

甲南大学 修士学位論文

3Dプリンタを使った集光器の  
設計と開発

甲南大学大学院

自然科学研究科 物理学専攻

2023年2月

22121003

溝手 雅也

## 概要

チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) は、100 台以上の望遠鏡からなるガンマ線の観測施設である。現在、カナリア諸島の天文台で高エネルギーガンマ線を観測する 23m 口径チェレンコフ望遠鏡が稼働している。この望遠鏡は直径 40mm の光検出器 1885 本からなるカメラを搭載しており、20GeV 以上のエネルギーを持ったガンマ線が大気中で生成した空気シャワー中の荷電粒子が発する微弱なチェレンコフ光を集めて、ガンマ線のエネルギーと到来方向を測定する。

現在の望遠鏡のカメラに取り付けている光検出器には、光電子増倍管(PMT)が採用されている。CTA は、カメラの高分解能、高感度化を進めるために、半導体検出器(SiPM)を導入することを検討している。検出器にはそれぞれ、チェレンコフ光の検出をサポートする集光器という器具が取り付けられている。集光器は、望遠鏡の主鏡から反射されてきた光を検出器に導き、主鏡以外から入ってくる夜光を除去する役割がある。検出器の交換にあたって、この集光器の形状を新しく設計することが、今回の研究の主題である。

集光器の内側は、曲面の反射鏡によって、一定の入射角以内の光子を出口まで届ける構造になっている。コンピュータシミュレーションにより望遠鏡主鏡から入射した光の経路を計算し、反射鏡の形状を変え、入射角ごとの集光効率をグラフ化する。それを基に、集光効率が高くなる、集光器の形状の最適化を行う。最適化した形状を基に、三次元の集光器の設計図を描く。パーツを 3D プリンタで製作することで安く量産化することを目指す。SiPM は、ノイズとなる赤外線にも感度が高いため、赤外線などの長波長の光の反射率を弱める、コールドミラーというガラス蒸着鏡を採用した。多層膜コーティングされた厚さ 0.145mm の鏡を、集光器の内側の壁の形状にカットして張り付ける。適切な治具や圧力をかけることで、集光器の内側の曲率を保ったまま、割れることなくガラス鏡が接着された。薄いガラスを使っているため、入り口側に飛び出した鏡の強度が不安定であり、補強などの改善の余地がある。また、検出器の実物や、基板に接続するための回路が決定され次第、寸法を変更することも考慮しなければならない。本研究で製作した設計と試作品を基に、完成品を決定し、半導体検出器の検出効率の測定に用いることを最終目標とする。

# 目次

1	はじめに .....	4
1.1	CTA .....	4
1.2	LST .....	6
1.3	光検出器 .....	7
1.3.1	PMT .....	7
1.3.2	SiPM .....	8
1.3.3	検出器の性能 .....	8
2	研究目的 .....	9
2.1	Winston Cone の原理 .....	9
2.2	ROBAST .....	10
2.2.1	集光効率の角度依存性 .....	10
2.2.2	形状の最適化 .....	11
3	ライトガイドの試作 .....	17
3.1	設計 .....	17
3.2	接着方法 .....	18

3.2.1 コールドミラー .....	20
4 試作品の試行錯誤と評価.....	23
5 結論と今後の展望.....	26
謝辞.....	27
参考文献 .....	28

# 1 はじめに

## 1.1 CTA

チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA) は、超高エネルギーのガンマ線天文学のための、次世代の地上観測所である。北半球 (スペイン) と南半球 (チリ) に設置された 100 台以上の望遠鏡により、CTA は世界最大かつ最高感度の高エネルギーガンマ線観測所となる。口径の異なる三つの望遠鏡 (大口径望遠鏡、中口径望遠鏡、小口径望遠鏡) を用いることで、広いエネルギー領域である 20 GeV から 300 TeV の範囲の観測を可能とする。100 台近くの望遠鏡を配置予定であり、2025 年の完成に向け、開発中である。



図 1. CTA の北サイトの完成予想図

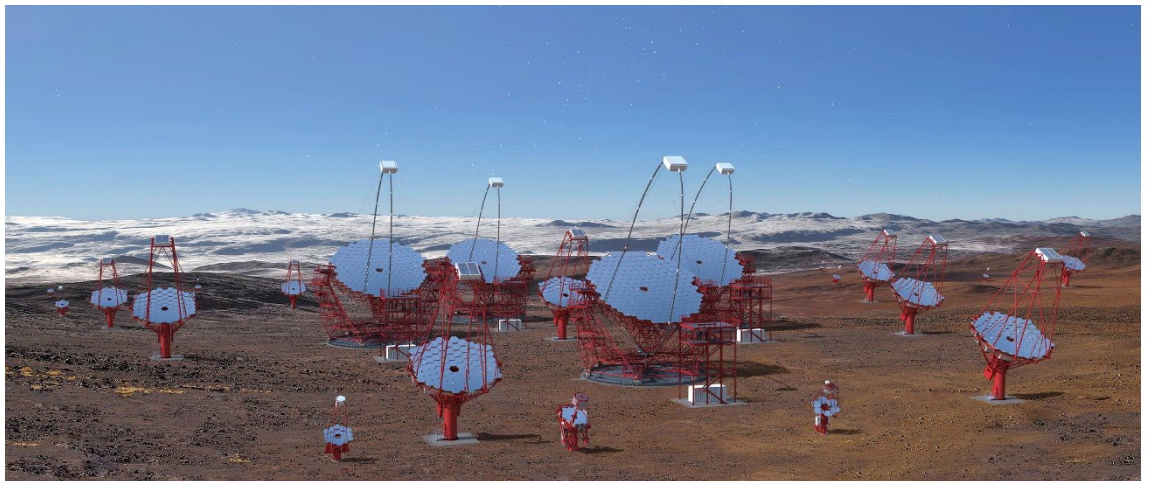


図 2. CTA の南サイトの完成予想図

高エネルギーガンマ線が大気中に入ってくる時、大気中の原子核と相互作用して、二次粒子 (電子、陽電子) を含んだ電磁シャワーを発生する。この二次粒子は大気中でチェレンコフ光を放出する。光子数とガンマ線エネルギーは比例関係にあるため、チェレンコフ光を地上で測定することでガンマ線を観測することができる。チ

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。カメラ面上の光電子数分布をイメージ化したガンマ線イベントは、楕円状で捕らえられる。楕円の長軸をのばしや交点から、ガンマ線の到来方向であると推定できる。

