

CTA 報告 71

CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの試作機性能評価及び形状最適化に向けた研究

茨城大学理工学研究科 田中駿也

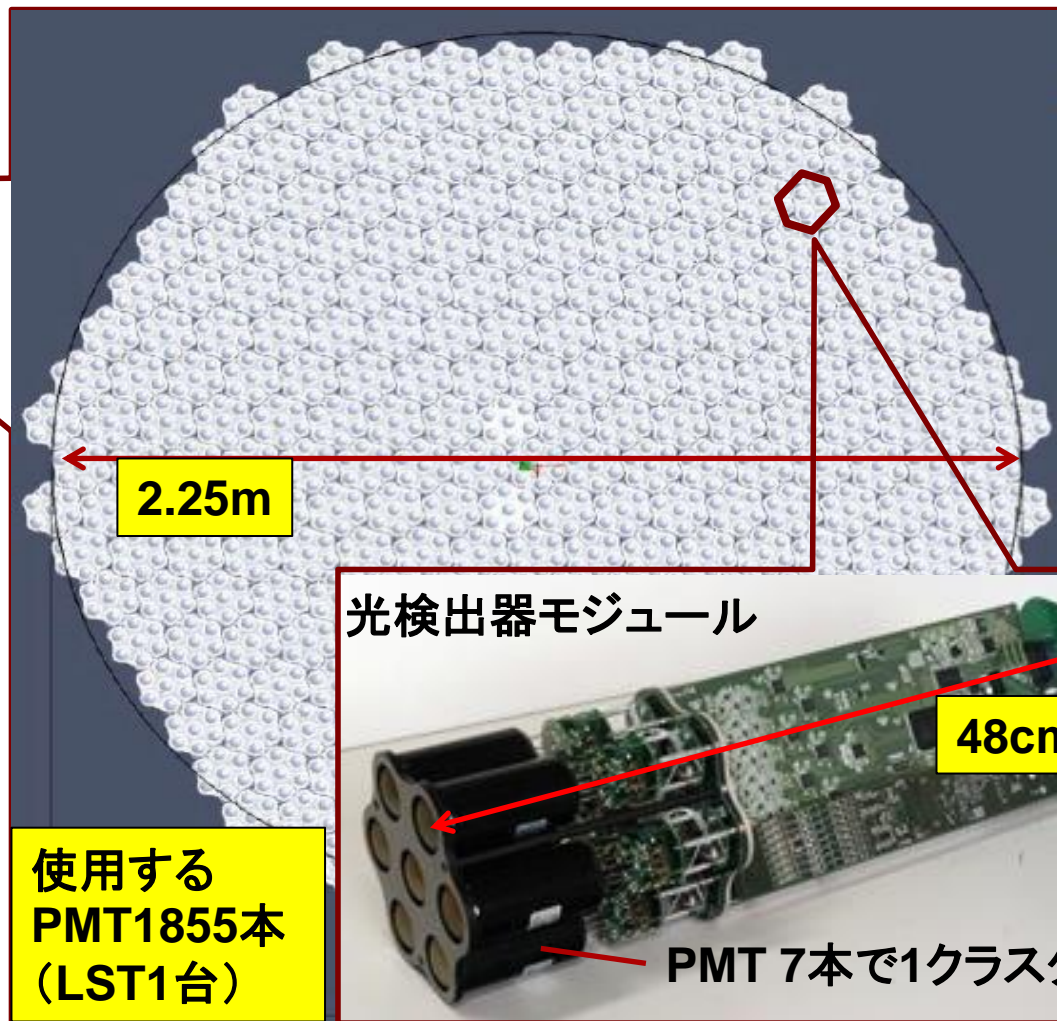
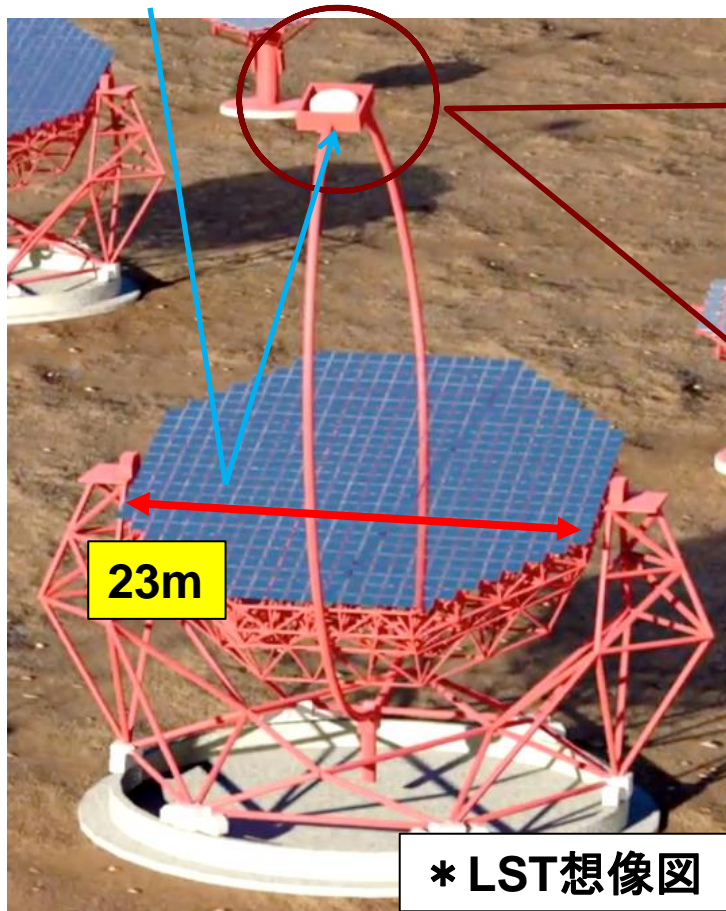
林田将明^A, 奥村暁^{B,C}, 片桐秀明, 手嶋政廣^{A,D}, 大岡秀行^A, 荻野桃子^A,
小野祥弥, 加賀谷美佳, 小島拓実^A, 齋藤浩二^A, 千川道幸^E, 中嶋大輔^A,
野里明香^E, 野田浩司^D, 花畑義隆^A, 馬場浩則, 柳田昭平, 山本常夏^F,
吉田龍生, 他 CTA-Japan consortium

