修士学位論文

次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡用ライトガイドの 量産化に向けた基礎開発 2013 年度 (平成 25 年度)

茨城大学大学院理工学研究科 理学専攻

12NM160X 田中 駿也

2014年2月28日

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、口径が異なる3タイプのチェレンコフ望遠鏡を約60 台配置して 従来のチェレンコフ望遠鏡よりも約10倍の感度を達成し、観測するエネルギー帯を数十GeVから100 TeV 以 上まで拡大することを目的とする国際共同プロジェクトである。日本グループは主に大口径望遠鏡(LST)の 開発を中心に進めている。

チェレンコフ望遠鏡の焦点面には、宇宙から到来した高エネルギーガンマ線と地球大気との相互作用で生じ るチェレンコフ光を捕え、電気信号に変換する光電子増倍管 (PMT) が一面に配置され、その数は LST 一台 あたり 1855 本にも及ぶ。しかし、PMT を一面に配置する際、LST に使用する PMT の入射窓が円形なため、 PMT 同士を隣接させて配置すると互いの間に隙間(デッドスペース)が生じてしまい、この隙間に入射した チェレンコフ光は検出することができない。このデッドスペースを埋めるためにライトガイドと呼ばれる光学 部品が全ての PMT に取り付けられる。ライトガイドの内面は、チェレンコフ光を PMT に効率よく導くために アルミ蒸着や反射材が貼られ鏡面になっている。また、夜光や地面からの照り返しなどの観測中にバックグラウ ンドとなる光を低減する役割も担う。チェレンコフ望遠鏡に用いられるライトガイドの形状としては、二次元 において、ある角度(cutoff angle)以内で入射した光は 100%集光し、それより大きい角度で入射した光は全 てカットするという特徴を持つ Winston Cone と呼ばれる曲面形状が代表的である。しかし、三次元で考えた 場合、焦点面を埋めるためにライトガイドが六角形であることが原因で、光子の入射角度によっては Winston Cone の形状から外れて入射してしまうため、LST 用のライトガイドに最も適した形状ではない。

本研究では、2016 年ごろから建設が開始する LST プロトタイプに搭載するライトガイドを、主に従来の Winston Cone 形状で複数個試作し、大量生産に向けてライトガイドに貼る反射材の効率のよい貼り方の検討 や、貼り方による性能の差を実験の結果から考察した。

実験ではライトガイドの集光率測定システムの設計・製作を行い、±1 %程度の精度をもつシステムを確立 して、試作したライトガイドを PMT に取り付けてライトガイドの集光率角度依存性を測定した。実験方法は、 ライトガイドに±1 度以下の平行光を入射させるため光源を 2400 mm 離し、PMT に取り付けたライトガイド を回転ステージを使用して回転させ、光の入射角度毎の PMT 出力値を測定した。測定結果から、反射材を貼 る際に使用する接着剤の圧着方法によってライトガイドの性能に差があることを確認し、ライトガイドの内面 形状と同様の形状を持つ「オス型」で接着剤を圧着すればより理想的な曲面形状に近いライトガイドを製作す ることができた。しかし、接着剤の最適な塗布量や反射材のカット形状を考慮しなければ、たとえオス型を使 用しても反射材が安定的に貼られたライトガイドが製作できないため、今後はそれらを考慮して大量生産に向 けた製作方法を確立していく。

また、測定したライトガイドの集光率をシミュレーションで計算した集光率と比較すると、約5度から cutoff angle より数度手前で入射する集光率の値がシミュレーションよりも高かった。これは PMT の感度に光の入射 位置及び角度に対する依存性があるためだと考えられる。これらの依存性は詳しく測定されておらずデータが ないため、シミュレーションには考慮していなかった。そこで、実験に使用した PMT 感度の位置依存性と角 度依存性を測定するシステムを構築し、それらの測定結果をシミュレーションに組み込み、集光率の上昇が再 現できるかを調べた。

位置依存性は、スポット光を PMT に入射させ、X・Z 軸ステージを使用して PMT 光電面の位置ごとの出力 値を測定した。角度依存性は、PMT の中心部分の依存性を測定するために直径 5 mm の穴が開いたマスクを PMT に被せ、回転ステージで -80 ~ +80 度の範囲を回転させて PMT 出力値を測定した。これらの測定結 果をシミュレーションに組み込み集光率を再計算したところ、約 10 度以上で入射する集光率が上昇し、実測 とよく合うようになった。位置依存性の結果だけを組み込んでも上昇する効果は見られなかったので、角度依 存性の影響が大きいと考えることができる。今後は、Winston Cone よりも集光率が高い LST 用ライトガイド の形状を、PMT 感度の位置及び角度依存性の測定結果を考慮したシミュレーションで求めていく。

目 次

第1章	序章	4
1.1	解像型大気チェレンコフ望遠鏡	4
	1.1.1 空気シャワー	4
	1.1.2 チェレンコフ光	6
	1.1.3 IACT の観測原理	8
第2章	Cherenkov Telescope Array(CTA)計画	10
2.1	CTA で狙うサイエンス	11
2.2	Large Size Telescope(LST)の概要	12
	2.2.1 反射鏡	13
	2.2.2 Active Mirror Control (AMC)	14
	2.2.3 焦点面カメラ	15
第3章	CTA 大口径望遠鏡用ライトガイド	20
3.1	ライトガイドの役割....................................	20
3.2	ライトガイドの形状:Winston Cone	20
3.3	レイトレースシミュレーション	22
	3.3.1 シミュレーションツール: ROBAST	22
	3.3.2 LST 用ライトガイドのレイトレースシミュレーション	22
3.4	ライトガイドの形状最適化について....................................	25
3.5	LST 用ライトガイドの試作	28
	3.5.1 試作したライトガイドの仕様	28
	I. 切削加工で試作したライトガイド	29
	II. 3D プリンタで試作したライトガイド	39
	III. 3D プリンタで試作したライトガイド - Okumura Cone	44
	IV. 3D プリンタで試作したライトガイド - カット無 -	46
	V. 3D プリンタで試作したライトガイド - アルミナイズドマイラー	48
	VI. 3D プリンタで試作したライトガイド - 出口半径 14.0 mm の Winston Cone 型	48
	3.5.2 試作したライトガイドのまとめ	51
第4章	CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの集光率測定実験	53
4.1	ライトガイド集光率角度依存性測定実験	53
	4.1.1 セットアップ	53
	4.1.2 点光源のレイトレースシミュレーション	57
	4.1.3 データ取得と解析方法	58
	4.1.4 PMT の時間安定性	59
	4.1.5 集光率角度依存性測定結果	59
	4.1.6 集光率角度依存性の絶対値測定	64

第5章	光電子増倍管(PMT)感度の位置依存性及び角度依存性の測定	70
5.1	PMT 感度の位置依存性及び角度依存性測定	70
	5.1.1 PMT 感度位置依存性の測定	70
	5.1.2 PMT 感度角度依存性の測定	73
5.2	測定した PMT 位置感度依存性及び角度依存性を考慮したシミュレーション	75
	5.2.1 レイトレースシミュレーションから求めた PMT への入射位置及び角度	75
	5.2.2 シミュレーション方法	75
	5.2.3 シミュレーション結果	77
	5.2.4 今後 - ライトガイドの形状最適化	78
第6章	まとめ	79
第 6 章 付 録 A	まとめ ステージコントローラの使い方	79 80
第 6 章 付 録 A 付 録 B	まとめ ステージコントローラの使い方 ライトガイド結像面撮影	79 80 82
第 6 章 付 録 A 付 録 B 付 録 C	まとめ ステージコントローラの使い方 ライトガイド結像面撮影 Winston Cone の導出	79 80 82 85
第6章 付録A 付録B 付録C 付録D	まとめ ステージコントローラの使い方 ライトガイド結像面撮影 Winston Cone の導出 試作したライトガイドの CAD データについて	 79 80 82 85 87

図目次

1.1	ガンマ線の放射過程	5
1.2	宇宙線のエネルギースペクトル	5
1.3	チェレンコフ望遠鏡	6
1.4	ガンマ線と宇宙線粒子による空気シャワー発達のシミュレーション図	6
1.5	チェレンコフ光放出の概要図...................................	7
1.6	ガンマ線のエネルギーによるライトプール内の光子密度の違い	7
1.7	チェレンコフ望遠鏡の観測イメージ....................................	8
1.8	空気シャワー中に放出されるチェレンコフ光の高度と望遠鏡焦点面のシャワーイメージ	8
1.9	焦点面における空気シャワーイメージ................................	9
1.10	ステレオ観測のイメージ	9
2.1	CTA 完成イメージ図	10
2.2	望遠鏡配置予定図	10
2.3	望遠鏡の設置候補地	10
2.4	高エネルギー天体の年代による発見数の変化................................	11
2.5	CTA の目標感度曲線	11
2.6	LST 概要図	12
2.7	LST 開発の今後のスケジュール	13
2.8	LST 分割鏡	13
2.9	Cold Slump 法	14
2.10	アルミハニカム	14
2.11	三光製衡所の真空チェンバー	14
2.12	LST 用分割鏡の評価方法である PMD 法の装置	15
2.13	PMD 法での分割鏡測定の様子	15
2.14	MAGIC \mathcal{O} Active Mirror Control	15
2.15	MAGIC の焦点面カメラ	16
2.16	PMT R11920-100 + 高圧回路 + Preamp	16
2.17	光検出器モジュール	16
2.18	PMT の増倍原理	17
2.19	チェレンコフ光の強度と PMT R11920-100 の量子効率の波長依存性	17
2.20	DRS4 チップ	18
2.21	Dragon Board version4	18
2.22	Slow Control Board	19
2.23	LEE アンプが搭載された基板	19
2.24	PACTAv1.4 プリアンプボード	19
3.1	ライトガイドの役割	20
3.2	MAGIC 望遠鏡のライトガイド	21
3.3	VERITAS 望遠鏡のライトガイド	21
3.4	Winston Cone 形状の概念図	21
3.5	ROOT のジオメトリライブラリを用いた形状作成の例	22

3.6	ROBAST での六角形分割鏡作成の例	22
3.7	LST におけるライトガイドの視野	23
3.8	PMT 光電面とライトガイド出口の関係	24
3.9	ROBAST での六角形ライトガイド作成図.................................	24
3.10	ROBAST で作成した Winston Cone 型ライトガイド	25
3.11	レイトレースイメージ	26
3.12	Winston Cone 型ライトガイドの集光率のシミュレーション結果	26
3.13	Winston Cone 形状の六角形ライトガイド	26
3.14	六角形ライトガイドに入射する光子....................................	27
3.15	Bézier 曲線	27
3.16	Bézier 曲線を用いたライトガイドの集光率のシミュレーション結果	28
3.17	射出成形の模式図	29
3.18	ライトガイドの厚みによるデッドスペース	31
3.19	ライトガイドの厚みによるデッドスペースを最大限減少するイメージ	31
3.20	ライトガイドの先端からカットする長さの変化を示したイメージ...............	32
3.21	先端をカットしたライトガイドの寸法を示したイメージ..............................	32
3.22	PMT R11920 – 100 の入射窓	33
3.23	六角形ライトガイドを PMT に取り付ける際に生じる隙間	33
3.24	ライトガイドと PMT 入射窓の位置関係	33
3.25	Z 軸方向から見たライトガイドと PMT 入射窓の位置関係	34
3.26	六角形ライトガイドと PMT がフィットしたときのイメージ	35
3.27	出口部分が削り取られたライトガイド...................................	35
3.28	光検出器モジュールにライトガイドを取り付けるイメージ	35
3.29	ライトガイドに取り付けたフック	35
3.30	ライトガイドを固定するプレート	35
3.31	ライトガイドが 7 個取り付けられたプレート	36
3.32	切削加工で試作したライトガイド	36
3.33	切削加工で試作したプレート....................................	36
3.34	試作したライトガイドとプレートを固定する様子	36
3.35	ESR フィルムの反射率の波長依存性	37
3.36	6 面が繋がった形状でレーザーカットする場合のイメージ	38
3.37	3 面繋がった形状を 2 つレーザーカットする場合のイメージ	38
3.38	3 入手した ESR フィルム	38
3.39	切削加工で試作したライトガイドに ESR フィルムを貼る際に使用した接着剤	38
3.40	切削加工で試作したライトガイドに反射材を貼った写真....................................	39
3.41	図 3.40を上から見たときの写真	39
3.42	MAGIC 望遠鏡ライトガイドの製作風景	40
3.43	AGIRISTA-3000	40
3.44	AGIRISTA の造形原理	40
3.45	AGIRISTA で造形できる構造	41
3.46	3 D プリンタで造形されたモデルのイメージ	41
3.47	AGIRISTA でのサポート除去の様子	41
3.48	3D プリンタで試作したライトガイド	42
3.49	3 D プリンタで試作したライトガイドに反射材を貼る際に使用したオス型	42
3.50	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..................	42
3.51	3 D プリンタで試作したライトガイドに反射材を貼る際に使用した接着剤	42
3.52	3 D プリンタで試作したライトガイドに接着剤を塗布する様子	43

3.53	3 D プリンタで試作したライトガイドにオス型を差し込み圧着する様子	43
3.54	3 D プリンタで試作したライトガイドに反射材を貼った写真	43
3.55	接着剤の圧着方法が異なるライトガイドの表面比較の図....................................	43
3.56	ライトガイド先端をカットしない場合の反射材..................................	44
3.57	反射材を貼った Okumura Cone	45
3.58	反射材を貼った Okumura Cone の入口部分..................................	45
3.59	反射材を貼った Okumura Cone の出口部分....................................	45
3.60	接着剤として使用した両面テープ....................................	46
3.61	先端カット有と無のライトガイドの長さを比較.................................	47
3.62	両面テープを使用して接着剤を貼ったライトガイド	47
3.63	反射材を貼った状態のライトガイドの長さを比較	47
3.64	アルミマイラーの反射率の波長依存性....................................	49
3.65	ルミマイラーと ESR フィルムの反射率の比較	49
3.66	レーザーカットしたアルミマイズドマイラー	49
3.67	アルミマイズドマイラーを貼ったライトガイド................................	50
3.68	アルミマイズドマイラーを貼ったライトガイドと ESR を貼ったライトガイドの明るさの比較	50
3.69	出口半径 14.0 mm の Winston Cone 型ライトガイド	51
3.70	出口半径 12.5 mm と 14.0 mm の Winston Cone 型ライトガイドの比較	51
4.1	集光率角度依存性測定実験のセットアップ概要図	54
4.2	光源とライトガイド間の距離....................................	54
4.3	実験で使用した LED の発光スペクトル	55
4.4	LED とディフューザーを入れた箱	55
4.5	LED とディフューザーを入れた箱の中身	55
4.6	回転ステージ上に設置したアルミボード	55
4.7	固定台に設置したライトガイドと PMT	56
4.8	ライトガイドと PMT の設置が完了した図	56
4.9	ライトガイド周辺のセットアップ全体図	56
4.10	光源とライトガイド及び PMT との中心位置を合わせるために設置した L アングル	57
4.11	点光源のレイトレースイメージ	57
4.12	点光源のライトガイド集光率シミュレーション結果	58
4.13	drsosc で見た PMT からの信号	58
4.14	drsosc で見た PMT からの信号の拡大図	58
4.15	ライトガイドの回転方向	59
4.16	PMT 時間安定性のセットアップ	59
4.17	PMT の時間安定性の測定結果	60
4.18	LG _{3D} に貼った反射材	60
4.19	LG _{mill} の集光率測定結果	61
4.20	LG _{3D} の集光率測定結果	61
4.21	LG _{Okumura} の集光率測定結果	61
4.22	LG _{full} の集光率測定結果	62
4.23	LG _{Alumi} の集光率測定結果	62
4.24	LG _{14mm} の集光率測定結果	62
4.25	LG _{mill} と LG _{3D} の集光率測定結果の比較	63
4.26	LG _{3D} とLG _{full} の集光率測定結果の比較	63
4.27	LG _{mill} と LG _{3D} の集光率測定結果の比較	63
4.28	集光率絶対値測定用のマスク	64
4.29	集光率絶対値測定のセットアップ	64

4.30	集光率絶対値測定の流れ	34
4.31	ライトガイド繰り返し測定の流れ	35
4.32	ライトガイド繰り返し測定の結果	36
4.33	double crossing の概要図	37
4.34	LG _{mill} の集光率の絶対値測定結果	38
4.35	LG _{3D} の集光率の絶対測定結果	38
4.36	LG _{Okumura} の集光率の絶対値測定結果	38
4.37	LG _{full} の集光率の絶対測定結果	38
4.38	LG _{Alumi} の集光率の絶対値測定結果	38
4.39	LG _{3D} とLG _{full} の集光率の絶対測定結果の比較	39
4.40	LG _{3D} とLG _{full} の集光率の絶対測定結果の比較	39
5.1	PMT 感度位置依存性のセットアップ概要図	70
5.2	実際の PMT 感度位置依存性のセットアップ ?	71
5.3	X・Z 軸ステージの移動範囲	71
5.4	PMT 入射窓の大きさと X・Z 軸ステージの移動範囲の比較	71
5.5	PMT 感度位置依存性の測定結果	72
5.7	PMT 感度の角度依存性測定に使用したマスク	73
5.8	実際の PMT 感度角度依存性測定のセットアップ	73
5.6	平均した PMT 感度位置依存性の測定結果	73
5.9	PMT 感度角度依存性の測定結果	74
5.10	平均した PMT 感度角度依存性の測定結果	74
5.11	PMT に入射した光子の角度の定義	75
5.12	光子の PMT への入射角度のシミュレーション結果	76
5.13	PMT 感度角度依存性の測定結果を相対値化したグラフ	76
5.14	PMT 感度の位置及び角度依存性の重み付け方法	77
5.15	位置及び角度依存性を考慮したシミュレーション結果	77
5.16	位置依存性のみを考慮したシミュレーション結果	78
5.17	角度依存性のみを考慮したシミュレーション結果	78
5.18	PMT 感度の位置及び角度依存性を考慮したシミュレーションと実測を比較した集光率	78
A.1	GSC-02 8	30
Ъð	ライトガイド結偽両提影のセットアップ概要図	งก
D.2 P 1	ライトガイド相像面撮影のビノドノノノ碱安因	ງ∠ ວງ
D.1 D 9	ショーションで求めたライトガイド結婚面の光乙分右	ງບ ວງ
D.J D 4	シュュレーション C、のにノート ハート 相塚山の ルーカ 中 · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	ט. א כ
D.4 DК	$\lambda \wedge \gamma$ C 取影 した LG _{mill} の 桁像面	94 24
D .0	ガメノビ軍影した LG _{3D} の相像面	54
C.1	<i>R-Z</i> 座標系の放物線	35
C.2	片方の放物線を焦点の位置に持ってきた図	35
C.3	Winston Coneの形状	36
D.1	LG _{3D} の図面	38
D.2	LG_{full} の図面	38
D.3	プレートの図面	39
Б 1	ライトガイドの目積たりは用	11
Ľ.I	ノ 1	<u>۱۱</u>
E.2	フ 1 ト 2 1 ト 2 3 2 2 3 5 0 2 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	Л

