

# CTA 大口径望遠鏡のためのSiPM モジュールに装着する集光器の 開発

溝手雅也, 山本常夏

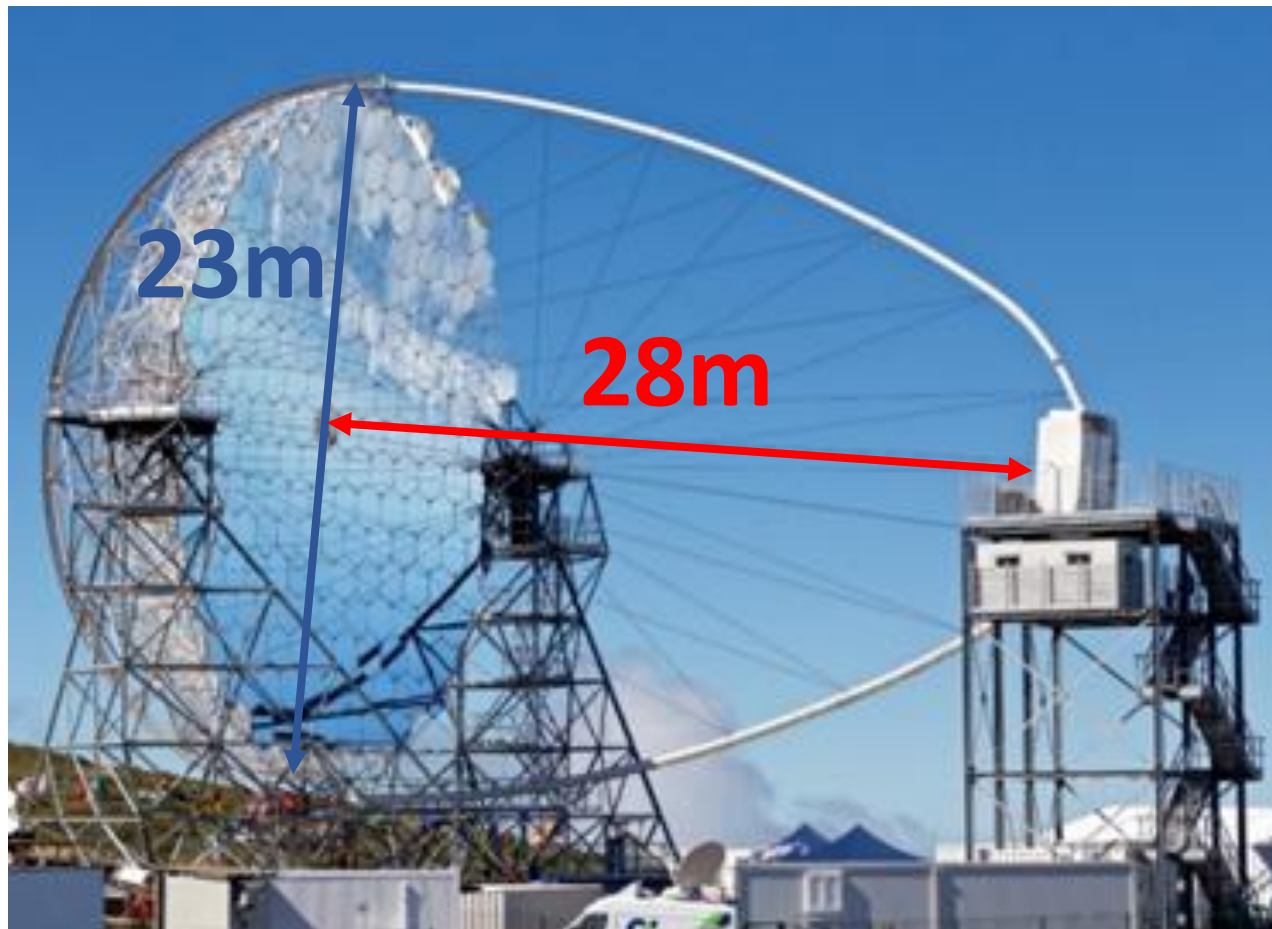
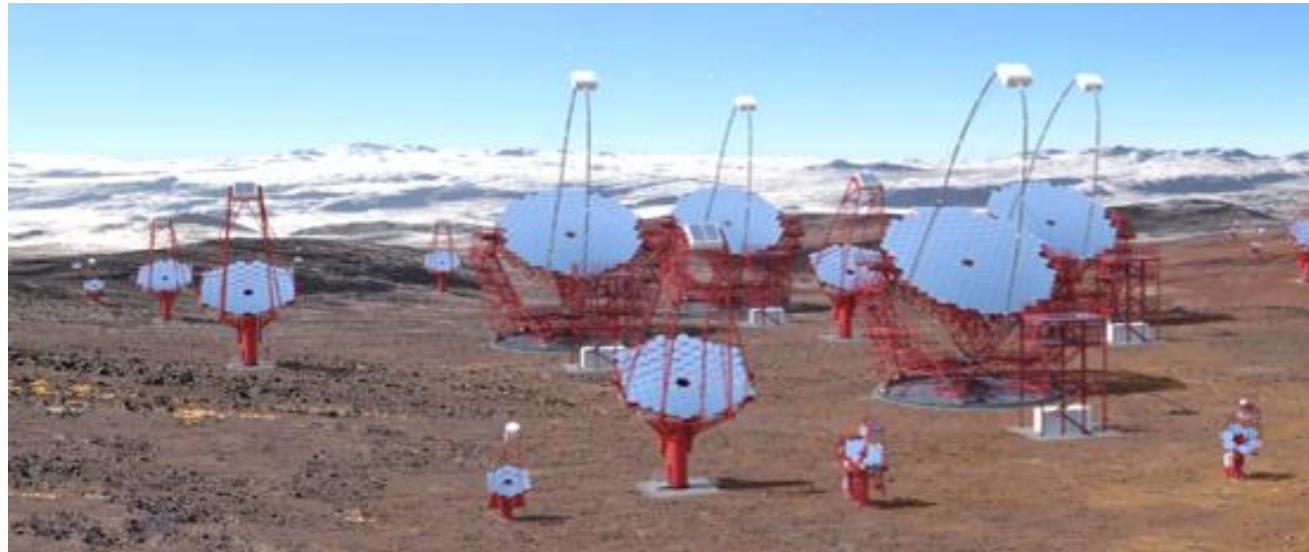
奥村暁, 田島宏康, 高橋光成, 齋藤隆之, 猪目祐介, 大岡秀行, 櫻井駿  
介, 手嶋政廣, 野田浩司, 橋山和明, 窪秀利, 岡知彦, 野崎誠也,  
Daniela Hadasch, Daniel Mazin, 片桐秀明, 吉田龍生, 寺内健太, 折  
戸玲子, 櫛田淳子, 西嶋恭司, 郡司修一, 門叶冬樹, 中森健之, 砂田裕  
志, 立石大, 寺田幸功, 田中真伸

他CTA-Japan consortium

# 概要

- CTAの大口徑望遠鏡は光電子増倍管からなるカメラを搭載している。
- 半導体検出器SiPMを使うことにより、カメラの分解能を上げることが検討している。
- SiPM間の不感領域を減らすため、デッドスペースを無くし主鏡からくる光を集めるライトガイドを取り付ける予定である。
- SiPMはノイズとなる赤外線に対する感度が高いため、長波長の光を除去する反射鏡を採用する。
- 本講演でSiPM用ライトガイドの開発状況について報告する。

# CTA、LSTについて



## チェレンコフ望遠鏡アレイ (CTA)

- 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
- ガンマ線由来の電磁シャワーで生まれたチェレンコフ光を観測
- 北半球（スペイン）と南半球（チリ）に100台以上の望遠鏡を設置
- 大きさと観測エネルギーで分けられる、3種類の望遠鏡を設置

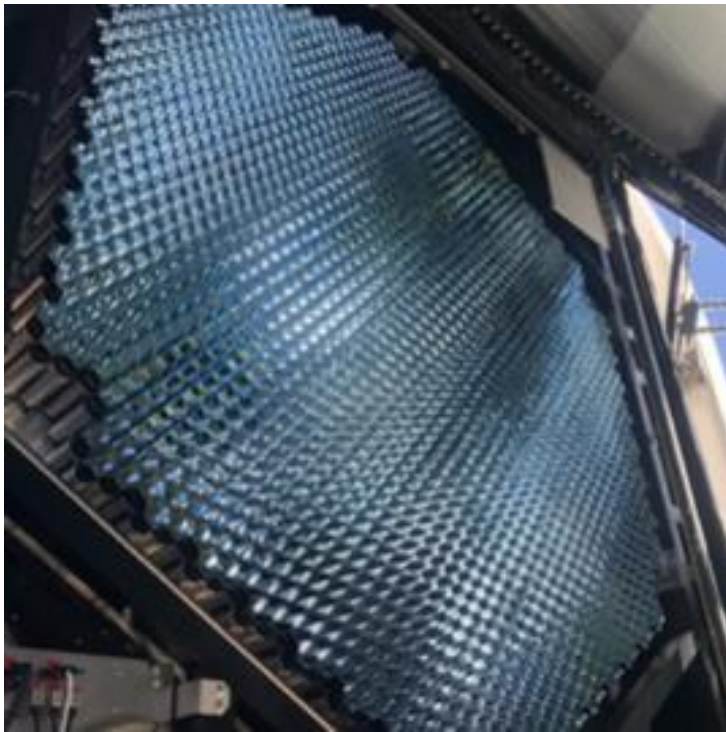
## 大型望遠鏡 (LST)