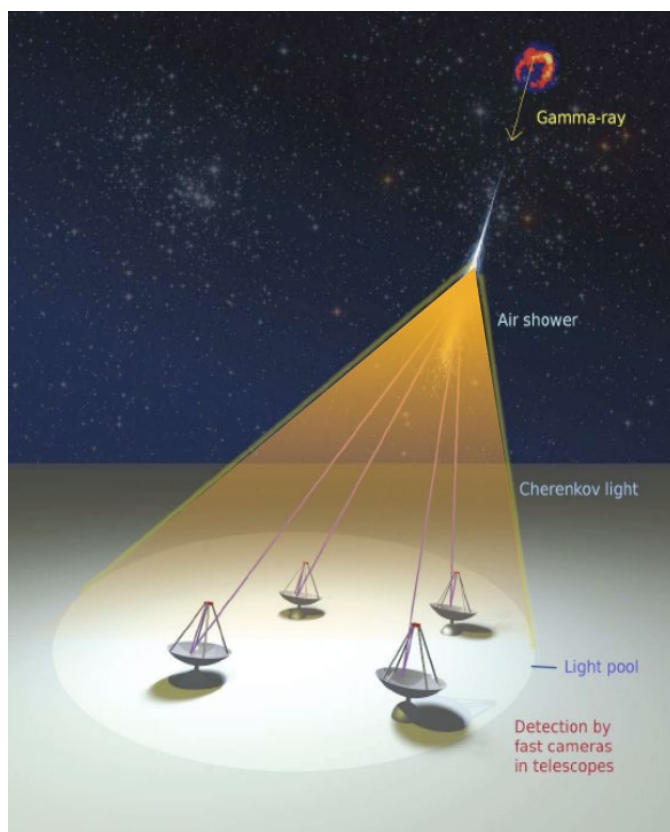


図 3. ガンマ線による電磁シャワーを望遠鏡で観測するイメージ図

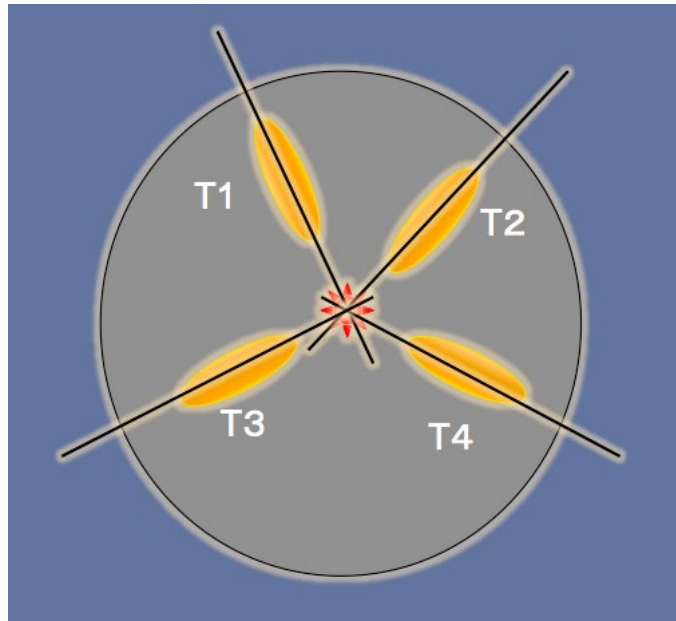


図4. 電磁シャワーを複数の望遠鏡で観測した時のイメージ図

## 1.2 LST

大口径望遠鏡 (LST) は CTA の 3 種類ある望遠鏡の中で、20GeV から 3TeV の低エネルギー領域を観測できる。プロジェクトチームは 31 カ国から集まった 1500 人以上の科学者で構成されており、4 台の LST が北半球と南半球のアレイの中心に配置される予定である。28m の焦点距離と 23m の直径からなる放物面の反射鏡を持ち、直径 40mm の PMT が 1855 本搭載された、直径 2.5m の焦点面カメラでチェレンコフ光を観測している。現在、初号機が建設を終えており、試験観測中である。

	大型望遠鏡 (LST)	中型望遠鏡 (MST)	小型望遠鏡 (SST)
エネルギー領域	20GeV~3TeV	80GeV~50TeV	1TeV~300TeV
主鏡の口径(m)	23.0	11.5	4.3 (副鏡：1.8)

表1. CTA にある望遠鏡



図 5. 北サイトに建設された LST 初号機

## 1.3 光検出器

### 1.3.1 PMT

LST の光検出器には、浜松ホトニクス社と共同開発した PMT(光電子増倍管)が用いられている。入射窓を通して入射した光子は、光電面に当たって光電子を放出する。電極に与えられた電圧で加速された光電子はダイノードに衝突し、二次光電子を発生させる。この時、一次光電子よりも放出される二次光電子の個数の方が多くなる。これをダイノードの段数分繰り返して光電子を増幅させる。陽極に到達した光電子は、電気信号として検出される。

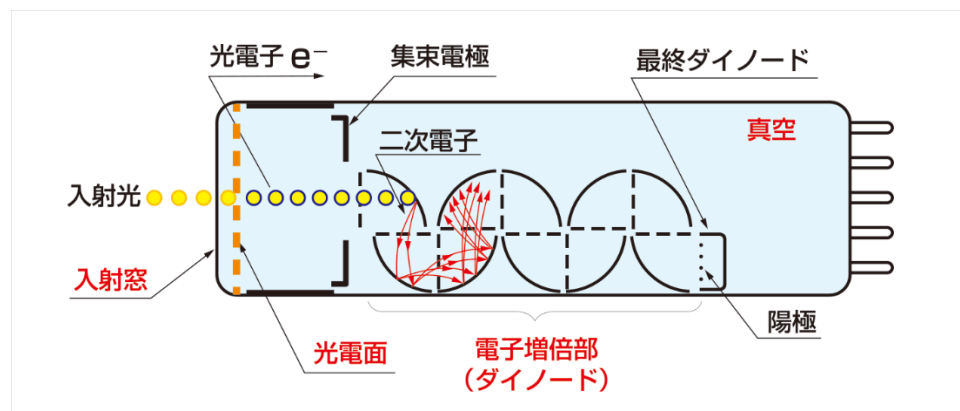


図 6. PMT の構造(浜松ホトニクスより引用)



### 1.3.2 SiPM

半導体のPN接合に降伏電圧を超える逆電圧をかけることで、電子と正孔がそれぞれ移動し、電子と正孔の数が同数になる空乏層が形成される。この層に光子が入射すると、光電効果が起こり、光電子が生成される。光電子は内部の電場によって加速され、新たに光電子を生成する。このようにして、光電子を増倍していく現象をアバランシェ増倍と呼び、アバランシェ増倍を利用した光検出素子がAPD(アバランシェフォトダイオード)である。降伏電圧を超える逆電圧をかけている状態をガイガーモードと呼ぶ。アバランシェ増倍が起こることで一定の電流が出力され、半導体内部の電場によって出力が止まらなくなってしまう。こうなるとアバランシェ増倍も止まらなくなり、APDで光を検出することが出来なくなる。クエンチング抵抗を接続することで、電圧降下を起こしてアバランシェ増倍を自動的に止め、再び光子を検出できるようにする。SiPM(半導体光電子増倍素子)は、ガイガーモードのAPDにクエンチング抵抗を組み合わせたものを1つのセルと考え、多数のセルを並列接続させた検出器である。LSTのカメラに導入を検討されているSiPMは、12mm四方の正方形の検出面を持つ検出器が考えられている。

### 1.3.3 検出器の性能

上記の特徴から、SiPMは微力な光に対して高い精度で検出することが可能である。動作電圧が低い望遠鏡の省電力化につながるとも考えられており、PMTと比べて小型であることから、分解能の向上による、よりシャープな天体の位置の特定も期待できる。欠点として、SiPMはPMTと比べて赤外線を含む長波長の光に対する感度が高い。夜光によるノイズの検出量が増加することで、ガンマ線への感度の悪化を招いてしまう。また、APDセルでアバランシェ増倍が起こった時、生成された電子と正孔の再結合によって二次光子が発生する。この二次光子が別のAPDセルで検出されてしまう現象をオプティカルクロストークと呼び、SiPMのもう一つの欠点として挙げられる。オプティカルクロストークが発生すると、検出光子を発生光電子数が上回り、それに伴って出力電荷も増加してしまう。その結果、ガンマ線イベントのチェレンコフ光の像が広まり、分解能の悪化を招く。

## 2 研究目的

焦点面カメラに光検出器を取り付ける際、入口にライトガイドと呼ばれる集光器が設置される。ライトガイドの内側は光を反射する鏡になっており、出口側に検出器を取り付け、出口より広い入口から光を受け入れる。カメラの受光面に敷き詰めることで、検出器の間の、チェレンコフ光が通り抜けてしまうデッドスペースを減らし、主鏡以外から来る視野外の入射光、夜光や地面からの反射光を抑える役割がある。現在 PMT に取り付けられているライトガイドは、入り口と出口が正六角形の形をしている。入射窓が円になっている PMT に合わせやすく、カメラに敷き詰めた際にハニカム構造によってデッドスペースがほとんど無くなるためである。

今回制作するライトガイドは入り口と出口を正方形の形に設計した。SiPM が正方形の形であることから、光子を出来るだけ逃がさないように出口を同じ正方形に設計、複雑な形状にするとライトガイドコーンの設計から成形が難しくなるため、今回の研究では入口も正方形の形にすることで、4つの鏡面をもつ四角のライトガイドコーンの設計を始めた。

### 2.1 Winston Cone の原理

ライトガイドの内側は緩やかな曲率を持っている。この曲率の原理には、二つの放物線の組み合わせで理解できる。放物線を回転して作られる放物面は、平行光を焦点に集める性質がある。

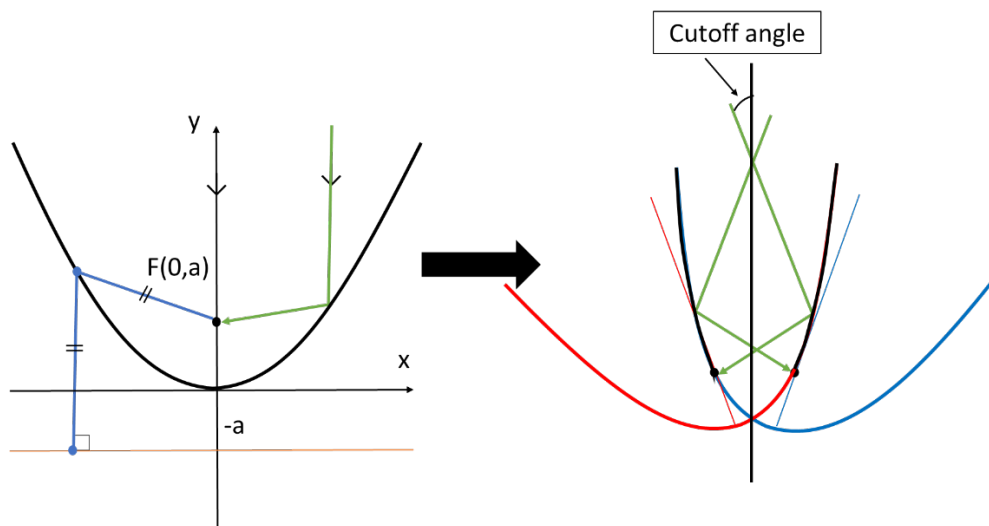


図7. Winston Cone の原理

$y=-a$  で書ける直線と  $(0, a)$  の位置にある点  $F$  があるとき、直線と点  $F$  からの距離が等しい点の軌跡は放物線になり、 $y = \frac{1}{4a}x^2$  の式が与えられ、点  $F$  は放物線の焦点と呼ばれる。放物線は軸と平行に入射した光を焦点に集める性質を持ち、焦点

