押す。



図 .31: フックを作成するためのスペースが空いた。



図 .32: 再び XZ Plane を選択してスケッチを開始する。ここまでに作成した図が邪魔になるため a の表示タブから b の表示スタイルのアイコンの中にある c のワイヤフレーム、エッジ表示のみを選択 する。以下、必要に応じて表示方法を変更する。



図.33: 図のように2つの点を打ち、寸法を決める。



図 .34: 円弧アイコンを選択してから図のような弧を2つ描く。



図 .35: 図のようなスケッチを描く。



図 .36: さらに図のような扇型を描く。これが PMT 食い込みのための切り取り用の図である。スケッチを終了する。



図 .37: a の回転アイコンを選択し、b で角度を 12 度に設定し、c の対処アイコンを選択し、d に示 す領域を選択する。次に e の軸アイコンを選択し、f の Z Axis を選択してから OK を押す。これによ り嵌合用フックの土台が出来上がる。



図.38: 図に赤で示した面を選択してスケッチを開始する。



図.39: 先に描いた弧の上かつ X 軸からの k 距離が 1.26 mm の位置に点を打つ。



図 .40: 図のような三角形を描く



図 .41: aのミラーアイコンを選択し、bの三角形を選択する。次に c のミラー中心線を選択し、d の X Axis を選択して完了を押してからスケッチを終了する。



図 .42: a の押し出しアイコンを選択し、b に示す三角形 2 つを選択する。次に c の切り取りアイコン を選択し、d で範囲をすべてに設定し、e の方向 1 アイコンを選択して OK を押す。これによりライト ガイドの中心から外側に進むにつれて細くなる構造となる。これは射出成形を見越した設計である。



図 .43: 図.36 で描いたスケッチを共用とする。



図 .44: aの回転アイコンを選択し、bの領域を選択する。次に c の切り取りアイコンを選択し、d で 範囲を全体に設定し、e の軸アイコンを選択し、f の Z Axis を選択して OK を押す。



図.45: aの円形状パターンのアイコンを選択し、フックを成形したbを選択する。



図.46: a の軸アイコンを選択し、b の Z Axis を選択する。次に c の配置数を 3 として OK を押す。



図 .47: ライトガイドの設計終了。

参考文献

- [1] CTA-Japan コンソーシアム, 2014, Cherenkov Telescope Array 計画書
- [2] http://www.mainsequencesoftware.com/
- [3] 井上一・小山勝二・高橋忠幸・水本好彦, 2008, シリーズ 現代の天文学 17 宇宙観測 Ⅱ Ⅰ高エネルギー天文学, 日本評論社
- [4] http://fermi.gsfc.nasa.gov/
- [5] https://wwwmagic.mpp.mpg.de/
- [6] Heinrich J. Völk , Konrad Bernlöhr, 2009, Imaging very high energy gamma-ray telescopes, Springer
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 長紀仁, 2015, 修士論文『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-』, 茨城大学
- [10] A. Förster, Mirror Development for CTA, 32ND INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, BEIJING 2011
- [11] Robert Marcus Wagner, 2006, Measurement of VHE γ-ray emission from four blazars using the MAGIC telescope and a comparative blazar study, Physik-Department der Technischen Universit ät München
- [12] http://www.cta-observatory.jp/
- [13] R. Winston, Light collection within the framework of geometrical optics, Journal of the Optical Society of America 60 (1970), no. 2 245-247.
- [14] Akira Okumura, Sakiya Ono, Syunya Tanaka, et al, 2015, Prototyping of Hexagonal Light Concentrators for the Large-Sized Telescopes of the Cherenkov Telescope Array, PROCEEDIMGS OF SCIENCE, arXiv : 1508.07776v1, ICRC 2015
- [15] 黒田和典, 2011, 修士論文 『次世代超高エネルギーガンマ線天文台 CTA の大口径望遠 鏡用ライトガイドの形状最適化』, 茨城大学

