

# CTA報告37

## CTA大口径望遠鏡用ライトガイドの開発

日本物理学会第67回年次大会

2012年3月24日(土)

茨城大学理工学研究科

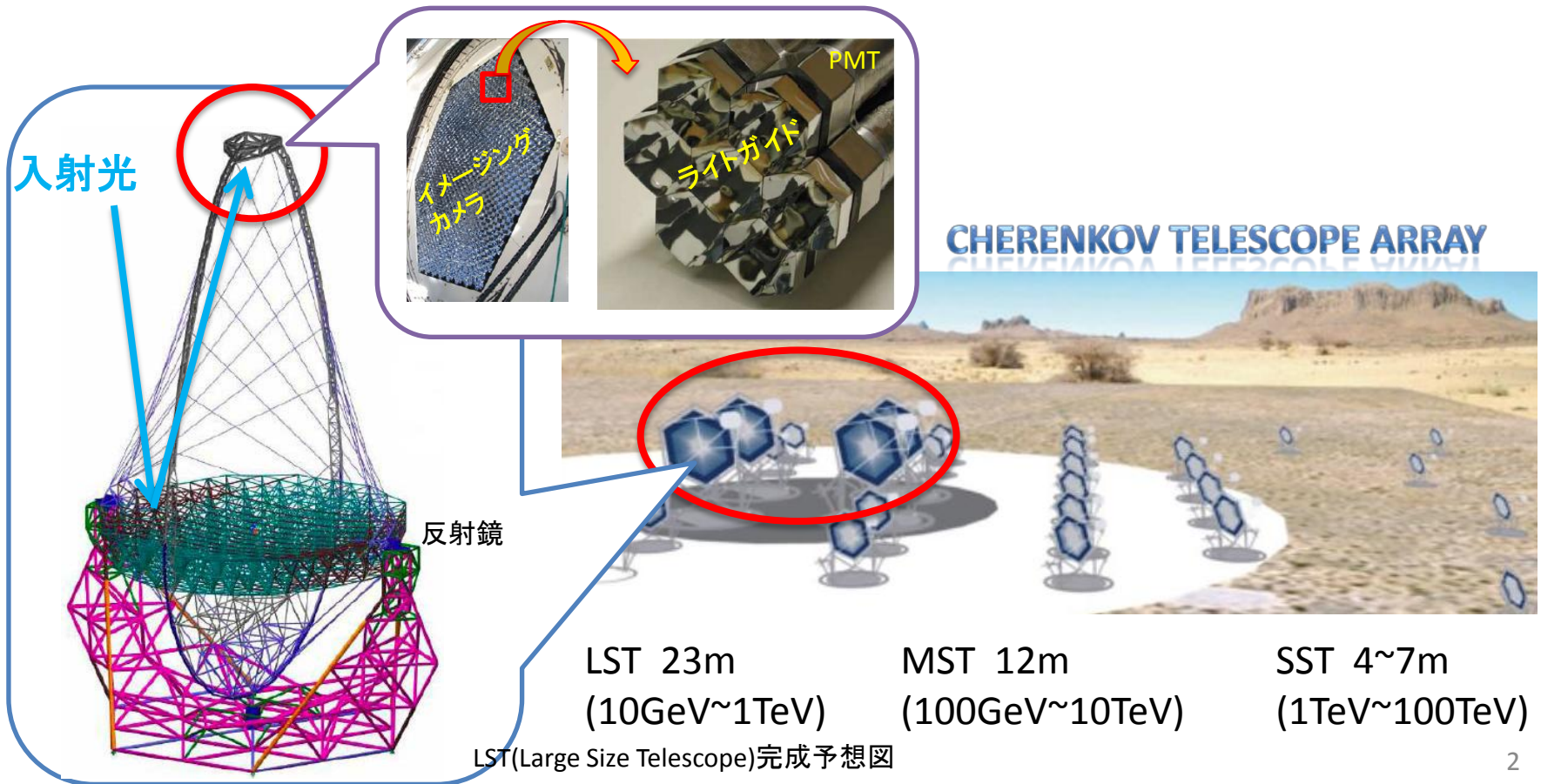
黒田和典

片桐秀明<sup>A</sup>、吉田龍生<sup>A</sup>、柳田昭平<sup>A</sup>、加賀谷美佳<sup>A</sup>、手嶋政  
廣<sup>B</sup>、榎本良治<sup>B</sup>、奥村暁<sup>C</sup>、林田将明<sup>D</sup>、山本常夏<sup>E</sup>、千川道  
幸<sup>F</sup>、他CTA-Japan一同

