



cherenkov  
telescope  
array



## CTA 報告122:

# CTA大口径望遠鏡の光学性能最適化に向けた分割鏡測定とその配置の検討

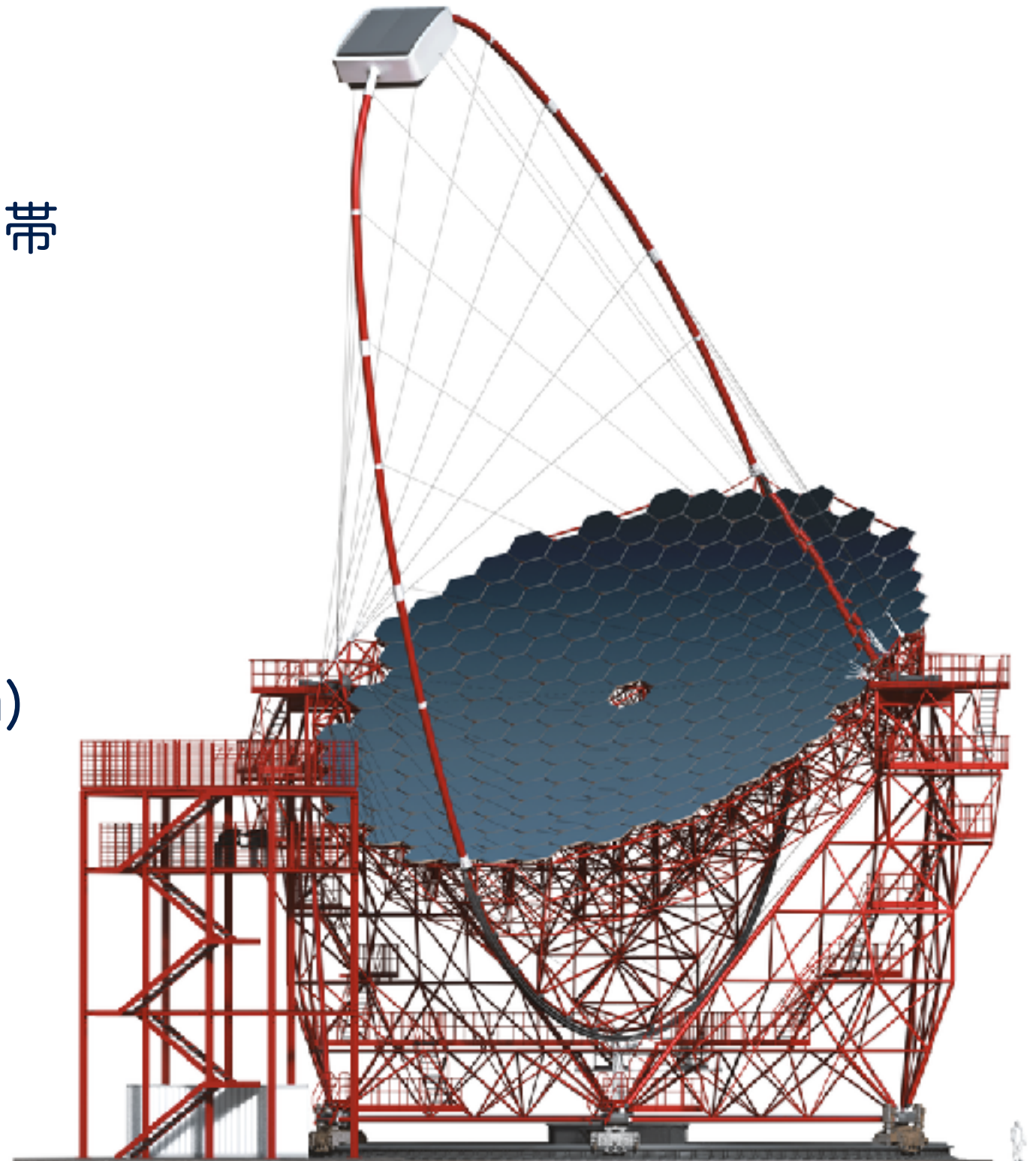
**稲田知大<sup>A</sup>**, 林田将明<sup>A</sup>, 野田浩司<sup>B</sup>, 奥村暁<sup>C</sup>, 加賀谷美佳<sup>D</sup>, 片桐秀明<sup>D</sup>, 黒田隼人<sup>A</sup>, 齋藤隆之<sup>E</sup>, 重中茜<sup>D</sup>, 千川道幸<sup>F</sup>, 手嶋政廣<sup>A,B</sup>, 中嶋大輔<sup>A</sup>, 深見哲志<sup>A</sup>, 本橋大輔<sup>D</sup>, 山本常夏<sup>G</sup>, 吉越貴紀<sup>A</sup>, 吉田龍生<sup>D</sup> 他CTA-Japan consortium

**東大宇宙線研<sup>A</sup>**, Max-Planck-Inst. fuer Phys.<sup>B</sup>, 名大ISEE<sup>C</sup>, 茨城大理<sup>D</sup>, 京大理<sup>E</sup>, 近畿大理工<sup>F</sup>, 甲南大理工<sup>G</sup>

# 大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope : LST)

---

- ・20 GeV - 1 TeVの観測エネルギー帯
- ・大口径望遠鏡(LST)光学系仕様
  - ・口径(D) : 23m
  - ・焦点距離(f) : 28m
  - ・視野 : 4.5°
  - ・カメラPixelサイズ : 0.1° (50 mm)
  - ・主鏡面形状 : 放物面
    - ・198枚の球面分割鏡により構成