観測エネルギー領域：20GeV~3TeV

反射鏡の焦点距離：28m

反射鏡の直径：23m

# LSTのカメラ



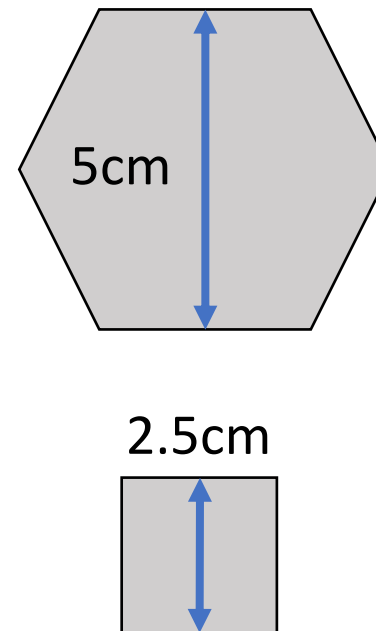
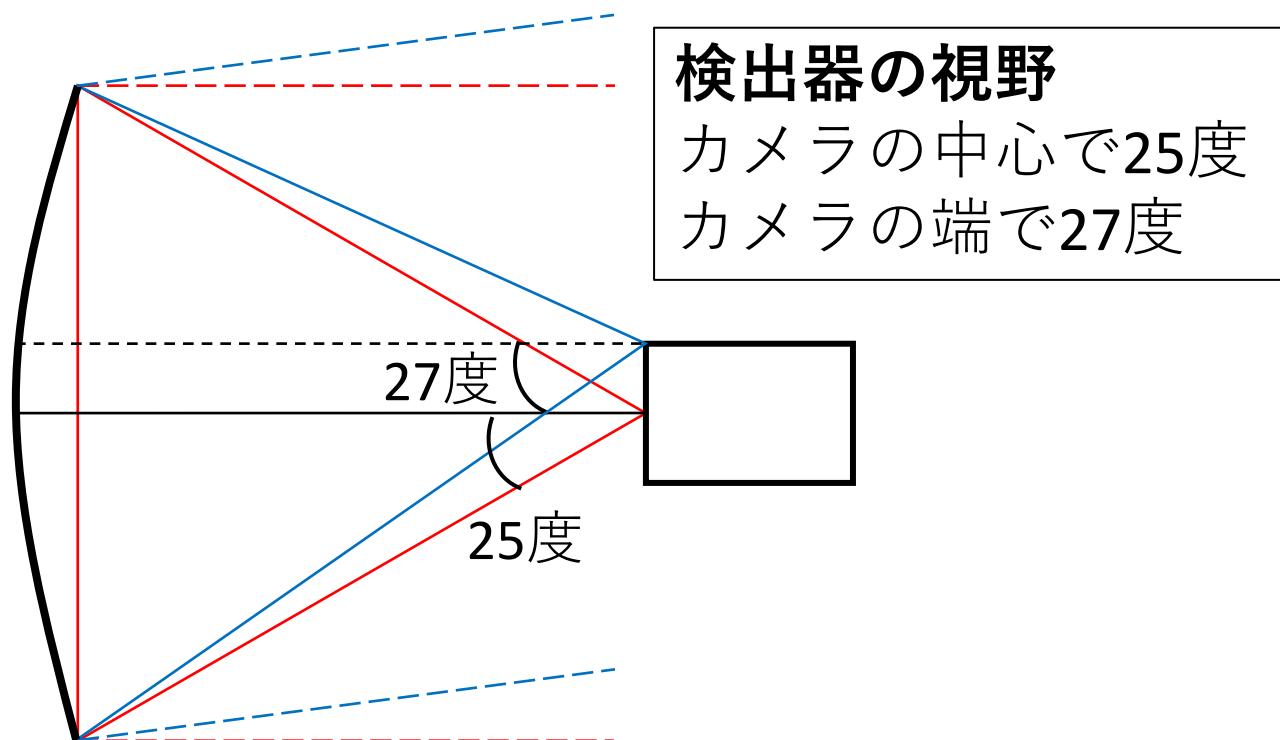
## LSTのカメラ

直径：2.5m

検出器：PMT(光電子増倍管)

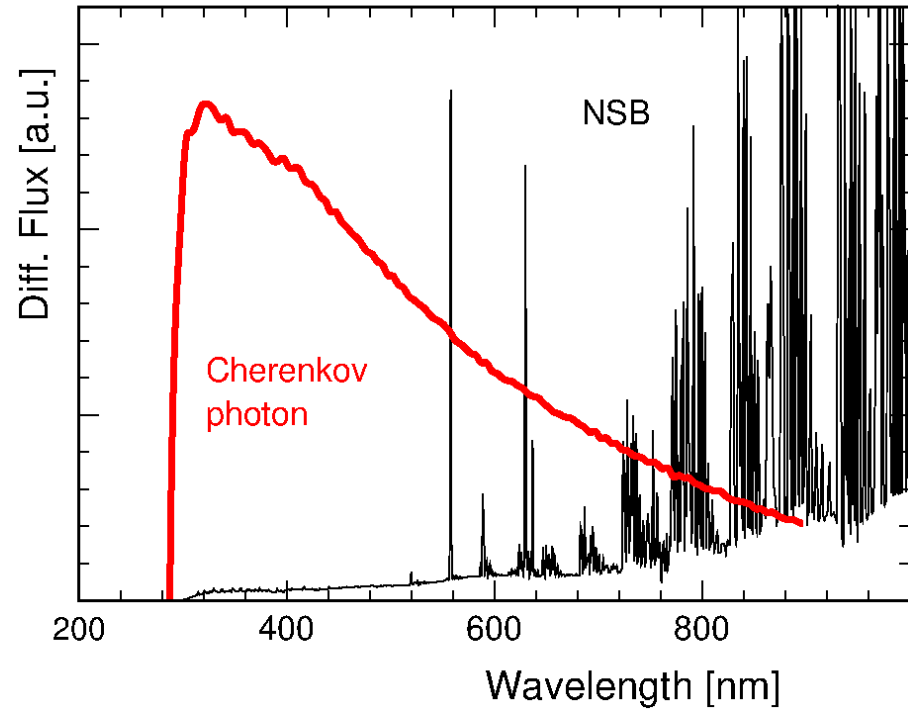
検出器の直径：40mm

検出器の数：1855本



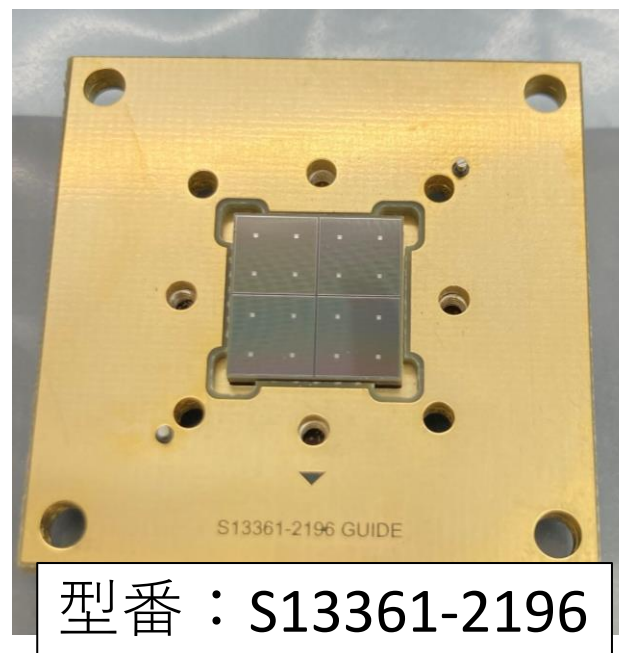
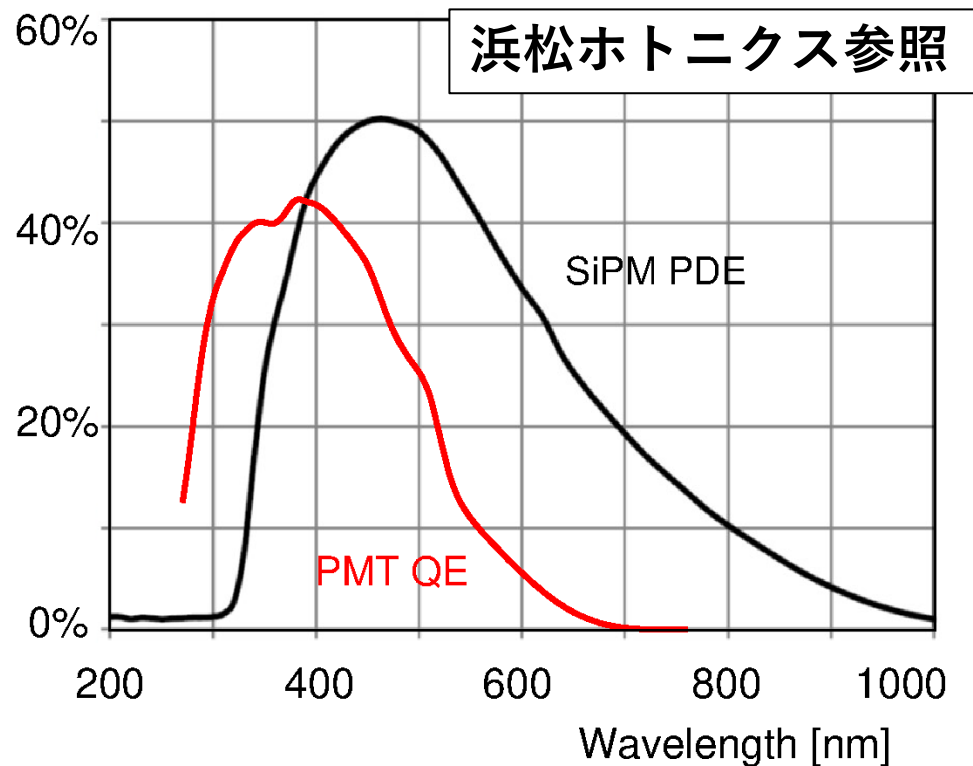
現在のカメラは1つの画素が5cmサイズの六角形。  
これを、一辺が2.5cmの正方形に置き換える計画が進められている。