の位置にもう一つの放物線の端を位置させた形状を Winston Cone 形状と呼ぶ。放物線上で反射して焦点に向かう入射光の角度を Cutoff angle と呼び、これより小さい入射角の光はライトガイドの出口に到達し、大きい入射角の光は反射されて入口から飛び出る。夜光等を低減する構造になっており、図の黒線を回転することでできる放物面を複数合わせた立体を、Winston Cone 型集光器と呼ぶ。

## 2.2 ROBAST

ライトガイドの内側の、反射鏡のシミュレーションにおいて ROOT-Based Simulator for Ray Tracing (ROBAST) を用いた。ROBAST は ROOT を使用した光線追跡シミュレータであり、宇宙線検出のための大型光学望遠鏡シミュレーションを簡単にするために開発されたソフトウェアである。名古屋大学の奥村曉氏によって開発されたこのソフトは、ROOT ベースの C++ で記述されている。今回、光の入射角による集光効率を計算し、反射鏡の最適な形状を探すため、集光鏡に光線を照射するシミュレーションを行った。

ROBAST では、Winston Cone 型のほかに、奥村氏が設計した Okumura Cone でもシミュレーションが出来る。Winston Cone ではライトガイドの出入り口の半径しかパラメータの編集ができないため、パラメータの自由が利く Okumura Cone の方を本研究では取り扱う。

### 2.2.1 集光効率の角度依存性

シミュレーションにおいて、光の入射角、方位角のパラメータは自由に設定することが出来る。ライトガイドの正方形の入口に対して光がどのように入射するのか、それが実際の集光効率にどれだけ影響を及ぼすのかもシミュレーションができる。光の入射角と集光効率のグラフを描くことで、ライトガイドの視野の広さ(効率が 100%である入射角の限度)をシミュレートできる。入射角と集光効率の関係をシミュレートする時は、方位角の 0~45 度の間を 1 度刻みでシミュレーションし、方位角の平均を計算して結果をまとめる。ライトガイドを入口から見た時、方位角の 0 度を正方形の辺に垂直に入射する設定にすると、45 度の時の入射光は正方形の対角線と平行になる。方位角が 90 度になると、隣の辺に垂直になり、0 度と変わらない結果になる。したがって、方位角で平均をとる際は 0~45 度間でいい。

また、従来のライトガイドは、CTA の観測結果から 25 度の視野を持つっていると推測。これは焦点面カメラの中心の結果なので、角度に直すと、カメラの端のライトガイドと 2 度のずれが生じる。これらからライトガイドの視野を 27 度と仮定し、様々な条件での入射角と集光効率の関係をシミュレート

した。

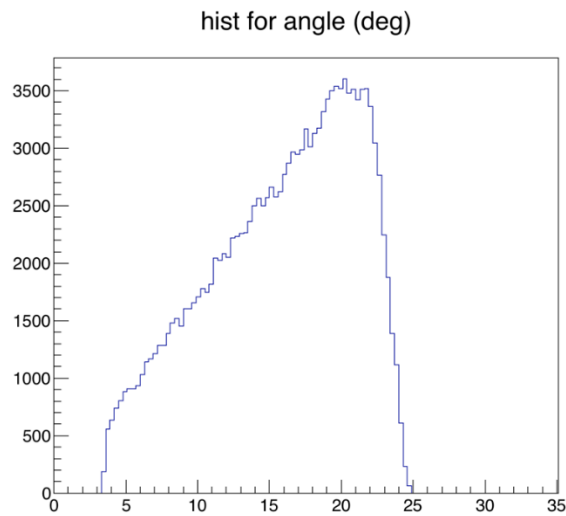


図 8. CTA の実地観測データによるライトガイドの入射角と入射光子のヒストグラム (2017/07)

### 2.2.2 形状の最適化

反射鏡の最適化において、フリーパラメータが多いほどシミュレーションの幅が広がる。ROBAST 上で反射鏡のシミュレーションを行う際には、反射鏡の大きさや曲率に関わるパラメータを編集して、計算することが出来る。今回のライトガイドは、入口を 25mm 四方、出口を 12mm 四方の正方形の形になるように設定した。まずは反射鏡の長さによる集光効率の違いを確かめる。ライトガイドの入口から出口までの長さは、入口と出口の大きさから、33.8mm に定められる。これを縮める、あるいは伸ばすことによる影響をシミュレートする。

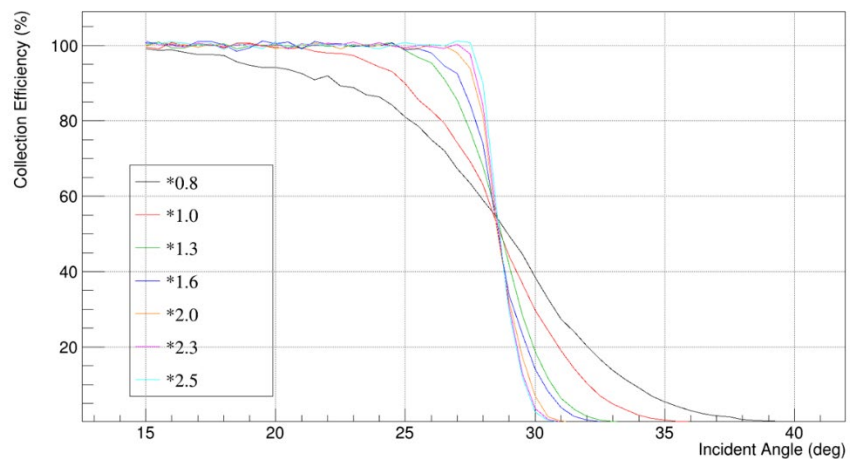


図9. 反射鏡の長さ(0.8~2.5倍)別の入射角と集光効率のグラフ

入口と出口の大きさを固定したままライトガイドの長さを変化させると、内壁の反射鏡で鋭角に反射することで入射光が外に飛び出してしまうことがある。これは縮めた時に起こることであり、伸ばしていくと反射光が出ていなくなる。ある程度伸ばすと、集光効率が100%を保てる視野の変化が収まっている。この結果から、ライトガイド及び反射鏡の長さは1.0~1.7倍に留めておくことにした。しかしこの結果は、反射鏡の反射率が100%であるときに限る。実際の反射率は100%を下回るものであると考えられ、反射するごとに光のエネルギーは減衰するはずである。したがって、反射鏡の長さを1.0~1.7倍にして、反射率を90%に設定してシミュレーションを行った。

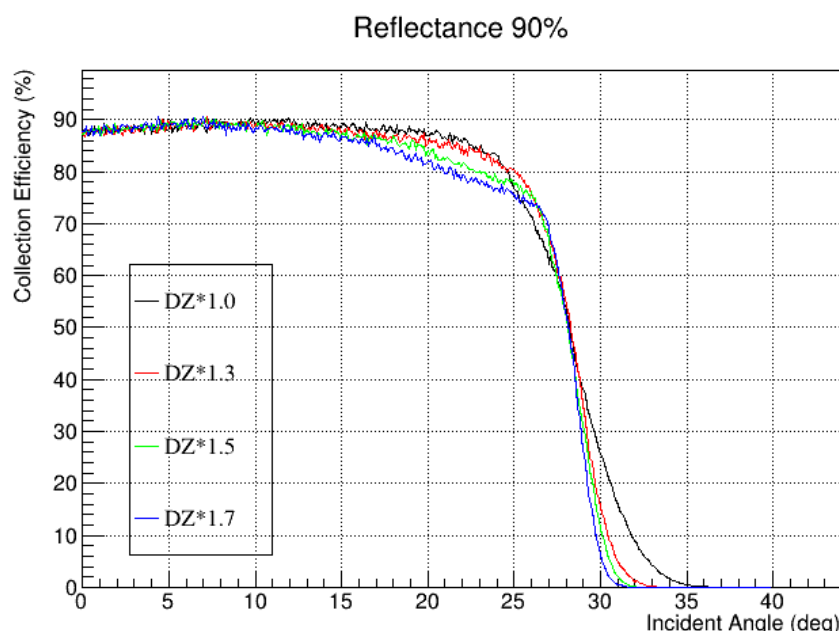
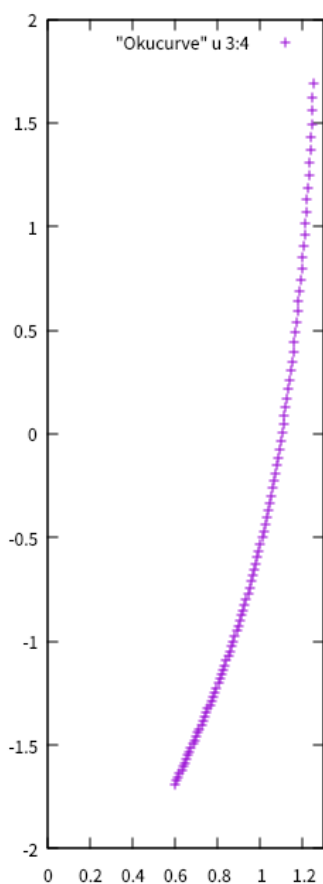