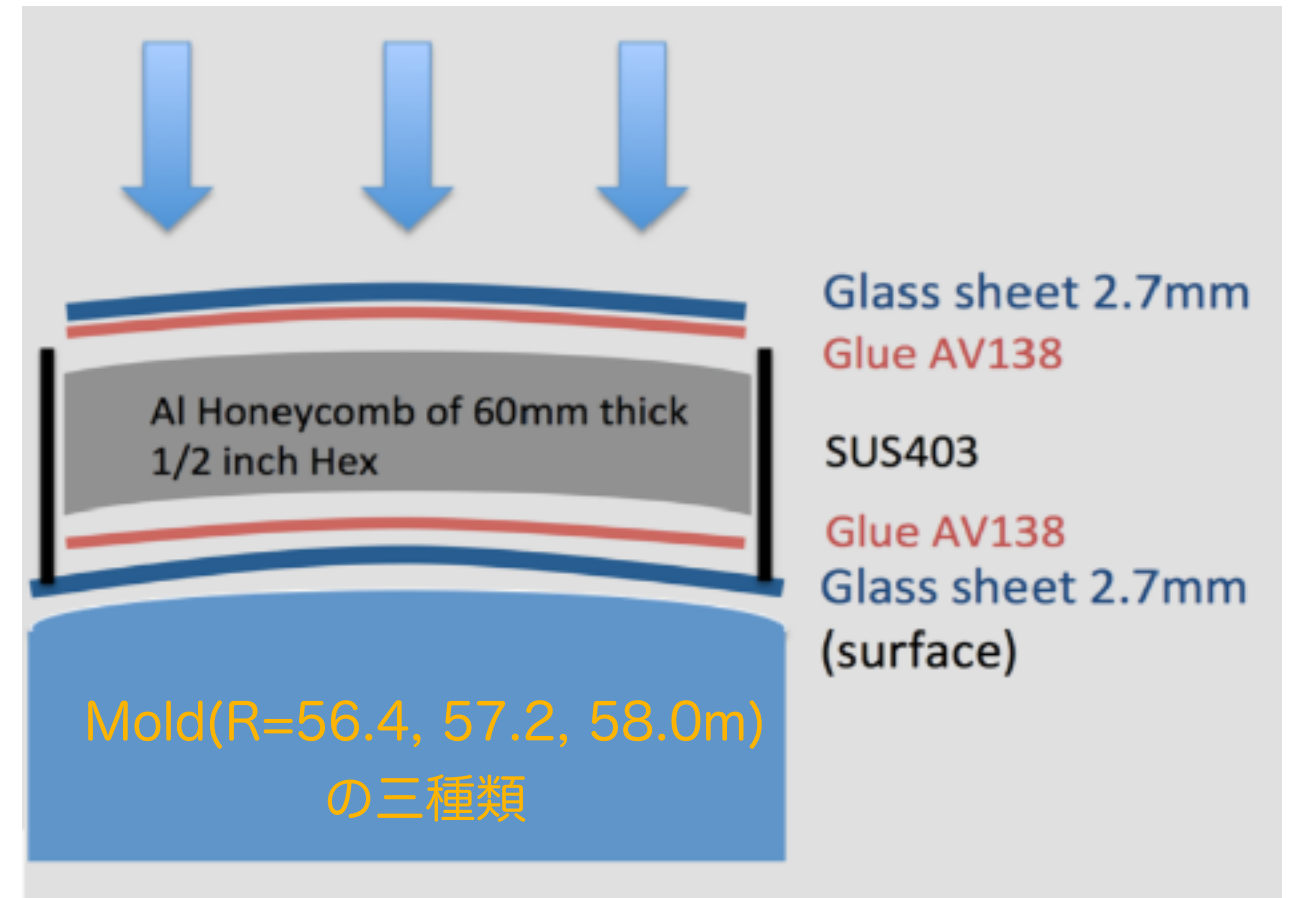
# 分割鏡開発

## 分割鏡仕様

- ・三光精衡所との共同開発
- ・曲率半径：56.0 – 58.4 m
- ・スポットサイズ: D80 < 16.7mm@1f  
(pixel sizeの1/3の大きさ)
- ・D80：鏡から反射された全光量の80%が入る円の直径



## 製法：Cold Slump 技術



- ・モールドは3種類の曲率を用意
- ・56.4m(A), 57.2m(B), 58.0m(C)
- ・放物面配置する際に最適配置を行う
- ・安価で軽量(~50kg)な鏡の製造に成功  
→現在、大量製造段階

