



cherenkov
telescope
array

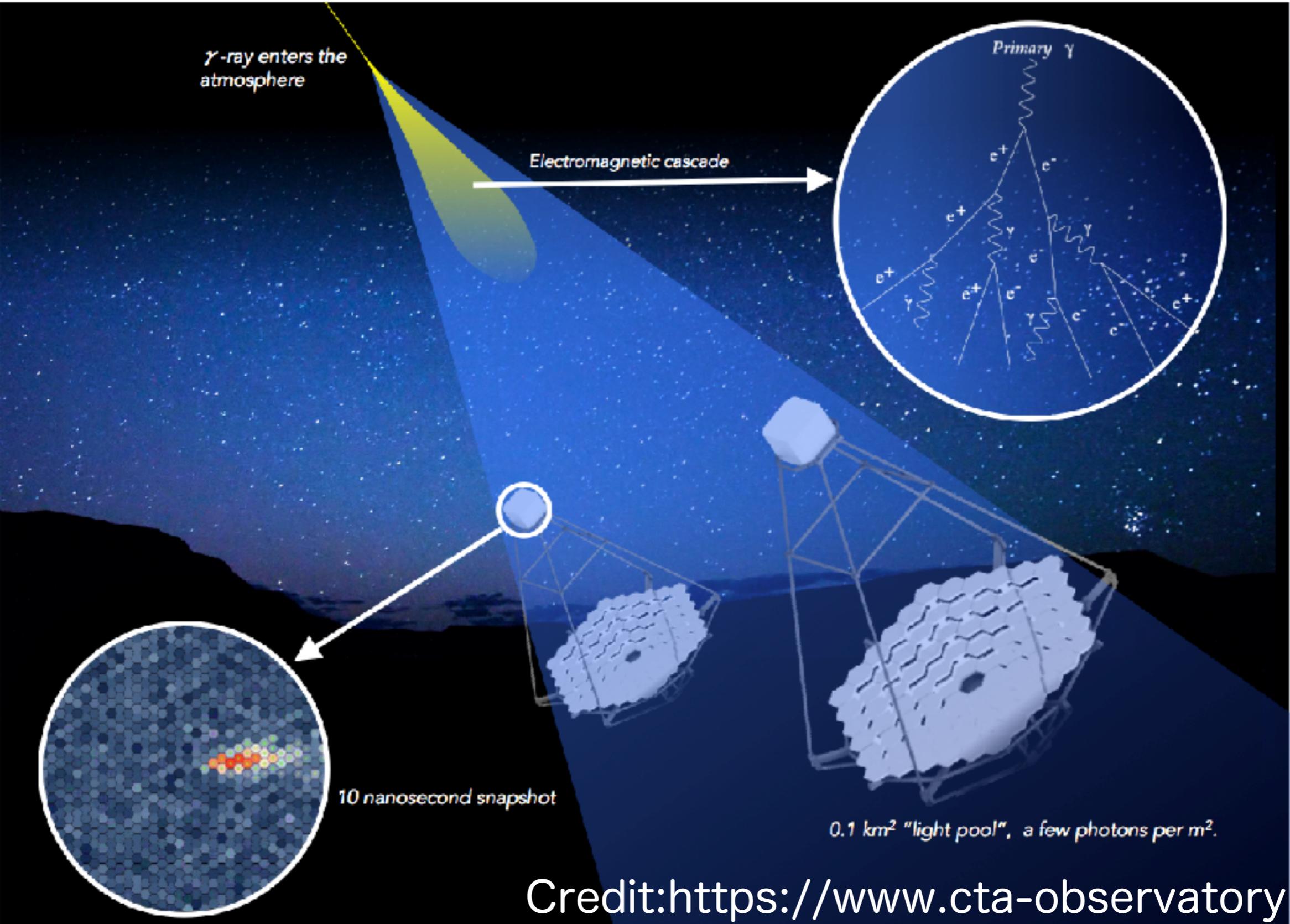


CTA光学系開発

東大宇宙線研 D1

稲田知大

大気チェレンコフ望遠鏡の原理



Cherenkov Telescope Array (CTA)

次世代地上ガンマ線群

★三種類(大中小)の口径の望遠鏡

★従来の望遠鏡と比較すると

◆一桁以上の感度向上

◆一桁広いエネルギー帯域(20GeV ~ 300TeV)