茨城大理, 東大宇宙線研^A, 名大 STE 研^B, レスター大^C, Max-Planck-
Inst. fuer Phys. ^D, 近畿大理工^E, 甲南大理工^F

大口径望遠鏡(LST)焦点面

- チェレンコフ光を捉える光電子増倍管(PMT)を一面に配置

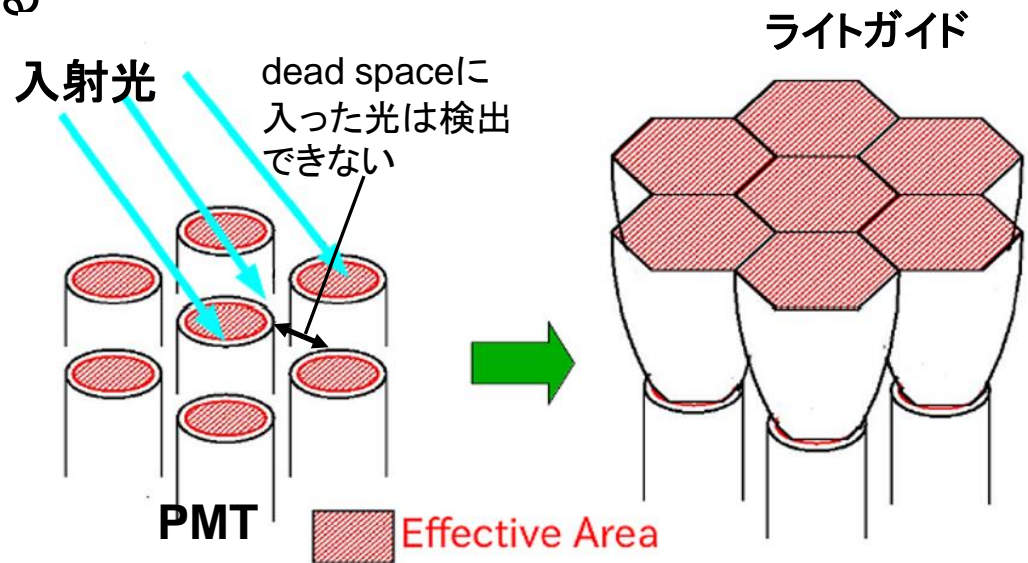
チェレンコフ光



ライトガイド

- PMTの入射窓が円形なため、PMTを隣接させて並べると隙間 (dead space) ができる

LSTに使用する
PMT



MAGIC望遠鏡
のライトガイド
反射材が貼って
あり、内側は鏡
面になっている

ライトガイドの役割

- ① **焦点面のデッドスペースを低減**