# SiPM (半導体光電子増倍素子)



- 量子効率が従来のPMTの1.5倍
- 一辺が12.6mmなのでPMTより多く搭載でき、ピクセルの細分化が可能
- 動作電圧が低い

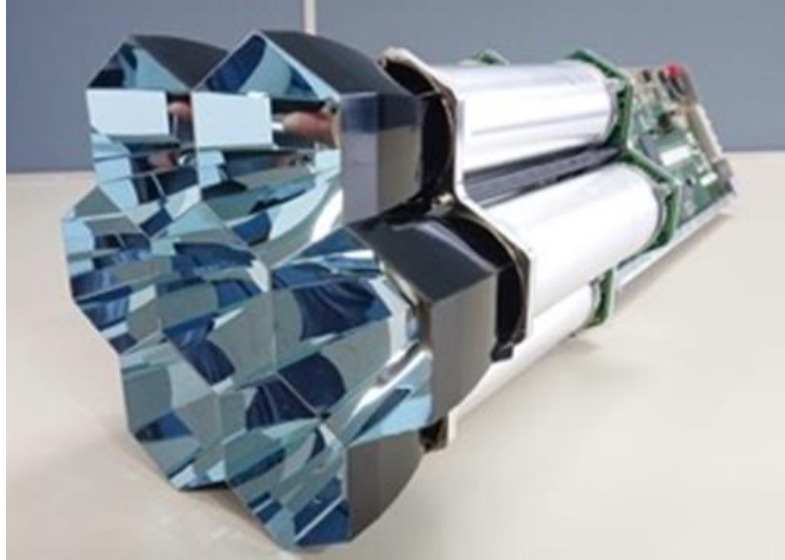
- 長波長まで感度があり、短波長の感度が無い
  - 酸素の輝線(550nm)を含む夜光がノイズ化
  - 短波長の感度は改善が進められている
- SiPM内部から出た赤外線を受け取り、光子の検出量に上乘せされてしまう



型番：S13361-2196

2023年3月物理学会、齋藤：  
「CTA 報告 210: CTA大口径望遠鏡のためのSiPM モジュールの開発(2)」より参照

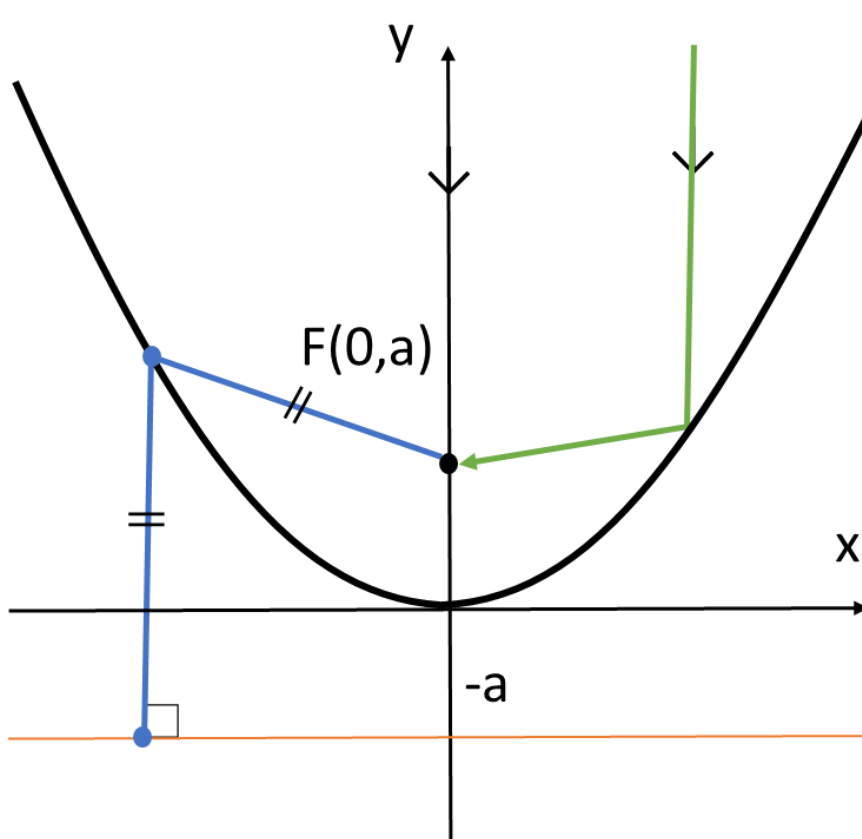
# ライトガイドの設計



## ライトガイドの役割

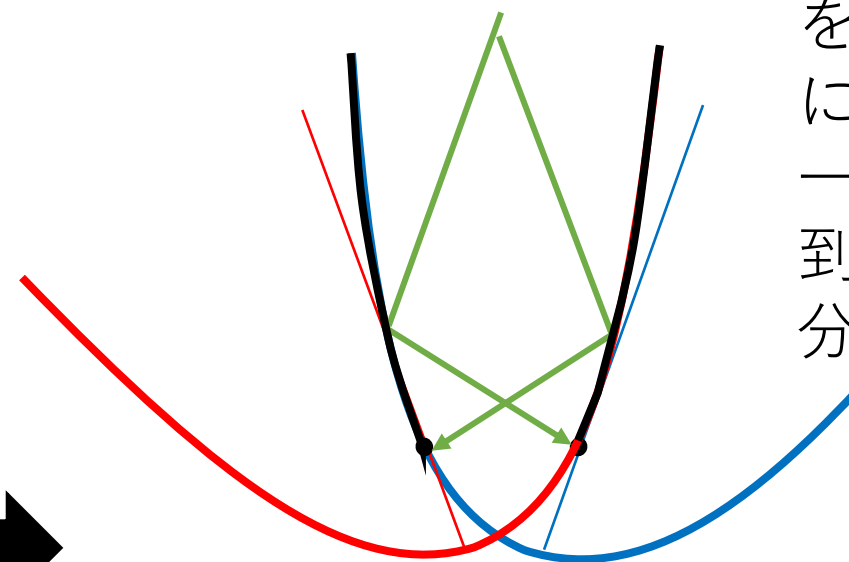
- 検出器間のスペースを埋める
- 視野の外からくる夜光や反射光を防ぐ
- 内側の鏡で光を反射させ、出口の検出器まで届ける

光子を出来るだけ多く検出するために、出口をSiPMと同じ正方形にして隙間を無くす。試作では、複雑な形状を避けるために、入口も同じ正方形にする。



## 放物線

軸に平行な線が  
焦点に集まる



## Winston Cone

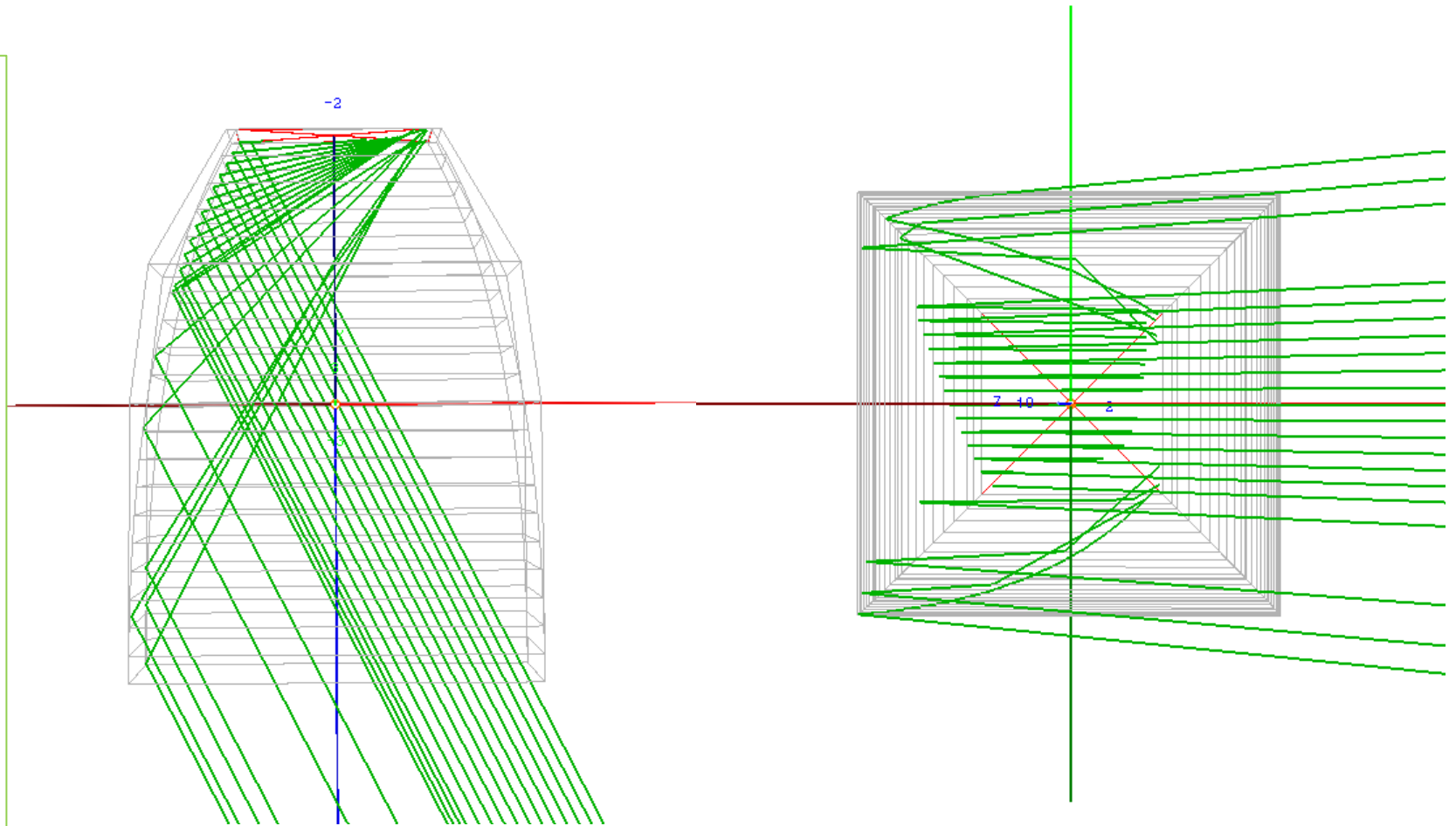
ある放物線の焦点  
を別の放物線の端  
に  
一定角度で出口に  
到達する入射光を  
分ける