★南北のサイトで観測 北:La Palma(Spain), 南:Paranal(Chile)



CTA北サイト@La Palma

Roque de los Muchachos observatory(標高2200m)
に大口径望遠鏡初号機を建設中(合計4台建設予定)



CTA北サイト@La Palma

Roque de los Muchachos observatory(標高2200m)
に大口径望遠鏡初号機を建設中(合計4台建設予定)



CTA北サイト@La Palma

Roque de los Muchachos observatory(標高2200m)
に大口径望遠鏡初号機を建設中(合計4台建設予定)

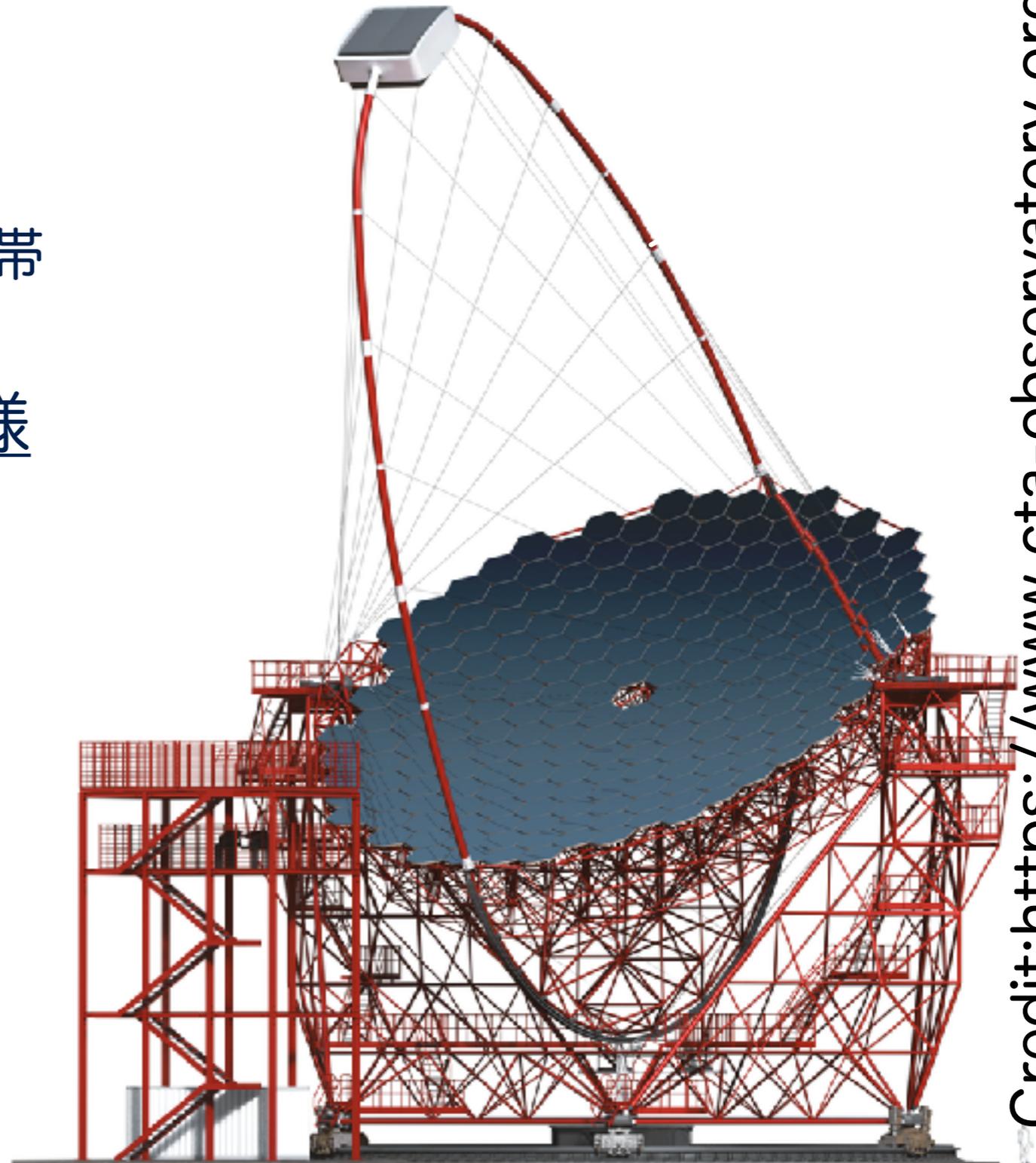


大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope : LST)