表目次

2.1	各望遠鏡の要求仕様	12
3.1	LST の要求仕様	23
3.2	試作したライトガイドのまとめ	52
4.1	実験に使用した各機器	53
4.2	ライトガイド繰り返し測定のまとめ....................................	66

第1章 序章

ガンマ線は電磁波の中で最もエネルギーの高い光子であり、そのエネルギーは数 10 KeV (KeV: 10³eV)から 100 TeV (TeV: 10¹²eV)以上にも及ぶ。ガンマ線の主要な放射過程は図 1.1のみであるため、高エネルギー ガンマ線の放射は宇宙空間のどこかで電子や陽子が高エネルギーにまで加速されていることを示すプローブと なる。また、高エネルギーの陽子や原子核などの荷電粒子からなる宇宙線のスペクトルは図 1.2であり、10²⁰ eV 以上まで加速された粒子が存在する。これは、スイスのジュネーブ郊外にある Large Hadron Collider (LHC) が加速することができる 14TeV^{*1}よりも 7 桁高く、宇宙空間には巨大な加速器が存在していると考えられる。

宇宙線は荷電粒子なので地球に到来するまでに宇宙空間内の磁場との相互作用で進行方向が曲げられる。そ のため地球近傍での直接観測では宇宙線の発生起源の場所を特定することができず、宇宙線の発見から 100 年 以上経った今でも発生起源は解明されていない。対してガンマ線は中性粒子なので磁場の影響を受けることな く地球に到来するため、ガンマ線を観測することで宇宙線の発生起源の解明に繋がる。これまでに銀河系内で は超新星残骸(SNR)や中性子星,パルサーなど、系外では活動銀河核(AGN)やガンマ線バーストなどか らのガンマ線が観測されており、これらは宇宙線起源の候補天体と考えられている。 また、ガンマ線観測は 1991 年に Compton Gamma Ray Observatory(CGRO)衛星が打ち上げられた以降目覚ましい発展を遂げた。 CGRO 衛星は数 10 keV - 10 GeV 帯の観測を行い、全天のガンマ線天体カタログを作成した。そして 2008 年 に GeV 領域の感度の向上を目指した Fermi 衛星が打ち上げられ、現在までに 2000 近いガンマ線天体を検出し ている。

1.1 解像型大気チェレンコフ望遠鏡

ガンマ線のエネルギーが高くなると到来頻度が低くなり光子数も減少するため、1m² ほどの検出面を持つ衛 星での観測は難しくなる。より大きな検出面を持つ衛星を打ち上げればよいが、重量やコストなど現実的な問 題が生じる。そのため、数 10 GeV から TeV 領域に渡る超高エネルギー(Very High Energy; VHE)ガンマ線 の観測は、ガンマ線と地球大気の相互作用によって発する光を間接的に観測して、到来したガンマ線のエネル ギーや到来方向を推定する、チェレンコフ望遠鏡(Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope; IACT)が用 いられる。チェレンコフ望遠鏡での観測は 1989 年の Whipple 望遠鏡に始まり、現在はカナリア諸島ラ・パル マにある MAGIC, ナミビアの H.E.S.S, アリゾナの VERITAS 望遠鏡などが稼働している。ここでは、チェ レンコフ望遠鏡でのガンマ線観測について説明する。

1.1.1 空気シャワー

地球に到来した高エネルギーガンマ線は、地球大気中の原子と電子・陽電子対生成を起こしてガンマ線は消滅し、荷電粒子の電子と陽電子のペアが生成される。生成された電子と陽電子は図 1.1 (b)の制動放射を起こしてガンマ線を放出する。放出されたガンマ線が再び大気中の原子と電子・陽電子対生成を起こして電子・陽電子のペアが生成され再度ガンマ線が放出する。これらの過程が繰り返され粒子数が増大していき、電子・陽電子のエネルギーが大気の臨界エネルギー以下まで低下すると粒子数の増加は止まり減少に転じてやがて収束する。このような現象を空気シャワーと呼ぶ。

空気シャワーは地球に到来した宇宙線からも発生する。宇宙線の主成分である陽子やその他原子核と大気中の原子との相互作用でπ中間子が生成され、そのうちπ⁰中間子はただちに2つのガンマ線に崩壊し、このと き生成したガンマ線から結果的に空気シャワーが発生する。この宇宙線起源で発生する空気シャワーをハドロ

^{*1}2012 年現在、8 TeV まで加速可能 [2]。



図 1.1: ガンマ線の放射過程 [17]



図 1.2: 宇宙線のエネルギースペクトル [6]



図 1.3: チェレンコフ望遠鏡。左上が Whipple[4], 左下が MAGIC[13], 右上が H.E.S.S[3], 右下が VERITAS[4]。



図 1.4: ガンマ線と宇宙線粒子による空気シャワー発達のシミュレーション図 [34]

ンシャワー、前述したガンマ線起源で発生する空気シャワーを電磁シャワーと呼び両者を区別する。図 1.4は 粒子による空気シャワーの発達を表す。陽子や原子核によって発生したハドロンシャワーに比べてガンマ線起 源の電磁シャワーは横に広がらずコンパクトに発達する。

1.1.2 チェレンコフ光

空気シャワー中に発生した電子・陽電子が十分なエネルギーを持つとき、大気中の光速 *c*/*n* (*c* は真空中の光速, *n* は大気の屈折率)を超えて運動する。このとき、チェレンコフ光と呼ばれる、紫外から可視光領域の光を放出する。図 1.5のように荷電粒子の波面を重ね合わせたときにできる包絡面がチェレンコフ光の波面となる。 図中のチェレンコフ光の放射角度 *θ* は、粒子の速さを β*c* とすると

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{1}{\beta n} \right) \tag{1.1}$$

となる。地上付近の大気の屈折率は波長が 300 nm の場合でおよそ 1.00029 であり、約 1.3 度の放射角になる が、大気の屈折率は高度が上昇すると小さくなるので、実際チェレンコフ光の放射角は 1.3 度以下になる。 放 出されたチェレンコフ光は、ある幅を持った広がりとなり地上に到達する。地上に到達した時の広がりは仮に 放射角が一定であれば放射高度が高いほど大きくなるが、放射角が大気の屈折率に依存する関係で地上での広 がりは約 150 m で一定となる。この広がりをライトプールと呼び、ライトプール内の光子密度は図 1.6のよう にほぼ一定であり、光子密度はガンマ線のエネルギーに依存する。



図 1.5: チェレンコフ光放出の概要図 [15]



図 1.6: ガンマ線のエネルギーによるライトプール内の光子密度の違い [32]



図 1.7: チェレンコフ望遠鏡の観測イメージ [1]



図 1.8: 空気シャワー中に放出されるチェレンコフ光の高度と望遠鏡焦点面のシャワーイメージ [16]

1.1.3 IACT の観測原理

大気チェレンコフ望遠鏡は、空気シャワー中から放出され地上に到達したチェレンコフ光を放物面型の反射 鏡で集光し、焦点面カメラに配置した多数の光検出器で電気信号に変換してチェレンコフ光を検出する。望遠 鏡が図 1.7のようにライトプール内のチェレンコフ光を検出できれば、ライトプール内の光子密度はほぼ一定 であるため空気シャワー中に発生したチェレンコフ光を全て検出しなくとも到来したガンマ線のエネルギーを 推定することができる。

チェレンコフ光は空気シャワーの発達に応じて様々な高度から放出され、低い高度ほど放射角が大きい。こ のように放射高度によって角度が異なるため、反射鏡で集光すると図 1.8のように焦点面カメラで結ぶ像の位 置がずれ、複数の光検出器にまたがってチェレンコフ光が検出される。このときチェレンコフ光を検出した検 出器の配置パターンが空気シャワーの発達形状に相当しており、焦点面カメラには、いわば空気シャワーの発 達イメージが形成される。

また、チェレンコフ光は空気シャワー中の様々な高度から放出されるため時間的な厚みが数 ns 存在する。これに対して夜光は数 10 ~数 100 MHz で発生するので、高速のエレクトロニクスを使用して光検出器からの信



図 1.9: 焦点面における空気シャワーイメージ [16]。左が陽子起源、右がガンマ線起源の焦点面イメージを表す。



図 1.10: ステレオ観測のイメージ

号を GHz レベルでサンプリングすればチェレンコフ光と夜光の信号を区別することができる。

イメージング法

1.1.1 節で述べたがガンマ線の他に陽子や原子核からなる宇宙線からも空気シャワーが発生し、チェレンコフ 光が放出される。この宇宙線起源の空気シャワーはガンマ線観測においてバックグラウンドとなり、高速で信 号をサンプリングする方法では低減することができない。しかし、図 1.4のようにガンマ線起源と宇宙線起源 の空気シャワーは発達の形が異なりガンマ線起源の方がよりコンパクトに細く発達する。この違いは図 1.9の ように焦点面カメラでのイメージ形状にあらわれ、ガンマ線起源と宇宙線起源の空気シャワーを区別すること ができる。

ステレオ観測

ステレオ観測とは、図 1.10のように複数のチェレンコフ望遠鏡で観測することで単独観測よりも精度よくガ ンマ線の到来方向を求める方法である。複数の望遠鏡焦点面カメラの空気シャワーイメージの軸を伸ばした交 点がガンマ線の到来方向であり、さらに複数の望遠鏡で捉えた空気シャワーイメージの距離からシャワー軸が 求まる。また、望遠鏡間の距離からシャワーが発生した高度が推定できる。ガンマ線の到来方向の決定精度は 望遠鏡の台数が多いほど向上する [37]。

第2章 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画



図 2.1: CTA 完成イメージ図 [5]

Cherenkov Telescope Array(CTA)計画は、図 2.1のように口径が異なるチェレンコフ望遠鏡群を配置し て、現在稼働している MAGIC, H.E.S.S, VERITAS 望遠鏡よりも約 10 倍の感度を達成し、観測するエネル ギー帯を数 10 GeV から 100 TeV 以上まで拡大することを目的とする国際共同プロジェクトである。図 2.7に LST の今後のスケジュールを示す。2020 年から 20 年間の本格観測を目指しており、現在は望遠鏡プロトタイ プの design study がほぼ完了し、搭載機器の開発や性能評価が行われている。

CTA では Large Size Telescope (LST), Medium Size Telescope (MST), Small Size Telescope (SST)の 3 タイプの望遠鏡アレイを北半球・南半球それぞれに建設し、全天観測を行う。望遠鏡の配置は CTA のモンテ カルログループによるシミュレーションによって最適化され、北半球には LST 4 台, MST 8 台, SST 17 台 が、南半球には LST 4 台, MST 32 台, SST 23 台が図 2.2のように配置される予定である。望遠鏡を配置す るサイトは、図 2.3のスペインの Teide, アメリカの Meteor Crater, ナミビアの Aar, チリの Armazones な どが候補として挙がっており、2014 年中に最終決定される。



図 2.2: 望遠鏡配置予定図 [10]。赤が LST,緑が MST, 青が SST を表す。







図 2.4:発見された X 線源,ガンマ線源,VHE ガンマ線源の数の年代による変化 [1]。横軸が年代、縦軸が発見された X 線とガンマ線源の数を表す。



図 2.5: CTA の目標感度曲線。赤が CTA の目標感度曲線,青が MAGIC,緑が H.E.S.S の達成感度曲線 [1]。CTA では、約 1mcrab (~10⁻¹⁴ erg s⁻¹ cm⁻²)の感度の達成を目指す。

現在稼働中のチェレンコフ望遠鏡によって図 2.4のように、数 10 GeV から TeV 領域に渡る超高エネルギー ガンマ線天体が 100 以上発見されている。CTA では、大規模な望遠鏡群による有効面積の向上や数 km² に及 ぶ地表面積をカバーすることによって、現在稼働しているチェレンコフ望遠鏡よりも図 2.5のように約 10 倍の 感度を達成し、かつ観測可能なエネルギー領域を数 10 GeV から 100 TeV 以上に拡大する。完成すれば、1000 以上の VHE ガンマ線源の発見が期待されている。

2.1 CTA で狙うサイエンス

地球に到来したガンマ線と、大気との相互作用で発生した空気シャワー中から放出するチェレンコフ光の密 度は、ガンマ線のエネルギーにほぼ比例するため、低エネルギー側のガンマ線の観測には大面積の望遠鏡が必 要である。一方、高エネルギー側のガンマ線はチェレンコフ光の密度が高いため、小面積の望遠鏡で十分観測 が可能である。CTA では、口径が異なる望遠鏡を設置することにより、幅広いエネルギー帯域の観測を目指し ている。各望遠鏡がカバーするエネルギー帯域及び仕様は表 2.1のようになっている。

表 2.1: 各望遠鏡の要求仕様 [12][30]			
望遠鏡サイズ	Large	Medium	$\mathbf{S}\mathbf{mall}$
口径	$23\mathrm{m}$	$12\mathrm{m}$	$6\mathrm{m}$
		Schwarzschild-Couder	Schwarzschild-Couder
ミラー形状	Parabolic	Davis-Cotton	Davis-Cotton
エネルギー帯域	$20~{\rm GeV}{\sim}1{\rm TeV}$	100 GeV ${\sim}10$ TeV	$1 \text{TeV} \sim 100 \text{TeV}$
ミラー面積	400 m^2	100 m^2	37 m^2
視野 (FOV)	4.5°	8°	$8 - 10^{\circ}$



図 2.6: LST 概要図 [12]

LST が担う数 10 GeV 領域では、銀河系内のパルサー、系外ではガンマ線バースト(Gamma-Ray Burst; GRB)や遠方の活動銀河核(Active Galactic Nuclei; AGN)などが、MST が担う 100 GeV~10 TeV 領域で は、銀河面や近傍銀河などが、SST が担う 10 TeV 以上の領域では Knee 領域の宇宙線が重要な研究テーマと なる。さらに、GRB や AGN の観測から光子の速度差を測定したり、スペクトルの詳細を調べることで、光速 度不変性の検証が期待されている [1]。

2.2 Large Size Telescope (LST)の概要

LST は3 タイプの望遠鏡のうち、反射鏡が最も大きく、さらに焦点面カメラに配置する光検出器の数は1855 本にも及ぶ。日本では MAGIC に参加している研究者が多く、また過去に Telescope Array 実験で大型鏡を製 作した実績があり、加えて世界有数の光検出器製造メーカーが存在するため、日本グループは主に図 2.6の LST の開発を行っている。図 2.7に LST の今後のスケジュールを示す。現在は 2016 年ごろに建設が始まる、LST プ ロトタイプに搭載する機器の開発や性能評価が行われている。ここでは LST の各装置開発について説明する。



図 2.7: LST 開発の今後のスケジュール [9]



図 2.8: LST 分割鏡

2.2.1 反射鏡

LST の反射鏡は放物面型複合鏡で、図 2.8の直径 1.51 m の六角形型分割鏡が約 200 枚使用される。日本グループでは分割鏡を茨城県つくばみらい市の三光製衡所^{*1}で製作している。

H.E.S.S の分割鏡では、熱成形と研磨をしたガラスにアルミを蒸着し、SiO₂の保護コーティングを施すという従来の方法で製作されている。しかし、鏡が大型化すると、十分な剛性を得るためにガラスの厚みを厚くする必要があるため、重量は増加し、コストが高くなってしまう。LST の分割鏡はサイズが 1.51 m と大型、枚数は約 200 枚必要なため、従来の方法での製作は難しくなる。

そのため、LST の分割鏡は、図 2.9の Cold Slump という方法で製作される。Cold Slump は、高さ 60 mm のアルミハニカムを厚さ 3 mm のガラスシートで挟み込み接着剤で固定した土台に、曲率を持つマスターモー ルドを押し付け曲率を写し取るという方法である。アルミハニカムは図 2.10のように、厚さ約 0.05 mm の六 角形の小部屋(セル)の集合体であり、この構造によりアルミ板に比べ軽量化することができる。

さらに、Cold Slump によって製造された鏡の表面には、スパッタリング法で鏡面を形成する。スパッタリング法とは、図 2.11の真空チェンバー内に鏡を置き、高電圧をかけてイオン化させたアルゴンなどを金属の薄膜に衝突させ原子を弾き飛ばし、鏡の表面に成膜する方法である。この方法は、従来の蒸着法比べて強度が強

^{*1}Telescope Array 実験の直径 0.66 m の分割鏡を製作した経験がある。



図 2.9: Cold Slump 法

図 2.10: アルミハニカム



図 2.11: 三光製衡所の真空チェンバー

い膜ができる。さらに、LST の分割鏡には SiO₂ や、HfO₂ などの多層膜コーティングを施し、チェレンコフ光 のスペクトル分布に合わせ波長が 350~400 nm 付近の反射率を向上させている。ここで、LST 分割鏡の要求 仕様を以下に示す。

- 重量:一枚当たり 50 kg 以下
- 焦点距離: 28 ~ 29.2 m
- スポットサイズ: 焦点面カメラ1 ピクセルの 1/3 に収まる 15 mm 以下
- 反射率: 90 %以上 (at 400 nm)、85%以上 (at 300 600 nm)
- 反射率の経年変化:1年あたり1%以下

CTA の観測期間は 20 年を予定しているため、分割鏡の反射率の劣化を少なくすることが重要となるが、三光 製衡所で製作された分割鏡のサンプルを用いた腐食加速実験 [20] から、10 年後でも反射率の低下が 2.24 %で あることがわかり、要求値をほぼ満たしている。

また、LST 一台あたり分割鏡が約 200 枚と多いため、効率よく製造された分割鏡を評価する必要がある。その評価方法として日本グループでは、Phase Measuring Deflectometry(PMD)法を採用し、東京大学宇宙線研究所に図 2.12の装置を設置した。現在、PMD 法装置の検証と精度の向上を目指す研究が行われている [21]。