# コンピュータシミュレーション

コンピュータシミュレーションを用いてライトガイドの光学系を最適化したい。

ROOT-Based Simulator  
for Ray Tracing  
=ROBAST

- ROOTベースのC++で記述されている、光線追跡シミュレータ



## 入射角27度で光を照射したシミュレーション結果

正方形の出入り口を持つライトガイドをシミュレーション上で再現し、入口から光を照射して、光の入射角ごとの光子検出効率を計算する。

この時、検出効率の方位角依存性が大きいので、角度平均する。

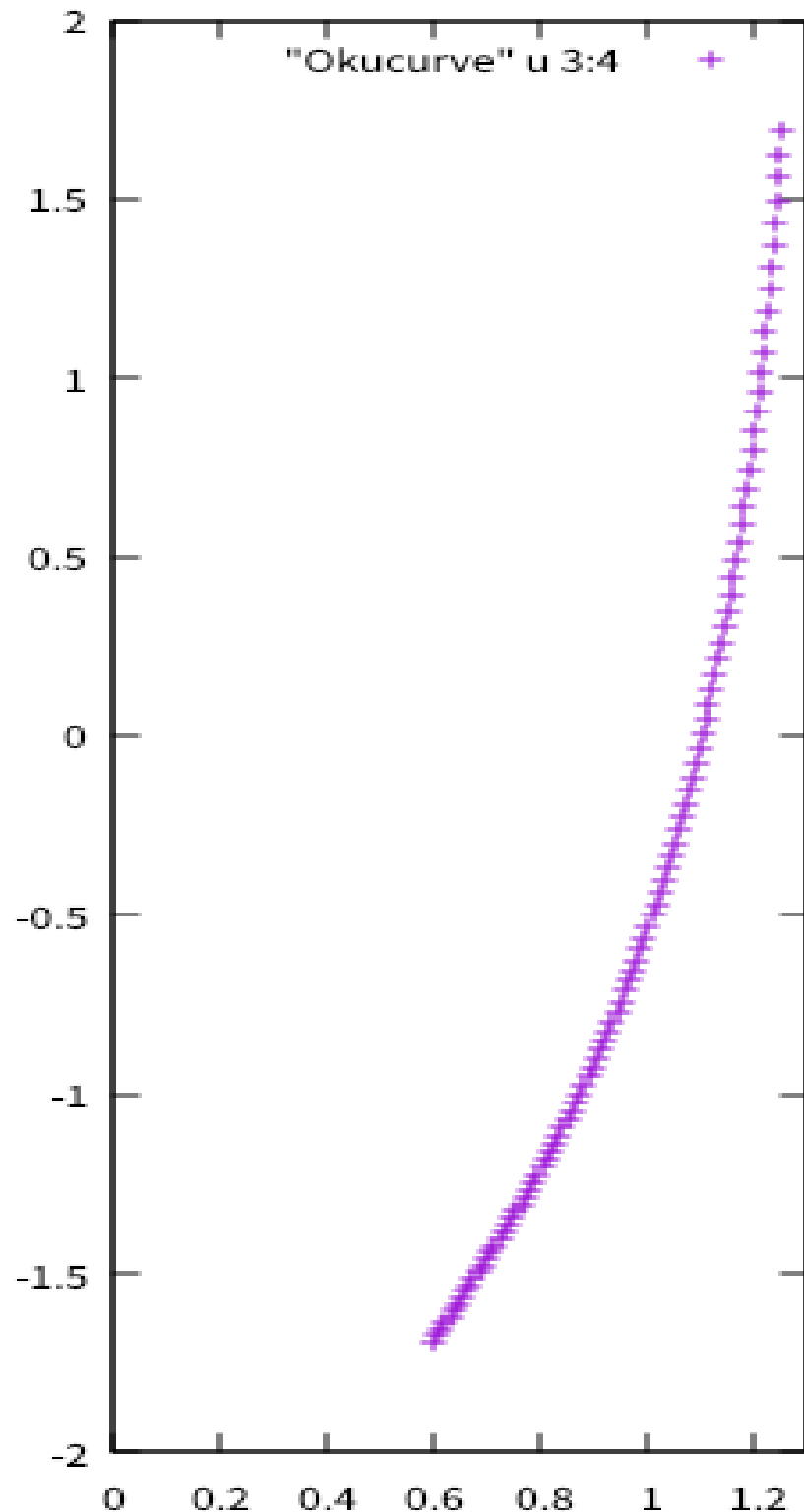
# 曲面の設計

ライトガイドコーンは、ベジエ曲線を押し出し式に伸ばして曲面を作り、曲面を組み合わせ合わせて作られている。

## ベジエ曲線と制御点

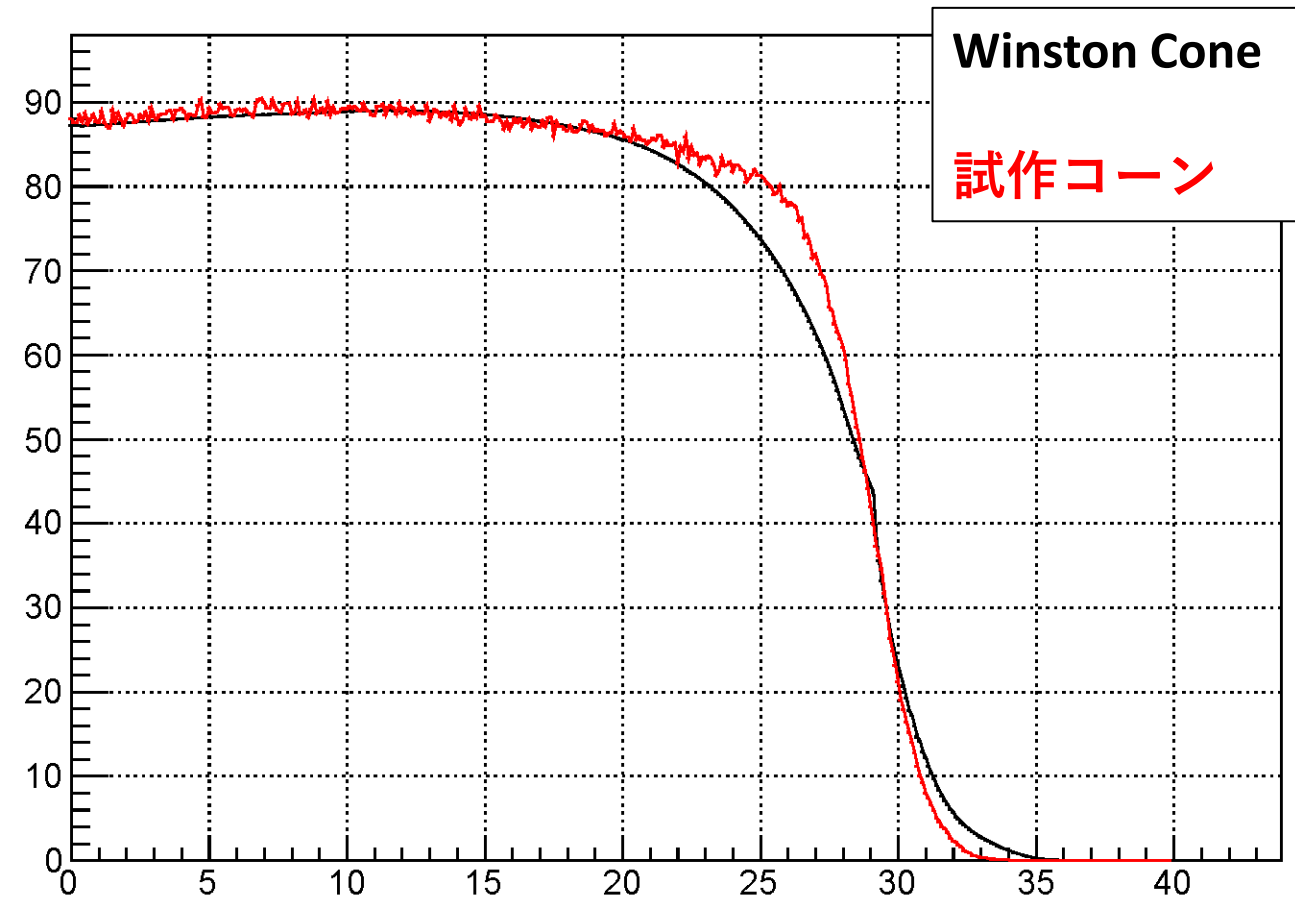
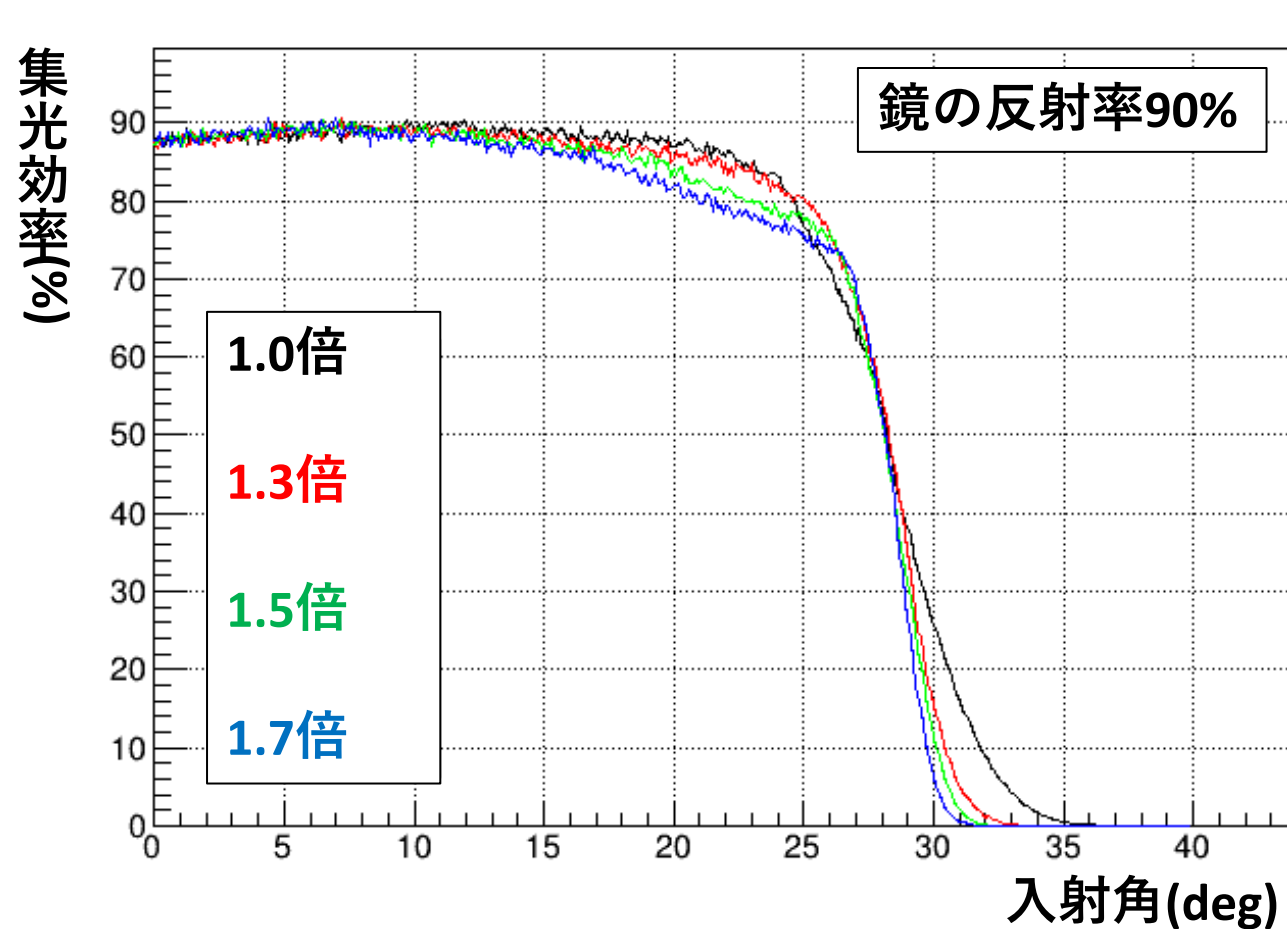
- 左のグラフはROBASTで描かれたベジエ曲線である。
  - コンピュータで曲線を描く時、いくつかの制御点からなる「ベジエ曲線」が用いられる。