- ② 夜光などの望遠鏡視野外の光 (バックグラウンド) を低減

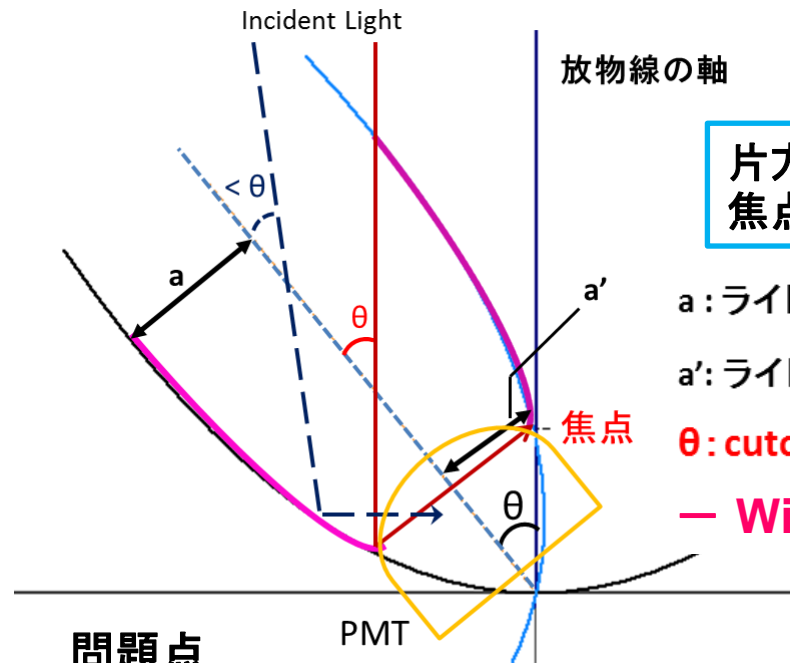
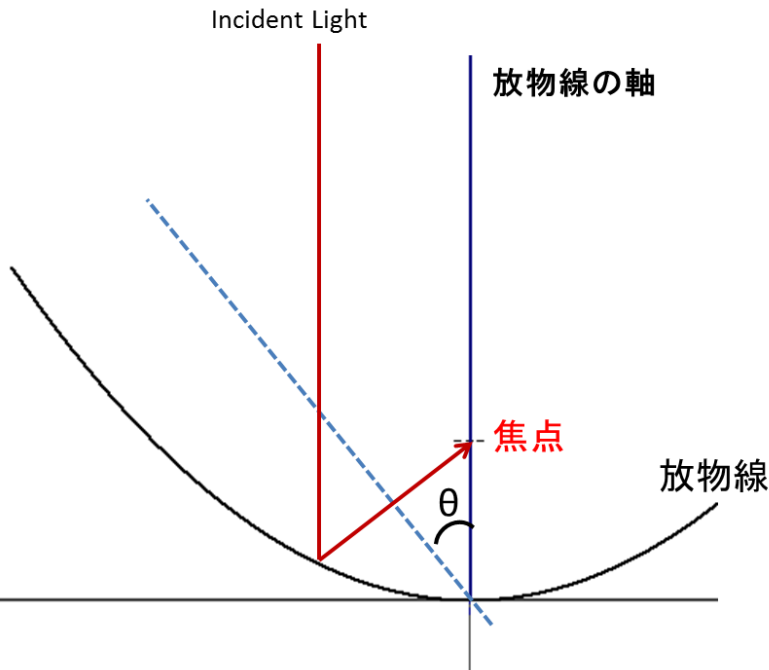
- ライトガイドはこの隙間を埋めるために全てのPMTに取り付けられる (LST1台あたり1855個必要)

ライトガイドの形状 ~ Winston Cone ~

- ・ ライトガイドの形状はWinston Coneが代表的

放物線の軸に平行して入射した光は焦点に集まる性質を利用

放物線の片方を焦点の位置に持つことにより、二次元において、ある角度(cutoff angle)以内に入射した光は100%集光し、それよりも大きい角度で入射した光はカットするという特徴を持つ