2.2.2 Active Mirror Control (AMC)

LST は、自重や風、望遠鏡設置環境の温度などによって望遠鏡構造に歪みが生じ、反射鏡が結ぶスポット が広がってしまう。この歪みは、望遠鏡を上下に傾けたときの仰角に依存するため、望遠鏡の動きと連動させ て歪みを常に補正する必要がある。MAGIC ではこの歪みを、鏡を支える構造部分(インターフェイスプレー ト)と鏡の間にアクチュエータを入れて、図 2.14のように分割鏡の中央に取り付けられたレーザーによって各 分割鏡の位置を補正している。この方法を Active Mirror Control (AMC) と呼ぶ。LST でも同様の方法で各 分割鏡の位置を補正するため、アクチュエータ制御システムや、インターフェイスプレートの開発が進められ ている。





図 2.12: LST 用分割鏡の評価方法である PMD 法の装置 [21] 図 2.13: PMD 法での分割鏡測定の様子。スクリーンに像(サイン波)を投影して分割鏡に写し込み、分割鏡の表面形状によって生じる像の歪みを撮影・評価する。



 \boxtimes 2.14: MAGIC \mathcal{O} Active Mirror Control

2.2.3 焦点面カメラ

光検出器モジュール

チェレンコフ望遠鏡は、反射鏡で集光したチェレンコフ光を図 2.15のように焦点面に設置したカメラで捉える。 カメラは図 2.15左下のように、ライトガイドと呼ばれる光学部品が取り付けられた光電子増倍管(Photomultiplier Tube, PMT)*2から構成される。LST では一台あたり PMT が 1855 本使用される。ライトガイドの詳細は 3 章で述べる。PMT の数は CTA 計画全体でおよそ 10 万本にも及び、世界的にこの数の PMT を製造・納品 できるのは日本の浜松ホトニクス社もしくはイギリスの Electron Tube 社に限られるため、日本グループでは 浜松ホトニクス社と共同で図 2.16の LST 用 PMT(R11920-100)の開発を進めている。現在、LST 用 PMT は量産化され、すでに 1000 本以上が日本グループに納品されている。また、PMT には量子効率などに個体差 があるため、量産化された PMT のキャリブレーションシステムの構築も進められている。 日本グループで はインストールとメンテナンスの作業を容易にするため、図 2.17のように PMT7 本を束にして、後段に増幅 回路や読み出し回路などを備えたクラスタ(光検出器モジュール)の開発を行っている。

光電子増倍管(PMT)

ここで光電子増倍管(PMT)について説明する。PMTは、光電効果により、入射した光子を光電子に変え 電気信号として取り出す光検出器である。光電効果で発生した光電子は、PMT内部のダイノードによって10⁴ ~10⁸ 倍に増幅される。図 2.18にその増倍原理を示す。まず UV 透過ガラスの入射窓に入射した光子が光電効 果によって光電子が真空中に放出される。放出された光電子は集束電極によって第一ダイノードに集められ二 次電子に増幅され、増幅された電子は後段のダイノードでさらに二次電子に増幅、最終ダイノードまで増幅さ

^{*2}光検出器には PMT 以外にもフォトダイオードがあるが、検出面が数 mm²~1cm² 程度と非常に小さく、費用や技術的な面で直径 2.25 m の LST 焦点面をカバーするのは難しい。しかし、量子効率は PMT に比べて高いため、将来的に PMT からのアップグレード c を検討している。



図 2.15: MAGIC の焦点面カメラ [8]



図 2.16: PMT R11920-100 + 高圧回路 + Preamp



図 2.17: 光検出器モジュール



図 2.18: PMT の増倍原理 [27]



図 2.19: チェレンコフ光の強度と PMT R11920-100 の量子効率の波長依存性 [14]

れた二次電子群は、陽極(アノード)からパルス信号として出力される。

光電効果によって光電面から発生した1光電子が、最終的に何個の電子に増幅されたか示す特性を増倍率、 またはゲインと呼び、光電面の材質やダイノード数、PMT への印加電圧によって変化する。各ダイノードの 二次電子放出比をδとすると、ダイノード間の電圧 E を用いて、

$$\delta = aE^k \tag{2.1}$$

ここで、*a* は定数、*k* は電極の材質で決まり約 0.7~0.8 である。さらに、ダイノードの数を *n*、光電子が第一 ダイノードの有効部分に入る確率(収集効率という)を *α* とするとゲイン *μ* は、

$$\mu = \alpha \delta_1 \delta_2 \dots \delta_n \tag{2.2}$$

とかける。一般的な PMT のゲインは 10⁸ 程度であるが、CTA は観測期間が 20 年と長く、PMT の交換やメ ンテナンスにかかる費用を抑えるために 4×10^4 ほどの比較的低ゲインで動作させる。

また、PMT 光電面に入射した光子は 100% 光電子を放出するわけではなく、ある確率で放出する。この確 率を量子効率と呼ぶ。チェレンコフ光の強度は波長の2 乗に反比例し、短波長ほど多く放出されるが、地上に 届くまでにオゾンによる吸収や大気分子によるレイリー散乱、塵などによるミー散乱によって光は減衰され、 実際に地上の検出器で検出される光子の波長は 350 nm 付近で最大になる。そのため、開発された PMT の量 子効率は以下の図 2.19のように、波長 350 nm 付近にピークを持つような材質を選んでいる。

エレクトロニクス

• LST 用読み出し回路

チェレンコフ望遠鏡が空気シャワーを捉えたときに光検出器から出力される信号は、短くて数 ns であるため、固定時間幅で積分した電荷量の測定だけでは数 10~数 100 MHz でランダムに発生する、バックグラウンドとなる夜光を効率的に除去することができない。そのため、波形を数 100 MHz~数 GHz ほどの高速でサン



図 2.20: DRS4 チップ [22]



 \boxtimes 2.21: Dragon Board version4[11]

プリングし波形情報を記録する必要がある。しかし、GHz レベルで波形をサンプリングしてデジタル変換をす るのは消費電力や発熱、費用の点が問題になってくる。また、この波形情報を読み出すにはトリガーが必要で あり、トリガー生成にかかる時間は一つの望遠鏡内で 0.1~数 ns 程度で、かつ望遠鏡アレイ間のトリガーを合 わせるためにさらに数 μs 程度必要になる。この時間の間、波形情報を保持しなければならない。LST では、 アナログメモリサンプリング方式という方法で波形をサンプリング・情報を保持する開発が進められている。

アナログメモリサンプリング方式は、毎秒数 100 MHz ~数 GHz の速度でスイッチを次々に切り替える方式 で、多数のキャパシタから構成される。スイッチを切り替えることによって各キャパシタに電荷が貯められて いく。記録できる波形時間の長さは、サンプリング速度とキャパシタの数で決まり、数 μs のトリガーの遅れ に対応できる。保存した波形の情報は数 10 MHz 程度で読み出せるため、低消費電力を実現できる。

アナログメモリサンプリング方式には専用の ASIC が必要になり、LST ではスイスの Paul Scherrer Institut (PSI) が開発した、図 2.20のD omino Ring Sampler version4 (DRS4) チップが使用される。

DRS4 は、MAGICII で使用されている DRS2 チップの改良版で、9 チャンネルの差動入力を持ち、1 チャ ンネル毎に 1024 個のキャパシタから構成されている。毎秒 0.7~5 GHz の速度でサンプリングし、数 10 MHz の速度で A/D 変換が可能である。光検出器モジュールの読み出し回路には、イタリアグループが DRS4 を搭 載した Dragon (Domino Ring Acquisition with Gigalink Over Network)を開発し、京都大学を中心として日 本で改良が重ねられ、現在、図 2.21の version4 が開発された。7 本の PMT からの信号は High Gain と Low Gain を持つメインアンプで増倍され、DRS4 でサンプリングされる。サンプリングされたデータは ADC でデ ジタル変換されてギガビットイーサネットで転送される [22]。

• Slow Control Board (SCB)

Slow Control Board (SCB) は、PMT に印加する高電圧を調整する。また、高電圧や、PMT のアノードからの電流、温度・湿度などをモニターする役割を担う。図 2.22は、日本グループで開発された SCB である。

• Preamp

2.2.3 節でも述べたが、LST の PMT は 4×10^4 という比較的低ゲインで動作されるため、PMT からの信号を 増幅するプリアンプが必要である。プリアンプの候補として、市販されている Multi-Circuits 社の LEE-39+



⊠ 2.22: Slow Control Board



図 2.23: LEE アンプが搭載された基板



図 2.24: PACTAv1.4 プリアンプボード

(以下 LEE アンプ)があり、LEE アンプが搭載された図 2.23の基板が日本グループで開発された。LST のプリアンプに要求される仕様は、

- ダイナミックレンジ: 1 ~ 3000 p.e.
- 周波数帯域:> 300 MHz
- ノイズ: 0.2 p.e. (S/N = 5 at 1 p.e. 測定時)
- 消費電力:~150 mW

であるが、LEE アンプは、ダイナミックレンジや消費電力などを満たしてはいない [19]。そのため、これらの要求を満たす図 2.24の PACTA というアンプがスペイングループによって開発された。図 2.21の Dragon version4 は PACTA アンプ用に改良されている。

第3章 CTA大口径望遠鏡用ライトガイド

3.1 ライトガイドの役割



図 3.1: ライトガイドを PMT に取り付けることによりデッドスペースが低減し、入射光に対する有効面積(図の赤い領域)が拡大する [17]。

CTA の大口径望遠鏡(LST) 焦点面には、チェレンコフ光を電気信号に変換する光検出器である、光電子 増倍管(PMT)が一面に配置される。LST 焦点面の大きさは直径 2.25m であり、LST 一台あたりに使用する PMT の数は 1855 本にも及ぶ。しかし、PMT を一面に配置する際の問題点として、図 3.1左のように LST に 使用する PMT の入射窓が円形なため、PMT 同士を隣接させて配置すると互いの間に隙間(デッドスペース) が生じてしまう。このデッドスペースに入射したチェレンコフ光は検出することができず、入射光に対する有 効面積が減少し、観測可能な望遠鏡のエネルギー閾値を下げることができない。

ライトガイドは、この PMT 間のデッドスペースを低減するために、図 3.1右のように全ての PMT に取り付けられる光学部品である。ライトガイドの内面は主に反射材が貼ってあり、ライトガイドを取り付けることによって効率よくチェレンコフ光を PMT に導くことができる。また、観測中には望遠鏡の反射鏡以外からも、 夜光や地面からの照り返しなどのバックグラウンドとなる光が PMT に入射してしまうが、ライトガイドはこれを低減する役割も担う。

3.2 ライトガイドの形状: Winston Cone

焦点面に隙間なくライトガイドを配置するため、ライトガイドは六角形である。ライトガイド内面の向かい 合う面同士の形状は、Winston Cone[35] と呼ばれる曲面形状が代表的であり、現在稼働中の図 3.2の MAGIC 望遠鏡と図 3.3の VERITAS 望遠鏡のライトガイドの内面形状は Winston Cone である。



図 3.2: MAGIC 望遠鏡のライトガイド [8]



図 3.3: VERITAS 望遠鏡のライトガイド [36]



図 3.4: Winston Cone 形状の概念図。右図の向かい合う緑の曲線が Winston Cone。*a*, *a*['] はそれぞれ Winston Cone の入口半径と出口半径、*L* は Winston Cone の長さを表す。Winston Cone 形状のライトガイドは、*a* がライトガイド入口 半径, *a*['] がライトガイド出口半径, *L* がライトガイドの長さになる。

Winston Cone は、放物線の軸と平行に入射した光は必ず焦点に集まる性質を利用し、図 3.4右のような、放 物線の焦点の位置にもう一つの放物線の端が位置する形状をしている。この形状により二次元において、cutoff angle と呼ばれる、ある角度 θ 以内で入射した光子は必ずライトガイドの出口を通過するので 100% 集光し、 cutoff angle よりも大きい角度で入射した光子はライトガイド内面で反射されてライトガイドの入口から飛び 出していき集光しないという理想的な特徴を持つ。この特徴により、夜光や地面からの照り返しなどの反射鏡 以外から PMT に入射するバックグラウンドとなる光を低減することができる。

• Winston Cone の関係式

Winston Cone には、入口半径 a, 出口半径 a', 長さ L, cutoff angle θ の間に次の式 (C.8), (3.2), (3.3) の関係がある。

$$\tan\theta = \frac{a+a'}{L} \tag{3.1}$$

$$a' = a \sin\theta \tag{3.2}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a'}{a} \right) \tag{3.3}$$

これら3式からWinston Coneは、入口半径とcutoff angleが決まれば出口半径と長さが決定する特徴を持つ。





図 3.6: ROBAST での六角形分割鏡作成の例 [28]。球面鏡と 六角柱の共通部分のみを取り出すと六角形型の分割鏡が作成 できる。

図 3.5: ROOT のジオメトリライブラリを用いた形状作成の 例。ROOT User's Guide より引用 [7]。

3.3 レイトレースシミュレーション

本研究では4章で詳細に述べるが、LST用に試作したライトガイドの集光率を測定して形状や性能の確認を する。その際の比較対象として、LSTの要求仕様に合わせたライトガイドの理想モデルをシミュレーションで 作成してレイトレースシミュレーションを行い、モデルの集光率を求めた。

ライトガイドの役割として重要なのは、cutoff angle 以内で入射した光を効率よく PMT に導き、cutoff angle より大きい角度で入射した光は低減することである。それらの特徴を検証するため、入射角度ごとの集光率を 定義し、ライトガイドに入射させる光子の角度を変化させた。

3.3.1 シミュレーションツール: ROBAST

シミュレーションツールは奥村曉氏が開発した ROBAST[28]^{*1}を使用した。ROBAST は ROot-BAsed Simulator for ray Tracing の略称で、ROOT^{*2}をフレームワークにしたレイトレースプログラムである。ROOT にはジオメトリライブラリが用意されており、図 3.5のような基本的な形状同士を論理演算することで複雑な 形状を容易に作成することができる。ROBAST はこのジオメトリライブラリを利用して、例えば LST の六 角形分割鏡を図 3.6のように作成し、スポットの大きさ等を求めるレイトレースをすることができる。また、 ROBAST は、事前にユーザーが光子一つ一つがどの面で反射するのかを指定する必要がない、Non - sequential Ray Tracing と呼ばれる方法を採用し、複数の反射鏡から成る光学系や複数回の反射が発生する光学系でも多 くの光子を降らせてレイトレースをすることができる。

3.3.2 LST 用ライトガイドのレイトレースシミュレーション

LST 用ライトガイドのモデルとして、Winston Cone 形状を内面に持つ六角形ライトガイドを作成し、レイトレースシミュレーションを行った。

• Winston Cone 型ライトガイドの形状作成

まず、LST 用ライトガイドに必要な視野を考え、cutoff angle を見積もっていく。

LST の要求仕様は表 3.1の通りである。望遠鏡の反射鏡で集光したチェレンコフ光は最大限捕えることを考 えると、図 3.7の焦点面カメラの右端に取り付けられたライトガイドが反対側の反射鏡左端で集光した光の入 射角度 θ がライトガイドの視野の半分になる。

^{*1}本研究では v1.5.0 beta2 を使用した。

^{*2}高エネルギー物理学のデータ処理・解析を目的として、欧州原子核研究機構(CERN)によって開発されたソフトウェア・ライブラリの名称。http://root.cern.ch/drupal/

表 3.1: LST の要求仕様		
パラメータ	値	
	23m	
焦点距離	$28\mathrm{m}$	
F 値	1.2	
曲率半径	$56\mathrm{m}$	
焦点面カメラ直径	$2.25\mathrm{m}$	
カメラピクセルサイズ	0.1° (50mm)	
視野(FOV)	4.5°	



図 3.7: LST におけるライトガイドの視野 [17]

LST では表 3.1より、図 3.7の口径 *D* が 23m、焦点距離 *ft* が 28m、カメラ直径 *d* が 2.25m となる。以下で 図 3.7の角度 *θ* を求める。

角度 θ は三角形 ABC の \angle ABC なので、辺AC, BC の長さを求めると、AC は反射鏡の口径 D の半分とカメラ半径の和なので、

$$AC = \frac{D+d}{2} \tag{3.4}$$

となる。反射鏡の縁の高さを Z とすると、辺 BC は、焦点距離 ft から Z を引いた値なので、

$$BC = ft - Z \tag{3.5}$$

であり、Z(r)に関しては、反射鏡の曲率(曲率半径の逆数)をc,反射鏡中心からの距離をr,反射鏡中心の 高さをZ(0)とすると、

$$Z(r) = Z(0) + \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}$$
(3.6)

と表せる。k は、反射鏡が球面なら 0、放物面なら -1 となる。LST の反射鏡の形状は放物面なので、k は -1 となり、反射鏡の中心を高さ 0 とすれば、Z(r) は、

10

$$Z(r) = \frac{cr^2}{2} \tag{3.7}$$

となる。式 (3.4), (3.5) より、

$$\tan\theta = \frac{AC}{BC}$$
$$= \frac{D+d}{2(ft-cr^2/2)}$$
(3.8)



図 3.8: PMT 光電面とライトガイド出口の関係。直径 30 mm の円が PMT 光電面を表す。cutoff angle が 30 度のとき、 ライトガイド出口の辺-辺の大きさが 25 mm, 頂点-頂点の大きさが 28.87 mm となり光電面に十分収まる。



図 3.9: ROBAST での六角形ライトガイド作成図。4 つの節があり中身が詰まっている(a)六角柱から6 面全てが Winston Cone でこちらも中身が詰まっている(b)六角錐台を引くと、(c)の内面全てが Winston Cone の六角形ライトガイドが 作られる。

なので、角度 θは、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D+d}{2(ft - cr^2/2)} \tag{3.9}$$

と表せる。 $r \ge 23/2$ m として、それぞれの数値を (3.9) に代入すると θ は 25.2 度になる。この角度以内でラ イトガイドに入射した光は最大限集光したいので cutoff angle は 25.2 度以上必要である。式 (3.2) から、cutoff angle が大きくなるとライトガイド出口半径も大きくなるが、ここで、ライトガイド入口半径と出口半径が 1/2 の関係になる 30 度を cutoff angle とすると図 3.8のように PMT 光電面に十分収まる大きさになるため、cutoff angle は 30 度とした。「ピクセルサイズ = ライトガイドの直径」なので、表 3.1の LST 要求仕様からライト ガイドの入口半径を 25 mm, cutoff angle を 30 度とすると (C.8), (3.2), (3.3) から、ライトガイドの出口半 径が 12.5 mm、長さが 64.95 mm となる。これらの寸法を持つライトガイドのモデルを ROBAST で作成する。