図10. 反射鏡(反射率90%)の長さ別の入射角と集光効率のグラフ

仮説通り、反射鏡の長さを伸ばすごとに、集光効率の視野が狭まった。四つのグラフの内、視野が安定して確保できると判断できたのは1.3倍。反射鏡の長さは、43.9mmを採用した。

反射鏡の曲面の設計にはベジエ曲線が採用されている。この曲線を押し出し式に伸ばして曲面にし、4枚を組み合わせて、正方形の入口と出口を持ったライトガイドを作る。複数の制御点と点を結ぶ複数の直線によって定められるベジエ曲線は、コンピュータ上で滑らかな曲線を描くため、反射鏡の長さや曲率が自由に設定できる。制御点は、ライトガイドの高さ方向(z)と、入り口出口の半径方向(r)の2つの値で決められる、二次元直交座標の点である。反射鏡の曲面になるベジエ曲線は、入口と出口の大きさによって決定される始点と終点のほか、2個の編集可能な制御点によって描かれているので、4

個の数値を変えることで曲率を変えることが出来る。コンピュータ上での制御点の数値は、正確にはライトガイドの入口の半径と出口の半径、長さの半分の値の上での、制御点の位置を表している。



ライトガイドの入口半径を  $R_1$ 、出口半径を  $R_2$ 、高さの半分の  $DZ$  と表記する。

制御点の値を  $(r, z)$  と設定した時、実際の座標の値は

$$(R, Z) = \begin{pmatrix} R_2 + r * (R_1 - R_2), \\ -DZ + z * (DZ - (-DZ)) \end{pmatrix}$$

という式で計算される。

今回設計するライトガイドは、

$R_1=12.5\text{mm}$

$R_2=6.0\text{mm}$

なので、Okumura Cone の初期値

$(0.39, 0.18)$ 、 $(0.87, 0.36)$

では、左の図のようなベジェ曲線が描かれる。図のライトガイドの長さは初期段階の

$DZ=16.9\text{mm}$

である。

図 11. ライトガイドの曲面に使われるベジェ曲線(単位は cm)

上のグラフは、ROBAST によって作られた Okumura Cone の曲面であり、Winston Cone をベジェ曲線で再現したものである。横軸が出入り口の半径を表しており、縦軸は中心をゼロ点においたコーンの長さを表している。

ライトガイドコーンにおける曲面の最適化のために、制御点の数値を変化させながら集光効率を計算する。制御点を設定する 4 個の数値を、半径方向と高さ方向に分ける。片方の 2 個の数値を固定して、もう片方の 2 個の数値を細かく変化させながら、集光効率を計算する。最適化した数値を見つけたら、その数値で固定し、固定していた側で同じことを行う。

最初は入口半径 12.5mm で測定していたが、後にライトガイドコーンの上端、反射鏡の厚さを 0.16mm と仮定し設計しなおしたため、半径を 12.34mm で測定し直した。図のグラフに見られる、集光効率が一番高い山になる値をグラフから判断する。具体的には制御点の初期値  $(0.39, 0.18)$ 、 $(0.87, 0.36)$  をもとに、以下表の範囲を 0.01 刻みでシミュレートし、集光効率が高い数

値を探した。

	1 点目	2 点目
初期値	(0.39, 0.18)	(0.87, 0.36)
半径 12.5mm	(0.30~0.50, 0.12~0.30)	(0.78~0.98, 0.30~0.45)
半径 12.34mm	(0.30~0.40, 0.13~0.23)	(0.83~0.93, 0.30~0.40)

表 2. ベジエ曲線の制御点測定のプロセス

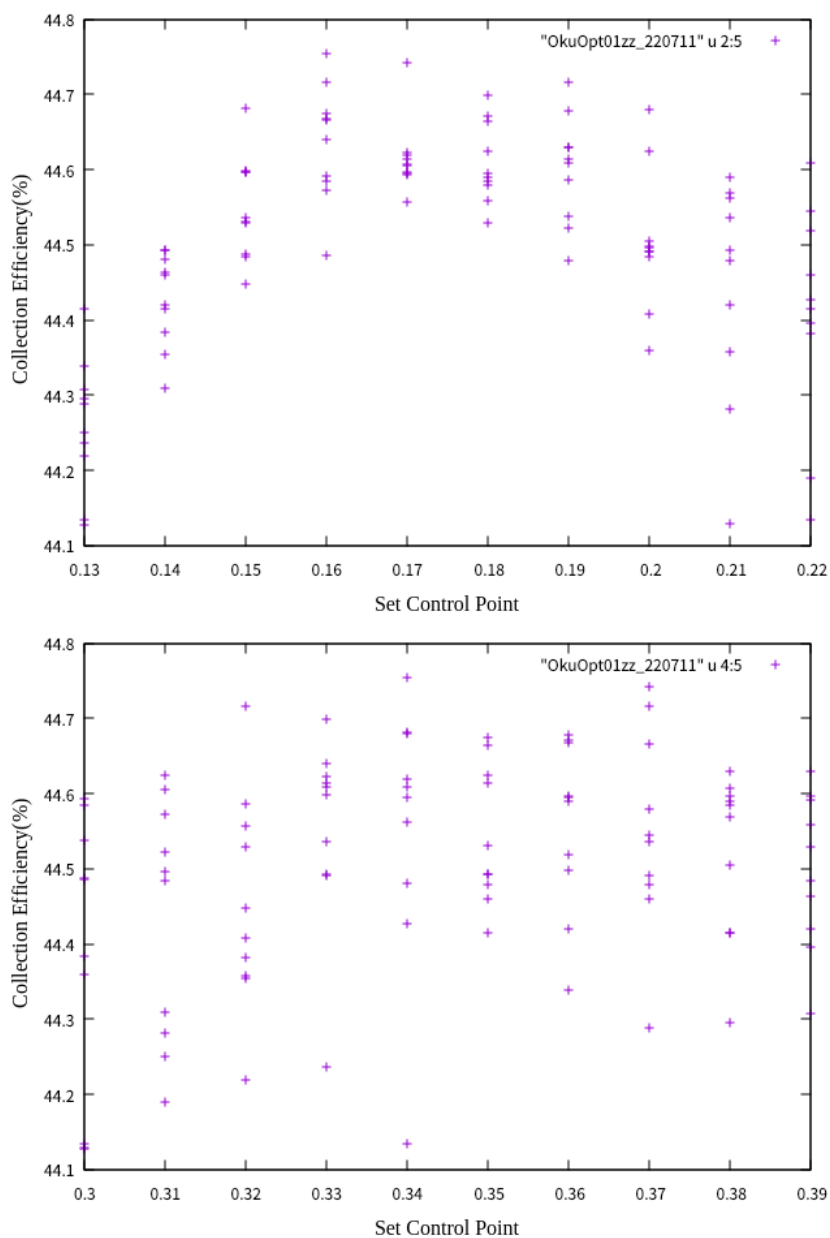


図 12. 半径 12.34mm での最適化測定の高さ (z) 方向  
(上:1 点目, 下:2 点目)