茨城大理<sup>A</sup>、東大宇宙線研<sup>B</sup>、名大STE研<sup>C</sup>、京都大理<sup>D</sup>、甲  
南大理工<sup>E</sup>、近畿大理<sup>F</sup>

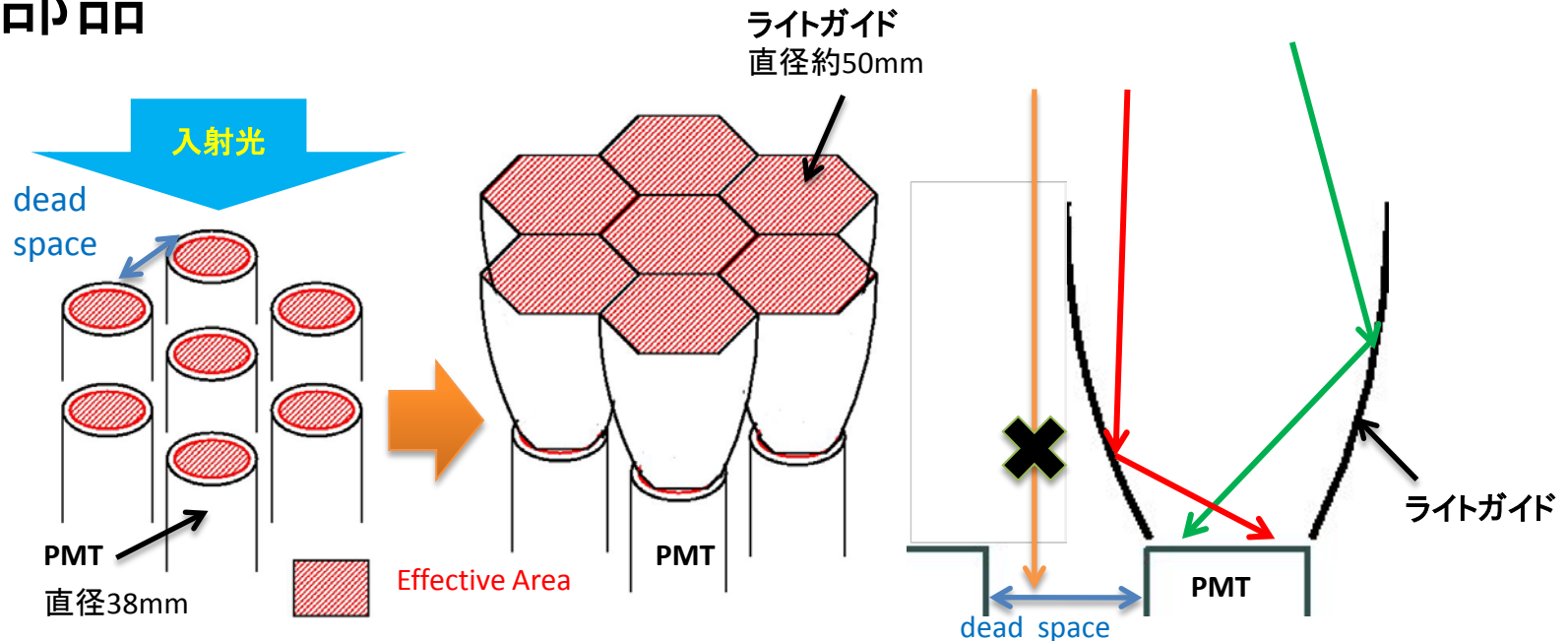
# CTAの大口徑望遠鏡LST(Large Size Telescope)

- 反射鏡でチェレンコフ光を反射し、焦点面にある光電子増倍管(PMT)からなるイメージングカメラで撮像
- イメージングカメラの前方にライトガイドがある



# ライトガイドについて

- イメージングカメラに並んだ光電子増倍管 (PMT) の隙間は不感領域
- PMTに実効的な開口面積を拡大し、同時に視野外のノイズ光をカットするために必要な光学部品