  - ライトガイドの入口と出口と、編集可能な制御点2つからこの曲線は得られる。
- ベジエ曲線の制御点の初期座標の値を基準に測定し、最適化する

A. Okumura, Astropart. Phys. 38 (2012) 18-24  
“Optimization of the collection efficiency of a hexagonal light collector using quadratic and cubic Bezier curves”より参照





# 曲面の設計



- ライトガイドの視野の目安として27度での集光効率が高い条件を調べる
- 反射鏡の反射率を90%として、反射の繰り返しによる入射光の減衰の影響が小さいライトガイドの高さを見つける
  - 縮めると鋭角反射で光が外に出してしまうため、伸ばして計算する

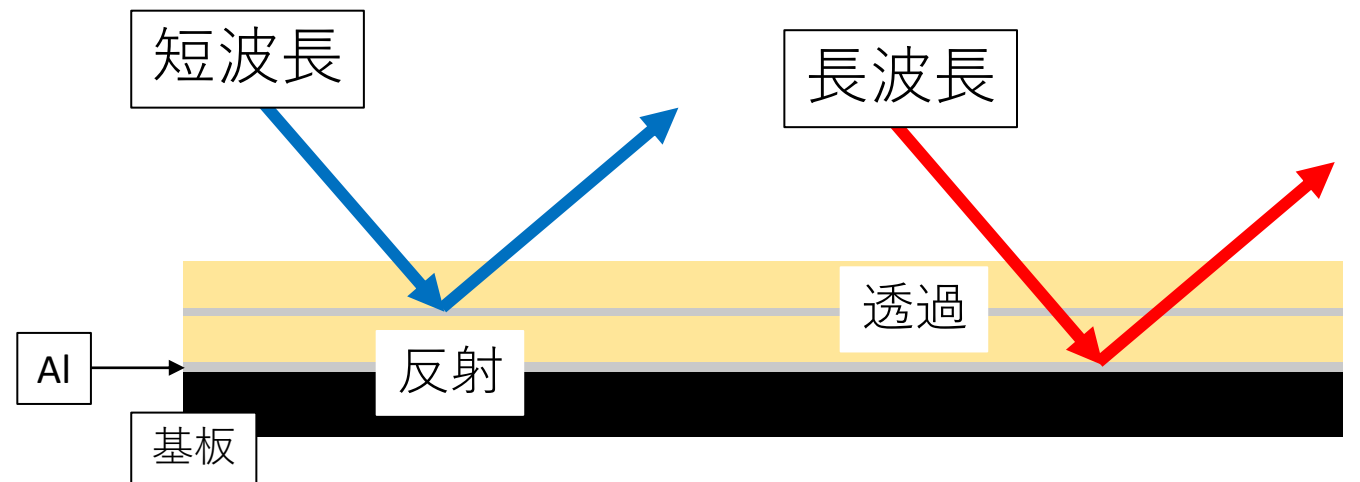
最適化した形状により、正方形のライトガイドを再現し、同じ正方形のWinston Coneと集光効率を比べた。Winston Coneと比べて25度以降の視野での集光効率が70~80%確保できた。