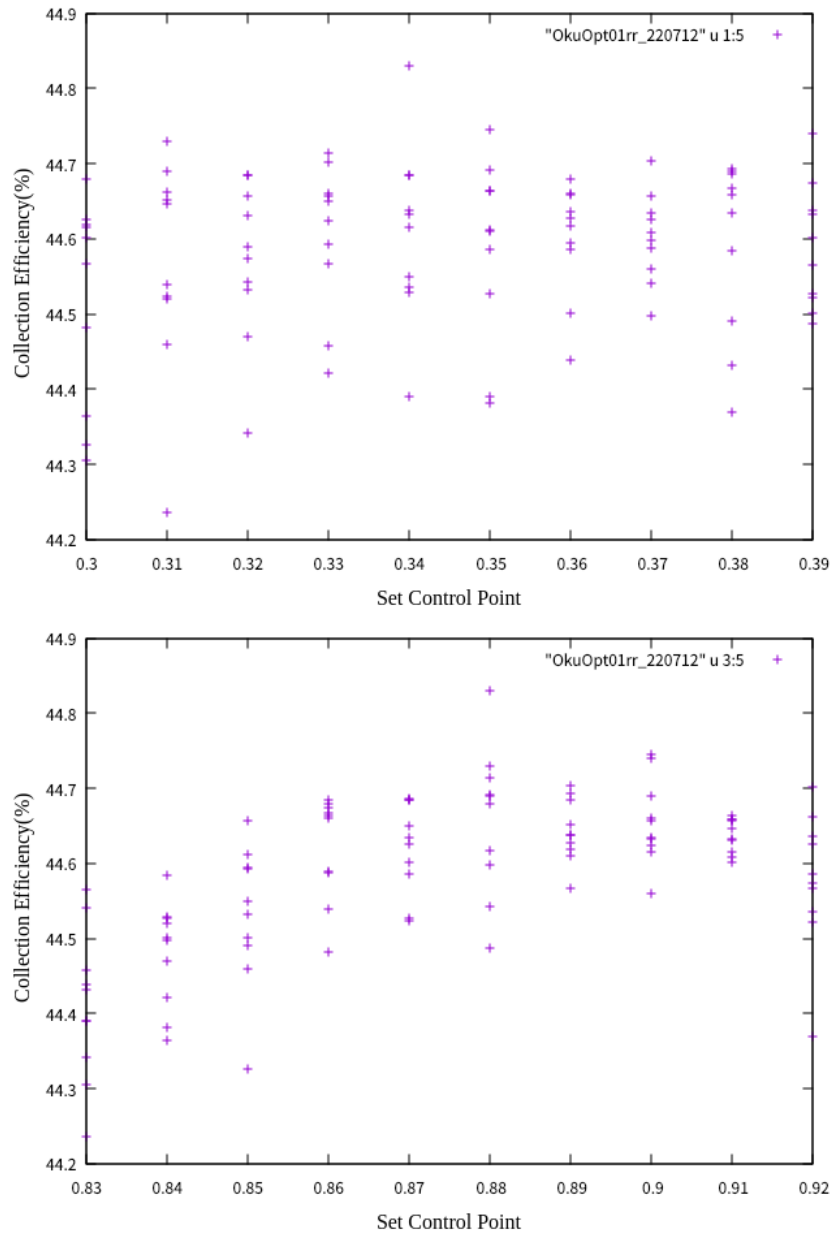
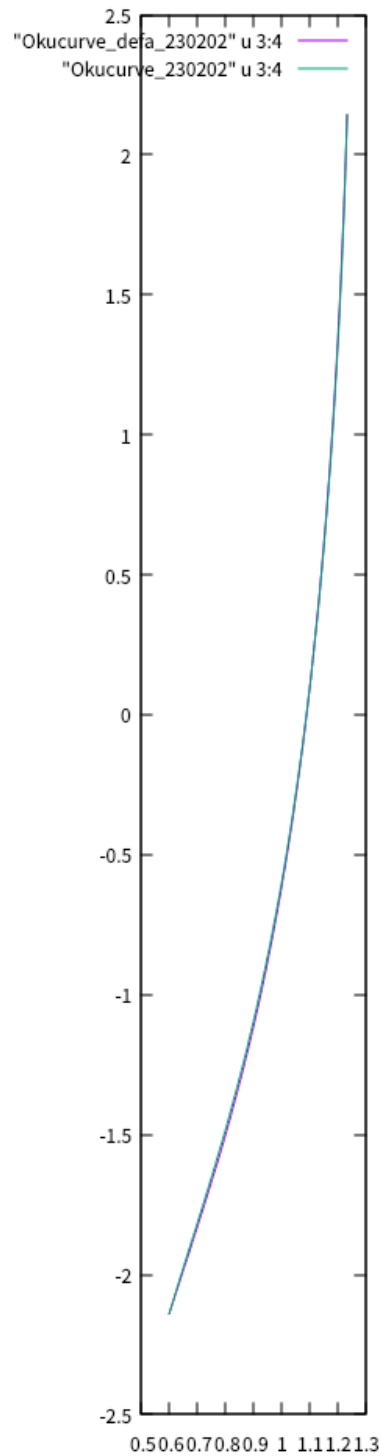


図 13. 半径 12.34mm での最適化測定の高さ ( r ) 方向  
(上:1 点目, 下:2 点目)

上のように制御点の値ごとの集光効率を測定し、グラフの山になる値を抜き出すことで、集光効率が高い制御点の座標を探し出す。結果、(0.34, 0.17), (0.88, 0.35) の 4 つの値を採用し、最適化した座標によるベジェ曲線による曲面をもった、反射鏡とライトガイドコーンの設計を進めた。





紫色の線が元のベジエ曲線、  
 緑色の線が最適化したベジエ  
 曲線である。

数値で比べても分かる通り、2  
 つのベジエ曲線はほとんど大  
 差がなく似た曲線になった。こ  
 れはコーンの高さを問わず、  
 Winston Cone がライトガイド  
 に最適な形状であると判断で  
 きる。

ベジエ曲線によるコーンの曲  
 率が決まった。コーンそのもの  
 の設計や反射鏡の取り扱いが、  
 これからの主な課題になると  
 考えられる。

図 14. 最適化ライトガイドと高さのみ変えたライトガイドのベジエ曲線

### 3 ライトガイドの試作

従来のライトガイドは、プラスチック樹脂でコーンを作り、内側に金属を蒸着させて反射鏡を作った。ライトガイドの試作品は、あくまで SiPM の性能テストが主な役割なので、ある程度の精度があればいい。しかし、金型から作る射出成型といった値段がかかる製造方法は避けたい。そこで、量産でもあまり時間がかからず、高い精度で比較的成本が抑えられる 3D プリンタで試作品を作ることにした。この場合内側の壁に使われる反射鏡は、ライトガイドコーンに多層膜蒸着ガラス鏡を接着することで代用する。

#### 3.1 設計

ライトガイドの内側の曲面の設計にあたって、AutoCAD というソフトを用いて三次元の設計図を作成。厚さ 0.16mm の蒸着鏡の接着を想定してライトガイドコーンを設計する。制作における部品の誤差は、0.1mm 前後で考える。

ライトガイドの外側は、焦点面カメラに敷き詰めることが出来るように設計する。ライトガイドコーンの材料として考えているプラスチック樹脂の 3D プリンタは、パーツの成型時に一番薄いもので 0.5mm の厚さを要求されるため、反射鏡よりライトガイドを短くし、コーンの上端より鏡がはみ出す設計を作る。そうすることで、隣り合うそれぞれのライトガイドの鏡でデッドスペースを埋め、ライトガイドの上端が 0.16mm ほどの薄さになることで、入射光がライトガイドの入口に入る確率が高くなる。本研究で運用予定の SiPM は、12.6mm 四方の受光面と、1.55mm の厚さを持つ。SiPM を基板に固定し、基板とライトガイドをナットとネジで固定したい。よってライトガイドの下部に SiPM が収まるようなスペースを作り、ライトガイドを基板に固定できるように、土台になる部分にインサートナットを埋め込む。

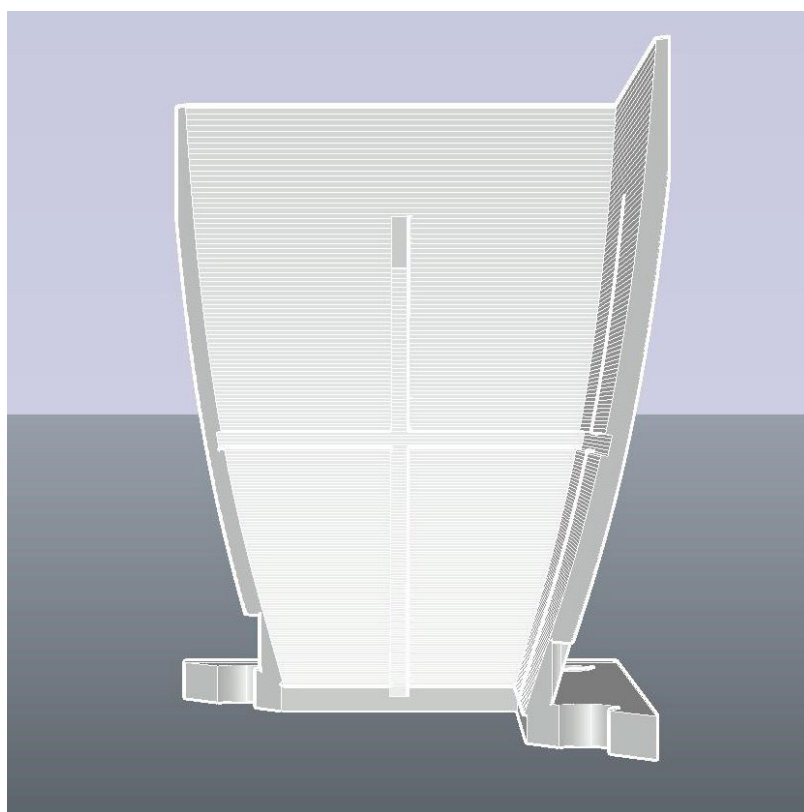


図 15. ライトガイドコーンの仮設計

コーンを作るにあたって、四方の壁を形作るパーツ(花びら)を設計した。制作過程を試行錯誤するにあたって、二つの方法を試す。一つは花びらを設計の段階で合体させてコーンを作り、それを 3D プリンタで製作する。この方法は、コーンができれば後はガラスを張り付ける工程のみだが、インサートナットを入れるためにコーンの外側を削る必要がある。もう一つは花びらを 4 つ作り、後でコーンを組み立てる方法である。四枚の花びらにガラスを張り付ける必要があるが、細かい作業に適した方法であるとも言える。コーンの組み立ての補助のために、外側になる壁に突起をつけて持ち手にする。