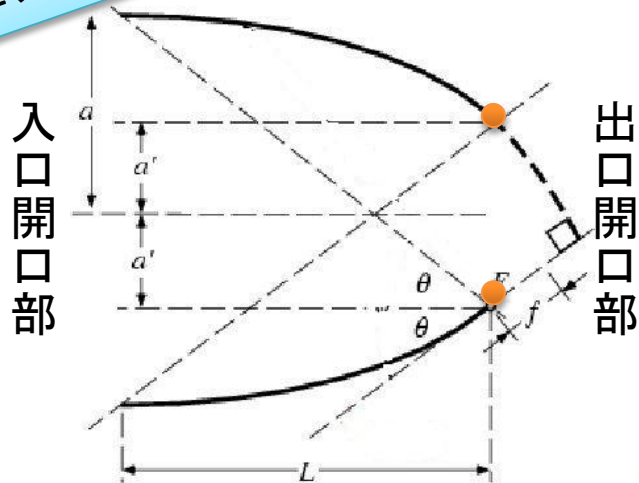


# Winston Cone形状

特徴

- ある最大入射角 $\theta$ 以内で入射した光は100%集光
- 最大入射角以外の光は排除

2次元



関係式

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a'}{a}\right), \quad \tan \theta = \frac{a + a'}{L}$$



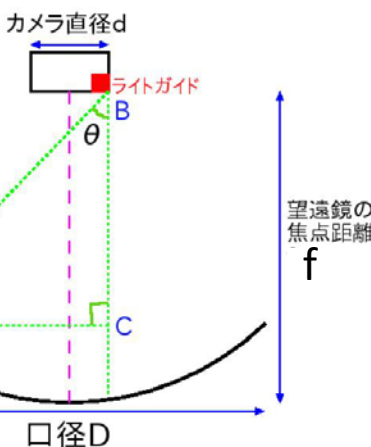
LST用ライトガイドの仕様

最大入射角  $\theta = 25^\circ$

入口開口半径  $a = 23.00$  [mm]

出口開口半径  $a' = 9.72$  [mm]

LGの長さ  $L = 70.17$  [mm]



$D = 23\text{m}$   
 $f/D = 1.2$

縁の高さ  
 $Z$

口径  $D$

望遠鏡の  
焦点距離  
 $f$

問題点

3次元で六角形の形状では最適化されていない

## 研究の目的

光線追跡シミュレーションを行い、ライトガイドの高集光・高ノイズ除去効果を最大にするようにLST用ライトガイドの形状最適化を行う

## 光線追跡のツール

ROBAST:ROot BAsed Simulator for ray Tracing

(名古屋大 奥村暁 開発)

# 光線追跡(ray trace)のイメージ

ライトガイドの中心軸からある $\theta$ だけ傾いた方向から、  
1mm間隔に並んだ光子を入射させる  
集光率を以下の式で定義

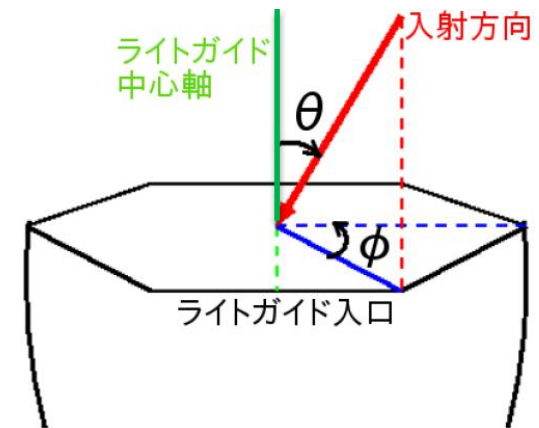
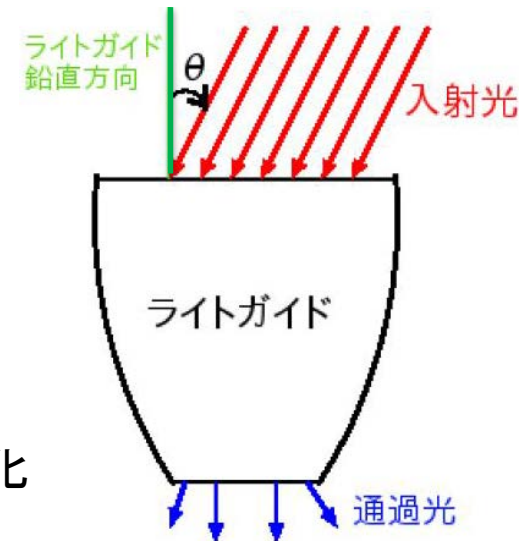
$$\text{集光率 } \eta(\theta) = \frac{\text{出口を通過した光子数}}{\text{入射した光子数}} \times 100[\%]$$