# コールドミラー

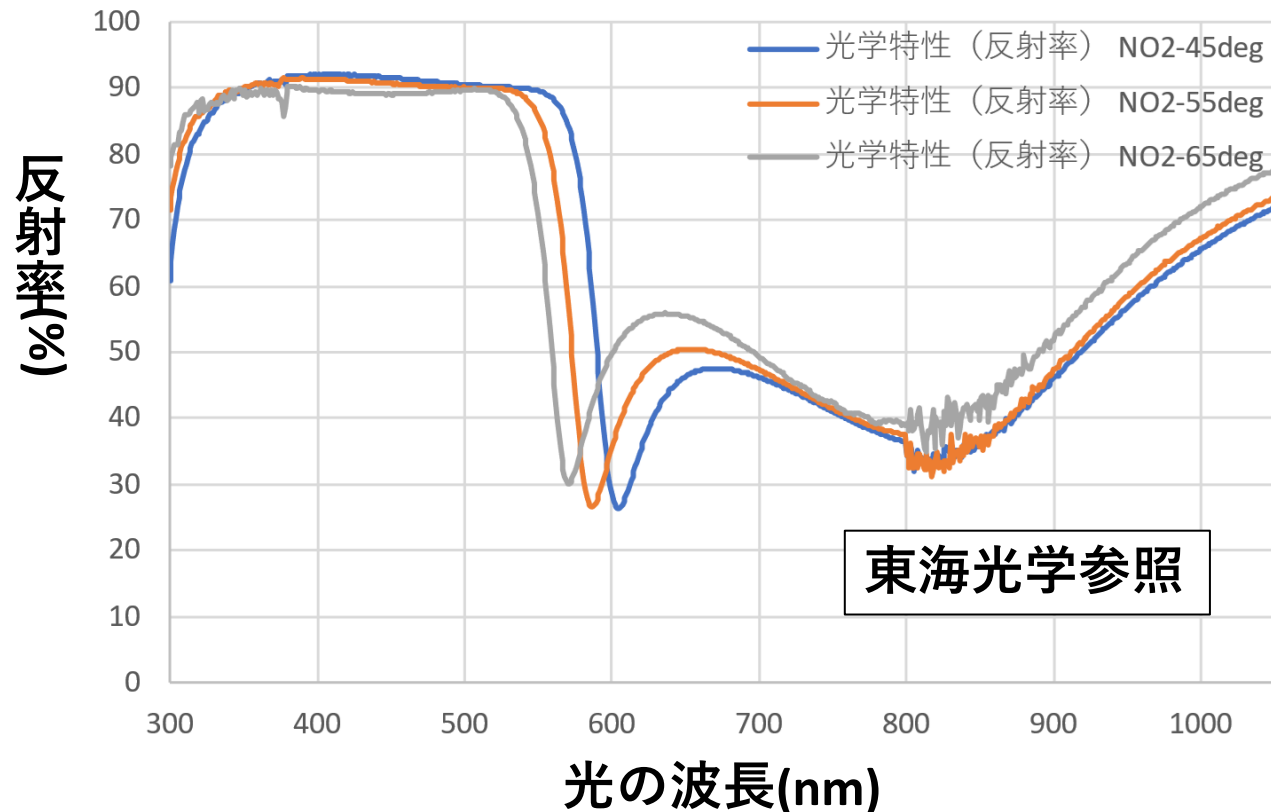
赤外線を含む、ノイズになる夜光をカットできるライトガイドを作りたい



多層膜コーティングによって、波長別の光の反射率が変化する鏡を使う



コールドミラーの反射スペクトル No2

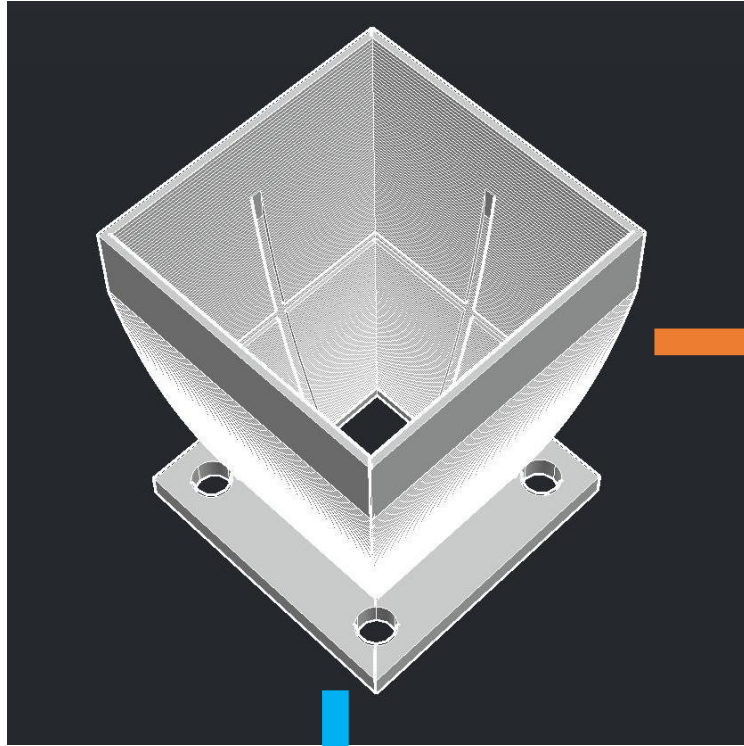


二酸化ケイ素や五酸化タンタルによる多層膜境界面で光が反射する  
アルミ薄膜で反射する光が区別される

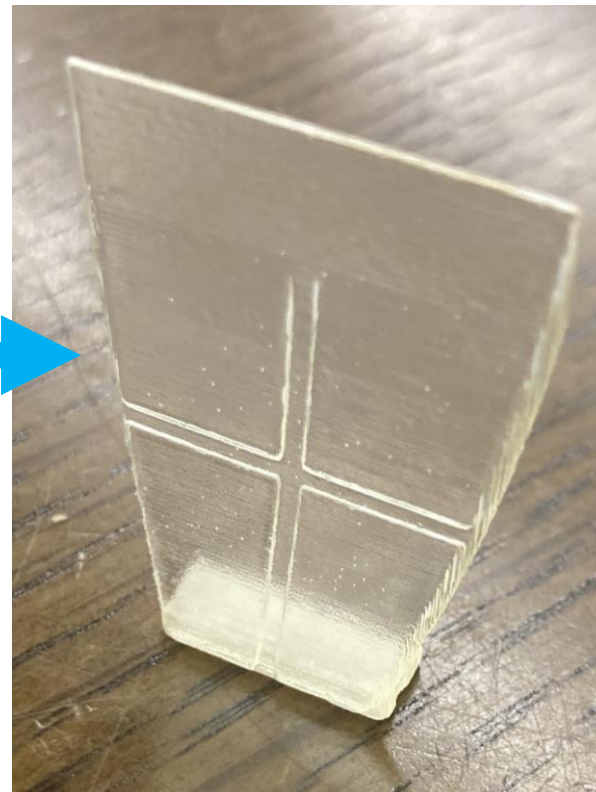
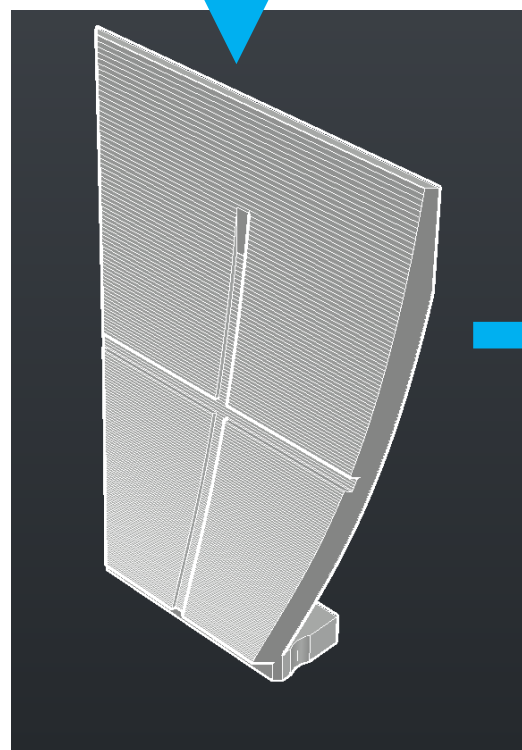
短波長の光は反射  
↓  
光の干渉によって  
増幅

長波長の光は透過  
↓  
光の干渉によって  
弱くなる

# コーンの組み立て

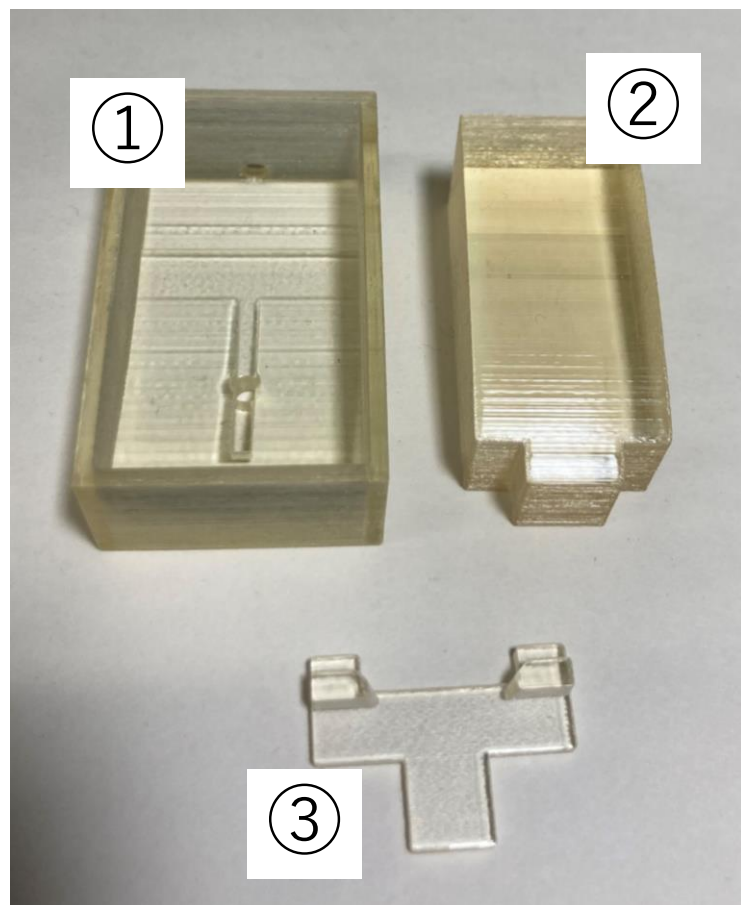


- 正方形のコーンの設計図を、AutoCADで3D化する
- 3Dモデルをもとに、3Dプリンタで成形し、安価に量産する
  - 内側へガラスを接着したいが、このままでは貼りづらい