片方の放物線は
焦点に位置する

a : ライトガイド入口半径

a' : ライトガイド出口半径

θ : cutoff angle

— Winston Cone

ライトガイドの役割

- ① 焦点面のデッドスペースを低減
- ② 夜光などの望遠鏡視野外の光(バックグラウンド)を低減

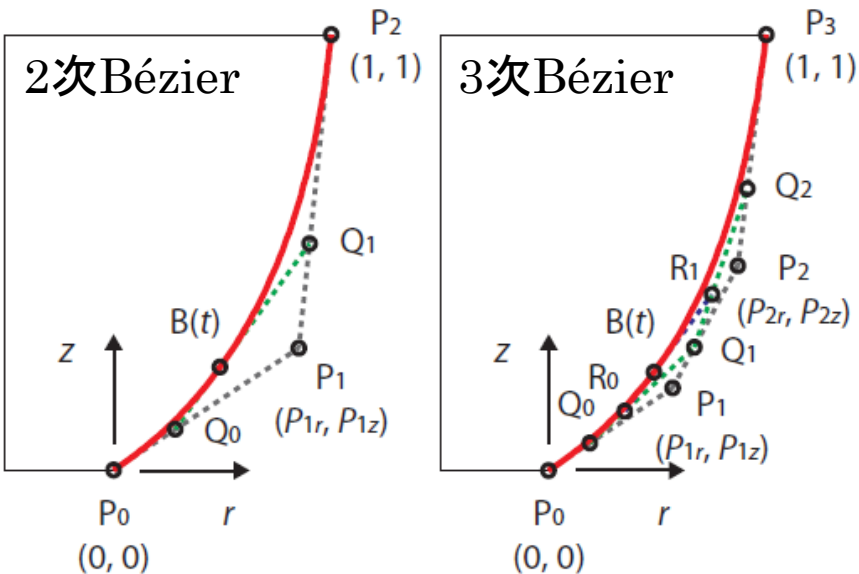
問題点

Winston Coneは二次元において理想的な集光をするが、三次元においてはLST用の六角形ライトガイドに最も適した形状ではない

Bézier曲線を用いたライトガイドの形状最適化

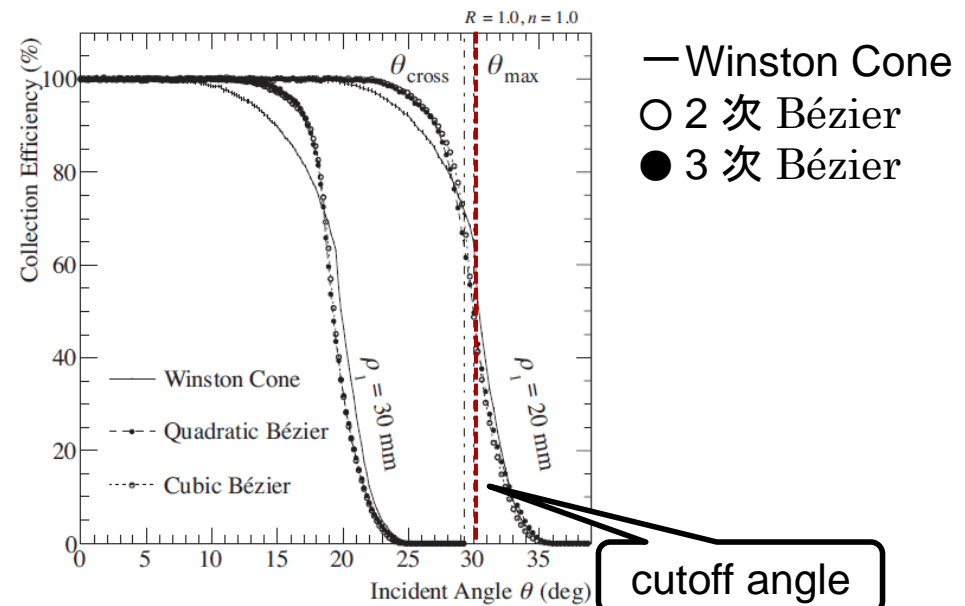
Bézier 曲線と呼ばれる、 N 個の制御点からなる $N - 1$ 次の曲線の**制御点の座標を変化させ様々な形状の曲線を作成し、Winston Cone よりも集光率が高い形状を探す**

Bézier 曲線概要図



P_0 はライトガイド出口、3 次 Bézier の P_3 はライトガイド入口の座標に固定

<シミュレーション結果>



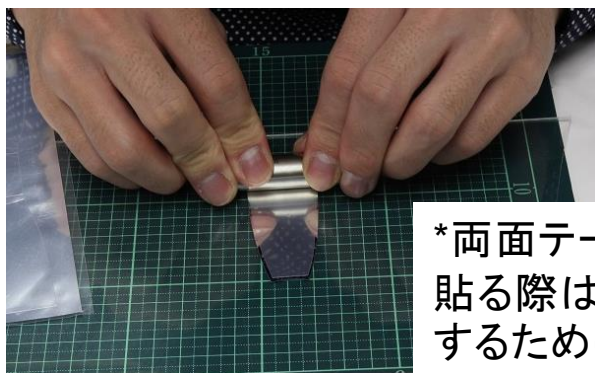
A. Okumura, 2012, Astroparticle Physics, 43, 3 – 18.