なおどちらの方法を採用するにせよ、鏡とコーン本体は接着剤で張り付けるため、コーンの内側に溝を作ることで、接着剤が溢れないようにする。

### 3.2 接着方法

ライトガイドコーンにガラス蒸着鏡を張り付ける。上記の通りコーンを二通りの方法で試作するので、接着方法もそれに応じた方法をとる。コーンを先に組み立てる場合は、コーンの中に鏡を差し込み、上下から 2 つで一組の治具で挟んで張り付ける。コーンの出口で鏡を固定する出っ張りがある板状の治具、上からコー

ンに差し込んでガラスを押しえつける治具が必要になる。

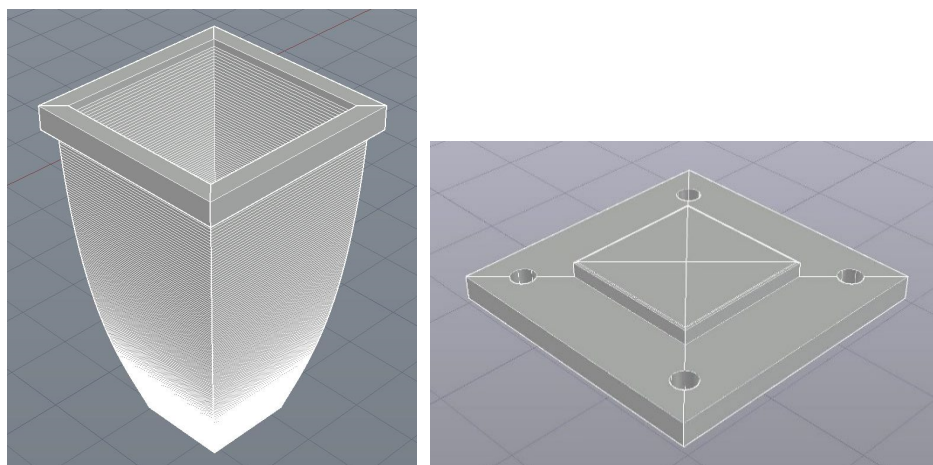


図 16. コーンを接着するための治具

右の板の上にコーンをセットし、

左の治具を上から押しこんでガラスをコーンに接着する。

後からコーンを組み立てる場合は、3つの治具を用いて花びらに鏡を張り付ける。

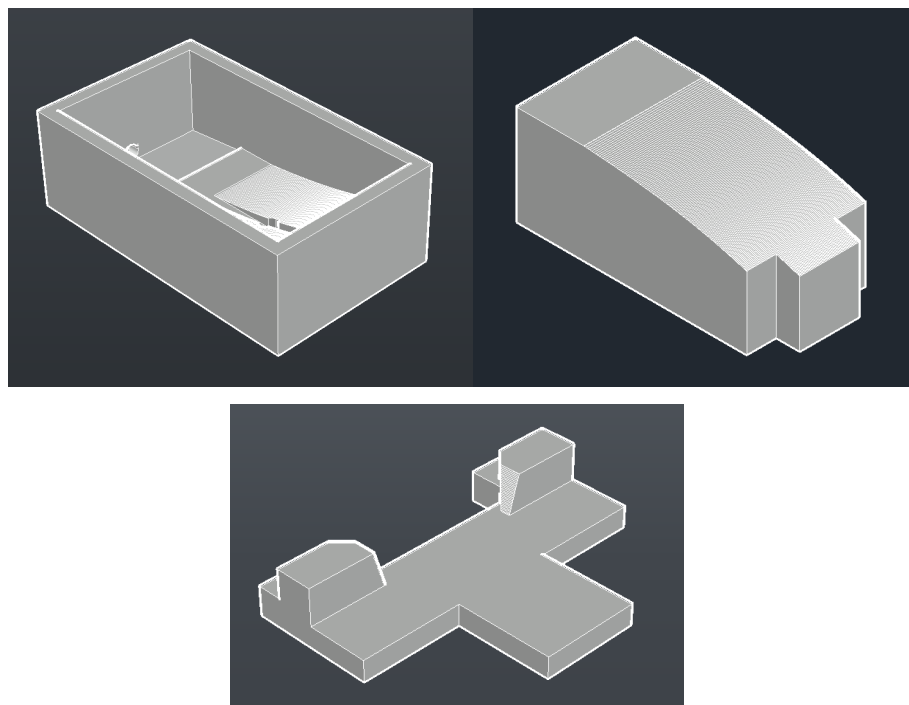


図 17. 花びらにガラス蒸着鏡を接着するための治具

上図の三つの治具より、上左の治具は花びらと鏡を入れてセットする時、上右の治具は上から被せて重りを乗せる時に使う。下の治具は出口側で鏡の接着位置を定めるための治具である。

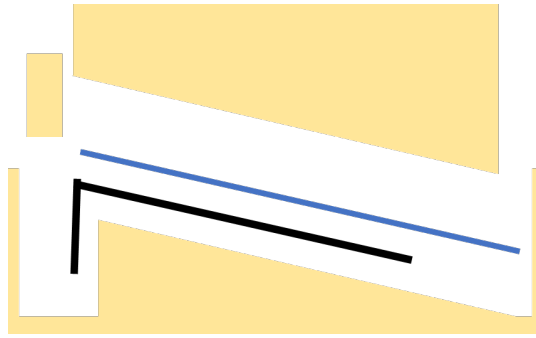


図 18. 花びらに鏡を接着するイメージ図

どちらの方法で接着するにせよ、花びらよりも鏡のほうが大きいので、鏡にあまり負荷がかからないように工夫しなければならないことである。

瞬間接着剤では、時間が経つと曲げられたガラスが元に戻ろうとして、ガラスとプラスチックの間隙が出来てしまった。代わりに接着力と耐熱性に優れたエポキシ接着剤を用いることにした。

### 3.2.1 コールドミラー

チェレンコフ光は 300~400nm 付近の波長をもつ光である。それより長い波長で入射してくる夜光や赤外線は、観測においてノイズとなる。SiPM は赤外線等の長波長の光に対する感度の高さが欠点である。ライトガイドや焦点面カメラの入射窓に、赤外線を反射するコールドフィルターを用いる考えもあったが、SiPM の場合、アバランシェ増倍が起きた時に出る二次光子がフィルターで反射して戻ってくる、オプティカルクロストークの発生が増えてしまう恐れがあったために保留となった。本研究では、コールドミラーと呼ばれる赤外線の反射量を減らす鏡を反射鏡に用いて、夜光の検出量の低減を図った。

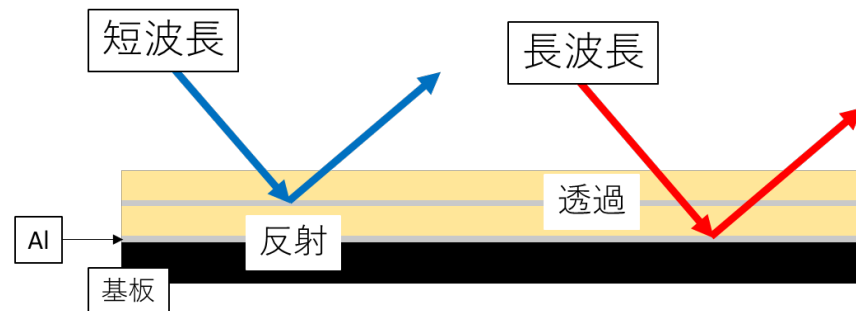


図 19. コールドミラーの断面簡略図

コールドミラーは基板の上に、光を吸収しない物質による複数の層と、アルミの薄膜の層が蒸着された鏡である。二酸化ケイ素や五酸化タンタルによる屈折率の異なる層の境界面で反射し、9層の内、2層目と6層目にア