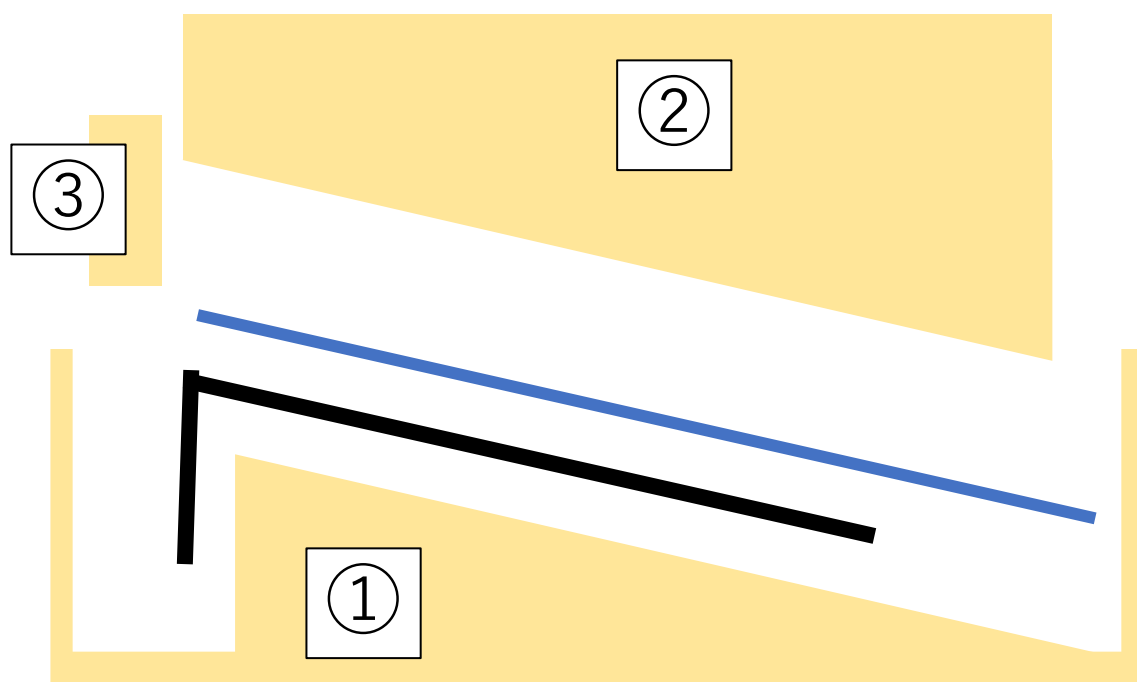
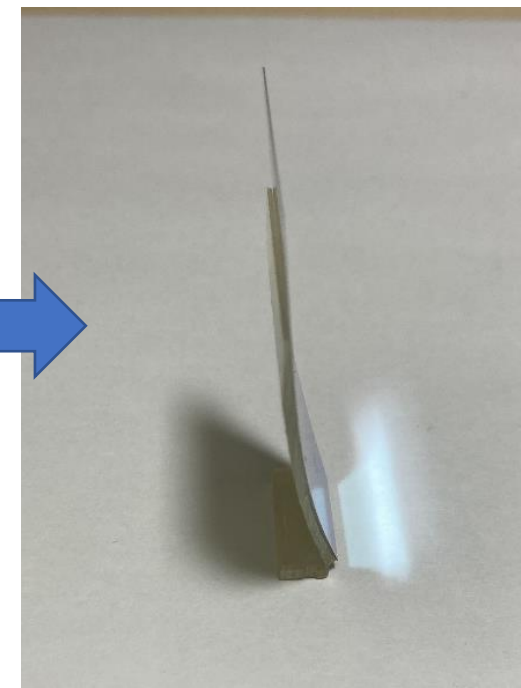
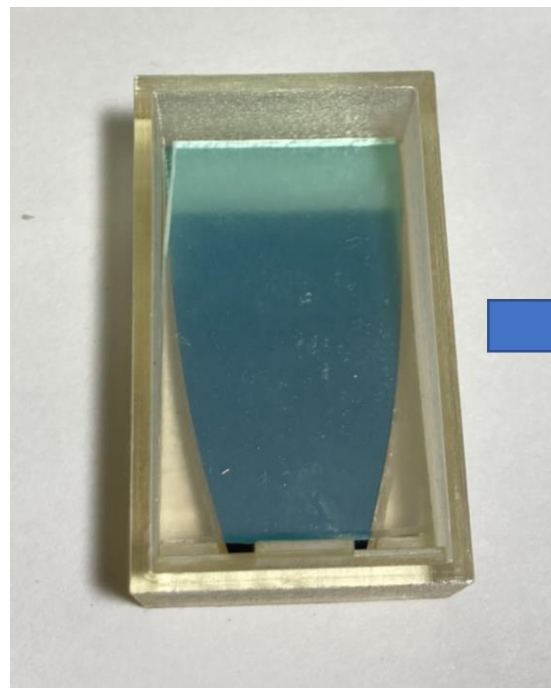
- 1つのコーンを4枚の花びら型パーツに分解
- 花びらとガラスを接着してから組み立てる
  - 接着作業の時にガラスにかかる圧の調整がしやすい
  - 隣り合うガラスの接触が調整しやすい

# 鏡の接着



## 治具

- ① 花びらを固定する治具
- ② 鏡に圧をかける治具
- ③ 花びらと鏡の端を合わせる治具



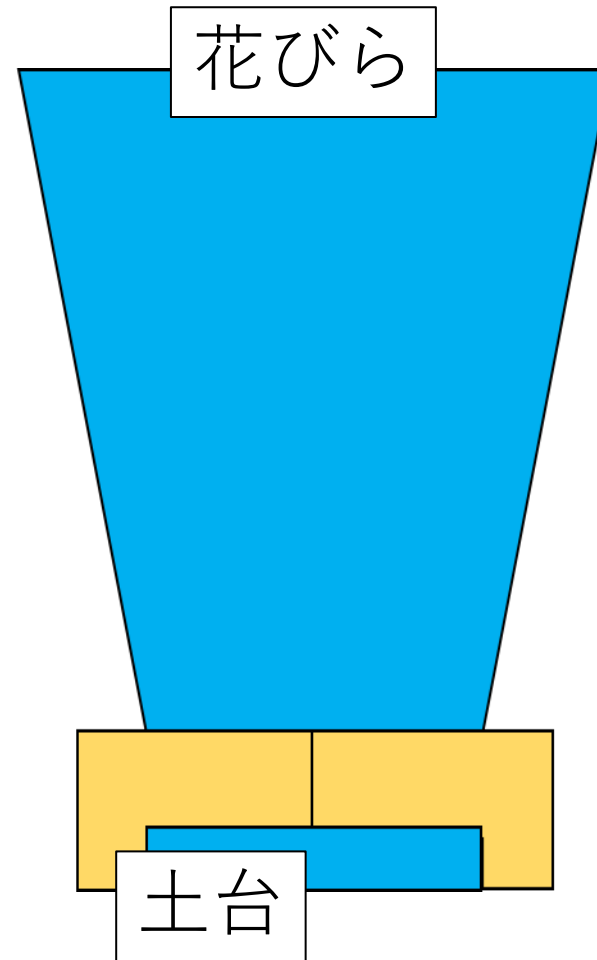
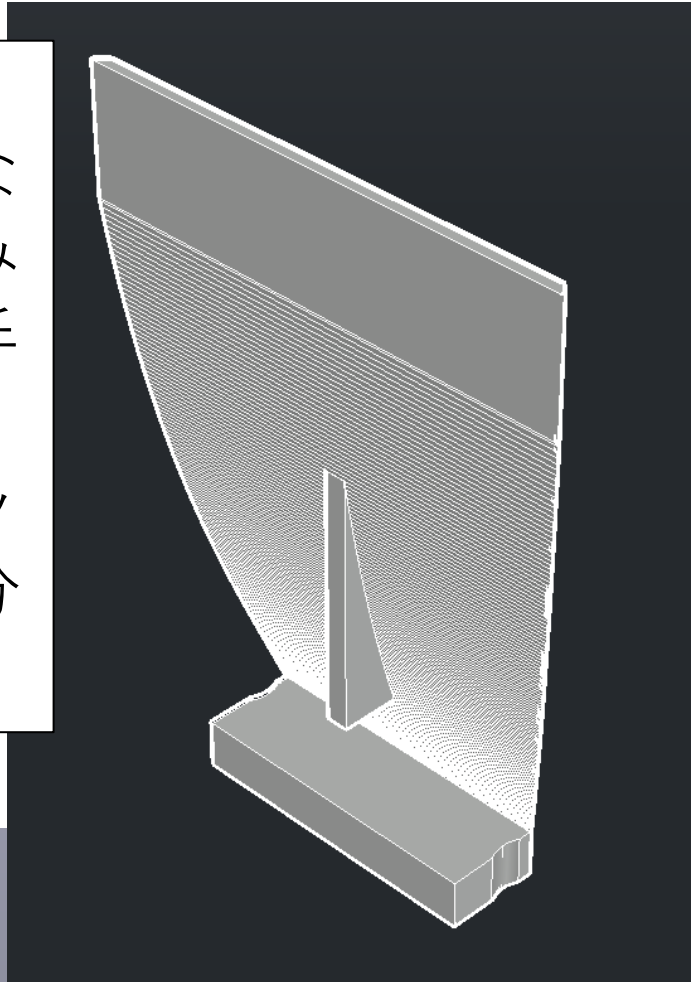
治具で固定した花びらに接着剤を塗って鏡を張り付ける