六角形のライトガイドは $\phi$ によって形状が異なるので集光率が変化  
ある入射角 $\theta$ (固定)のときの $\phi$ で平均化した集光率を定義

$$\text{平均集光率 } \overline{\eta(\theta)} = \frac{\int \eta(\theta, \phi) d\phi}{\int d\phi} [\%]$$

$\theta$ が大きいほど立体角は大きくなる  
光があらゆる方向で等確率で到来すると仮定したとき  
 $\theta$ の重みのついた集光率を定義

$$\text{重みつき集光率 } R(\theta) = \overline{\eta(\theta)} \times \sin \theta [\%]$$

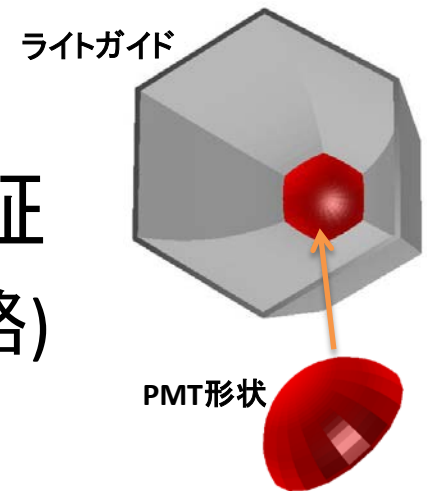


# 最適化の流れ

- Winston Cone形状のライトガイドでの光線追跡
  - ライトガイド表面の反射率とPMT形状の考慮

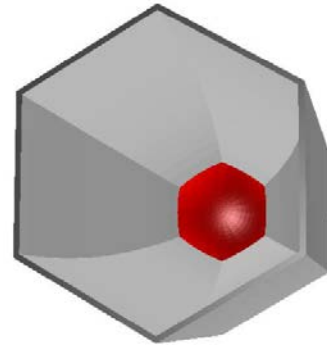
- ライトガイド表面反射率**98%**
  - 高反射率フィルム(3MのESRフィルム)を想定
- PMTのPhoto Cathodeは**曲率半径20mmの球面**
- **ライトガイドとPMTを密着させる**