ライトガイドの試作

- Winston Cone 型と形状最適化した Okumura Cone を試作

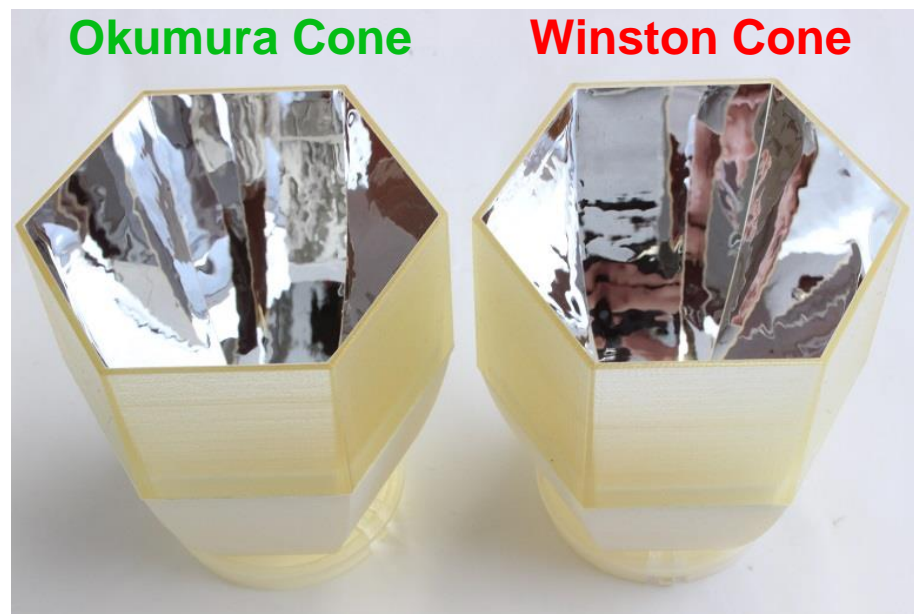
□形状を比較するため、製作方法を統一

- 3D プリンタ (AGIRISTA - 3000) で製作
- 反射材は 3M 製 ESR フィルム
- 両面テープで反射材を貼る*



*両面テープを反射材に貼る際は、気泡を少なくするために電池で圧着

* 使用した両面テープ
日東電工製 No.5603R
厚さ 30 μm

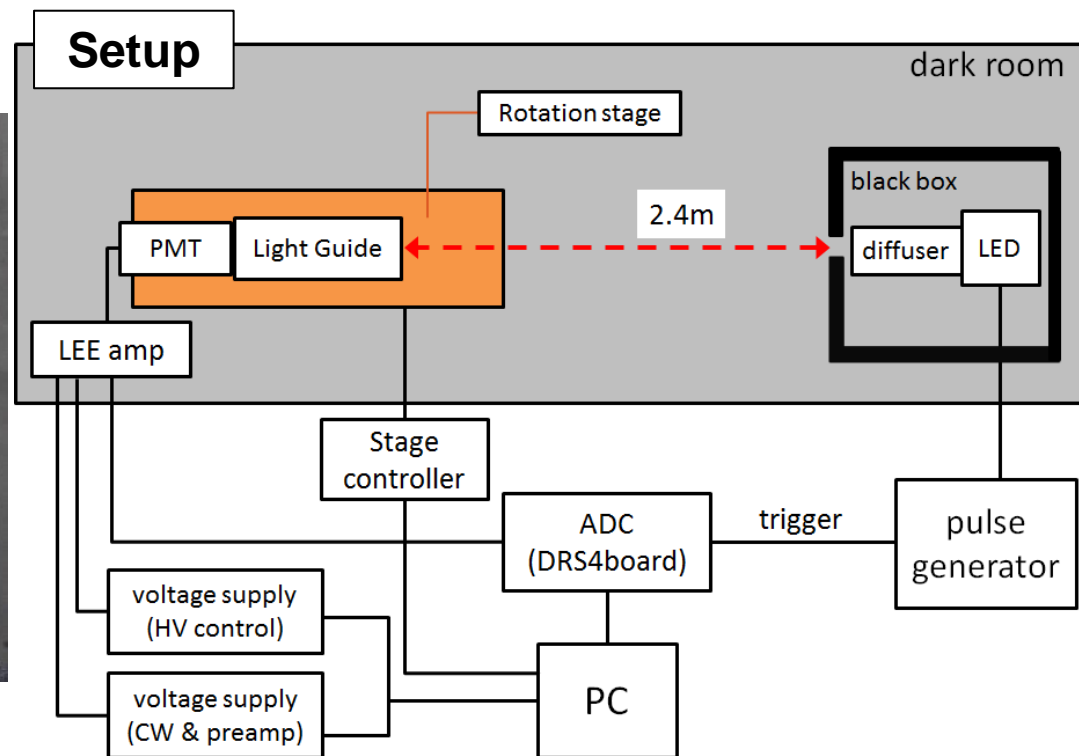
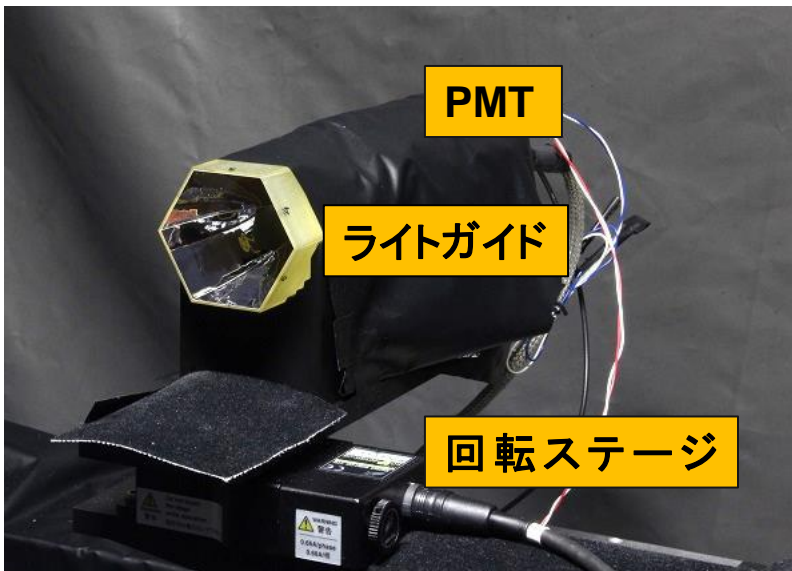