# 分割鏡の性能評価

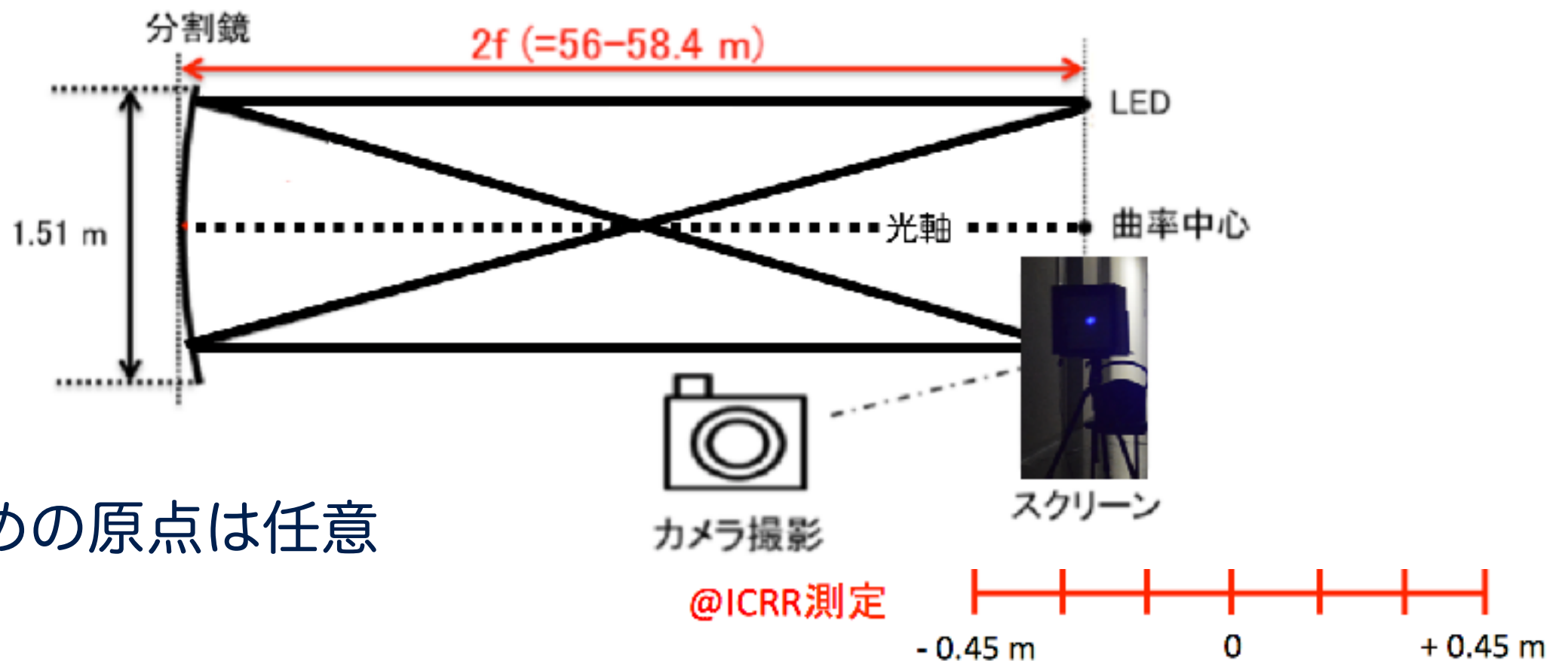
## 目的

使用する分割鏡一枚一枚の性能を評価

- ・ 品質管理のための測定
- ・ 望遠鏡放物面への配置の最適化

## 性能評価手法：2f法

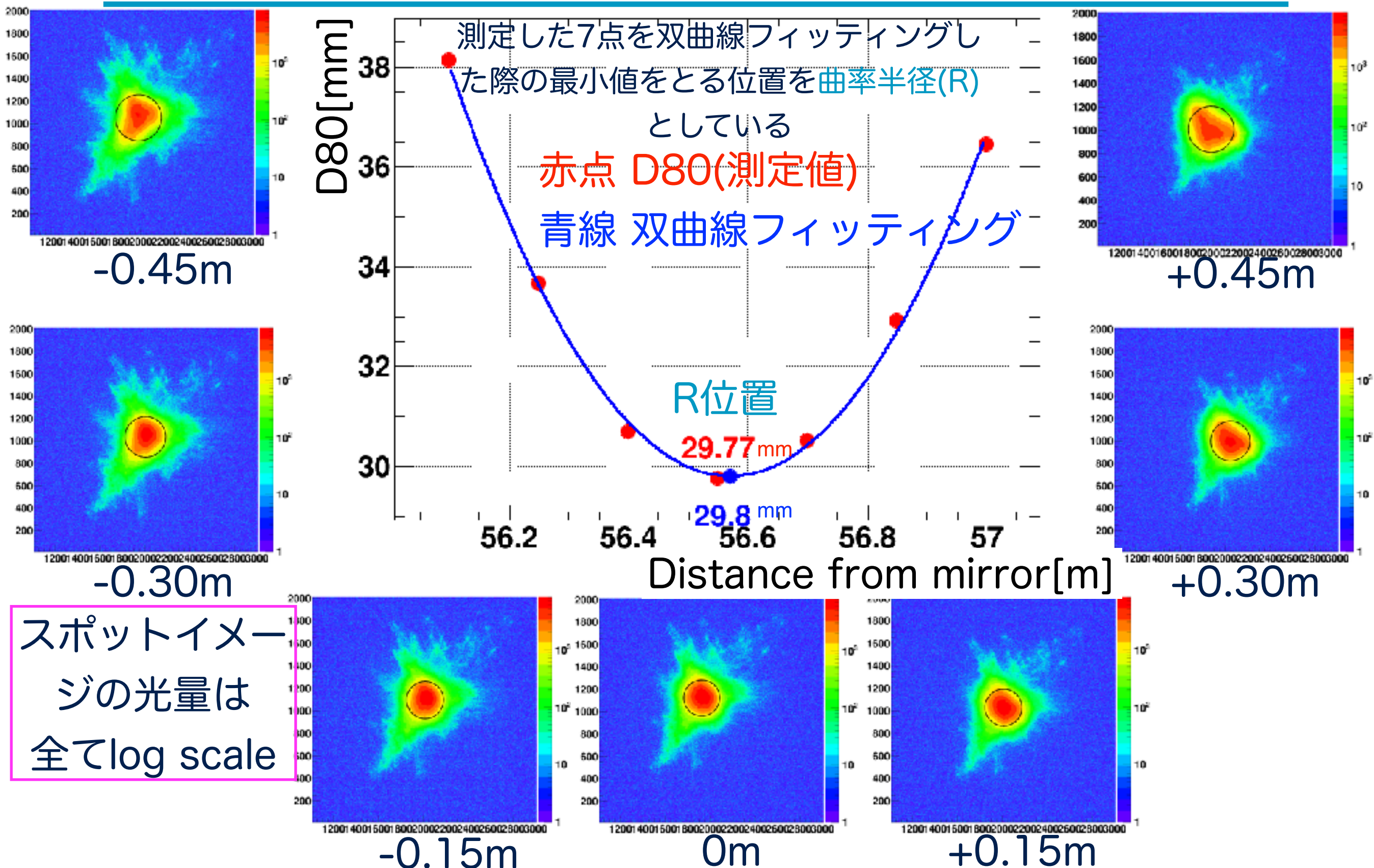
- ・ 曲率半径( $R$ )だけ離れた点光源からの反射像の広がりを測定
- ・ 像の広がりを結像性能( $D80$ )として解析



- ・ 測定のための原点は任意



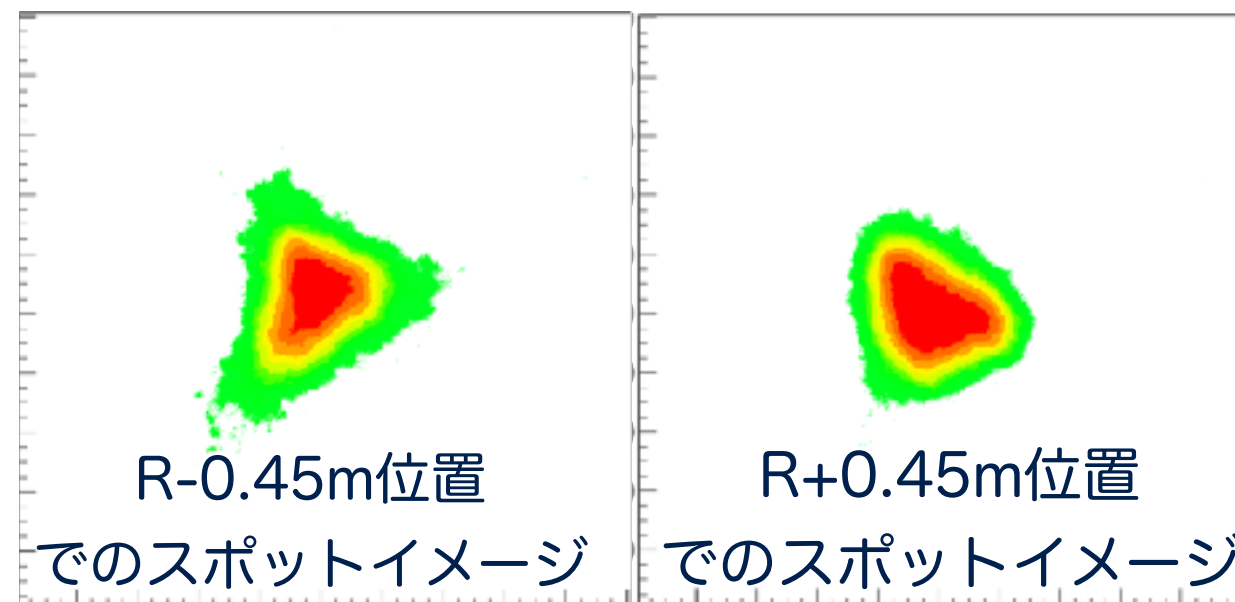
# 2f測定で得られたスポットイメージとD80



# 分割鏡の非球面性を利用した形状モデルの提案

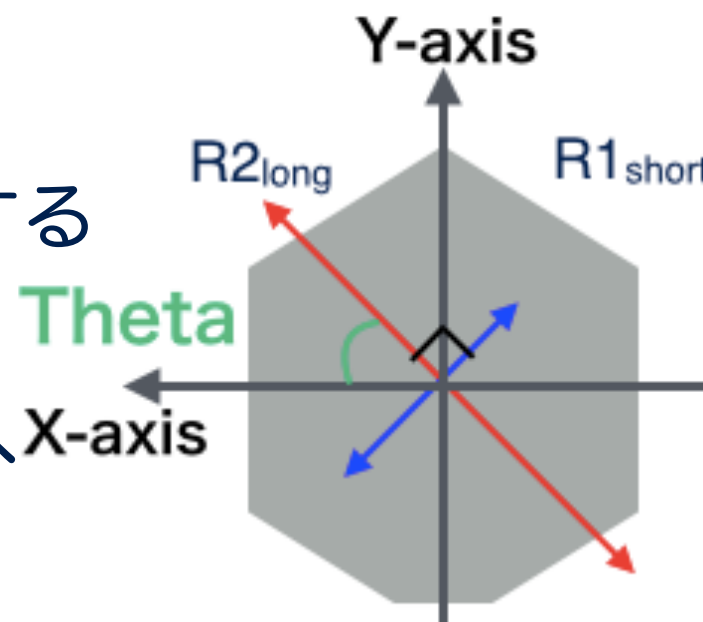
## 現状

- ・ 分割鏡のスポットが細長い形状になっていることが測定によりわかってきた
- ・ 製造の際に分割鏡がわずかに鞍型変形している影響



## モチベーション

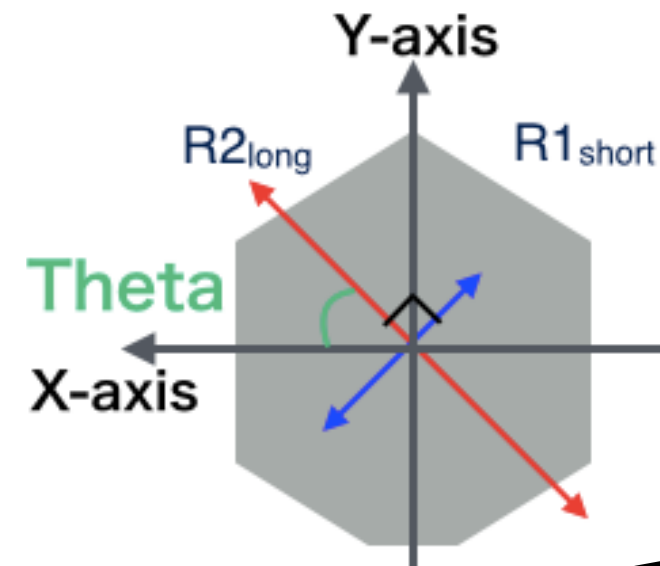
- ・ 鞍型変形を放物面配置に積極的に利用する
- ・ 現在の球面形状モデルを拡張
- 二軸の曲率半径を持った形状モデルへ