- Winston Coneを越える形状の検証
  - 2次Bezier曲線を用いた最適化(省略)
  - **3次Bezier曲線を用いた最適化**

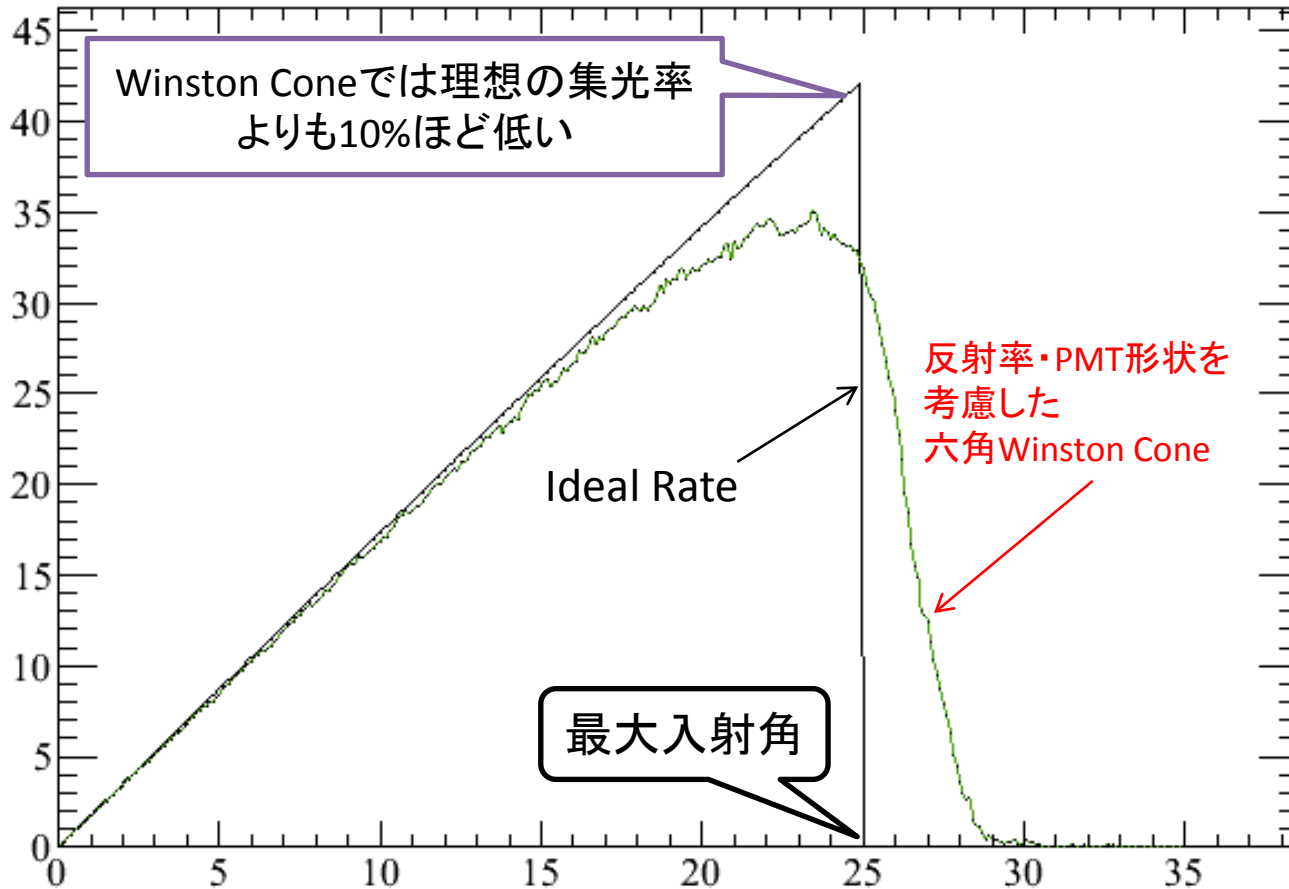




# Winston Cone形状での光線追跡シミュレーション結果



重みつき集光率[%]



六角形のライトガイドではWinston Coneの特徴の理想的な集光率は得られなかった

入射角[deg]

Winston Cone以上に高集光率・高ノイズ除去率の形状はないか?