ROBAST には Winston Cone 形状を作成するクラス(AGeoWinston ConePoly)^{*3}が実装されており、そ れを用いて図 3.9のように六角形のライトガイドを作成した。

ライトガイドの出口には図 2.16の PMT R11920 – 100 を想定して同じ曲率半径 21 mm の検出面を図 3.10のように配置した。

シミュレーション方法と結果

ROBAST でのレイトレースは、図 3.11のように一定間隔で格子状に並んだ光子の入射角度 θ を変化させてラ イトガイドに平行光として降らせ、出口を通過して検出面に到達した光子数を各入射角度毎にカウントする。

ライトガイドの集光率は、ライトガイド出口を通過して検出面に到達した光子数を N_{out},ライトガイド入口を通過した光子数を N_{in} とすると、

集光率
$$(\theta) \equiv \frac{N_{out}(\theta)}{N_{in}(\theta)}$$
 (3.10)

^{*3}他に Bézier 曲線や球面鏡を作成するクラスが実装されている。



図 3.10: ROBAST で作成した Winston Cone 型ライトガイド

と定義するのが最もシンプルであるが、ライトガイド入口を通過した光子数を求めるには入口に検出面を追加 するなど多少の手間がかかる。そのため、ライトガイド入口を通過する光子数が十分多ければ、

と考えることができるので、「ライトガイド入口を通過する光子の密度の逆数」を「光子一個あたりの有効面 積」と定義し、この有効面積から光子数を見積もることにした。光子一個あたりの有効面積を式 (3.12) のよう に dA とする。

$$dA \equiv \frac{1}{ \overline{\neg 1} \overline$$

今、ライトガイド入口を通過する光子の密度は、格子状に配置した光子の密度なので dA は、

$$dA = \frac{1}{\text{格子状に配置した光子の密度}} [\text{mm}^2/\text{個}]$$
(3.13)

となる。よって式 (3.10) の集光率は、ライトガイド出口を通過して検出面に到達した光子数 N_{out} はカウント しているので、

と表すことができる。 $\cos\theta$ は、入射角度 θ が変化すると光子から見たライトガイド入口面積が $\cos\theta$ 倍減少するため補正する。

集光率を以上のように定義し、格子状に光子を 40000 個配置して光子の入射角度を 0 から 40 度まで変化さ せたレイトレースシミュレーションの結果を図 3.12に示す。

理想的な二次元の Winston Cone の集光率と比較すると cutoff angle の数度手前から集光率が落ち始めており、cutoff angle 以降のノイズとなってしまう光を集光してしまっていることがわかる。

3.4 ライトガイドの形状最適化について

六角形の Winston Cone 型ライトガイドは図 3.13のように向かいあう曲面の断面が Winston Cone になって いる。Winston Cone は二次元において理想的な集光をするが、三次元の場合、図 3.14のように六角形ライト ガイドに入射する角度 θ が同じでもライトガイド中心軸(Z)回りに対する角度 φ が異なると、断面の形状が Winston Cone からずれてしまい図 3.12でわかるように理想的に集光することができない。そのため、Winston Cone は六角形ライトガイドの曲面形状に最も適した形状ではなく、六角形ライトガイドに最も適した形状は自 明ではない。Winston Cone よりも集光率が高い形状を探すことは、望遠鏡のエネルギー閾値を下げることに繋 がり、光検出器の量子効率や反射鏡の反射率を向上させる開発よりも費用が安く済み、かつ内面の曲面形状が



図 3.11: レイトレースイメージ。格子状に配置した光子を一斉にライトガイド方向に降らせる。(a) は光子の入射角度が 0 度のときで、(b) はある角度 θ で光子が入射する場合を表す。



図 3.12: Winston Cone 型ライトガイドの集光率のシミュレーション結果。縦軸が集光率,横軸が入射角度,赤丸が作成 した六角形ライトガイドの集光率,黒実線が理想的な二次元の Winston Cone の集光率を表す。格子状に配置した光子の 数は 40000 個,ライトガイド内面の反射率は 100%, PMT 入射窓の屈折率は 1.0 の条件でシミュレーションした。



図 3.13: Winston Cone 形状の六角形ライトガイド。内面の向かいあう曲面の断面が Winston Cone になっている。



図 3.14: Winston Cone 形状のライトガイドに入射する光子。XZ 平面内に入射する図中黄色の光子の向かい合う曲面の 断面は Winston Cone だが、ライトガイド中心軸(Z)回りに対して角度 ϕ で入射した図中緑色の光子の向かい合う曲面 の断面は Winston Cone からずれてしまう。



図 3.15: Bézier 曲線の概要図 [29]。(a) が P₀, P₁, P₂ の 3 個の制御点からなる二次 Bézier 曲線で、(b) が P₀, P₁, P₂, P₃ の 4 個の制御点からなる三次 Bézier 曲線である。このうち、(a) では P₁、(b) では P₁, P₂ の座標を変えることでさまざまな形状の曲線が作成され、Winston Cone よりも集光率の高い曲面形状を探すことが出来る。

大きく変わることはなく製作工程を変更する必要がないため、極めて重要なテーマである。ライトガイドの形 状最適化の研究 [17, 29] はすでに行われており、図 3.15の Bézier 曲線という N 個の制御点からなる N – 1 次 の曲線を用いたレイトレースシミュレーションから、Winston Cone よりも集光率の高いライトガイドを探す ことができている。形状最適化したライトガイドと Winston Cone 形状のライトガイドの集光率のシミュレー ション結果を図 3.16に示す。 チェレンコフ望遠鏡に搭載するライトガイドの形状最適化は過去に行われたこと はなく、Bézier 曲線を用いて形状最適化する手法は奥村曉氏によって考案されたため、形状最適化したライト ガイドを Okumura Cone と名づけて、実際の LST に Okumura Cone を搭載することを日本グループでは目指 している。また、5 章で述べるがさらなるライトガイドの形状最適化には PMT 感度の入射位置及び角度依存 性を考慮する必要があるため、最終的な形状は現時点で求まっていない。一方、フランスのグループでは、レ ンズタイプのライトガイドの開発 [33] を進めており、今後の両グループの開発状況によってどちらのライトガ イドを LST に搭載するのかが決定される。



図 3.16: Bézier 曲線を用いて形状最適化したライトガイドの集光率のシミュレーション結果 [29]。実線が Winston Cone、 黒丸が二次 Bézier 曲線、白丸が三次 Bézier 曲線の集光率である。 θ_{max} が cutoff angle, ρ_1 はライトガイドの入口半径, R はライトガイド内面の反射率, n は PMT 入射窓の屈折率を表す。検出面の形状は六角形の平面。形状最適化したライ トガイドの方が θ_{max} 付近の集光率が向上している。

3.5 LST 用ライトガイドの試作

本研究の目的は、2016 年ごろから建設が始まる CTA 大口径望遠鏡(LST)に搭載するライトガイドを試作 し、ライトガイドの大量生産に向けた基礎開発を行うことである。

ライトガイドは LST 一台あたり 1855 個必要になるため、プラスチック部品を大量生産する加工法である 「射出成形」で製作する。ライトガイドを取り付ける PMT の光電面には約 –1000 V の高電圧が印加されるがプ ラスチックは絶縁性であるため、放電を防ぐことができる。しかし、射出成形では費用が 100 万円以上かかっ てしまうため、最終的に最適化したライトガイドの形状が求まる前に射出成形をするのは現実的ではなく、さ らにライトガイドに貼る反射材の貼り方を確立してからでないと効率よくライトガイドを製作することができ ない。

そのため、本研究では従来の Winston Cone 型ライトガイドを射出成形よりも安価に製作できる切削加工と 3 D プリンタで複数個試作し、形状の確認や大量生産に向けた反射材の貼り方を検討した。さらに、形状最適 化したライトガイド (Okumura Cone)を3D プリンタで一つ試作し、Winston Cone 型に比べて性能が向上 しているのかを調べた。

3.5.1 試作したライトガイドの仕様

ライトガイドは切削加工で1個,3Dプリンタで5個の計6個試作した。製作方法が異なるのは、本研究で は初めに切削加工で試作し、その後切削加工よりも製作費用が安価(切削加工では1個あたり3万5000円だ が3Dプリンタでは1個あたり約1万円で済む)で、より精細な形状が製作できる3Dプリンタが名古屋大 学に導入されたため、そちらを利用するようにしたからである。

ここでは、それぞれのライトガイドの製作目的と特徴について簡単に述べた後にその詳細を説明する。なお、 p.52の表 3.5.2に試作したライトガイドの特徴をまとめた。



図 3.17: 射出成形の模式図。http://www.koatsu-kako.co.jp より引用。

I. 切削加工で試作したライトガイド

/ 製作目的と特徴 -

製作目的

ライトガイド大量生産に向けた開発の第一段階として、実際のLST に搭載できる設計を考慮したプロトタイプを製作し、形状の確認をする。また、反射材を貼り、貼り方の検討をする。

特徴

- 曲面形状は Winston Cone
- 出口半径は 12.5 mm
- 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にライトガイド先端をカット
- 貼った反射材は ESR フィルムで、指で接着剤を圧着して貼った

実際の LST に搭載するライトガイドは内面形状の他に、主に以下に挙げた点を考慮して製作しなければなら ない。

1. 大量生産時の射出成形による成形誤差

2. 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

3. PMT 入射窓の形状を導入

4. PMT との接続方法

これらを考慮した LST 用ライトガイドのプロトタイプを切削加工で試作した。ここで切削加工について簡単に 説明する。切削加工は、金属やプラスチックの加工に用いられる方法で、ブロック状の材料を刃物で削り取り 製作したい形状に仕上げていく。製作精度が高い半面、形状が複雑になるほど使用する刃物が多くなり、時間 と費用がかかってしまう欠点がある。一般的に大量生産したい部品の試作段階で切削加工が用いられる。

射出成形の業者は、比較的費用が安く短納期という利点がある神奈川県大和市のプロトラブズ社を候補としている。上記の1.大量生産時の射出成形による成形誤差はプロトラブズで射出成形をした場合を考えた。またプロトラブズは射出成形の他に切削加工にも対応しているため、今回の試作はプロトラブズに依頼した。

以下で1. ~ 4. の詳細を説明する。

1. 大量生産時の射出成形による成形誤差

射出成形はプラスチックの代表的な加工法で、熱で溶かした樹脂を金型に流し込み、冷却により固化させ成形 品を製造する方法である。図 3.17に射出成形の模式図を示す。最大のメリットは、金型を一度作ってしまえば 材料となる樹脂を流し込み、冷却・固化をするだけで製品を成形できるので大量生産に非常に向いている。射 出成形の製作費用の大部分は金型の加工費用であり、成形品の形状にもよるが最低でも数十万円はかかるため 試作段階で用いるのは現実的でない。

射出成形では樹脂を固化させる際に冷却するため成形品が収縮する可能性があり、この樹脂の収縮と金型の 加工精度を考慮しなければならない。プロトラブズでは金型の加工精度が0.08 mm で、樹脂の収縮率のばらつ きは樹脂によって異なる。例えば、ABS 樹脂では樹脂の収縮率は0.5%^{*4}で収縮のばらつきは0.002 mm/mm、 ポリプロピレン(PP)では収縮率が1.3%で収縮のばらつきは0.004 mm/mm である。後述の「デッドスペース を低減するための設計」で述べるが、切削加工のライトガイドはPP で、3 D プリンタのライトガイドはABS 樹脂で射出成形を行うことを想定した寸法で試作した。

以下 PP 樹脂の場合の成形誤差を考える。p.23の表 3.1の LST の要求仕様より、ライトガイドの入口の直径 50 mm に対して、金型は樹脂の収縮率を考慮した寸法で加工される。PP 樹脂の収縮率は 1.3% なので金型は、

の寸法で加工され、全ての成形品が 1.3% 収縮すれば 50 mm の寸法で完成する。しかし、収縮のばらつきが 0.004 mm/mm 生じ、かつ金型も 0.08 mm の加工誤差が生じると予想されるため、この二つの合計である

が射出成形による成形誤差であり、成形品は 50±0.28 mm の範囲で完成する。しかし、50 mm を超えてしま うと望遠鏡焦点面にライトガイドを配置したときにライトガイド同士が押し合い焦点面にひずみが生じてしま う。そのため、50 mm を超えないように 50 – | 成形誤差_{PP}| = 49.72 mm の寸法で製作するが、今回の切削加 工での試作は樹脂の収縮のばらつきを考慮せずに 49.84^{*5} mm で製作してしまった。しかし、ABS 樹脂の場合 は 49.82 mm になり、さらに切削加工の精度が±0.13 mm であることを考えると、ABS の寸法で製作した 3 D プリンタのライトガイドとの差はほぼ無視できるとした。

2. デッドスペースを低減するための設計

ライトガイドには、LST 焦点面に配置する PMT 間のデッドスペースを低減する役割があるが、図 3.18のよう にライトガイド先端に厚みがあると、その厚み分デッドスペースができる。仮にこの厚みを 1 mm とすると、 ライトガイドー個あたり約 4% のデッドスペースが生じてしまう。

ライトガイド先端の厚みを極力小さくするために、LST 用ライトガイドは図 3.19のように先端からある長さ 分だけカットして、先端では反射材同士が触れあうようにする。このようにすればデッドスペースは反射材の 厚み分しかできないため、最大限デッドスペースを低減することができる。

先端からカットする長さは、図 3.20のようにライトガイドの厚みによって変化し、厚みがあるほどカットす る長さは長くなる。カットする長さが長いほどライトガイド内面が短くなるため、ライトガイドの厚みは薄い ほど良い。どの程度ライトガイドの厚みを薄くできるかは、射出成形で成形可能な最薄の厚みに依存する。こ の厚みは樹脂によって異なり、流動性が良い樹脂ほど金型の隅まで充填することができる。プロトラブズでは、 比較的流動性が良い PP で 0.5 mm の厚みが可能であったため、射出成形時の樹脂は PP を想定し、切削加工 での材質も PP を選択した。しかし、PP は接着剤が付きにくい欠点があるため、後にプロトラブズの技術者 が確認したところ ABS 樹脂でも 0.5 mm の厚みが可能なことがわかったので、3 D プリンタで試作したライト ガイドは ABS 樹脂で射出成形を行うことを想定した。ライトガイドの厚みが 0.5 mm の場合、先端からは約 17 mm カットするため、切削加工で試作したライトガイドはその長さ分短い寸法で製作した。

1., 2. をまとめると図 3.21のようになる。射出成形の成形誤差を考慮した寸法は、射出成形したライトガイドパーツの先端なので、ライトガイドの入口は 50 mm から反射材の厚み分小さくなった寸法になる。

^{*4}通常の場合。値は樹脂の種類(グレード)や成形品の厚み・形状などによって変化する。

^{*5}間違って金型加工精度の2倍の値(0.08×2=0.16 mm)を考慮してしまった。


図 3.18: ライトガイドの厚みによるデッドスペース。ライトガイド先端の厚みが無い場合、デッドスペースは生じないが、 実際には図のようにある程度厚み t が存在する。1 pixel の大きさが 50 mm なので面積に換算すると $\{100 - (t^2/50^2) \times 100\}$ %だけ有効面積が減少する。L はライトガイドの長さを表す。



図 3.19: ライトガイドの厚みによるデッドスペースを最大限減少する図。ライトガイドの先端から h だけカットし、先端 で反射材同士が触れ合うようにする。



図 3.20: ライトガイドの先端からカットする長さの変化を示したイメージ。反射材同士が触れあうようにするためには、 先端から垂直に下ろした図中黄色の点線よりも内側まで厚みがなくなるようにする必要がある。ライトガイドの厚みが t'₁ ~t'₃ のように異なるとカットする長さはそれぞれ h1~h3 のように変化する。



図 3.21: 先端をカットしたライトガイドの寸法を示したイメージ。t は反射材の厚みを表す。





図 3.22: PMT R11920 – 100 の入射窓

図 3.23: 六角形ライトガイドを PMT に取り付けたイメージ 図。図のように両者の間に隙間が生じてしまう。



図 3.24: ライトガイドと PMT 入射窓の位置関係

3. PMT 入射窓の形状を導入

LST の光検出器には浜松ホトニクス社製 PMT R11920 – 100 が使用される予定であり、この PMT の入射 窓は図 3.22のように曲率半径 21 mm の球形をしている。六角形ライトガイドを単純に入射窓に取り付けると 図 3.23のように隙間が生じてしまい、入射光を逃がしてしまう。そのため、ライトガイドの出口部分を削り取 り入射窓の形状にフィットするような設計にする必要がある。次の図 3.24と図 3.25に、ライトガイドと PMT 入射窓がフィットするときの位置関係を示す。 以下で図 3.24のライトガイド入口から PMT 入射窓の曲率半径 中心までの距離を導く。図 3.24の H をライトガイド入口から PMT 入射窓の曲率中心までの距離、L をライト ガイドの長さ、h をライトガイド出口から PMT 入射窓の曲率中心までの距離、r を PMT の曲率半径、R を 図 3.25の Z 軸からライトガイドと PMT の交点までの距離、Rout を図 3.25のライトガイド出口半径とおいた。 H は

$$H = h + L \tag{3.17}$$



図 3.25: Z 軸方向から見たライトガイドと PMT 入射窓の位置関係

なので、hとLを求めると、hは、図 3.24から

$$h = \sqrt{r^2 - R^2} \tag{3.18}$$

となる。Rは、図 3.25から、

$$R = \frac{Rout}{\cos 30^{\circ}} \tag{3.19}$$

とかける。ライトガイドの長さ*L*は、ライトガイド入口半径を*Rin*とすると、Winston Coneの関係式 (C.8) から求めることができる。しかし、本研究で試作した Winston Cone 型ライトガイドの曲面は、シミュレーショ ンで*Z*座標を 0.1 mm ずつ変化させたときの *X*座標を求めたため、ライトガイドの長さは 64.90 mm、ライト ガイドの入口半径は 25.0 mm、出口半径は 12.5299 mm となった。

PMT の曲率半径は 21 mm なので、r = 21 mm, Rout = 12.5299 mm, L = 64.9 mm を式 (3.17), (3.18) に代入して H を求めると

$$H = \sqrt{r^2 - R^2 + L} = 80.12067 [\text{mm}]$$

となる。PMT 入射窓の曲率半径の中心を図 3.24の座標 (X, Z) = (0, -80.12067) としたとき、図 3.26のよう にライトガイドと PMT 間の隙間は生じなくなる。このとき、ライトガイドの出口部分は図 3.27のように削り 取られる。