# 分割鏡光学パラメータ

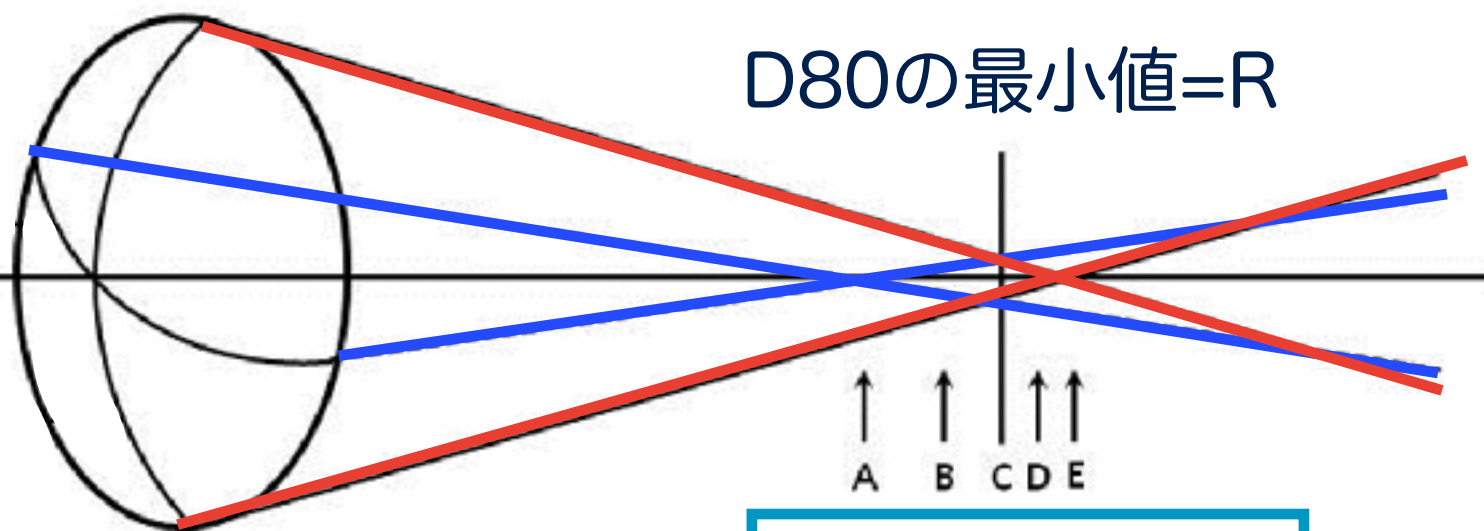
- 4種類のパラメータ
- 結像性能(D80)
- 曲率半径(R)
- 二軸の曲率半径(dR)
- $R1_{short}=R-dR$ ,  $R2_{long}=R+dR$
- 二軸の曲率半径の方向(Theta)



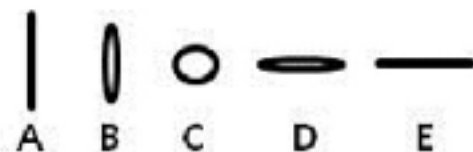
2016年秋季物理  
学会にて発表

- 新しいスポットイメージ解析  
手法の開発  
スポットイメージの光量の二次  
のモーメントの平方根を計算す  
ることによりdR, Thetaを決める  
ことができた。

D80の最小値=R



スポットイメージ



# 90枚の分割鏡に適用した結果

2016年秋季物理  
学会にて発表

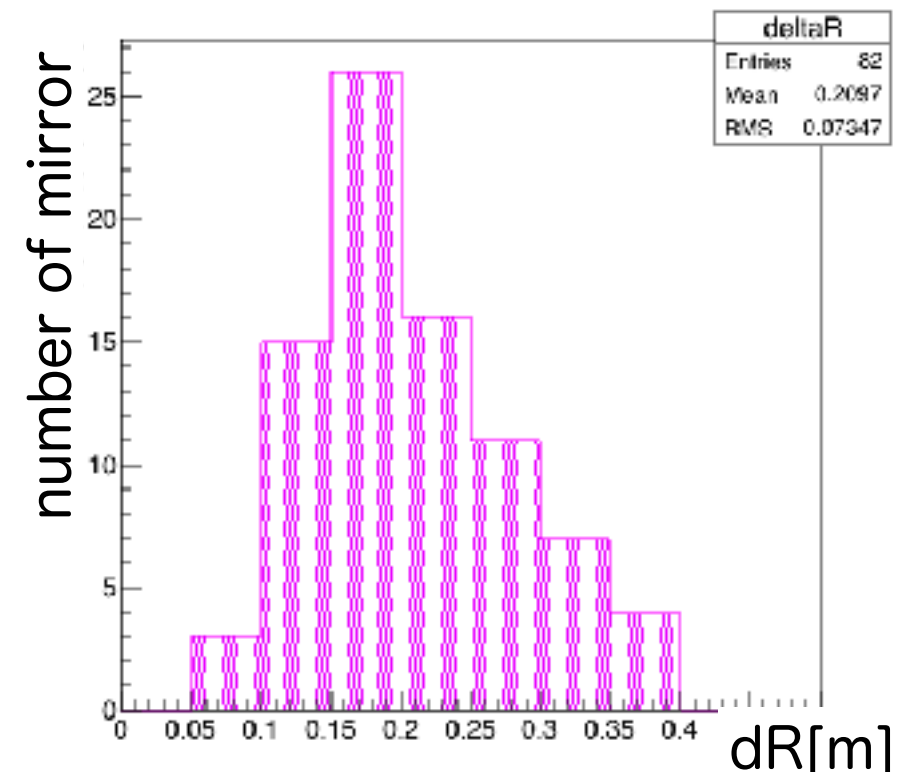
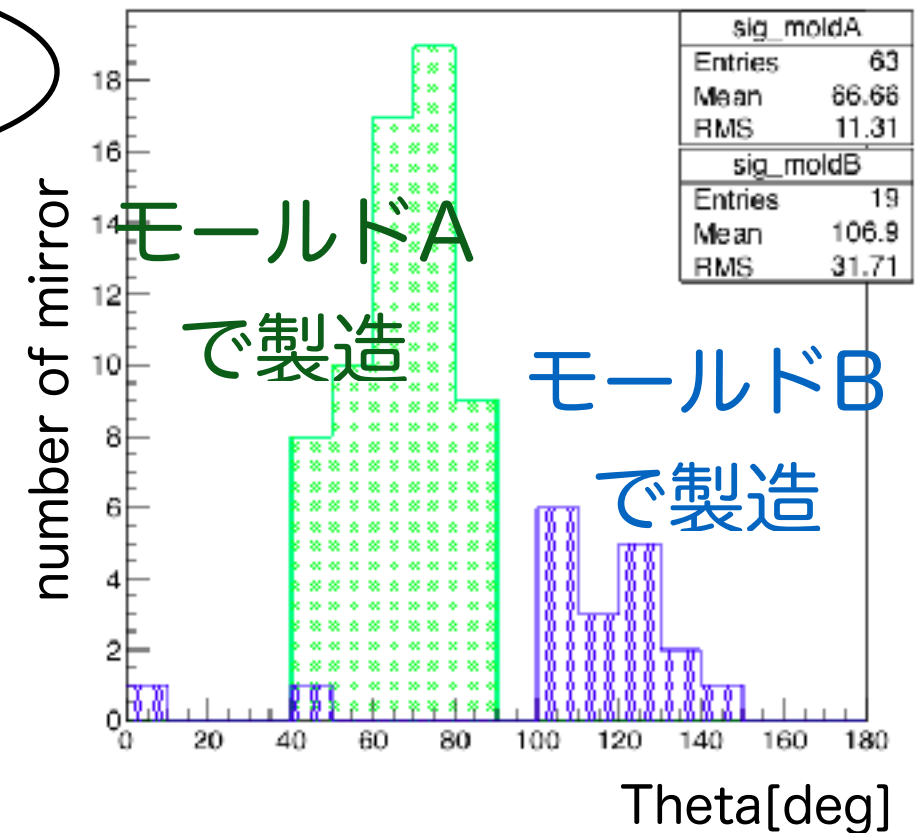
すでに2f測定を行っていた分割鏡90枚の測定  
結果に対して、新しい解析手法を適用した