ルミの層がある。6層目のアルミは3nmの薄さで作られており、短波長の光を反射し、長波長の光を透過する。屈折率の異なる物質に入射した光は、一部がそのまま反射し、また一部が物質内を透過する。各層界面で反射した光は、光の経路差によって干渉作用を起こし、強め合ったり弱めあったりする。これらの反射光の増減は層の厚さによって調整ができる。赤外線を含む長波長の光をカットする明確な原理は、製造元の東海光学株式会社でもはっきりしていないが、3～5層間で赤外線の吸収が起きているのは確からしく、多層膜構造からなる光の干渉によって減光しているのではないかと推察する。6層目のアルミを境に、3～5層目と7～9層目の層は、厚さを変えて作られているため、短波長の光は7～9層目で干渉を起こし強め合い、反射率は向上する。一方で、赤外線等の長波長の光は3～5層目での干渉によって弱めあい、反射率が落ちると考えられる。ライトガイドコーンの内側に合う形にガラスを切断し、多層膜蒸着してコールドミラーは作られる。コールドミラーは0.145mm(誤差0.015mm)の厚さのガラスに蒸着したものであるため、鏡を指紋で汚したり割ったりしないよう、丁寧に扱う必要がある。

	基板
1層目	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (密着層)
2層目	AL
3層目	SiO <sub>2</sub>
4層目	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
5層目	SiO <sub>2</sub>
6層目	AL
7層目	SiO <sub>2</sub>
8層目	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
9層目	SiO <sub>2</sub>
	空気

表 3. 多層膜蒸着鏡の層

### コールドミラーの反射スペクトル No2

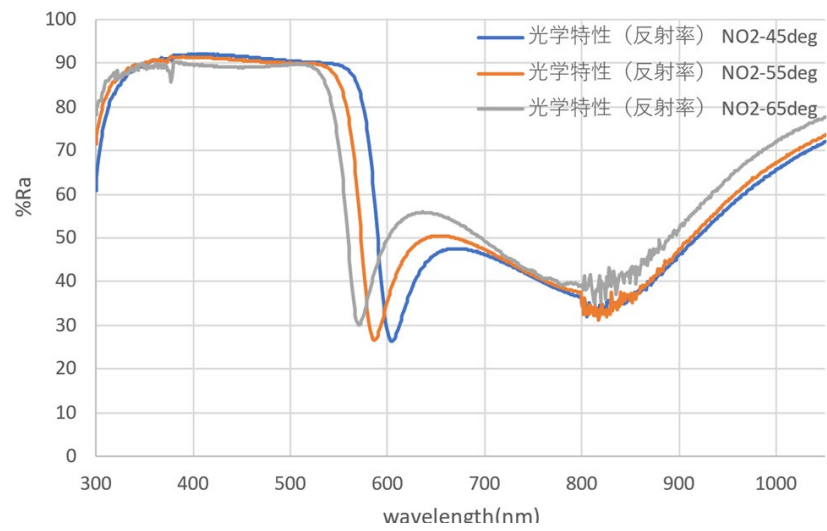


図 20. コールドミラーの光の波長による反射率  
(番号は蒸着ドーム内での設置場所の区別)

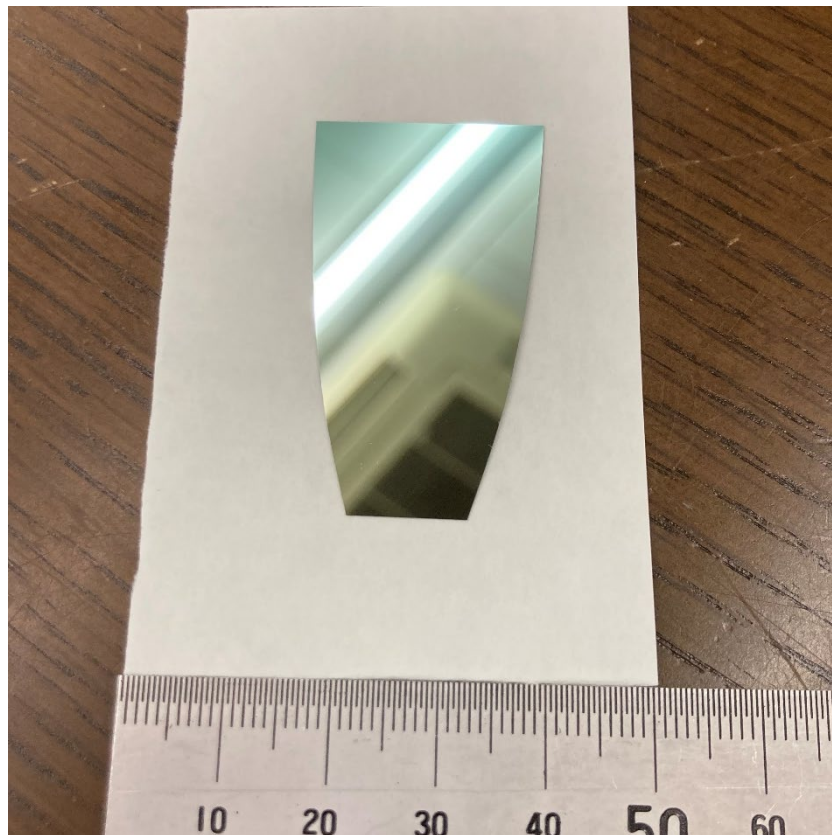


図 21. コールドミラーの実物

## 4 試作品の試行錯誤と評価

ライトガイドの試作にあたって、コーンをそのまま制作する方法を試す。四角錐台を基にした正方形の出口と入り口を持つコーンを3Dプリンタで制作。上下から特殊な治具で挟んで、上から重りで圧をかけてコーンの内側に接着する方法を確かめた。

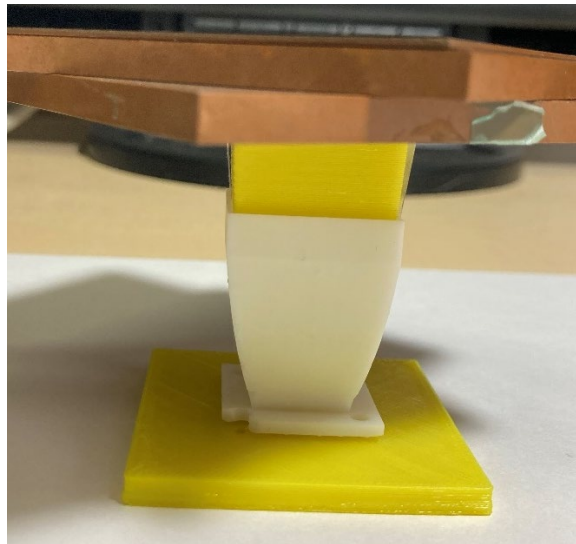


図 22. 鏡を接着している最中のコーンと治具

結果、コーンの中で鏡の端同士がこすれあい、隣り合う反射鏡の接着が出来なかった。また、ガラス鏡に対して斜めに力がかかるため、ライトガイドの出口にあたる部分が破損してしまった。縦にパーツと鏡を合わせるやり方のせいもあり、狙いの位置に接着するのは困難であると判断した。

次に、花びらを4つ制作する方法を試す。この方法は、コーンの内側に鏡を接着することを優先することができる。接着にあたって、パーツの曲面に沿って曲げた鏡を維持する必要があるため、治具の上に重りを乗せ、圧をかけながら接着する。結果として、鏡は花びらから剥がれることが無く曲面を維持させることができたと目視で判断した。



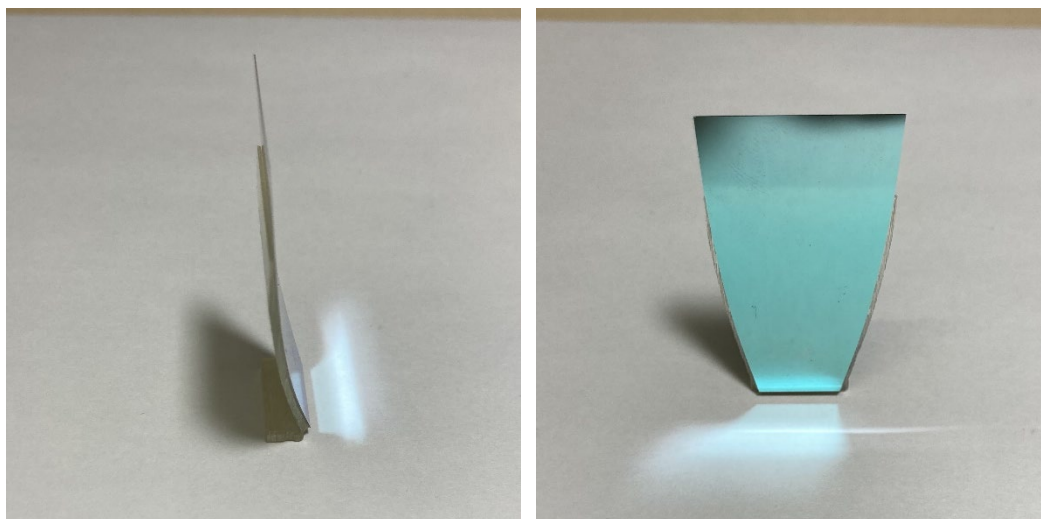


図 23. 花びらにガラス蒸着鏡を接着している最中(上)と完成物(下)