4. PMT との接続方法

ライトガイドをそのまま PMT の入射窓に取り付けても固定することができないため、図 3.28のように PMT7 本分の穴が空いたプレートを光検出器モジュールに取り付け、その穴にライトガイドをはめて固定する方法を 考案した。今回の切削加工ではライトガイドの他にプレートもプロトラブズに依頼して試作した。プレートは、 3 本の支柱でクラスタの Slow Control Board と固定される。プレートとライトガイドの固定は、図 3.29のよ うにライトガイド側に小さなフックをつけ、対してプレート側には図 3.30のようにフックがちょうどはまる大





図 3.26: 六角形ライトガイドと PMT がフィットしたときの イメージ

図 3.27: 出口部分が削り取られたライトガイド



図 3.28: 光検出器モジュールにライトガイドを取り付けるイメージ



図 3.29: ライトガイドに取り付けたフック

図 3.30: ライトガイドを固定するプレート。溝は一つの穴 に 3 箇所、計 21 箇所作った。



図 3.31: ライトガイドが 7 個取り付けられたプレート



図 3.32: 切削加工で試作したライトガイド

きさの溝を作り、両者を固定できる機構にした。ライトガイドをプレートにはめた後回転しないように、ライトガイドのフックとプレートの溝はともに3箇所作った。プレートにライトガイドを7個固定すると図 3.31のようになる。

以上の4 点を考慮して実際に切削加工で試作したライトガイドが図 3.32である。また、図 3.33が切削加工 で試作したプレートである。プレートーつあたりライトガイドを7 個取り付けるので、プレートは LST 一台 あたり 1855/7 = 265 個必要になる。そのため、プレートもライトガイド同様に射出成形で製作する予定であ



図 3.33: 切削加工で試作したプレート



図 3.34: 試作したライトガイドとプレートを固定する様子

る。今回切削加工で試作したプレートの材質はライトガイドと同様の PP にした。ライトガイドのフックとプ レートの溝の位置・大きさの関係などを確認するため、試作したプレートに、図 3.34のようにライトガイドを はめこみ固定した。フックがプレートの溝にはまるとき、フックが多少内側に歪むため折れてしまうのではな いかと懸念したが、特に問題なくはまり固定することができた。

ライトガイド内面に貼る反射材

ライトガイドの内面を鏡面にするために反射材を貼った。反射材を貼るのではなくアルミ蒸着で反射面を形 成する方法もあるが、蒸着ではライトガイド先端で反射材同士を触れ合うようにすることができず、反射材を 貼ることに比べてデッドスペースを低減できない。

実際の LST に搭載するライトガイドに貼る反射材は、ドイツの Max Plank Institut (MPI) が、住友 3 M 社製の Vikuiti Enhanced Specular Reflector (ESR) 反射フィルムの 400 nm 以下の波長に対する反射率を向 上させたフィルムを現在開発中であり、そのフィルムを使用する予定である。今回の切削加工で試作したライ トガイドには、市販されている通常の ESR フィルムを使用した。

ESR フィルムは、ポリエステル系の樹脂を用いた多層膜構造により、可視光範囲において高反射率を有する フィルムで、主にバックライトの導光板下反射シート用に開発された製品である。以下の図 3.35にコニカミノ ルタ社の CM - 2500 d で測定した ESR フィルムの反射率を示す。



図 3.35: ESR フィルムの反射率の波長依存性

400 nm 以上の反射率はほぼ 98% 以上を保っているが、400 nm 以下の反射率は急激に落ちている。ESR フィルムは基材がポリエステルなので、PMT の入射窓に触れても放電が起こる心配はない。また、ESR フィルムには光抜け防止のため非反射面に黒色の遮光層を追加した ESR-B(厚み 72µm) などがあるが、切削加工で試作したライトガイドには比較的厚みが薄い 65µm の ESR フィルムを使用した。



図 3.36: 6 面が繋がった形状でレーザーカットする場合のイメージ。青色の線 が反射材が繋がっている箇所を表す。







図 3.38: 入手した ESR フィルム。表と裏に保護フィルムが貼られていいる。

ESR フィルムは、 ライトガイドの曲面座標からライトガイドの展開図を作成し、埼玉県新座市の東京紙器社 に依頼してレーザーカットをした。ライトガイドの内面は6面で、かつデッドスペースを低減するためにライ トガイドの先端では反射材が剥き出しになることを考えると、反射材の一部分が繋がっていなければならない。 これは、図 3.36のような形状で反射材をレーザーカットすることになり、カット面のサイズが縦70×横170 mm 程度必要になる。しかし、入手した図 3.38の ESR フィルムのサイズが縦160×横140 mm であったため、 図 3.37のように3面ずつ繋がった形状を2つ作成した。

反射材同士が繋がっている部分の長さは4mmにし、さらにこの部分は反射材を折りこむため、ハーフカット 処理^{*6}をした。

反射材の貼り方

図 3.37の形状でレーザーカットした ESR フィルムを接着剤を使用して切削加工で試作したライトガイドに 貼った。費用は一枚あたり約 7000 円であった。接着剤は、図 3.39のセメダイン社製のセメダイン BBX を使 用した。



図 3.39: 切削加工で試作したライトガイドに ESR フィルムを貼る際に使用した接着剤





図 3.40: 切削加工で試作したライトガイドに反射材を貼った 写真 のたため、表面に凸凹ができてしまった。

この接着剤は、

- 切削加工で試作したライトガイドの材質である、接着剤が付きにくい性質の PP に対応している。
- すぐには固まらないため、反射材とライトガイドを貼り合わせた後に位置合わせの微調整ができる。

などの利点がある。

まず、セメダイン BBX をライトガイドの内面の一面のみに塗布し、反射材を軽く貼り合わせ、接着剤の厚みが 均一になるように指で圧着しながら反射材とライトガイドを完全に貼り合わせた。それを繰り返して全6 面分 反射材を貼ったライトガイドが図 3.40である。しかし、この貼り方で反射材を貼ったライトガイドを図 3.41の ように上から見ると、接着剤の厚みが均一になっておらず内面に凸凹ができてしまった。たとえライトガイド を製作精度が良い方法で製作してもライトガイドに貼った反射材の表面形状がライトガイドの内面形状になる ため、反射材を指で圧着して貼るという貼り方では問題があることがわかった。接着剤を均一な厚みで圧着し て、反射材表面の凸凹をなるべく少なくする貼り方を検討する必要がある。

^{*6}完全にカットせず折りこみを作る加工方法

接着剤を塗布



図 3.42: MAGIC 望遠鏡ライトガイドの製作風景 [8]

II.3 D プリンタで試作したライトガイド

▶ 製作目的と特徴 -

製作目的

切削加工で試作したライトガイドの反射材は指で接着剤を圧着して貼る方法で貼ったため、表面に 凸凹が生じた。そこで、ライトガイドの曲面形状を持つオス型で圧着する方法を検討し・実践する ために切削加工よりも安価な3Dプリンタで製作した。

特徴

- 曲面形状は Winston Cone
- 出口半径は 12.5 mm
- 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にライトガイド先端をカット
- 貼った反射材は ESR フィルムで、ライトガイドのオス型で接着剤を圧着して貼った

• MAGIC 望遠鏡ライトガイドの反射材の貼り方

MAGIC 望遠鏡では大量生産されたライトガイドに効率よく反射材を貼るため、図 3.42上のような装置を組み 立てて作業をしている。この装置では、ライトガイドを一方に固定し、もう一方にはライトガイドの内面形状 が外形になっている、「オス型」に反射材を巻きその上に接着剤を塗布し、レール上の台に固定されオス型をラ イトガイドに挿し込むという方法で反射材が貼られている。この方法ではライトガイドの内面形状を外形に持 つオス型で接着剤を圧着するため、接着剤を均一な厚みにすることができると考えられる。そこで、切削加工 よりも安価にライトガイドが製作できる、名古屋大学に導入された3Dプリンタを使用して新しくライトガイ ドを試作した。

名古屋大学に導入された 3 D プリンタは図 3.43の KEYENCE 社製の AGIRISTA-3000 (以下アジリスタ) である。

アジリスタは、インクジェット方式の 3D プリンタで、以下の図 3.44のように造形する。また、アジリスタ の Z 分解能は、15µm と非常に高精度なため、図 3.45の構造などを造形することができる。3 D プリンタでは 造形されるモデル以外に、サポートと呼ばれるモデル以外のものが同時に造形される。下層から造形されるた め、例えば図 3.46のようなキノコ型のモデルの場合、笠の部分は自重で崩れ落ちてしまう。それを防ぐために サポートがモデルと同時に造形される。モデルとサポートの材料が同じ場合、造形後に手作業でサポートを取 り除く必要があり手間がかかる。それに対してアジリスタはモデルとサポートの材料が異なり、さらに世界で 初めて水に溶けるサポート材を採用して図 3.47のように水につけておくだけで簡単にサポートを除去できる。

以上の特徴を持つ3Dプリンタで試作したライトガイドが図 3.48である。なお、サポートはすでに除去して ある。製作費用はモデルとサポートの材料費のみで約1万円であった。切削加工で試作した図 3.40のライトガ



図 3.43: AGIRISTA-3000[23]



図 3.44: アジリスタの造形原理 [23]。アジリスタでは次の 1~5 のように造形される。1. ステージ上をヘッドが X-Y 方向 に移動する。 2. データ形状に UV 硬化樹脂を吐出する。 3. ヘッド側面にある UV ランプで樹脂を硬化する。 4. 1 層分の 造形完了後にステージが Z 方向に降下する。 5. 1~4 を繰り返して樹脂を積層してモデルを造形する。



図 3.45: アジリスタで造形できる構造 [23]



図 3.46:3D プリンタで造形されたモデルのイメージ



図 3.47: アジリスタでのサポート除去の様子 [23]



図 3.48: 3D プリンタで試作したライトガイド





図 3.49: 3 D プリンタで試作したライトガイドに反射材を貼 図 3.50: オス型を使用してライトガイドに反射材を貼るイ る際に使用したオス型 メージ

イドが約3万5000円であったため1/3以下の費用で製作できた。モデルの材質は3Dプリンタ専用のプラス チック樹脂(AR-M1)である。

反射材の貼り方

3D プリンタで試作したライトガイドには MAGIC 望遠鏡用ライトガイドで用いられている、ライトガイド のオス型を使用して接着剤を圧着する方法で反射材を貼るため、図 3.49のオス型も3D プリンタで試作した。 MAGIC 望遠鏡用ライトガイドを製作する際は、作業効率も兼ねてレール上の台に固定されたオス型をライト ガイドに挿し込んでいるが、今回の試作では、オス型で圧着すれば反射材表面の凸凹を少なくして貼ることが できるのかの確認なので、レールは使わずに図 3.50のように手でオス型を挿し込む方法にした。

3 D プリンタで試作したライトガイドには切削加工で試作したライトガイドと同様にレーザーカットした ESR フィルムを貼った。カットの形状は図 3.37である。また、接着剤として図 3.51のコニシボンド社製のウ



図 3.51: 3 D プリンタで試作したライトガイドに反射材を貼る際に使用した接着剤



図 3.52: 3 D プリンタで試作したライトガイドに接着剤を塗 布する様子



図 3.53: 3 D プリンタで試作したライトガイドにオス型を差 し込み圧着する様子



図 3.54: 3 D プリンタで試作したライトガイドに反射材を貼った写真

ルトラ多用途 s·u を使用した。こちらの接着剤も、接着剤が付きにくい PP に対応しているため、様々な種類 のプラスチックに使用することができ、貼り合わせ後、すぐには固まらないので、反射材の位置合わせが可能 である。

接着剤は、オス型を差し込んで厚みを均一になりやすいように、図 3.52のようにライトガイドの内面の各面に 2本の線になるように塗布した。その後、反射材を軽く貼り合わせ、オス型を手で挿し込みライトガイドの内 面の6 面全てを同時に図 3.53のように圧着した。

以上の方法で、反射材を貼ったライトガイドが図 3.54である。 反射材を指で圧着して貼ったライトガイド と比較してみると図 3.55を見て明らかなように、オス型で圧着して反射材を貼ったライトガイドの方が表面の 凸凹が少ないことがわかる。オス型で圧着することで接着剤がより均一な厚みでライトガイド内面に広がった



図 3.55: 接着剤の圧着方法が異なるライトガイドの表面比較の写真。左が反射材を指で圧着したライトガイドで、右が反 射材をオス型で圧着したライトガイド。

と考えられる。また、オス型で圧着する方法は、反射材をライトガイド内面の6面全てを同時に貼ることがで きるので効率よく貼れる。

III. 3 D プリンタで試作したライトガイド - Okumura Cone -

(- 製作目的と特徴 -					$\overline{}$
	製作目的					
	形状最適化	したライトガイドと、	Winston Cone 型ライ	トガイドの性能を比	較するため製作した。	

特徴

- 現時点での形状最適化した曲面形状
- 出口半径は12.5 mm
- ライトガイド先端をカットしていない
- 貼った反射材は ESR フィルムで、Okumura Coneのオス型で接着剤を圧着して貼った

これまで試作した I と II のライトガイドは、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に先端 を約 17 mm カットして反射材が飛び出るようにした。しかし、反射材が飛び出る長さが増えるほど Winston Cone 形状(もしくは最適化した形状)からずれてしまうことになる。そのため、反射材が飛び出るようにした 加工がライトガイドの性能に与える影響を調べるために、あえて先端をカットしないライトガイドを製作した。 先端をカットしないライトガイドは、Winston Cone 型と形状最適化したライトガイド(Okumura Cone)の

二種類を製作した。

Okumura Cone は図 3.16の三次 Bézier 曲線で最適化した形状であり、Winston Cone 形状のライトガイドよりも集光率が向上することが予想できる。

反射材の貼り方は II のライトガイドと同様に接着剤に su を使用して、Okumura Cone 用のオス型も 3 D プリンタで試作し、オス型を差し込み接着剤を圧着した。先端をカットしないので、図 3.37のように面同士を 繋げる部分を作る必要はない。そのため、図 3.56のように全て独立した形で ESR フィルムをレーザーカット した。なお横幅が大きいサイズ(縦 110×横 180 mm)の ESR を入手したのでそちらの反射材をカットした。 図 3.57が実際に反射材を貼った Okumura Cone である。

しかし、オス型で圧着しても図 3.58のように入口部分の反射材の高さが面によってばらばらになり、その結 果図 3.59のように出口部分の反射材の位置がずれてしまっていた。特に出口部分は接着剤が集中し、目に見え てわかるほどの厚みができていた。これは、

- 内面に塗布した接着剤の量が多すぎた
- 反射材同士が繋がっていないために、接着剤を塗布してから6面分の反射材の位置合わせに時間がかか



図 3.56: ライトガイド先端をカットしない場合の反射材。ESR フィルムのサイズを最大限利用すると、一面分のスペース が空くので中央に追加した。



図 3.57: 反射材を貼った Okumura Cone



図 3.58: 反射材を貼った Okumura Cone の入口部分



図 3.59: 反射材を貼った Okumura Cone の出口部分



図 3.60: 接着剤として使用した両面テープ



図 3.61: 先端カット有と無のライトガイドの長さを比較

り接着剤が多少固化した状態で圧着してしまった

が主な原因だと考えられ、接着剤を塗布する量の最適化などを今後考検討する必要があることがわかった。

IV.3 Dプリンタで試作したライトガイド - カット無-

製作目的と特徴
製作目的

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に先端をカットして反射材が飛び出るようにした加工がライトガイドの性能に影響するのかを調べるため、先端をカットしないライトガイドを製作した

特徴

曲面形状は Winston Cone
出口半径は 12.5 mm
先端をカットしたライトガイドと性能を比較するため、先端をカットしていない
貼った反射材は ESR フィルムで、厚さ 50µ m の両面テープを使用して貼った

図 3.61の右が、3 D プリンタで製作した先端をカットしていない Winston Cone 型ライトガイドである。 オス型を使用して反射材を貼っても接着剤の最適な塗布量などを検討しないと、前述した Okumura Cone の ようにうまく貼ることができない可能性があるため、接着剤として図 3.60の厚さ 50µ m の両面テープ(住友 3



図 3.62: 両面テープを使用して接着剤を貼ったライトガイド



図 3.63: 反射材を貼った状態のライトガイドの長さを比較

M 社製 467 MP)を使用した。両面テープで反射材を貼ったライトガイドが図 3.62で、II. のライトガイドと 比較したものが図 3.63である。

V.3Dプリンタで試作したライトガイド - アルミナイズドマイラー -

▶ 製作目的と特徴 —

製作目的

MAGIC 望遠鏡用ライトガイドに使用している反射材を貼ったライトガイドを製作して、ESR フィ ルムを貼ったライトガイドと性能を比較する。

特徴

- 曲面形状は Winston Cone
- 出口半径は12.5 mm
- ライトガイド先端をカットしていない
- 貼った反射材はアルミナイズドマイラーで、厚さ 50µ m の両面テープを使用して貼った

図 3.35で見たように ESR フィルムはチェレンコフ光のピーク波長領域(図 2.19参照)の反射率が急激に低下し ており、このままでは LST 用ライトガイドの反射材として使用できない^{*7}。MAGIC ではポリエステルフィルム

^{*7}p.38で述べたが、ドイツの Max Plank Institut (MPI) で ESR フィルムの短波長側の反射率を向上する開発がされている。



図 3.64: アルミマイラーの反射率の波長依存性



図 3.65: アルミマイラーと ESR フィルムの反射率の比較。右は 85% 以上の反射率を拡大した図。

にアルミを蒸着した反射材(アルミナイズドマイラー)をライトガイドの反射材として使用しており、MAGIC の関係者からその反射材を入手した。反射率を測定^{*8}した結果は図 3.64であり、ESR フィルムでは落ち切って いる 400 nm 以下の反射率が 90% 以上と高い。図 3.65に ESR フィルムと比較した結果を示す。LST 用のライ トガイドにアルミナイズドマイラーを使用する可能性もあるので、本研究で LST 用にデザインしたライトガイ ドにアルミナイズドマイラーを貼り性能を確認するため、先端をカットしていない Winston Cone 型ライトガ イドを 3 D プリンタで試作した。

反射材の貼り方は IV. のライトガイドと同様に両面テープを接着剤として、レーザーカットしたアルミナイ ズドマイラーを貼った。レーザーカットに関しては、これまで依頼していた東京紙器ではアルミ素材のカット に対応していないため、アルミ素材の加工事例があるオーレーザー社に依頼した。しかし、カットした反射材 を見ると図 3.66のようにカット部周辺が白くなっており、カットする際にアルミが溶けて煙が発生し、それが 付着したと思われる。さらに反射面にもかかわらずテープが貼られていた。代わりのアルミナイズドマイラー はなかったので、この中からなるべく汚れていないものを6面分選択した。