## Theta

- Thetaの偏りはモールド由来
- 製造の際に調整し、Thetaの値を均質な分布にできる見込みがある

## dR

- dRは一様ではなくピークを持つ分布
- dRの分布は最適配置を考慮する際に用いる





# LST望遠鏡結像性能評価のための光線追跡シミュレーション

現実の分割鏡の光学パラメータを反映した望遠鏡光学性能を見積もる

目的

- ・ 完全なるシミュレーションからより現実を反映したものへ
- ・ 望遠鏡(主鏡)全体の性能(spot size)を求める

・ 実測した分割鏡90枚の光学パラメータ分布を  
198枚に拡張

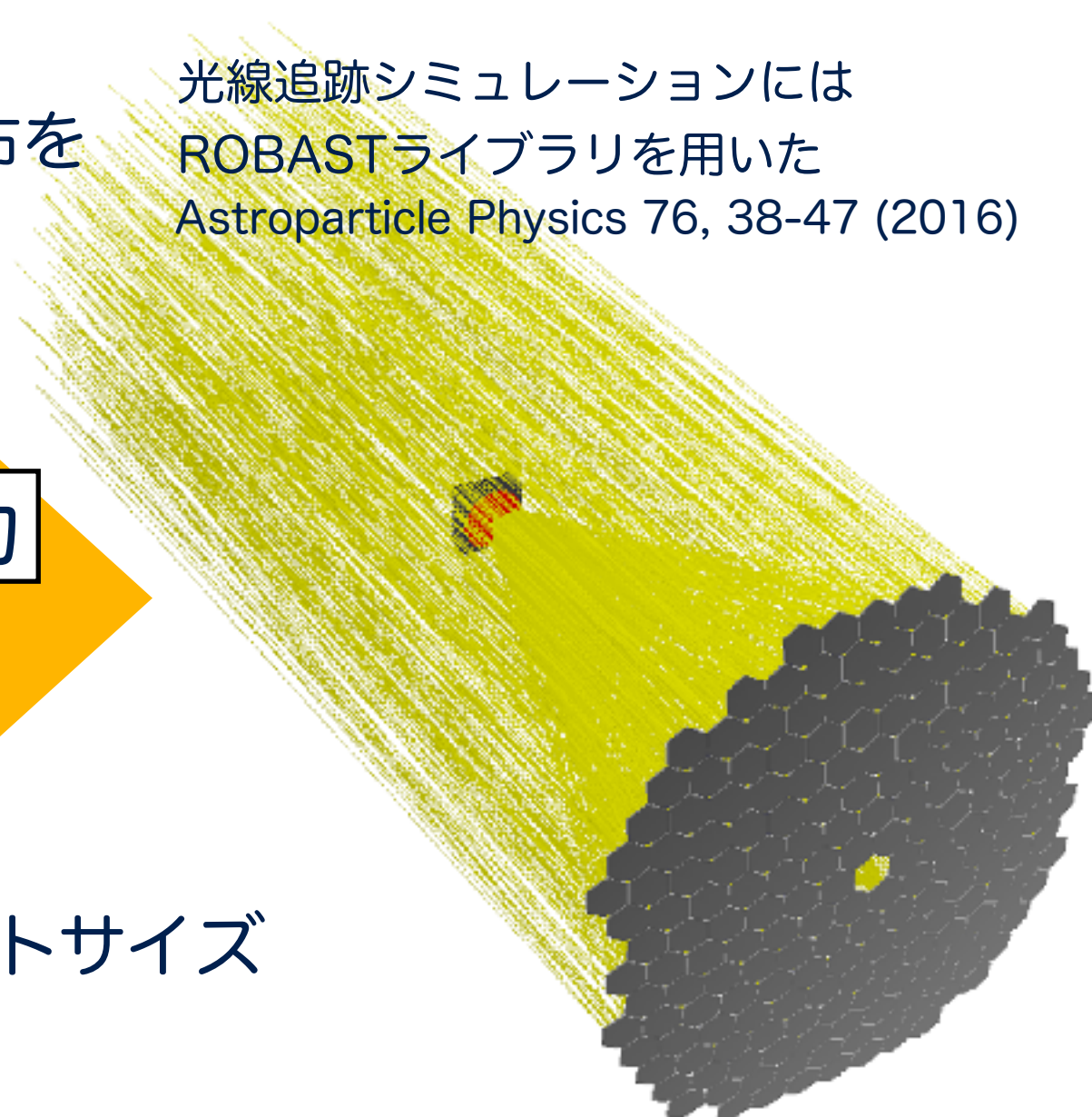
・ 実測の結果を反映

- ・ 曲率半径(R)
- ・ 結像性能(D80)
- ・ 二軸の曲率半径(dR)
- ・ 二軸の曲率半径の方向(Theta)

入力

光線追跡シミュレーションには  
ROBASTライブラリを用いた  
Astroparticle Physics 76, 38-47 (2016)