集光率角度依存性測定実験

- 試作したライトガイドの入射角度毎の集光率を測定

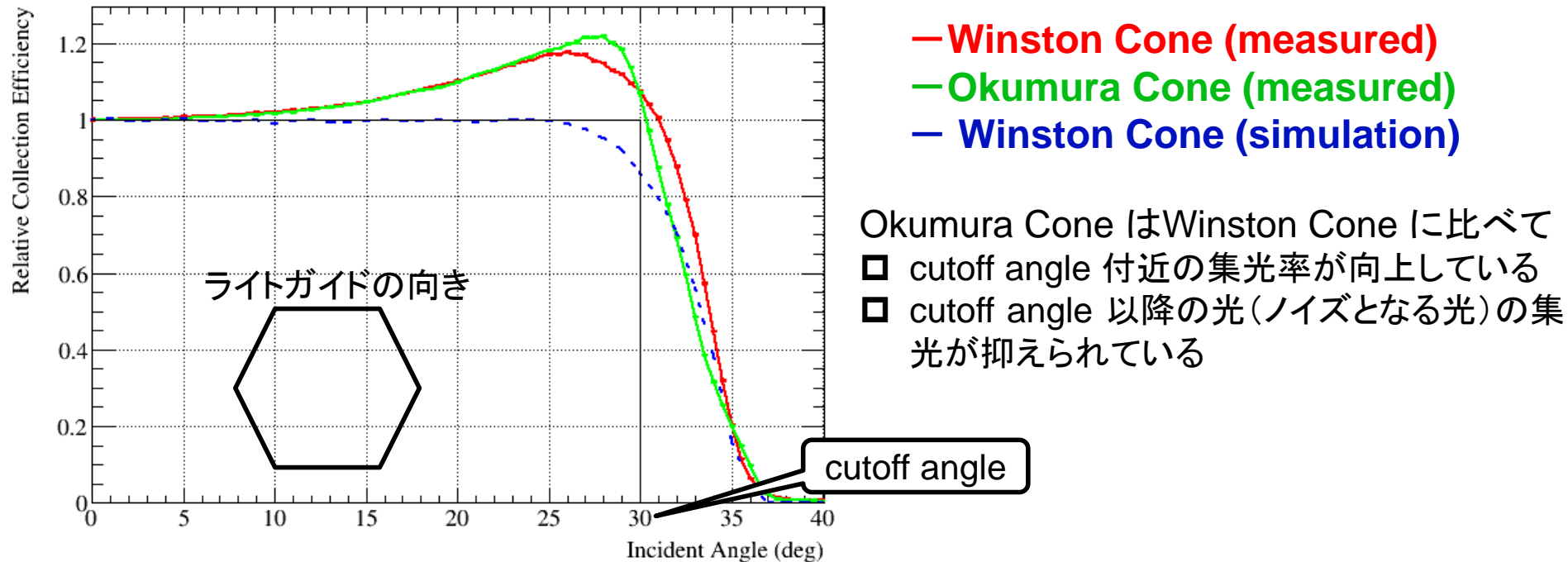
～測定方法～

ライトガイドに平行光を入射させるため、光源との距離を約2.4mとり、PMTとライトガイドを回転ステージ上に置いて回転させ、角度毎のPMT出力値を測定



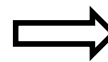
試作したライトガイドの集光率測定結果

• Winston Cone 型と Okumura Cone の比較



ここで..

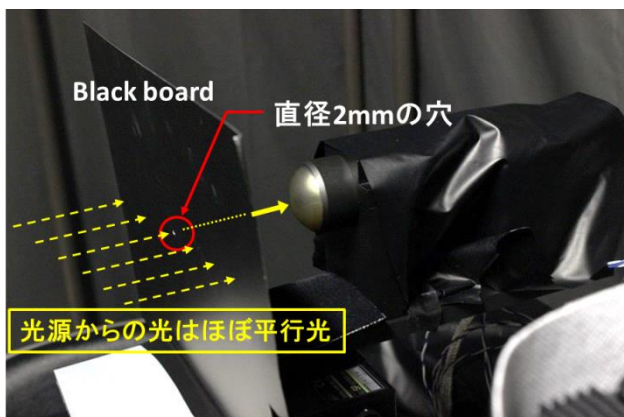
入射角度が5 ~ 30 度付近の集光率が上昇しており、実測とシミュレーションが比較できない。集光率が上昇する原因は、PMT光電面感度の位置依存性や角度依存性の影響だと考えられる。