アルミナイズドマイラーを貼ったライトガイドを図 3.67に、ESR を貼った IV. のライトガイドとの比較を 図 3.68に示す。ESR フィルムと比較すると反射率が約 10% 低いため、若干ではあるがアルミナイズドマイラー を貼ったライトガイドの内面が暗く見える。

^{*8}ESR フィルムと同様にコニカミノルタ社の CM - 2500 d で測定。



図 3.66: レーザーカットしたアルミマイズドマイラー



図 3.67: アルミマイズドマイラーを貼ったライトガイド



図 3.68: アルミマイズドマイラーを貼ったライトガイドと ESR を貼ったライトガイドの明るさの比較。左がアルミナイズドマイラーを貼ったライトガイドで、左が ESR フィルムを貼ったライトガイド。



図 3.69: 出口半径 14.0 mm の Winston Cone 型ライトガイド



図 3.70: 出口半径 12.5 mm と 14.0 mm の Winston Cone 型ライトガイドの比較。左が 14.0 mm,右が 12.5 mm のライトガイド。

VI. 3 D プリンタで試作したライトガイド - 出口半径 14.0 mm の Winston Cone 型 -

・製作目的と特徴 -製作目的 cutoff angle が異なるとライトガイドの性能にどのような差が出るのかを確認するため製作した。 特徴 • 曲面形状は Winston Cone 出口半径は14.0 mm 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にライトガイド先端をカット • 貼った反射材は ESR フィルムで、ライトガイドのオス型で接着剤を圧着して貼った 反射材はレーザーカットではなくハサミでカットした

これまでに試作したライトガイドは III.の Okumura Cone を含めて全て出口半径が 12.5 mm であるが、cutoff angle の決定はライトガイドの視野内の光を最大限集光することや、チェレンコフ光とノイズの比(S/N 比) などの様々な要素が考えられ、30 度という値は一つの候補に過ぎない。また、本研究では 4 章で述べるが、光 電子増倍管(PMT)を用いてライトガイドの性能を評価した。30 度よりも cutoff angle を大きくする場合は、 ライトガイドの出口半径を大きくする必要があるため PMT の光電面サイズを超える可能性がある。そうした 場合、シミュレーションで求めた集光率とは異なる集光をすることが考えられるため、出口半径が大きいライ トガイドを製作して、性能を確認する。

反射材は、図 3.36のように 6 面が繋がった状態でカットするため、図 3.38よりも横幅が大きいサイズ(縦 110×横 180 mm)の ESR を使用した。また、レーザーカットは一枚あたり約 7000 円と費用が高いので、カッ ト形状を実際のサイズにプリントアウトして、反射材の保護フィルムに図 3.60を使用して貼り、ハサミでカットした。接着剤は s・u を使用し、出口半径 14.0 mm 用のオス型を 3 D プリンタで製作して、II. のライトガイドと同様にオス型で圧着した。

反射材を貼った出口半径 14.0 mm のライトガイドを図 3.69に、出口半径 12.5 mm の II. のライトガイドと の比較を図 3.70に示す。ハサミでカットしたためレーザーカットほどの精度はなく、ライトガイド内面よりも 若干大きめにカットしてしまったが、特に問題なく貼ることができた。

3.5.2 試作したライトガイドのまとめ

表 3.5.2に本研究で試作したライトガイドの特徴をまとめる。なお、次章からそれぞれのライトガイドを呼称 に書かれている名前で区別する。

No.	製作方法	出口半径 (mm)	曲面形状	ライトガイド先端	反射材	貼り方	呼称
Ι	切削加工	12.5	WC	カット有	ESR	手で圧着	$\mathrm{LG}_{\mathrm{mill}}$
II	3 D プリンタ	12.5	WC	カット有	\mathbf{ESR}	オス型で圧着	LG_{3D}
III	3 D プリンタ	12.5	Okumura	カット無	ESR	オス型で圧着	$\mathrm{LG}_{\mathrm{Okumura}}$
IV	3 D プリンタ	12.5	WC	カット無	\mathbf{ESR}	両面テープ	$\mathrm{LG}_{\mathrm{full}}$
V	3 D プリンタ	12.5	WC	カット無	Alumi	両面テープ	$\mathrm{LG}_{\mathrm{Alumi}}$
VI	3 D プリンタ	14.0	WC	カット有	ESR(ハサミでカット)	オス型で圧着	LG_{14mm}

表 3.2: 試作したライトガイドのまとめ

LG・・・Light Guide の略称

WC…Winston Cone の略称

Okumura··· 形状最適化した曲面形状

mill···milling(削り出し)の略称

第4章 CTA大口径望遠鏡用ライトガイドの集光率 測定実験

前章で表 3.5.2の特徴を持つライトガイドを 6 個試作した。本研究では試作したライトガイドの性能評価と して、測定システムを確立して光電子増倍管(PMT)を用いたライトガイドの集光率を測定した。この実験で は回転ステージを使用して光の入射角度に対するライトガイドの集光率を測定して、cutoff angle 以内で入射 した光は最大限集光し、cutoff angle より大きい角度で入射した光は低減するというライトガイドの特徴を主 に評価した。

ライトガイド集光率角度依存性測定実験 4.1

4.1.1 セットアップ

実験のセットアップを図 4.1に、使用した各機器を表 4.1.1に示す。実験中の PMT 増倍率の変化量が少なく なるように、供給する電圧が1 mV ずつ設定でき、変動が±1 mV 程度の電源(GW - INSTEK 製 GPD - 3303 S)を使用した。 3.3 節のシミュレーションでは平行光をライトガイドに入射させていたが、本実験では、使 用する暗室の横幅が最大で約3mだったので、±1度以下の平行光を入射させるためにライトガイドと光源の 距離を 2.4 m とした。2.4 m の場合、ライトガイド入口の六角形の頂点-頂点間が約 58 mm なので、図 4.2の ように $R \ge 58/2 \text{ mm}$, $L \ge 2400 \text{ mm}$ とすると、角度 θ は、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{R}{L} \right)$$
$$\simeq 0.7 \, \text{g} \tag{4.1}$$

となり、±1 度以下の平行光をライトガイドに入射することができる。

光源には LED (日亜化学工業製 NSPB346KS) を使用した。この LED のピーク波長は図 4.3のように約 465 nm であり、ESR フィルムの反射率が 98% 以上ある波長域である。また、LED の強度をなるべく一様にする ため、前方にディフューザー (Edmond Optics 社製 #49 – 158)を 2 枚設置した。そして、なるべくライトガ イドに向いた光のみを取り出すために、前方に直径 5 mm^{*1}の穴が開いた図 4.4の小さな箱の中に LED とディ

表 4.1:実験に使用した各機器					
	型番	メーカー			
LED	NSPB346 KS	日亜化学工業			
diffuser	#49 - 158	Edmond Optics			
Pulse Generator	3390 型	KEITHLEY			
Voltage Supply	GPD - 3303 S	GW - INSTEK			
Rotation Stage	SGSP - 60 YAW - 0 B	シグマ光機			
X-axis Stage	SGSP20 - 85 (X)	シグマ光機			
Z-axis Stage	SGSP20 - 85 (Z)	シグマ光機			
Stage Controller	GSC - 02	シグマ光機			

^{*1}穴が小さければ点源に近くなるが、その分光量が減ってしまうため適当な 5 mm の大きさにした。



図 4.1: 集光率角度依存性測定実験のセットアップ概要図



図 4.2: 光源とライトガイド間の距離



図 4.3: 実験で使用した LED の発光スペクトル [26]。約 465 nm がピーク波長。





図 4.4: LED とディフューザーを入れた箱

図 4.5: LED とディフューザーを入れた箱の中身





図 4.6: 回転ステージ上に設置したアルミボード。アルミボードの上にはライトガイドと PMT を固定する台を取り付ける。

フューザーを入れた。図 4.5はその箱の中身である。LED は、Pulse Generator(KEITHLEY 社製 3390 型) と接続させ、パルス状に光らせた。

ライトガイドに入射する光の角度は、ライトガイドを回転させて変化させる。そのため、ライトガイド及び PMT を、回転ステージ(シグマ光機製 SGSP-60YAW-0B)と接続したアルミボード上に図 4.6~図 4.8のよう に設置した。回転ステージはステージコントローラ(シグマ光機製GSC-02)で制御した。 また、回転ステージ は図 4.9のように X 軸ステージ (シグマ光機製 SGSP20-85(X))と Z 軸ステージ (シグマ光機製 SGSP20-85(Z)) と接続させた。X 軸・Z 軸ステージは、次章で述べる PMT 感度の位置依存性測定で使用する。そして、光源



図 4.7: 固定台に設置したライトガイドと PMT。PMT は固定用に二か所カバーを取り付ける。ライトガイドは変形を防 ぐため取り付けていない。また、ライトガイドの反射材が全て固定台から飛び出るように置くと、反射材の先端が回転ス テージの回転軸上に位置するようにした。



図 4.8: ライトガイドと PMT の設置が完了した図。ノイズ低減の効果があるアルミホイルを被せ、その上から暗幕で 覆った。



図 4.9: ライトガイド周辺のセットアップ全体図。X 軸ステージは、防振台上の M6 のねじ穴がマトリックス状に空いて いる光学ステージに固定され、X 軸ステージに Z 軸ステージが固定されている。さらに、Z 軸ステージに長さ 200 mm 以 上のブラケットを取り付け、その上に回転ステージを固定する。



図 4.10: 光源とライトガイド及び PMT との中心位置を合わせるために設置した L アングル。ライトガイドの中心から光 学ステージに伸ばした軸(水色の直線)を光学ステージのマトリックス状に空いたねじ穴を結ぶ軸(図中赤の直線)に合 わせる。最後に、2 本の L アングルを光学ステージ上の軸に対称の位置に固定し、L アングル間の中心に光源を置くこと で、ライトガイドの中心と光源の中心を合わせた。



図 4.11: 点光源のレイトレースイメージ。光子のかたまりを円錐状にライトガイド方向に降らせる。(a) は光子の入射角 度が 0 度のときで、(b) はある角度 θ で光子が入射する場合を表す。

とライトガイド及び PMT との中心位置を合わせるために、図 4.10のように 2 本の L アングルを防振台にねじ 止めして固定し、L アングルの先端に光源を置いた。以上の測定システムを組んでライトガイドの集光率を測 定した。

4.1.2 点光源のレイトレースシミュレーション

実験の条件に近づけるために距離 2400 mm の点光源から光子と飛ばした時のレイトレースシミュレーションを行った。

点光源のレイトレースは、図 4.11のように光子のかたまりを距離 2400 mm の位置に配置し、円錐中に一様 にしてライトガイドに降らせる。集光率の求め方は 3.3 節と同様である。点光源の場合、光子を配置した距離 から離れるほど円錐の底面の面積が増加するので、ライトガイド入口での光子の密度を計算し、光子一個あた りの有効面積 dA を

$$dA = \frac{1}{\overline{\neg} \uparrow \restriction \ddot{\neg} \uparrow \restriction \ddot{\neg} \uparrow \restriction \ddot{\neg} \Box \ddot{\neg} \sigma \mathcal{H} \neg \mathcal{H}} [\mathrm{mm}^2/\mathbb{m}]$$
(4.2)

として各入射角度ごとの集光率を求めた。

図 4.12に光子数 30000 個,入射角度を 0~40 度まで変化させたシミュレーション結果を示す。平行光の場合 と比較すると点光源の方が cutoff angle 付近の集光率が約 0.6 度手前から落ちていた。この角度は式 (4.1) とほ ぼ同じである。



図 4.12: 点光源のライトガイド集光率シミュレーション結果。(a) の青実線が距離 2400 m の点光源でレイトレースシミュ レーションしたライトガイド集光率。(b) の赤実線が図 3.12の平行光でレイトレースシミュレーションしたライトガイド 集光率。



図 4.13: drsosc で見た PMT からの信号。横軸のスケールは 図 4.14: drsosc で見た PMT からの信号の拡大図。横軸のス 20 ns/div。 ケールは 5 ns/div。

4.1.3 データ取得と解析方法

本実験では、ライトガイドを PMT に取り付け、光の入射角度ごとの PMT 出力値を測定する。まず、Pulse Generator から光源に周波数 1 KHz,振幅 5.0 V,幅 (FWHM) 20 ns のパルス信号を入力し、パルス状に光 らせる。このとき、Pulse Generator からの信号を分岐させて、DRS4 評価ボードに入力しトリガー信号とし た。光源からの光が PMT に入射し、入射光量に応じた信号が出力する。出力された信号は LEE アンプ*2で 増幅され、DRS4 評価ボード*3に入力する。DRS4 評価ボードには Pulse Generator から分岐されたトリガー 信号がかかっているため、光源の発光と同期したタイミングでデータの読み出しを開始する。DRS4 評価ボードに入力した信号は、2 GHz でサンプリング後デジタル変換され、PC に送信される。このとき、DRS4 評価 ボードに入力した信号を、評価ボード用ソフトウェアに用意されている drsosc というアプリケーションで見 ると図 4.13のようになっている。このうち、パルス波形が光源からの信号なので、この波形を積分する。波形 は、2 GHz の速度(実際は 1.982 GHz)でサンプリングされ、図 4.14のように約 0.5 ns ごとの波高値に細分 化されている。積分する際は、光源からの信号がないノイズ成分の平均値を求め、パルス波形の波高値それぞれでノイズの平均値を引いてから積分する。以上で求めた積分値を計 500 イベント分取得して、その平均値を PMT 出力値とした。

^{*2}LST では LEE に替わり PACTA がプリアンプとして採用されるが、本実験では低い増倍率で PMT を動作させるわけではないの で LEE を使用した。

^{*3}DRS4 チップの基本的な動作を評価するための回路が搭載された評価ボード。評価ボードには USB2.0 端子があり、USB ポート先 から電源が供給され、Windos と Linux で制御することができる。



図 4.15: ライトガイドの回転方向。光源に対して時計回りをマイナス、反時計周りをプラスとした。



図 4.16: PMT 時間安定性のセットアップ

集光率は、入射角度0度の測定値に対する相対値として式(4.3)のように定義した。

集光率
$$(\theta) = \frac{\text{PMT 出力值}(\theta)}{\text{PMT 出力値}(0)} \times \frac{1}{\cos\theta}$$
 (4.3)

 $\cos \theta$ は、光源から見たライトガイドの入口面積が $\cos \theta$ 倍で減少するため補正する。

なお、回転ステージは –45 度から +45 度の範囲を1 度ずつ回転させ、回転方向は図 4.15のように定義した。

4.1.4 PMT の時間安定性

ー般的に PMT の増倍率(ゲイン)は HV をかけ始めてからの経過時間によって変化する。実験中に PMT の増倍率が変化してしまうとライトガイドの集光率が正しく測定できない。そのため、図 4.16のようにライト ガイドを取り付けずに PMT 単体の出力値を測定した。測定結果を図 4.17に示す。 測定結果を見ると、600 分 後までは比較的安定に動作しており、700 分経過後に 0.25%/hour 程度 PMT 出力値が低下していた。しかし、 図 4.17 (b) のように動作直後から数十分ほどに注目すると、出力値の変動がおよそ 3% と大きかった。

以上の結果から、PMT の増倍率が安定してから集光率角度依存性を測定するため、PMT に HV をかけてから 90 分後に集光率の測定を開始することにした。

4.1.5 集光率角度依存性測定結果

試作したライトガイドの測定結果を図 4.19~図 4.27に示す。いずれのライトガイドでも入射角度によっては 実測の集光率がシミュレーションよりも上昇しており、特に cutoff angle に近づくほどその傾向は大きくなっ ていた。また、LG_{mill} と LG_{3D} の結果を比較すると、LG_{3D} の方が cutoff angle 付近の集光率が向上しており、 さらにノイズとなる cutoff angle より大きい角度で入射する光の集光を抑えられていた。オス型を使用して反



図 4.17: PMT の時間安定性の測定結果。縦軸は PMT 出力値, 横軸は PMT の HV をかけた後の経過時間を表す。2 分おきに測定し、合計で 24 時間測定した。(b) は、0 ~150 分までを拡大した図。



図 4.18: LG_{3D} に貼った反射材

射材を貼ったことで表面の凸凹を少なくすることができ、ライトガイド内面が Winston Cone の理想形状に近づいたと考えられる。さらに LG_{3D} と LG_{full} の結果を比較すると LG_{full} の方が cutoff angle 付近の集光率が高いことがわかった。これは、反射材が飛び出したことにより Winston Cone の理想形状からずれてしまっていることや、さらに LG_{3D} の反射材は図 3.37の形状でレーザーカットしたため、図 4.18のように反射材の間に 2 箇所隙間ができていることなどの影響だと考えられる。

また、LG_{Okumura}は Winston Cone 型よりも集光率が向上することは確認できなかった。出口部分に接着剤が 集中して厚みとなってしまい、出口半径が小さくなり、結果的に cutoff angle が 30 度より小さくなったのでは なったのではないかと考えられる。今回の試作では、形状最適化した LG_{Okumura}をオス型で圧着し、Winston Cone 形状の LG_{full} は両面テープで貼ったりと反射材の貼り方が統一されていないため、今後の課題として同 じ貼り方で反射材を貼ったライトガイドをそれぞれ製作し、性能を比較する必要がある。

試作したライトガイドそれぞれの測定結果



図 4.19: LG_{mill} の集光率測定結果。左がプラス回転とマイナス回転の集光率をプロットしたグラフで、右がプラス回転と マイナス回転の測定値の平均をプロットしたグラフ。赤実線が点光源の場合のレイトレースシミュレーションの集光率を 表す。



















図 4.25: LG_{mill}と LG_{3D} の集光率測定結果の比較。黒実線が LG_{mill} で青実線が LG_{3D} の集光率。

 LG_{3D} と LG_{full} の比較



図 4.26: LG_{3D}と LG_{full} の集光率測定結果の比較。青実線が LG_{3D} で緑実線が LG_{full} の集光率。

出口半径 12.5 mm のライトガイドの比較



図 4.27: LG_{mill}と LG_{3D} の集光率測定結果の比較





図 4.28: 集光率絶対値測定用のマスク

図 4.29: 集光率絶対値測定のセットアップ



図 4.30: 集光率絶対値測定の流れ。ライトガイドを取り付けて PMT を動作させ、90 分後に回転ステージを -45 ~+45 度の範囲で回転させて集光率を測定する。測定には約 25 分要する。測定が終了したら、マスクに付け替える際に暗室の蛍 光灯を点けるため PMT の HV を切り、付け替え後暗室を暗くして PMT を再び動作させる。90 分後に同様の測定をして 終了する。図とは逆に先にマスクを付けて測定したら次にライトガイドに付け替えて測定する。