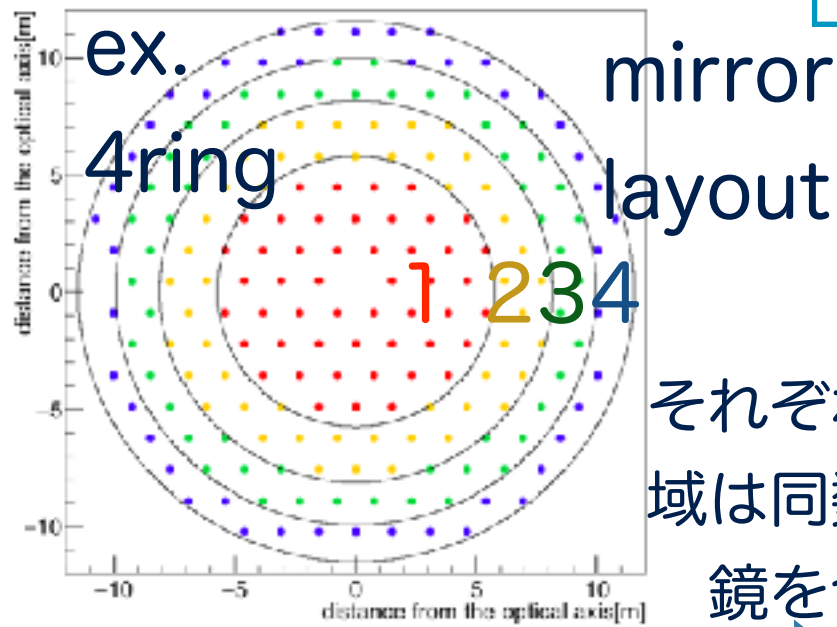
分割鏡の配置手法の違いが望遠鏡スポットサイズ  
に与える影響を見積もった



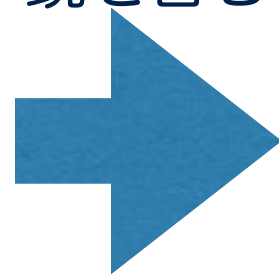
# 分割鏡の曲率半径の最適配置

~Thetaを考慮しないケース~

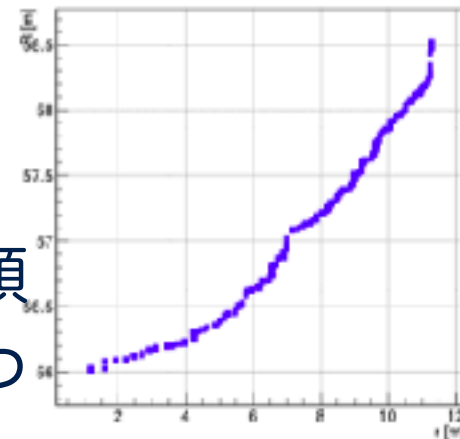
曲率半径	Theta	dR	結像性能
6種類のリングパターン で配置した	ランダム Thetaを考慮せずに 配置したことに相当	測定値を確率分布として それぞれの鏡に与えた	



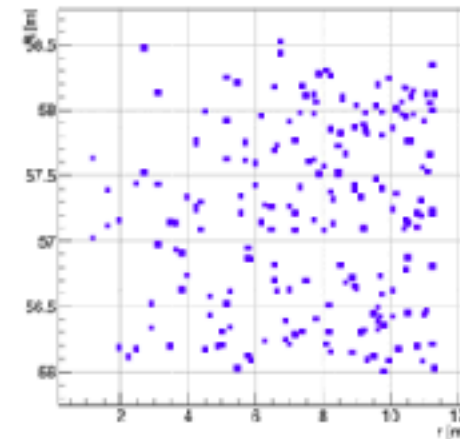
それぞれの領域は同数ずつ鏡を含む



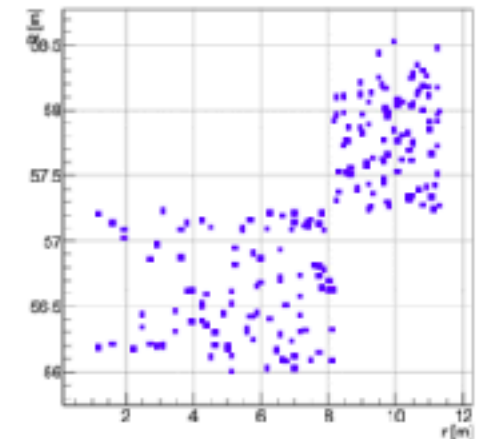
6つのリングパターン



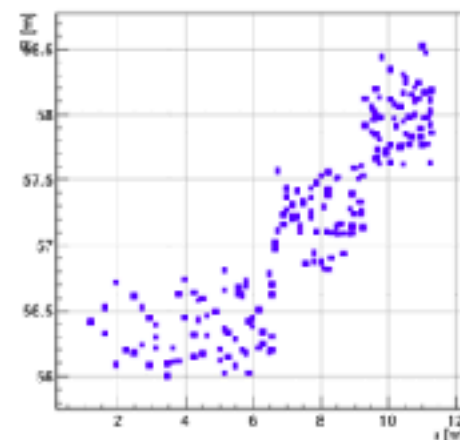
optimal



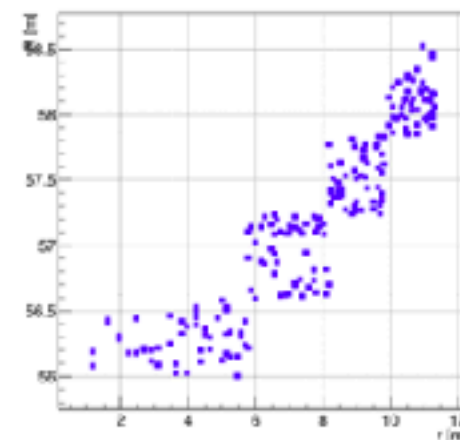
random



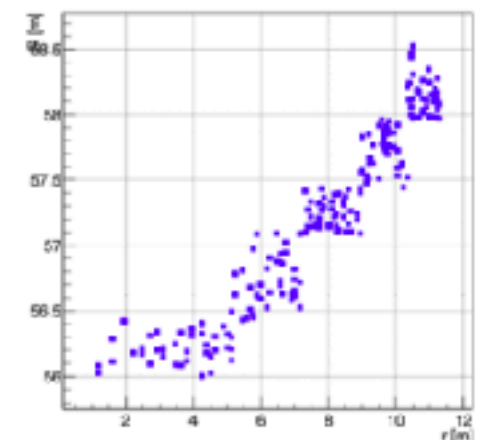
2 ring



3 ring



4 ring



5 ring

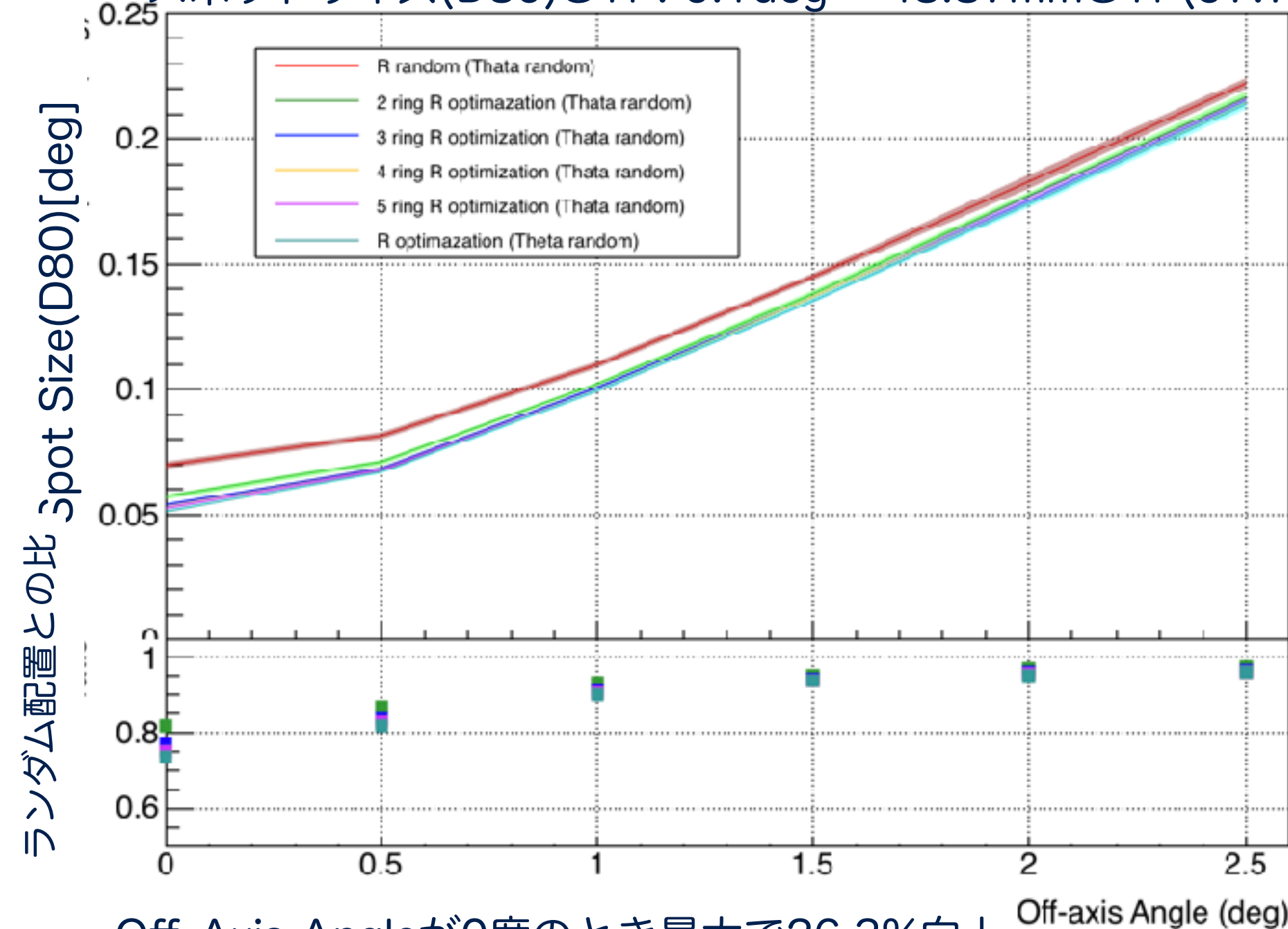
曲率半径(R)[m]