これらの依存性を測定し、入射角度・位置による感度の違いを考慮したシミュレーションを行い、集光率の上昇が再現できるかを検証

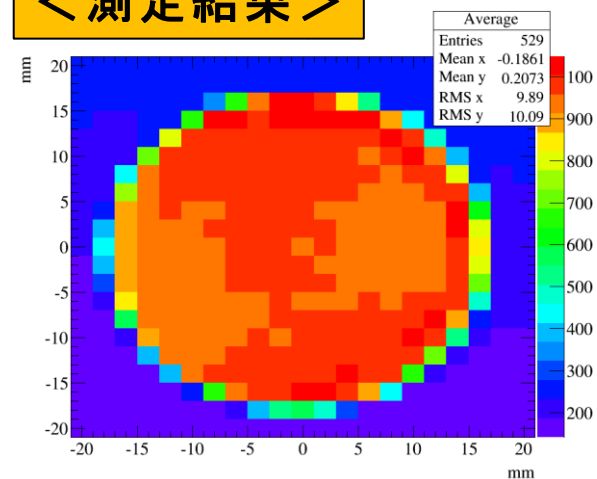
PMT光電面感度の位置及び角度依存性の測定

• 位置依存性の測定



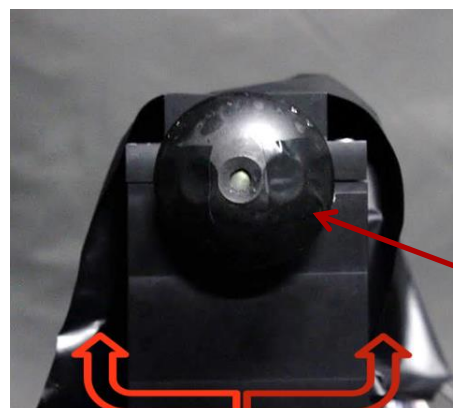
直径約2mmのスポット光をPMTに入射し、PMTをX, Z軸ステージで動かして光電面位置による出力値の違いを測定

<測定結果>



10%以上の感度のムラがある

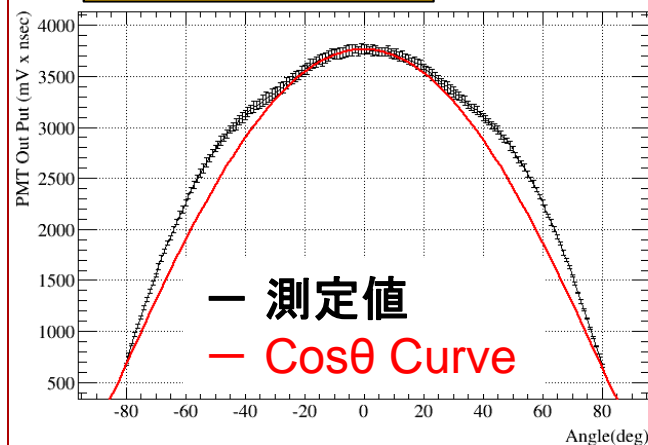
• 角度依存性の測定



PMTを回転ステージで回転させて、入射角度ごとのPMT出力値を測定

PMTには直径5mmの穴が開いたマスク(3Dプリンタで製作)を被せた

<測定結果>



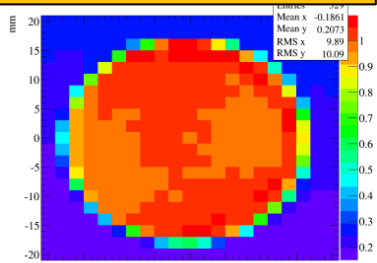
面を傾ければ $\text{Cos}\theta$ に依存して測定値が減少していくと考えられるが、入射角度がおよそ20~70degの出力値が $\text{Cos}\theta$ Curveよりも高い

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

・シミュレーション方法

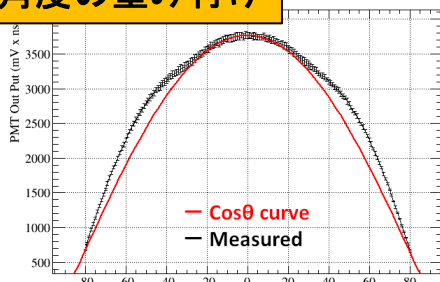
PMTに入射する光子の座標と入射角度を求めて、相対値化した測定結果から入射位置・角度ごとの重みを付け、集光率を再計算