4.1.6 集光率角度依存性の絶対値測定

前節では入射角度 0 度の PMT 出力値を 1 とした場合の集光率角度依存性を求めた。加えてライトガイドを 取り付けたときの PMT 出力値と、ライトガイドを取り付けていない PMT 単体の出力値を測定し、ライトガ イドを取り付けることによって PMT の出力値がどの程度増加するのかを調べた。

セットアップ

ライトガイドを取り付けない PMT 単体の場合は、露出する PMT 入射窓がライトガイドの出口と同じ大き さになるように、アジリスタで製作した図 4.28のマスクを図 4.29のように PMT 入射窓に取り付けた。なお、 出口半径が 14mm の LG_{14mm} 用のマスクは製作していないため、LG_{14mm} の絶対値は測定していない。

測定方法と解析方法

集光率絶対値の測定方法を図 4.30に示す。また、集光率の絶対値は、図 3.1のように「ライトガイドを取り 付けることによって PMT の有感領域がライトガイドの入口面積に拡大した」と考えて式 (4.4) のように定義 した。

集光率_{絶対値}(
$$\theta$$
) = $\frac{PMT 出力値_{LG}(\theta)}{PMT 出力値_{mask}(0)} \times \frac{1}{\cos\theta} \times \frac{S_{out}}{S_{in}}$ (4.4)
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) : マスクを取り付けたときの入射角度 0 度の PMT 出力値
 S_{in} : ライトガイドの入口面積
 S_{out} : ライトガイドの出口面積

この定義から、PMT 出力値_{LG}(θ) が PMT 出力値_{mask}(0) に比べて S_{in}/S_{out} 倍のとき、集光率が 100% となる。



図 4.31: ライトガイド繰り返し測定の流れ。経過時間によるばらつきの差を見るために (a) のように PMT を動作させた 直後に測定を開始した。回転ステージは -40 ~+40 度の範囲で回転させると測定する時間は約 20 分なので、そのまま (b) I~III のように 3 回分連続で計 60 分測定した。測定が終了したら PMT の HV を切り、ライトガイドと PMT を台から 外し再び固定して同様の測定を 10 回繰り返した。

ライトガイドの面積比は、ライトガイドの入口半径が 25 mm,出口半径が 12.5 mm なので $S_{in}/S_{out} = 4$ となるが、ライトガイドの出口部分が PMT 入射窓の形状でくり抜かれているため若干六角形よりも広くなっている。その点を考慮すると、 $S_{in}/S_{out} = 3.7515^{*4}$ となった。

集光率の測定精度

集光率の絶対値測定ではライトガイドやマスク、さらに PMT を取り外す作業があり、図 4.7の固定された状態を一度崩す必要がある。この取り外しによってライトガイドや PMT の位置が若干ずれて測定値に影響があるのではないかと考えられる。そのため、ライトガイドと PMT を固定台から取り外し、再び固定し直して集光率を測定する作業を 10 回繰り返して、測定値のばらつきを調べた。

測定方法を図 4.31に示す。10 回分の測定結果は図 4.32のようになった。測定結果を見ると PMT 動作直後 に測定開始した I の 2nd,4th、約 20 分後に測定開始した II の 4th、約 40 分後に測定開始した III の 4th が他 のプロットと比較して測定値のずれが大きい。特に I の 2nd,4th は明らかにずれてしまっており、PMT の動 作直後の増倍率が不安定、もしくは PMT に繋がっているケーブルの接触不良などが考えられる。これら測定 値がずれてしまっているプロットを除いて入射角度-5~+5 度の測定値の平均値を I, II,III でそれぞれ計算 して標準偏差を求めた。結果を表 4.2にまとめる。PMT やライトガイドを固定台から取り外しても本実験で組 んだ測定システムのずれは±1%以下に抑えられていることがわかった。

^{*4} モンテカルロシミュレーションから計算した値。



図 4.32: ライトガイド繰り返し測定の結果。上から図 4.31(b) の I, II, III の順で、右が –30~30 度の範囲を拡大した図。



表 4.2: ライトガイド繰り返し測定のまとめ

PMT 動作後の経過時間	-5~+5 度の測定値の平均	標準偏差	(%)
0-20 分	$15567 \; (\mathrm{mV}{ imes}\mathrm{nsec})$	85.16	$\pm 0.547\%$
20 - 40 分	15612	85.67	$\pm 0.549\%$
40 - 60分	15560	103.7	$\pm 0.662\%$



図 4.33: double crossing の概要図 [31]

集光率絶対値の測定結果

試作したライトガイドの集光率絶対値測定の結果を図 4.34~図 4.40に示す。反射材を手で圧着して貼った LG_{mill}とオス型を使用して圧着して貼った LG_{3D}の入射角度 0 度の集光率はどちらも約 95% あり、入射角度 0 度の集光率に曲面の凸凹の差による違いは見られなかった。対してライトガイドの先端をカットしていない LG_{full} は図 4.39のように入射角度 0 度の集光率が LG_{3D} よりも数%下がっていた。LG_{3D} は先端をカットした ことで反射材が飛び出ているので、反射材が外側に広がり入口面積が若干大きくなっている影響ではないかと 思われる。しかし、実際に LST の焦点面に先端をカットしたライトガイドを配置することを考慮すると、反射 材同士が密着してライトガイド内側に押し込まれて入口面積が多少減少すると予想でき、単純に LG_{3D}の方が 性能が良いとは言えない。実際、相対値をプロットした図 4.26を見ると LG_{full}の方が cutoff angle 付近の集光 率が高いため、大量生産時のライトガイドは、

- •1. 反射材同士の繋がっている長さを極力短くする
- 2.6 面繋がった状態で反射材をレーザーカットする
- 3. 射出成形したライトガイドの先端の厚みを、現状考えている 0.5 mm よりも薄くする

などの点に改善すれば、Winston Coneの理想形状により近いライトガイドが製作できると考えられる。

また、アルミ反射材を貼った LG_{Alumi} 以外のライトガイドの集光率が cutoff angle 付近で 100% を超えてい る。これは、PMT の感度が光子の入射位置と入射角度によって異なることが考えられる。ライトガイドを傾 けると PMT に入射する光子の位置・角度が変化し、特に図 4.33のように double crossing と呼ばれる、光子 が光電面を 2 回通過する現象 [31] が起きやすい角度で入射していると予想できる。
試作したライトガイドそれぞれの測定結果



図 4.34: LG_{mill} の集光率の絶対値測定結果



図 4.36: LG_{Okumura} の集光率の絶対値測定結果



図 4.38: LG_{Alumi} の集光率の絶対値測定結果



図 4.35: LG_{3D} の集光率の絶対値測定結果



図 4.37: LG_{full} の集光率の絶対値測定結果



図 4.39: LG_{3D} と LG_{full} の集光率の絶対測定結果の比較。青実線が LG_{3D} で緑実線が LG_{full} の集光率。右は -30~+30 度の範囲を拡大した図。





図 4.40: LG_{3D} と LG_{full} の集光率の絶対測定結果の比較

第5章 光電子増倍管(PMT)感度の位置依存性及 び角度依存性の測定

前章で試作したライトガイドの集光率入射角度依存性を測定した。しかし、入射角度によっては実測の集光 率がシミュレーションよりも高くなっており、シミュレーションと実測を比較することができていない。集光 率が高くなる要因として、PMT 感度の光子の入射位置及び入射角度の依存性が影響が考えられるため、実験 で使用した PMT の感度の位置及び角度依存性を測定し、それら依存性をパラメータとしてシミュレーション に組み込み、集光率の上昇が再現できるのかを調べた。

5.1 PMT 感度の位置依存性及び角度依存性測定

5.1.1 PMT 感度位置依存性の測定

セットアップ

位置依存性測定のセットアップを図 5.1に示す。



図 5.1: PMT 感度位置依存性のセットアップ概要図。各機器は表 4.1.1参照。

位置依存性の測定はスポット光を PMT 入射窓に照射して、スポット光の入射位置ごとの PMT 出力値を測 定する。これを現状の1度以下の平行光を照射する光源で測定可能にするため、図 5.2のようなセットアップ を組み直径2 mm のスポット光を PMT 入射窓に照射した。また、スポット光が照射する位置は固定されるの で、図 5.3,図 5.4のように PMT を動かし、入射窓全域の位置依存性を測定した。

データ取得と解析方法

データ取得と解析方法は 4.1.3 節と同様であるが、光源からの光がアルミ板の 2 mm の穴を通過した光のみ に減少してしまうため、Pulse Generator の Width を 20 ns から 150 ns に変更して光量を上げた。また、測



図 5.2: 実際の PMT 感度位置依存性のセットアップ。直径 2 mm の穴を開けて黒く塗装したアルミ板を PMT 前方に固定した。





図 5.3: X・Z 軸ステージの移動範囲。PMT 入射窓の直径が 図 5.4: PMT 入射窓の大きさと X・Z 軸ステージの移動範囲 約 39 mm なので、±20 mm の範囲で動かせば全体をカバー の比較。±20 mm の範囲を格子状になるように 2mm ずつ動 できる。 かした。

定点が 400 点以上あり、500 イベントだと一回の測定で時間がかかってしまい PMT の時間安定性の影響が懸 念されるため、イベント数を 100 にして測定回数を 13 回に増やしてその平均値を求めた。

PMT 感度の位置依存性測定結果

PMT 感度位置依存性の測定結果を図 5.5に示す。また、13 回分の平均値をプロットした結果は図 5.6になった。











hist









No.10

(uu) >

-10

-15

-20





図 5.5: PMT 感度位置依存性の測定結果





図 5.7: PMT 感度の角度依存性測定に使用したマスク。直径 5 mm の穴が 5 個開いているが本実験では中心の穴のみ使用 した。

図 5.8: 実際の PMT 感度角度依存性測定のセットアップ



図 5.6: 平均した PMT 感度位置依存性の測定結果

5.1.2 PMT 感度角度依存性の測定

セットアップ

角度依存性の測定は、図 5.7のマスクを図 5.8のように PMT に被せた状態で回転ステージを -80 ~+80 度 回転させ、PMT 入射窓中心部分の角度依存性を測定した。

データ取得と解析方法

角度依存性測定もデータ取得と解析方法は 4.1.3 節と同様である。マスクを被せることで位置依存性測定と 同様に光量が減少してしまうので、Pulse Generator の Width を 20 ns から 100 ns に変更して光量を上げた。 イベント数は 500 のままで測定を 6 回行い、その平均値を求めた。

PMT 感度の角度依存性測定結果

PMT 感度角度依存性の測定結果を図 5.10に示す。結果を見ると、回転ステージで PMT を θ 度回転させる と光源から見た面積が cos θ 倍で減少し測定値もそれだけ小さくなると予想できるが、入射角度が 30~70 度付 近の測定値がその減少分よりも高くなっていた。これは主に double crossing による PMT 感度の角度依存性の 影響だと思われる。また、6 回分の平均値をプロットした結果は図 5.10になった。



図 5.9: PMT 感度角度依存性の測定結果。黒実線が測定値、赤実線が 入射角度0度の測定値×cos θ を表す。



図 5.10: 平均した PMT 感度角度依存性の測定結果



図 5.11: PMT に入射した光子の角度の定義

5.2 測定した PMT 位置感度依存性及び角度依存性を考慮したシミュレー ション

PMT 感度の位置及び角度依存性の測定結果から、光が PMT 入射窓に入射する位置、入射する角度によって 測定値が異なることがわかった。次に、これら測定値をパラメータ化してシミュレーションに組み込み、実測 のライトガイド集光率の上昇がシミュレーションで再現できるのかを確かめた。

5.2.1 レイトレースシミュレーションから求めた PMT への入射位置及び角度

まず、測定した PMT 感度の位置・角度依存性をシミュレーションに組み込むために、ROBAST を用いたレイトレースで PMT に入射する光子の座標と角度を求める。

ROBAST 内で作成する形状は、3.3 節の図 3.10と同様に、入口半径 25 mm, 出口半径 12.5 mm, cutoff angle 30 度の Winston Cone と、PMT に見立てた曲率半径 21 mm の検出面である。光子は実験の条件に近づ けるため 4.2 節と同様に、距離 2.4 m の点源から飛ばし、ライトガイドに入射する角度を 0~40 度まで変化さ せ、検出面に到達した光子それぞれの座標と入射角度を求めた。

ここで PMT への入射角度は、検出面の形状が球形なので図 5.11のように入射位置での法線に対する角度を 光子の入射角度とした。PMT への入射角度のシミュレーション結果を図 5.12に示す。ライトガイドに入射す る角度が大きくなると、PMT に入射する光子の角度も同様に大きくなることがわかった。特にライトガイド に入射する角度が cutoff angle の 30 度のときは 60~80 度の光子がほとんどであった。

5.2.2 シミュレーション方法

PMT 感度の入射位置及び角度依存性の測定結果をシミュレーションに組み込みやすくするため、それぞれの 平均化した図 5.6,図 5.10の測定値のある値を1とし、相対値化した。位置依存性の測定結果は、X = 0 mm, Y = 0 mm の測定値を1 に標準化し、角度依存性の測定結果も同様に入射角度0 度の測定値を1 に標準化し て、さらに $\cos\theta$ curve よりも測定値が上昇している効果を考慮するため、それぞれの入射角度(θ)の測定値を 0 度の測定値 × $\cos\theta$ で割り、図 5.13のように相対値化した。

ROBAST で行ったレイトレースシミュレーションでは 3.3 節で述べたように検出した光子の総有効面積を 求めて集光率を計算していたので、前節で求めた光子それぞれの座標と入射角度を図 5.14のように相対値化し た位置と角度のグラフに対応させて「入射位置での重み」と「入射角度での重み」を求め、それぞれの重みを 光子一個あたりの有効面積に掛け合わせる。

重みをつける前の光子の一個あたりの有効面積を dA, 位置の重みを W_{XY} , 角度の重みを W_{θ} , 重みをつけた光子一個あたりの有効面積を W_{dA} とすると、

$$W_{dA} = dA \times W_{XY} \times W_{\theta} \tag{5.1}$$



図 5.12: 光子の PMT への入射角度のシミュレーション結果。左上がライトガイドへの入射角度が 0 度で、右下が 40 度 のとき。縦軸が光子数、横軸が PMT への入射角度を表す。



図 5.13: PMT 感度角度依存性の測定結果を相対値化したグラフ



図 5.14: PMT 感度の位置及び角度依存性の重み付け方法。(a) 位置依存性の重み付けは、X・Z 軸ステージを 2 mm ずつ 移動させたので、例えば、レイトレースシミュレーションから求めた座標が X:5 ~ 7 mm、Y:5 ~ 7 mm の範囲内の光 子は、図の測定結果の重みを付ける。(b) 角度依存性の重み付けは、例として、レイトレースシミュレーションから求めた 光子の入射角度が 40 度以上 41 度未満のとき、{-40 度の重み + (+40 度の重み)}/2 の重みをかける。



図 5.15: 位置及び角度依存性を考慮したシミュレーション結果

となる。この重みを付けた光子一個あたりの有効面積を検出面に到達した全光子分求め、集光率をシミュレー ション上で再計算した。

5.2.3 シミュレーション結果

位置及び角度の重みを付けて集光率を再計算した結果は図 5.15になった。重みを付けたことでシミュレーショ ンで集光率の上昇が再現できた。さらに位置のみ、角度のみの重みを付けた結果はそれぞれ図 5.16,図 5.17の ようになり、位置依存性はほとんど効果がないことがわかった。また、実測の集光率と比較すると図 5.18のよ うになった。現状では PMT 中心部の角度依存性のみしか測定していないので、中心部以外の位置での角度依 存性を測定して結果をシュミレーションに取り込めばさらに現実に近い状況になるので、より実測に近くなる と予想できる。



図 5.16: 位置依存性のみを考慮したシミュレーション結果 図 5.17: 角度依存性のみを考慮したシミュレーション結果



測定したライトガイドの集光率とシミュレーションを比較

図 5.18: PMT 感度の位置及び角度依存性を考慮したシミュレーションと実測を比較した集光率。(a) は図 4.22、(b) は 図 4.20の測定結果。

5.2.4 今後 - ライトガイドの形状最適化 -

3.4 節でも述べたが、Winston Cone は LST 用ライトガイドに最も適した形状ではないため、これまでに LST 用ライトガイドの形状最適化の研究が行われてきた。しかし、PMT 感度の位置及び角度依存性は考慮していな かったため、今後は今回測定した結果を考慮したシミュレーションでライトガイドの形状最適化を行っていく。

第6章 まとめ

本研究では、次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡(LST)用ライトガイドを、主に従来の Winston Cone 形状で複数個試作し、大量生産に向けてライトガイドに貼る反射材の効率のよい貼り方の検討や、貼り方による性能の差を実験の結果から考察した。

実験ではライトガイドの集光率測定システムの設計・製作を行い、±1%程度の精度をもつシステムを確立 して、試作したライトガイドをPMTに取り付けてライトガイドの集光率角度依存性を測定した。測定結果か ら、反射材を貼る際に使用する接着剤の圧着方法によってライトガイドの性能に差があることを確認し、ライ トガイドの内面形状と同様の形状を持つ「オス型」で接着剤を圧着すればより理想的な曲面形状に近いライト ガイドを製作することができた。しかし、たとえオス型を使用しても、接着剤の最適な塗布量を考慮しなけれ ば反射材を安定的にライトガイドに貼ることができず、また反射材を貼ったときに、ライトガイドの内面がよ り理想的な曲面形状になる形で反射材をカットする必要があることがわかった。今後はそれらの問題を検証し、 大量生産に向けた製作方法を確立していく。

また、測定したライトガイドの集光率とシミュレーションで計算した集光率を比較すると、入射角度によっ てはシミュレーションよりも集光率が上昇していた。これは PMT の感度に光の入射位置及び角度に対する依 存性があり、その影響だと考えられる。これらの依存性は詳しく測定されておらずデータがないため、シミュ レーションには考慮していなかった。そこで、実験に使用した PMT の感度の位置依存性と角度依存性を測する システムを構築し、それらの測定結果をシミュレーションに組み込み、集光率の上昇が再現できるかを調べた。