光軸からの距離[m]

# 分割鏡の曲率半径の最適配置

## ~Thetaを考慮しないケース~

スポットサイズ(D80)@1f : 0.1deg = 48.87mm@1f (97.74mm@2f)



ランダム配置の値で規格化

	0.0[deg]
Random	100.0%
2 ring	81.8%
3 ring	77.0%
4 ring	75.7%
5 ring	74.8%
optimize	73.7%

- Off-Axis Angleが0度のとき最大で26.3%向上
- 領域数を増やすごとに望遠鏡スポットサイズは向上する。ランダム配置から2分割配置への差が一番大きく、スポットサイズが18.2%向上した

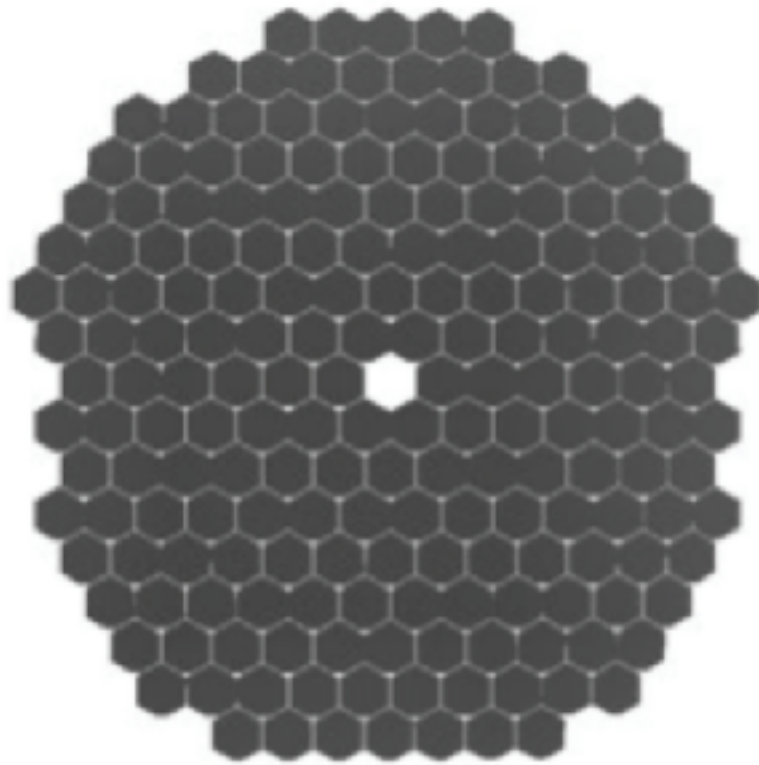


# 分割鏡の曲率半径の最適配置

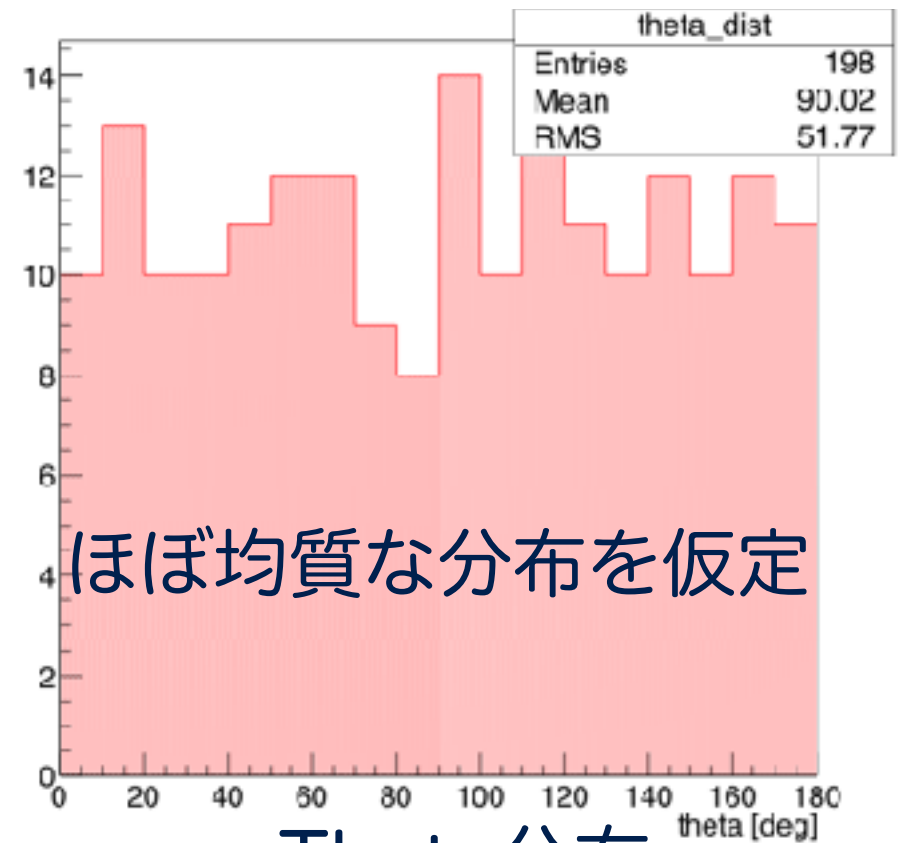
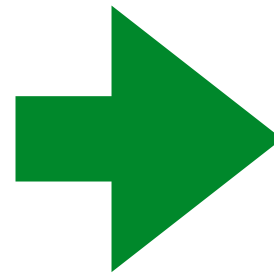
~Thetaの最適化を加えた場合~