# 3次Bezier曲線を用いた最適化

## 3次Bezier曲線

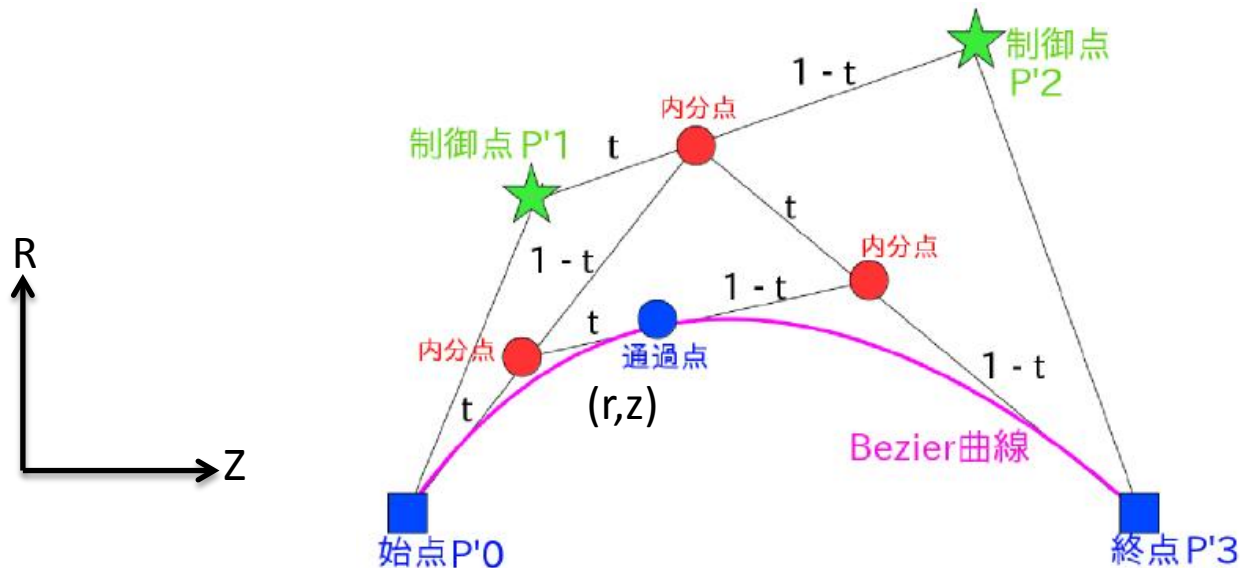
始点、終点、2つの制御点の4点からなる

制御点を変化させることで曲線の形が変化

Bezier曲線は媒介変数 $t(0 \leq t \leq 1)$ を用いて以下の式で表される

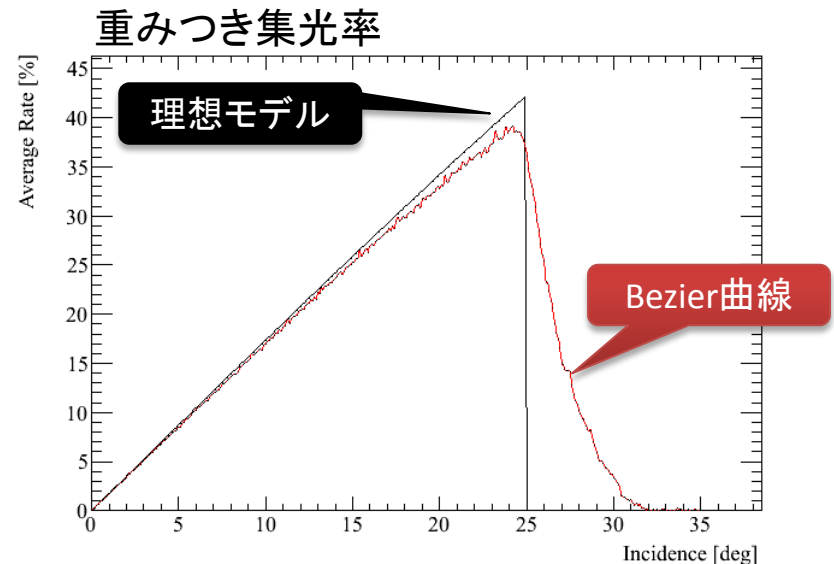
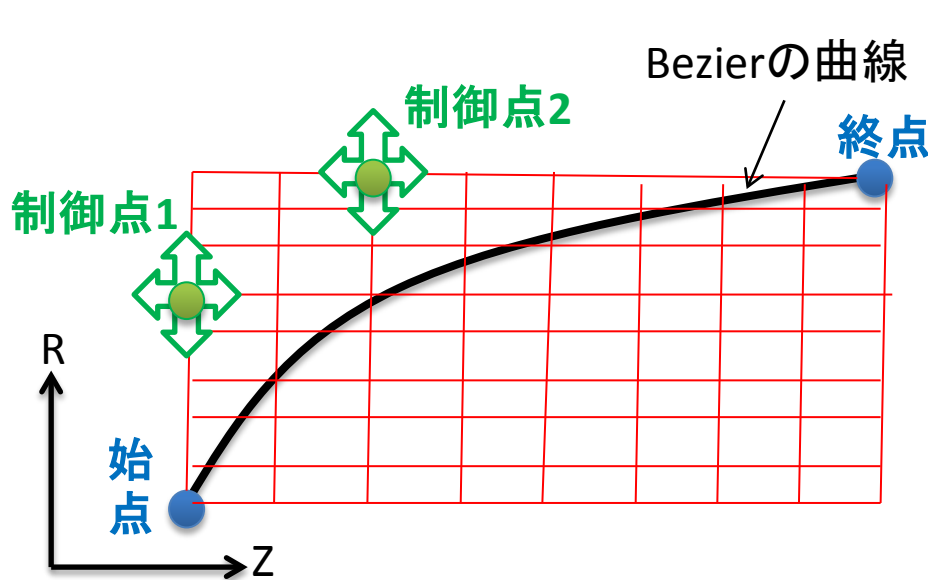
$$r = (1-t)^3 r_0 + 3t(1-t)^2 r_1 + 3t^2(1-t)r_2 + t^3 r_3$$