ガラスだけに圧がかからないように、重りの位置を調節する

# コーンの完成形

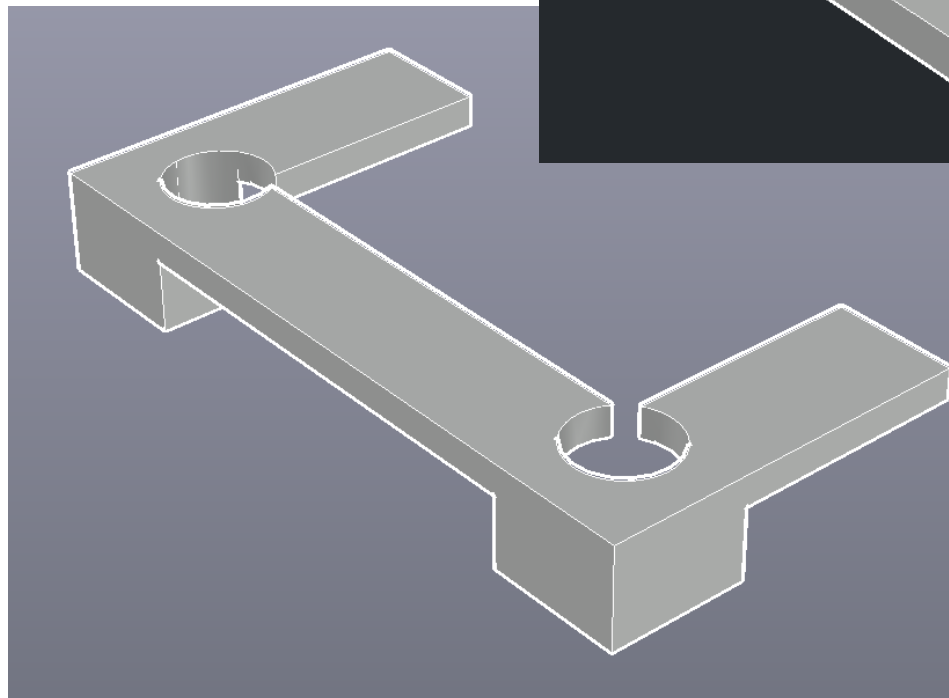
## 花びらパーツ

- ガラスに触れないように、組み立て用の持ち手を作る
- インサートナット用に土台部分を少し削る



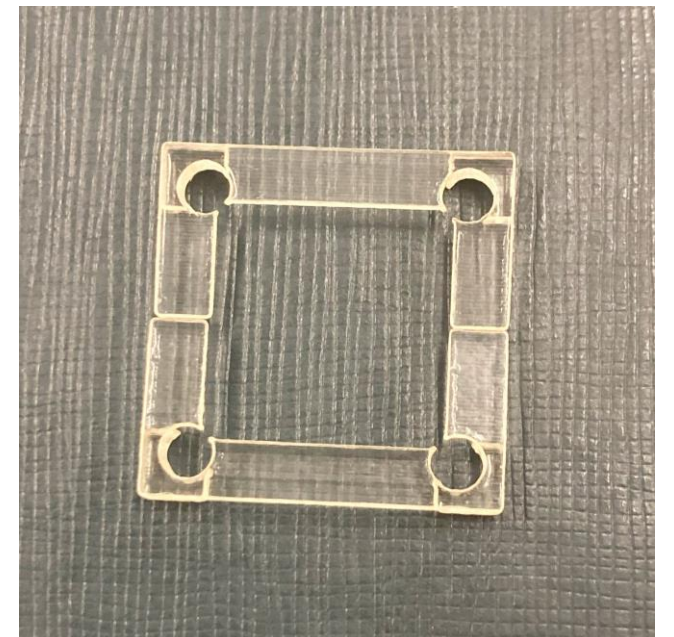
花びらの土台部分の上から土台パーツを接着

土台は2つのコの字で正方形を作るように組み立てる

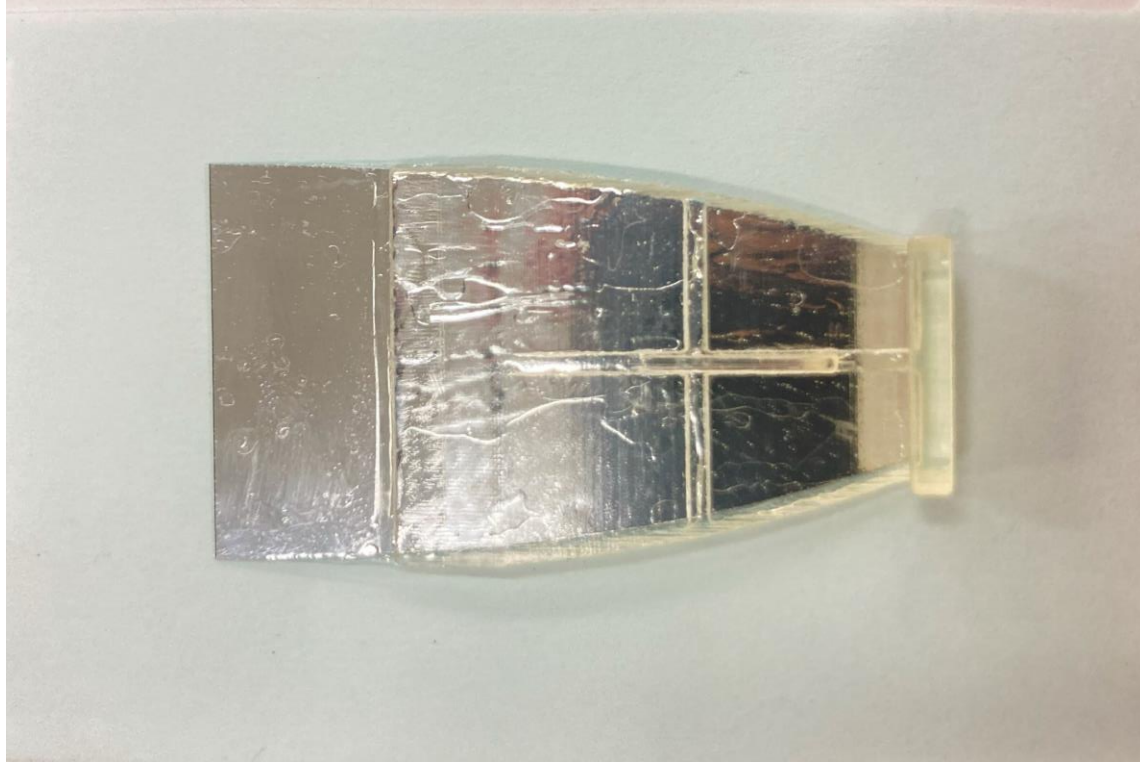


## コーンの土台パーツ

- 1つのコーンにつき2つ使う
- インサートナット用の穴を開ける



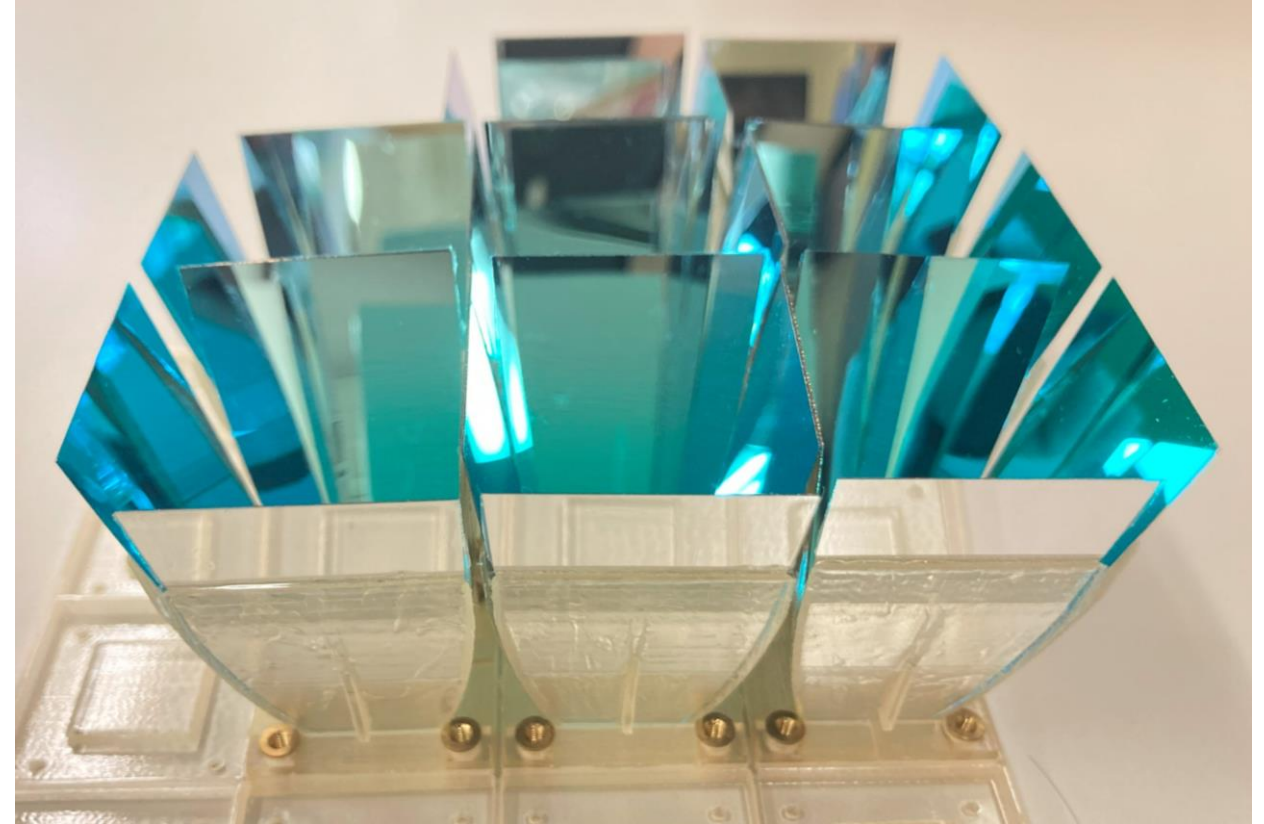
# コーンの試作品



入口側は、鏡が突き出て強度が不安定な作りになっているので、裏側のガラス部分に薄いフィルムを張り付けて補強する

## ポリエステルフィルム粘着テープ

- 寺岡製作所の製品
- 厚さは0.03mm
- 無色透明



理想として、上の画像のようにコーンを敷き詰める

上側が開いているのは鏡が元に戻ろうとしているからなので、全体の形を整える囲いパーツを作る必要がある

# まとめ

- 視野角**27度**を持つ**SiPM**用ライトガイドの試作を行った。
- ガラス蒸着鏡を曲げながら接着し、**4枚の反射鏡**を持つライトガイドの試作ができた。
- これから実際に**SiPM**に取り付けて、性能テストを行う。
- 複数の波長で集光効率を測定する。