曲率半径	Theta	dR	結像性能
6種類のリングパターン で配置した	理想値 鏡の座標値から計算	測定値を確率分布として それぞれの鏡に与えた	

Thetaの最適化



分割鏡配置



ほぼ均質な分布を仮定

Theta分布

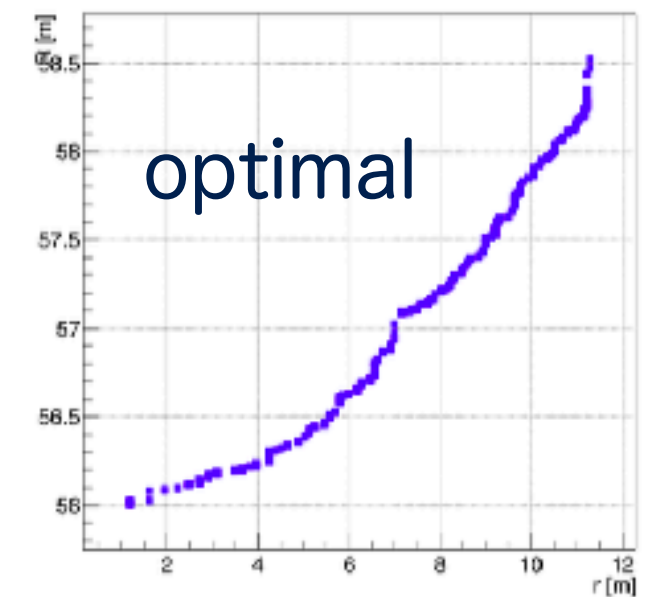
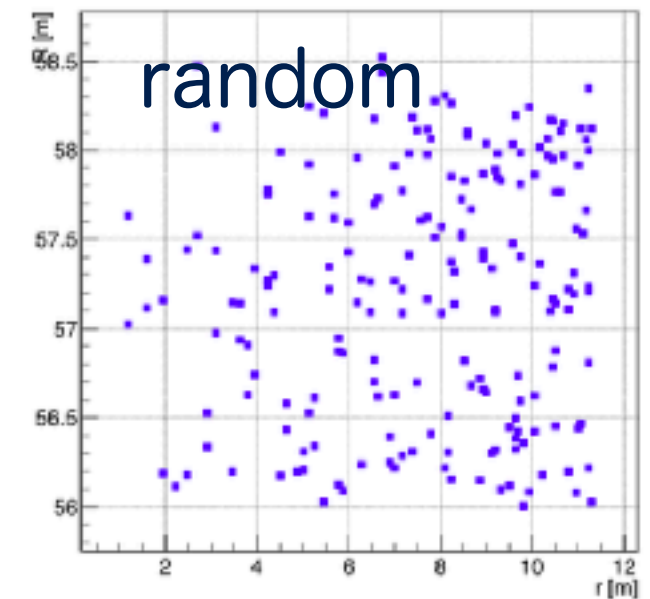
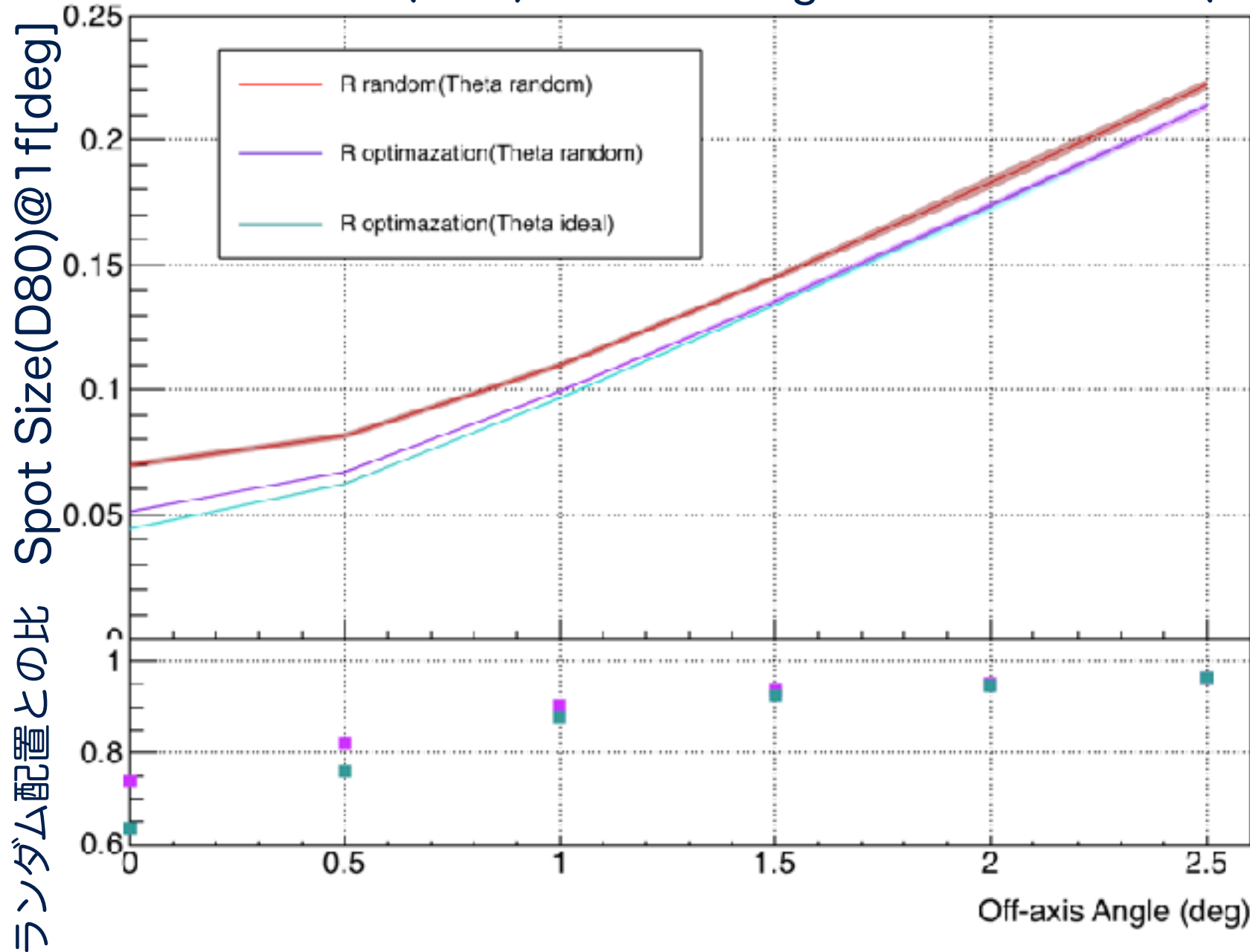
分割鏡の曲率半径の最適化に

Thetaの最適化を加えたものと加えなかったものを比較する

# 分割鏡の曲率半径の最適配置

~Thetaの最適化を加えた場合~

スポットサイズ(D80)@1f : 0.1deg = 48.87mm@1f (97.74mm@2f)



- Off-Axis Angleが0度のときR, Thetaともにランダムのものとの比
- Thetaを考慮して最適配置した場合、考慮しない場合より11%スポットサイズが向上した。

# 結論と展望

---

## 結論

- ・ 新たな分割鏡形状モデルを用いた解析により、得られた光学性能パラメータを用いてLST放物面への分割鏡の最適配置を検討し、個々のパラメータの望遠鏡スポットサイズへの影響を調べた
- ・ その結果、曲率半径の最適化にThetaの最適化を加えるとスポットサイズが最大36%程度向上することがわかった

## 展望

- ・ 本研究での望遠鏡光学系の検討が望遠鏡の物理感度の与える影響を空気シャワーシミュレーションにより求める
- ・ 2台目以降の目標性能に反映させる
- ・ 分割鏡形状のより詳細なモデル化