$$z = (1-t)^3 z_0 + 3t(1-t)^2 z_1 + 3t^2(1-t)z_2 + t^3 z_3$$



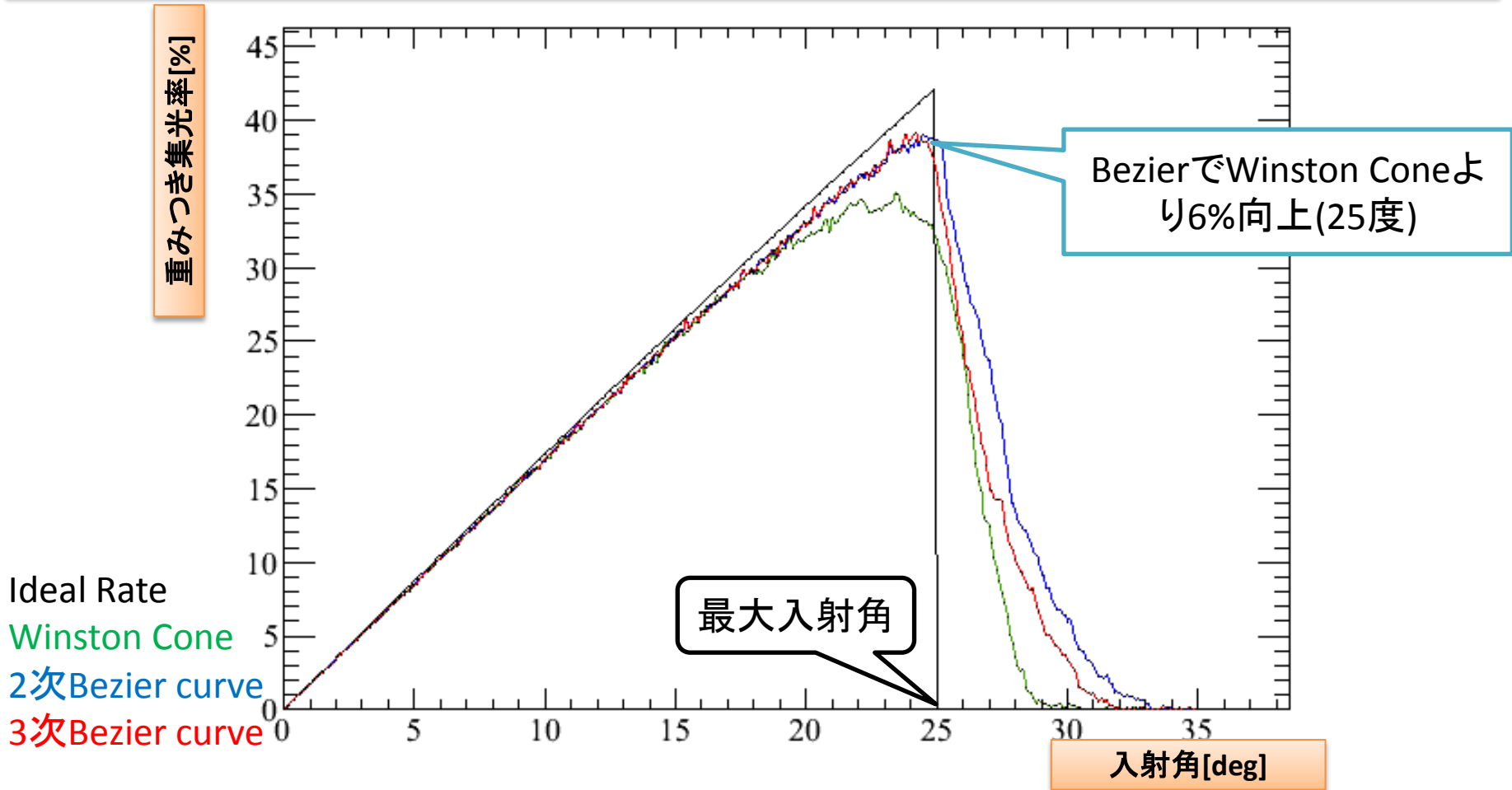
# 最適化の方法

- ライトガイドのR方向とZ方向を等間隔に分割した座標点ごとの集光率を計算
- 範囲を絞りながら理想的な集光率モデルと比較



理想モデルとの集光率(重みつき集光率)の差が最小になる制御点を探す

# 3次Bezier曲線でのシミュレーション結果



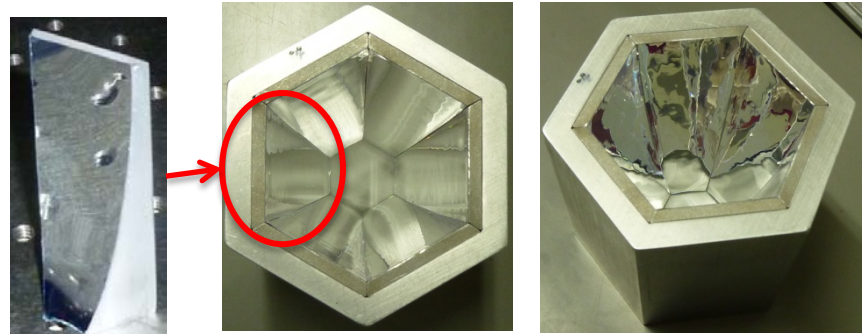
Bezier曲線では、入射角20度～25度の範囲で、重みつき集光率がWinston Coneよりも最大で約6%向上

# ライトガイドの試作

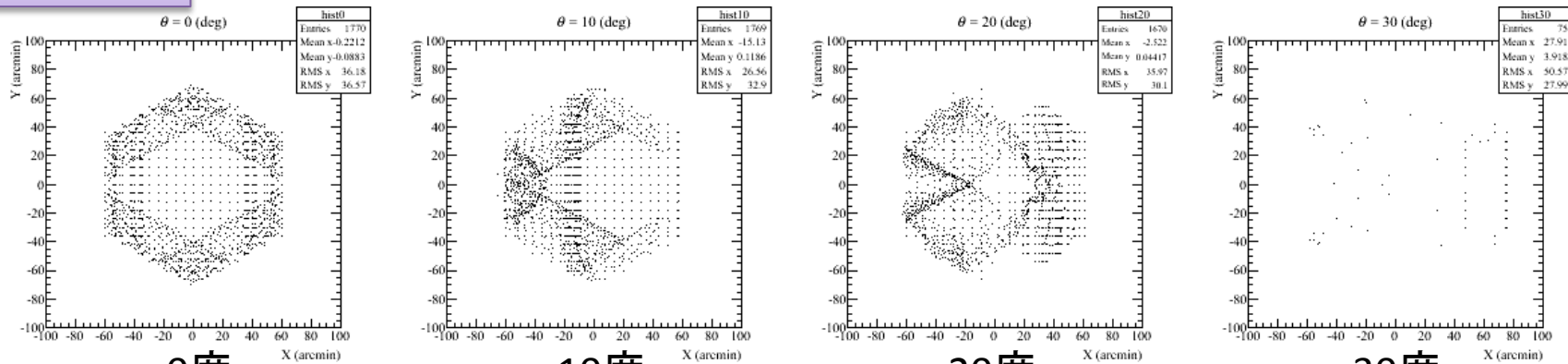
試作(国立天文台)

六角形の一辺で切り抜いたような形のパーツに  
反射フィルムを貼り、固定用の治具にはめ込んだ

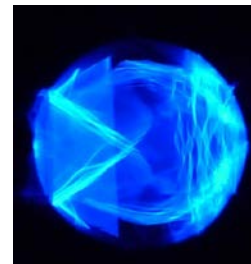
ライトガイド底面での光子分布の  
シミュレーションとの比較



シミュレーションの像



試作LGの像



今後、集光率の検証へ

# まとめ

ROBASTによる光線追跡シミュレーションを行い、高集光率・高ノイズ除去率になるようなCTAのLST用ライトガイドの形状最適化を行った

- Winston Cone形状での集光率
  - 表面反射率とPMT入射窓形状の考慮
- Winston Coneに代わる形状での最適化
  - 2次Bezier曲線による形状最適化(省略)
  - 3次Bezier曲線による形状最適化

3次Bezier曲線を用いて、入射角20度～25度の範囲で、重みつき集光率がWinston Coneよりも最大で約6%向上



今後・・・  
試作の集光率の検証  
PMT応答実験