それぞれの花びらに鏡を接着してから、土台用のパーツと合体させる。花びら4枚とパーツ2つで1つのライトガイドコーンが出来る。工程と部品が増えた分、鏡の端同士を合わせる細かい調整がしやすくなった。プリンタの精度を考えて0.1mmほどの誤差を計算したこともあり、パーツ同士の組み合わせにおけるパーツの破損は無かった。

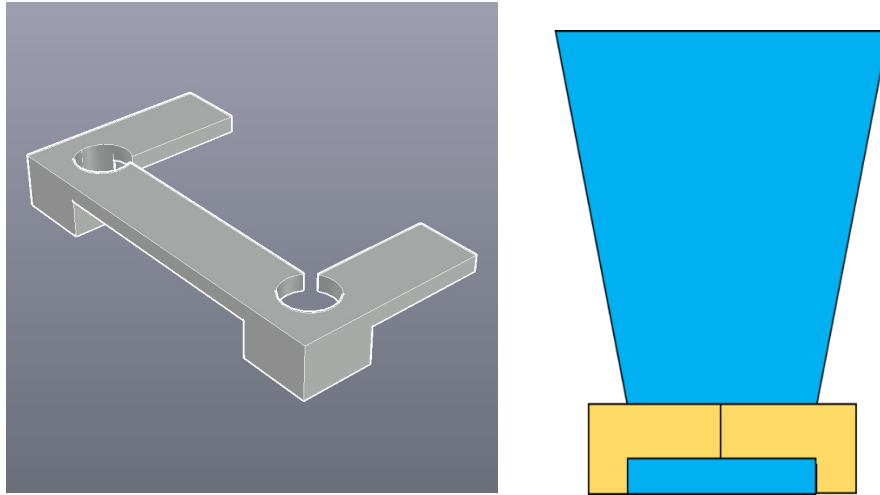


図 24. ライトガイドコーンの土台パーツと完成イメージ

コの字型の土台パーツを、正方形を作るように 2 つ組み合わせることで、花びらパーツの土台部分を固定し、コーンの土台を組み立てた。接着には、花びらと鏡の接着にも使用したエポキシ接着剤を使った。パーツを持ち上げたり、組み立て時にパーツ同士を押さえたりする時には、ピンセットを用いる。組み立てる際に鏡に触れないように、花びらの背中側に突起を追加した。

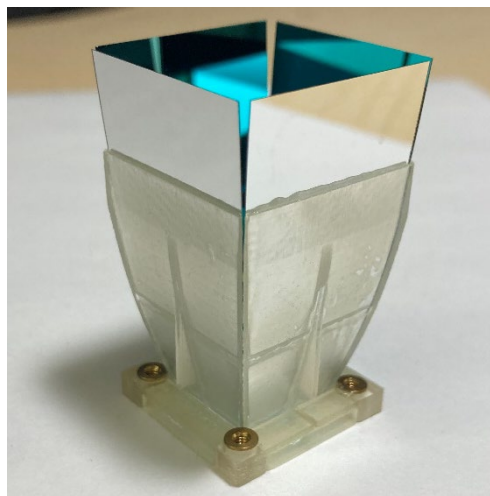


図 25. ライトガイドコーンの完成品

想定していたライトガイドコーンが完成した。接着剤で張り付けた個所が剥がれることもなく、コーン自体の強度に問題はないと評価できる。鏡の間にできてしまった隙間は、テープを張って正方形の入口を成形するか、設計の見直しを考えている。また、飛び出た鏡の強度が不安定であり、こちらもテープによる補強が必要になると考えている。耐熱性に関しては、あくまで SiPM のテストとして、短時間での測定に使うことを考え、現段階で問題はないと判断した。

## 5 結論と今後の展望

本研究では、新型 SiPM 用に設計したライトガイドの設計と試作を行った。コンピュータシミュレーションによって、視野角を最適化したライトガイドを設計した。制作の際に 3D プリンタを使うことによって、反射鏡と合わせて 1 つのライトガイドコーンを 2 万円ほどに抑えることができた。SiPM の短所の一つに赤外線への感度の高さがあつたが、その赤外線を減光できるライトガイドを設計できたことも大きい。

このライトガイドの設計や試作案は、SiPM と望遠鏡に実際に取り付けられ、SiPM の性能テストに用いられる予定である。ただ SiPM がまだ製品化されていないため、実際にこのライトガイドを用いた検出効率測定はもう少し先になると思われる。SiPM の性能テストにより、ライトガイドの改善点や改良案が出てくるものと考えつつ、現段階ではライトガイドの試作品を完成させ、これを修士研究とする。

## 謝辞

CTA の重要な研究である大口径望遠鏡のための SiPM モジュールの開発、それに関係するライトガイドの設計という課題に挑戦させていただきました。指導主任の山本常夏教授や、SiPM 用の設計についてアドバイスをくださった、CTA-Japan の方々には深く感謝しております。特に山本教授には、普段からコンピュータシミュレーションの取り扱いや、研究内容の記録、まとめ方について親身に指導していただきました。本当にありがとうございました。他研究室の教授方々にも普段から気にかけていただき、部品の注文や設計の外注において、学内の職員の方々にもお世話になりました。ありがとうございました。

名古屋大学の奥村暁様とは、ライトガイドの設計、それをもとにした 3D プリンタによる試作と、ご助言とご協力をいただきました。また、東海光学株式会社のコールドミラーの注文にあたって、担当してくれました西本圭司さんに感謝しています。他にも多くの方々に支えていただき、本修士論文を完成させることができました。ありがとうございました。

最後に、大学から大学院へ進学し修士論文に苦戦していた自分を、いつも支えてくれた両親に感謝いたします。

## 参考文献

- [1]. CTA-Japan, URL:<http://www.cta-observatory.jp/>.
- [2]. CTA 計画概要, URL:<http://www.cta-observatory.jp/overview.html>.
- [3]. 「Cherenkov, Telescope, Array, 計画書」, 2014.
- [4]. CTA-Japan, Internal Site, 「Light Collection Efficiency」, URL:<http://www.cta-observatory.jp/Internal/ELEC/index.php?Light%20Collection%20Efficiency>.
- [5]. PMT について | 光電子増倍管 (PMT) | 浜松ホトニクス, URL:[https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/about\\_pmts.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/about_pmts.html).
- [6]. MPPC とは | MPPC (SiPM) | 浜松ホトニクス, URL:[https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what\\_is\\_mppc.html](https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html).
- [7]. 芳賀純也「集光器への多層膜蒸着による夜光低減手法および半導体光検出器の採用による大気チェレンコフ望遠鏡の性能向上の評価」, 名古屋大学, 2021 年度修士論文.
- [8]. 橋山和明「CTA 大口径望遠鏡のための SiPM モジュールの開発」, 東京大学, 2021 年度修士論文.
- [9]. 黒田裕介「望遠鏡構造と多層膜を考慮した半導体光検出器の特性評価」, 名古屋大学, 2020 年度修士論文.
- [10]. 田中駿也「次世代ガンマ線天文台 CTA の大口径望遠鏡用ライトガイドの量産化に向けた基礎開発」, 茨城大学, 2013 年度修士論文
- [11]. 橋山 和明「CTA 大口径望遠鏡のための SiPM モジュールの開発」, 日本天文学会 2022 年秋季年会, 2022 年 9 月 15 日
- [12]. 橋山和明「CTA 報告 196: CTA 大口径望遠鏡のための SiPM モジュールの開発」, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15 日
- [13]. 芳賀純也「CTA 報告 197: CTA 大・中口径望遠鏡のカメラの SiPM 化に向けた、集光器を用いた夜光低減手法の検討 (2)」, 日本物理学会 第 77 回年次大会, 2022 年 3 月 15 日
- [14]. 山根暢仁「次世代チェレンコフ望遠鏡 CTA 計画の小口径望遠鏡カメラに用いる光検出器の選定に向けた半導体光電子増倍素子の特性評価」, 日本物理学会 2016 年秋季年会, 2016 年 9 月 24 日
- [15]. 山根暢仁「次世代チェレンコフ望遠鏡 CTA 計画の小口径望遠鏡カメラに向けた半導体光電子増倍素子の特性評価」, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 21 日
- [16]. 田中駿也「CTA 報告 62: CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの試作機性能評価及び大量生産に向けた開発」, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 9 月 20 日