位置依存性は、スポット光を PMT に入射させ、X・Z 軸ステージを使用して PMT 光電面の位置ごとの出力 値を測定した。角度依存性は、PMT の中心部分の依存性を測定するために直径 5 mm の穴が開いたマスクを PMT に被せ、回転ステージで –80 ~ +80 度の範囲を回転させて PMT 出力値を測定した。結果から PMT 感 度の位置による違いと角度による違いがあることがわかり、特に角度依存性は入射角度が ±20 ~ ±70 度の測 定値が予想された値よりも高かった。これは double crossing と呼ばれる、光子が光電面を 2 回通過する現象 によるものと思われる。これらの測定結果を相対値化してシミュレーションに組み込み集光率を再計算したと ころ、集光率が上昇する傾向が見られた。これは、位置依存性の結果だけを組み込んでも上昇する効果は見ら れなかったので、角度依存性の影響が大きいと考えることができる。今後は、Winston Cone よりも集光率が 高い LST 用ライトガイドの形状を、PMT 感度の位置及び角度依存性の測定結果を考慮したシミュレーション で求めていく。

付 録 A ステージコントローラの使い方

実験に使用したステージコントローラは図 A.1のシグマ光機製の GSC-02 であり、同時に 2 つのステージを 制御できる(2 軸制御という)。 ここでは GSC-02 の使い方について簡単に説明する。なお、GSC-02 の説明 書は、以下のリンクからダウンロードすることができる。

http://www.products-sigmakoki.com/page_pdf/GSC-02.pdf

GSC-02 は、ステッピングモータ対応のドライバを内蔵したステージコントローラであり、PC から単純なコ マンドを送ることで制御できる。また、モータは通常1パルスで0.72 度回転するが、GSC-02 はハーフステッ プタイプのコントローラなので、1パルスで0.36 度回転する。そのため、

となる。本実験で使用した、表 4.1.1の SGSP - 60 YAW - 0 B はハーフステップ時の分解能が 0.0025 度/パル スであるため、400 パルスで1 度回転する。また、SGSP20 - 85 (X), SGSP20 - 85 (Z) は、ハーフステップ 時の分解能が 0.001mm/パルスなので、1000 パルスで1 mm 移動する。

GSC-02 の電源にはシグマ光機製の PAT-001-POW1 を使用した。ステージと GSC-02 はこちらもシグマ光 機製の DMINI-CA ケーブルで繋ぎ、PC と GSC-02 は RS232 C ケーブルで繋ぐ。このとき、GSC-02 側には D-Sub9pin メス(ナット)が付いているので D-Sub9pin オス(インチネジ)が付いているケーブルを用意す る。ない場合は、D-Sub9pin オス(ナット)の小型アダプタを使う。

コントローラの制御

コントローラには、奥村曉氏が開発した PySigmaKoki をインストールした PC からコマンドを送った。 PySigmaKoki は、以下のリンクからダウンロードできる。

http://sourceforge.net/p/pysigmakoki/code/3/tree/trunk/PySigmaKoki/src/

なお、コマンドを送るには Pyserial を先にインストールしておく必要がある。以下に PysigmaKoki でのコマ ンド送信の例を示す。コントローラの Stage1 に回転ステージ、Stage2 に Z 軸ステージが接続しているとする。



⊠ A.1: GSC-02[24]

```
$ python
>>> import sigma_koki
>>> gsc02 = sigma_koki.GSC02()
>>> gsc02.open("/dev/ttyUSB0")
>>> gsc02.getStatus() // 現在の位置を表示する
>>> '
       0,
              0,K,K,R'
>>> gsc02.move(45*400, - 1000*4) // 回転ステージを 45 度、Z軸ステージを-4 mm 動かす
>>> gsc02.getStatus()
                  4000,K,K,R' // パルス数で現在の位置が表示される
>>>'
       18000, —
>>> gsc02.InitializeOrigin(1,2) // 現在の位置を新しい原点に設定する
>>> gsc02.getStatus()
>>> '
        0,
              0,K,K,R'
>>> gsc02.move(10*400,1000*10)
>>> gsc02.decelerate('1','2') //Stage1, Stage2 を減速停止させる
>>> gsc02.returnToMechanicalOrigin('0','-') /// Stage2のみ、一側機械原点復帰を行う
Ctrl + D // python を終了する
```

付 録 B ライトガイド結像面撮影

試作したライトガイドの性能評価実験として PMT を用いて集光率を測定する以外に、ライトガイドの出口 部分に薄い紙を貼って紙に映る像をカメラで撮影し、シミュレーションで求めた像と比較した。実験のセット アップの概要を図 B.2に、実際のセットアップを図 B.1に示す。なお、この実験は本文中の集光率測定実験の セットアップを組む前に行ったので、回転ステージは手動回転ステージ(シグマ光機製 KSC-606)を、ディ フューザーには半透明のアクリル板を使用し、ライトガイドは LG_{mill} と LG_{3D} のみ撮影した。また、カメラは Canon 製の EOS Kiss X5 を使用した。

シミュレーションでは六角形の平面を検出面としてライトガイドの出口に設置し、検出面に到達した光子の X 座標と Y 座標を求めた。 距離 2200 mm の点源で光子数を 1000000 個としたときのシミュレーション結果 を図 B.3に、カメラで撮影した像のうち LG_{mill} を図 B.4, LG_{3D} を図 B.5に示す。

結果を見ると、LG_{3D}の方がシミュレーションに近い像となっていることがわかった。特に入射角度0度の ときの六角形の形がLG_{mill}に比べてはっきりしている。オス型で圧着することで内面の形状がWinston Cone に近づいたと考えられる。



図 B.2: ライトガイド結像面撮影のセットアップ概要図



図 B.1: ライトガイド結像面撮影のセットアップ。ライトガイドの出口には画材店で購入できる薄いトレーシングペーパー をなるべく平面になるように貼った。また、回転ステージと段ボールを固定し、段ボールの上にカメラを設置してカメラ もライトガイドと同様に回転できるようにした。



図 B.3: シミュレーションで求めたライトガイド結像面の光子分布。左上がライトガイドに対する光子の入射角度が0度のときで、他は10度,15度,20度,25度,30度の場合を表す。



図 B.4: カメラで撮影した LGmill の結像面。入射角度 15 度の画像は撮影していない。



図 B.5: カメラで撮影した LG_{3D} の結像面

付 録 C Winston Coneの導出

ここでは Winston Coneの形状を表す式を導く。ある放物線を、図 C.1のような *R-Z* 座標系で考える。この 放物線は、焦点距離を *f* とすると、

$$R^2 = 4fZ \tag{C.1}$$

と表せる。次に、放物線のR < 0成分のみを焦点の位置に持っていくと、図 C.2の点線を中心軸とした線対称 の位置になる。このとき、中心軸と Z 軸とのなす角を θ とおく。さらに、焦点 F から中心軸と直角に交わる ように放物線に向けて引いた直線との交点を A とおき、この点を Winston Cone の原点と考える。R-Z 座標 系を点 A が原点の Winston Cone の r-z 座標系に変換するため、まず R-Z 座標軸の原点を Z 方向に f だけ平 行移動すると、式 (C.1) は、

$$R^2 = 4f(Z+f) \tag{C.2}$$

となる。さらに、点 F を中心に反時計回りに R-Z 座標系を回転させ、r-z 座標系に合わせると、r, z 座標は、

$$\begin{pmatrix} r \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ Z \end{pmatrix}$$
(C.3)

と表すことができる。R, Z 座標は、式 (C.3) の回転行列を α とおくと、 α^{-1} を用いて、

$$\begin{pmatrix} R \\ Z \end{pmatrix} = \alpha^{-1} \begin{pmatrix} r \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ z \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} r \cos \theta + z \sin \theta \\ -r \sin \theta + z \cos \theta \end{pmatrix}$$
(C.4)

となり、式 (C.4) を式 (C.2) に代入すると、

$$(r\cos\theta + z\sin\theta)^2 = 4f(-r\sin\theta + z\cos\theta + f) \tag{C.5}$$



図 C.1: R-Z 座標系の放物線



図 C.2: 片方の放物線を焦点の位置に持ってきた図

そして、最後に点 F を点 A に移動する。F-A 間の距離を a' とおくと、式 (C.5) は、

$$\left\{ (r+a')\cos\theta + z\sin\theta \right\}^2 = 4f\left\{ -(r+a')\sin\theta + z\cos\theta + f \right\}$$
(C.6)

となる。この式 (C.6) が Winston Cone の形状を表す式である。

座標系変換前の焦点 Fの座標は、座標系変換後、(r, z) = (a', 0)なので、式(C.6)にそれぞれ代入すると焦点距離 fは、

$$f = a'(1 + \sin\theta) \tag{C.7}$$

と書くことができる。以上のr, z 座標からなる形状を図に表すと、次の図 C.3のようになる。



図 C.3: Winston Cone の形状。http://scienceworld.wolfram.com/physics/WinstonCone.html より引用。

図 C.3の a がライトガイド入口半径、a' が出口半径、L がライトガイドの長さ、 θ が cutoff angle に相当する。図 C.3から、a, a', L, θ には次の関係がある。

$$\tan \theta = \frac{a+a'}{L} \tag{C.8}$$

また、 $\rho(\phi)$ は、焦点から放物線までの距離を表しており、放物線には、放物線から z = -fの準線までの距離 と、 $\rho(\phi)$ が等しくなるので、

$$\rho(\phi) = \rho(\phi)\cos(\phi) + 2f \tag{C.9}$$

となる。よって $\rho(\phi)$ は、

$$\rho(\phi) = \frac{2f}{1 - \cos\phi} \tag{C.10}$$

 $\phi = 2\theta$ のとき、式 (C.10) は、

$$\rho(2\theta) = \frac{2f}{1 - \cos(2\theta)} = \sqrt{L^2 + (a + a')^2}$$
(C.11)

となる。式 (C.7), (C.8), (C.11) から、

$$\frac{2a'(1+\sin\theta)}{2\sin^2\theta} = (a+a')\sqrt{1+\left(\frac{1}{\tan\theta}\right)^2}$$
(C.12)

a' について解くと、以下の関係が導き出せる。

$$a' = a \sin \theta$$
 (C.13)

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{a'}{a}\right) \tag{C.14}$$

付 録 D 試作したライトガイドの CAD データにつ いて

試作したライトガイドのデータは全て CAD で作成した。CAD は、Autodesk Professional Inventor 2013(以下 Inventor 2013) を使用した。

Autodesk 社の CAD は無料でインストールできる

CAD は購入する場合、10 万円以上するものもあるが、正規版とほとんど同じ機能を持つ「学生版」は登録 をすれば以下のサイトで無料でインストールすることができる。

http://www.autodesk.com/education/free-software

Inventor 2013の学生版を自前のノート PC (Windows7, RAM 4 GB, 64 Bit) にインストールし、作成した データ (Inventor 2013の場合、標準では.ipt)をプロトラブズに送ったり、3 D プリンタ用に.stl に変換した データを名古屋大学に送ったりした。

ライトガイドの図面

図 D.1から図 D.3にライトガイドとプレートの図面を示す。



図 D.2: LG_{full}の図面



図 D.3: プレートの図面

付 録 E 射出成形でのライトガイドの見積もり

現時点でのライトガイド(LG_{3D})のCADデータをプロトラブズに見積もってもらった結果を図E.1に示す。

- 内面を鏡面仕上げにした場合の金型費用が約120万円
- ライトガイド単価は約250円
- 材質は ABS (白, クララチック MVF 1K)
- 納期を通常の 10 日から 15 日に遅らせると 20% 割り引きされる

プレートとの結合のためにフックが三箇所あり、一般的な2方向抜き金型ではフックなどがアンダーカット^{*1}と なって成形品を取り出すことができない。そのため、金型を3分割して図 E.2のようにスライドさせて取り出 す。このように金型を3分割させるため、金型費用が高くなっている。

^{*1}金型から取り出す時にひっかかって抜くことができない成形品の凸形状や凹形状のこと。

pro	tomold	短納期 射出的	成形サービス			
ホーム	技術情報	創業の背景	お問い合わせ	MY ACCOUNT) 🏣 カート (0 アイテム) ログイン 📇 📩
PROTOQUOTE [®] 茨城大学大学院 ^{見預り番号:} 12280 見積功日: 12/25/2013 パーツ名/番号: newHex_width0.59(0.50)mm_3joints1_plate11 rev 10 外形寸法: 49.82 mm x 57.527 mm x 52.108 mm						
1	仕様を変更し	,て価格をごす x):	崔認ください 1 キャビティー]
	固定側(緑色)の 可動側(青色)の	生上げ: 🥑 生上げ: 🥑	SPI-C1 (外装音 SPI-A2 (鏡面付	8品レベル仕上げ - 600番の 上上げ - 外装品用途向け最」 金型費	ゲリッドストーン処理) 上級仕上げ) ¥1,217,500	
	サンプルパーツの数	≘ :	25 💌	サンブル パーツ 25 @ ¥2	252: ¥6,300	
	希望納期 (発注時に確定):	. 0	サンプルパーツ15	営業日 (20%ディスカウント)	-¥243,500	
	材料:	0	ABS, 白 (クララ)	スチック MVF-1K)	×	J
			合計(税	友)JPY:	¥980,300]

図 E.1: ライトガイドの見積もり結果



図 E.2: ライトガイドの金型からの抜き方向

謝辞

この論文を書き終えて、本研究は数々の方に支えていただいていたんだと心からそう思います。まず、指導 教官である片桐秀明准教授には研究内容で多大なご指導を受け、常に親身になって考えていただき誠にありが とうございました。また、日々ご迷惑とご心配をおかけしてしまい申し訳ありませんでした。吉田龍生教授に は研究に関する質問以外のどんな小さなことでも真剣に相談に乗っていただき、誠にありがとうございました。

名古屋大学の奥村曉助教、東京大学宇宙線研究所の林田将明助教には研究に関するご意見や助言をいただき 誠にありがとうございました。ふがいない私ではありましたがお二人のサポートあっての研究内容でした。心 から感謝いたします。その他にも東京大学宇宙線研究所の手嶋政廣教授はじめ CTA - Japan の皆様にも web 会議やメールで貴重なご意見や助言をいただき、とても参考になりました。また、プロトラブズ社の榊原さん、 米本さんには疑問点を懇切丁寧にいつも教えていただきありがとうございました。

ゼミ室の皆様にはいつも感謝しながら過ごしていました。3年間をともに過ごした加賀谷美佳さん、杉山重 実君、馬場浩則君には大変お世話になりました。加賀谷さんは最年長というところもあり研究活動が最も多忙 にもかかわらず疲れた表情を見せずにいつも元気でやる気に満ち溢れているその姿勢は尊敬に値します。時々 でいいので少し休んでいる姿を見せてください。杉山君はその豊富な知識量に裏付けされた確かな言動にはい つも感心していました。また、日々の生活で多大なご援助とご協力を受けさせてもらい感謝でいっぱいです。 馬場君は、同じ CTA - Japan に所属していて席が隣同士な点もあり、いつでも研究内容に関することもそうで ないことも相談に乗ってもらいました。その頭の切れの良さがとても羨ましかったです。田中洋輔君は2年間 でしたが同じく大変お世話になりました。常に周りに気を配りながら時に手を差し伸べるその姿勢はとても人 間らしく、素晴らしく、私の憧れでした。

他にもここには書ききれないほどの方が私の研究に関わっていたのだ気づかされました。私にはもったいな いことだと思いますが、どんなに小さなことでも全て貴重な経験となりました。深く感謝いたします。

最後に、私の両親と夏川冬美さんに最大限の敬意を表します。誠にありがとうございました。

参考文献

[1] CTA - Japan コンソーシアム 2010 年 8 月 30 日 「Cherenkov Telescope Array 計画」

- [2] http://atlas.kek.jp/
- [3] http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/
- [4] http://veritas.sao.arizona.edu/
- [5] http://www.cta-observatory.org/
- [6] http://asd.gsfc.nasa.gov/archive/owl/intro.html
- [7] http://root.cern.ch/drupal/
- [8] Holger Wetteskind, MAGICII Camera Mechanical Highlights, 2009, CTA WP FPI Session Paris
- [9] Miquel Barceló, 2014, LST General Meeting in Kashiwa
- [10] 窪秀利, 天文学会, 2013
- [11] 今野裕介, 2014, LST General Meeting in Kashiwa
- [12] 手嶋政廣, 物理学会, 2013
- [13] 窪秀利, 共同利用研究成果発表会, 2012
- [14] 株式会社浜松ホトニクス, 2011, CTA-FPI: PMT update from Hamamatsu
- [15] Christian Fruck, 2011, A new LIDAR system for the MAGIC telescopes and site search instrumentation for CTA, Physik-Department der Technische Universität München
- [16] 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 Universität München
- [17] 黒田和典, 2011 年度, 茨城大学修士学位論文
- [18] 佐々木美佳, 2011 年度, 茨城大学修士学位論文
- [19] 梅原克典, 2012 年度, 茨城大学修士学位論文
- [20] 加賀谷美佳, 2012 年度, 茨城大学修士学位論文
- [21] 馬場浩則, 2013 年度, 茨城大学修士学位論文
- [22] 今野裕介, 2012 年度, 京都大学修士学位論文
- [23] 株式会社 KEYENCE, AGIRISTA-3000 技術資料
- [24] 株式会社シグマ光機, GSC-02 技術資料
- [25] 株式会社住友 3 M, ESR 反射フィルム技術資料

- [26] 株式会社日亜化学工業, NSPB346KS 技術資料
- [27] 株式会社浜松ホトニクス,光電子増倍管 その基礎と応用 第 3a 版
- [28] A. Okumura et al., 2011, Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference, 9, 210-213.
- [29] A. Okumura, 2012, Astroparticle Physics, 38, 18-24.
- [30] B.S. Acharya et al., 2013, Astroparticle Physics, 43, 3-18.
- [31] D. Paneque et al., 2003, Proceedings of the 3rd International Conference on New Developments in Photodetection, 504, 109-115.
- [32] F.A. Aharonian and A.K. Konopelko, 1997, arXiv:astro-ph/9712044v1
- [33] F. Hénault et al., 2013, arXiv:1309.4252
- [34] K. Bernlöhr, 2008, Astroparticle Physics, 30, 149-158.
- [35] R. Winston, 1970, Journal of the Optical Society of America, 60, 245-247.
- [36] T. Nagai et al., 2007, Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, 3, 1437-1440.
- [37] W. Hofmann et al., 1999, Astroparticle Physics, 12, 135-143.