入射位置の重み付け

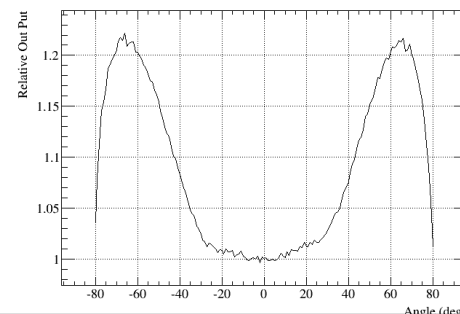


(0mm , 0mm) の測定値を1

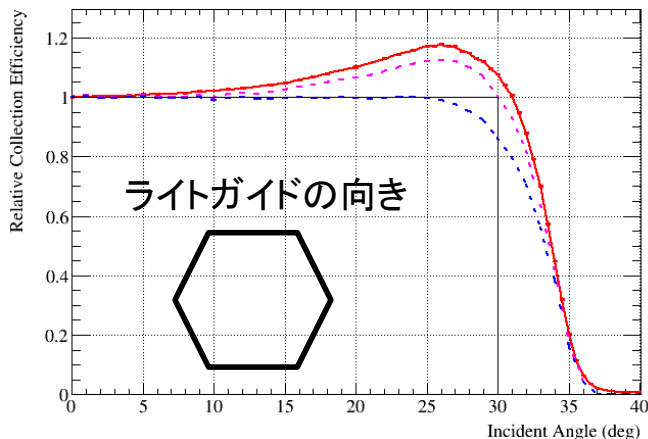
入射角度の重み付け



入射角度0degの測定値を1にし、「0degの測定値 × Cosθ」で割る



・シミュレーション結果 (Winston Cone)

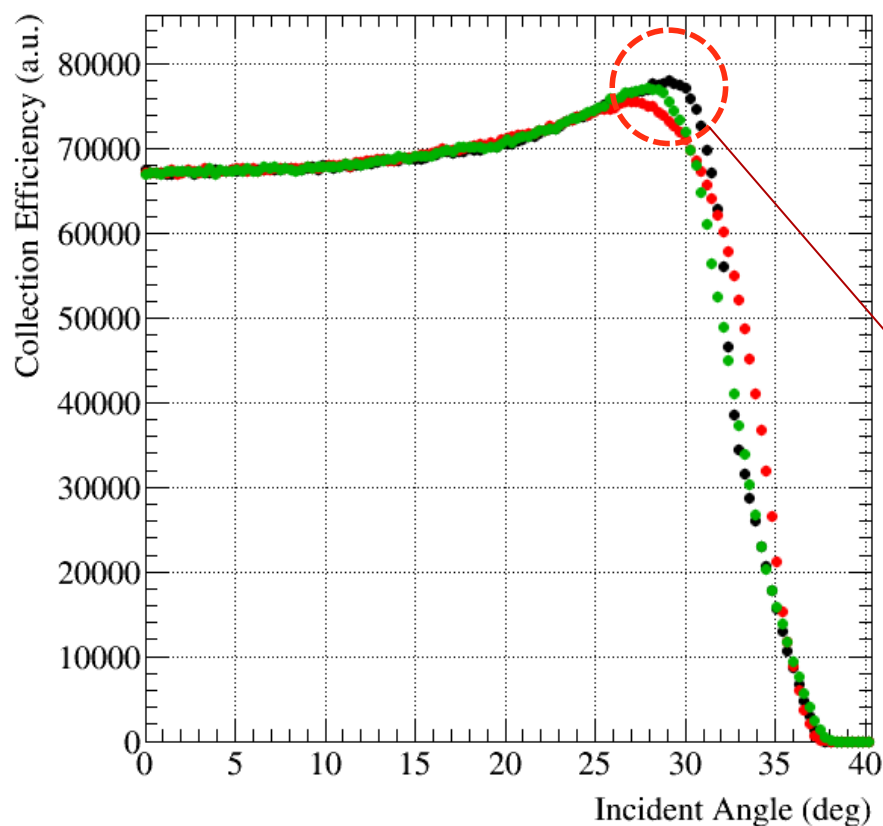


- 入射位置・角度を考慮した **Simulation**
- 入射位置・角度を考慮していない **Simulation**
- **measured**

- ◆ シミュレーションで集光率の上昇が再現できた
- ◆ 入射位置のみの結果では集光率の上昇が見られなかったため、角度依存性の影響が大きい

PMT 感度角度依存性を考慮した形状最適化

- PMT感度の入射角度依存性を考慮して形状最適化したシミュレーション結果



- 角度依存性を考慮した形状最適化
- 角度依存性を考慮しない形状最適化
- **Winston Cone**

cutoff angle 付近の集光率がアップ

PMT の感度依存性を組み込むことで、LST 用 PMT に最も適した形状のライトガイドをシミュレーションすることができた。
今後、PMT 感度の角度依存性を考慮して形状最適化した、新しい Okumura Cone を試作して集光率を測定する。

まとめと今後

- Winston Cone 型と形状最適化したライトガイドを試作
- 集光率測定結果から、形状最適化したライトガイドの方がcutoff angle 付近の集光率が上昇し、さらにノイズとなる光の集光を抑えられていた
- PMT光電面感度の位置及び角度依存性を測定し、シミュレーションに組み込んだところ、集光率の上昇が再現できた
- PMT依存性を考慮したシミュレーションでライトガイド形状最適化

- 今後は、
 - PMT 感度の依存性を考慮して形状最適化したライトガイドの試作・測定
 - ライトガイドの量産化に向けて反射材の貼り方を確立する