- [16] 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』
- [17] Aharonian, Konopelko 1997, Towards a Major Atomospheric Cherenkov Detector V;
 p. 263 277
- [18] D. Paneque et al., A method to enhance the sensitivity of photomultipliers for air cherenkov telescopes, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 504 (2003), no. 1-3 109—115. Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Photodetection.
- [19] CTA Group, 2015, Large Size Telescope Technical Design Report
- [20] 日亜化学工業株式会社、カタログ、『青色 LED 標準仕様書』
- [21] 日亜化学工業株式会社,カタログ,『紫外発光 LED 標準仕様書』
- [22] DOWA エレクトロニクス株式会社, カタログ 『MODEL xFxVF-1X009 series』
- [23] 株式会社キーエンス, AGILISTA-3000 カタログ
- [24] http://www.hitachi-hightech.com/jp/products/science/apli/ana/uv.html/
- [25] http://multimedia.3m.com/mws/media/466120O/esr.pdfsearch='3M+ESR'

謝辞

本研究において大変多くの方々から頂いたご指導やご協力に心より感謝申し上げます。

主指導教官である片桐秀明准教授には本論文のテーマであるライトガイドにまつわる知 識をはじめ、研究及び実験に対する取り組みとしてあるべき姿勢や心得を指導して頂きまし た。副指導教官の吉田龍生教授には、私の研究の進捗状況を常に気にかけて頂いては問題が 生じた際に親身になって相談に乗って頂いた上、出張や物品の購入など学外とのやりとりが 多かった本研究において様々な手続きを円滑に進めて頂きました。私は両先生が指導教官で ある高エネルギー宇宙物理グループで研究できたことを大変嬉しく思います。本当にありが とうございました。

同じ研究室の先輩である加賀谷美佳さんには私の研究にまつわる助言を頂いたり、研究室 の外では大学内のバスケ大会にチームメイトとして参加したりと、様々な面でお世話になり ました。また、同学年の長紀仁君とは大学入学当初からの友人として共に物理を勉強してき ました。同じく同学年の村田丈承君には出身県が同じということもあり、地元の話で何度も 盛り上がりました。同学年の3人では、互いの研究に関する議論や相談だけでなく、たわい 無いやりとりが日常に頻発しました。研究室の後輩も含めて個性の強いメンバーばかりで毎 日がとても充実していました。楽しい日々をありがとうございました。

CTA 日本グループの一員として進めてきた本研究では外部の方々にも大変お世話になり ました。名古屋大学の奥村曉助教には、LST のライトガイド開発の責任者として研究にお ける専門性の高い様々なことをご指導して頂きました。また、普段はドイツで過ごされてい たことから、日頃のご指導をメールや電話で頂き、綿密に連絡をとりあって下さりました。 出張として直接茨城大学へお越し頂いた機会には、その日数がごく僅かだったにもかかわら ず研究が数カ月分も進んだような気持ちでした。遠隔でのご指導及び直接のご指導により私 が身に付けた力は、私の大学院生活で得た最大の成果です。沢山のことをご教授頂き誠にあ りがとうございました。そして御馳走して頂いたアンコウ鍋の味は忘れません。また、CTA 日本グループを総括されている東京大学宇宙線研究所の手嶋政廣教授をはじめ CTA に関わ る学生やスタッフの方々にも沢山のご助力を頂きました。中でも MIR グループのコーディ ネーターである東京大学宇宙線研究所の林田将明助教、FPI / CAL グループのコーディネー ターである東京大学宇宙線研究所の林田将明助教、FPI / CAL グループのコーディネー

更に、プロトラブズ株式会社にライトガイドの型の製作を依頼した際には、榊原さんと窪 田さんには何度も製作における技術的な説明を頂きました。茨城県工業技術センターの加藤 さんには、同センターにある分光光度計 U-4100 を使用させて頂く際に使用方法の説明や、ア タッチメントの取り換え作業をして頂き大変お世話になりました。誠にありがとうございま した。

最後に、両親及び兄と妹には私が大学院まで進学することに対する理解と協力を頂けたこ とを心より感謝します。