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



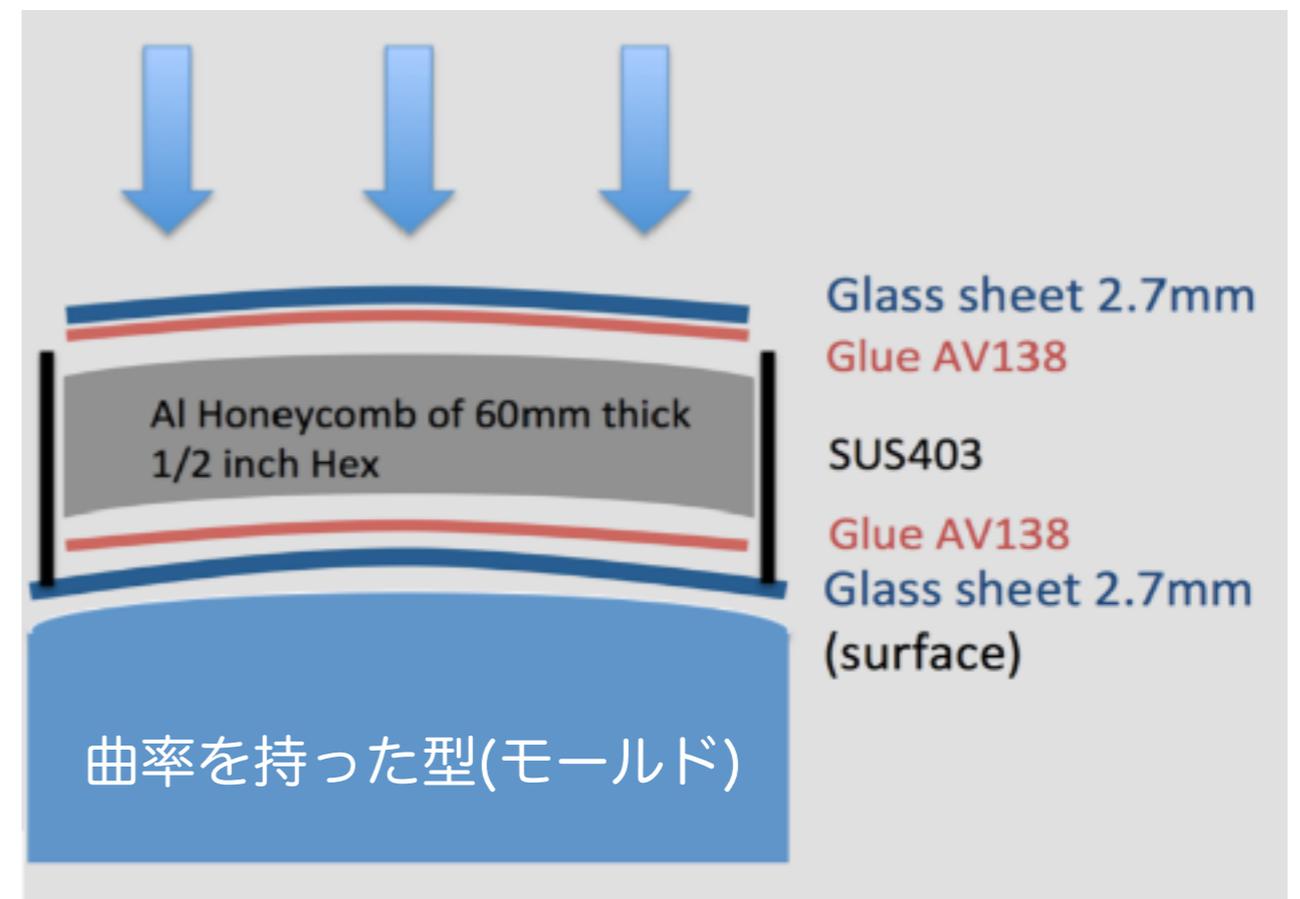
分割鏡開発

★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6種類の曲率を用意
 - ◆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
 - 約500枚製造済
 - 約400枚がLa Palmaにshipping済

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

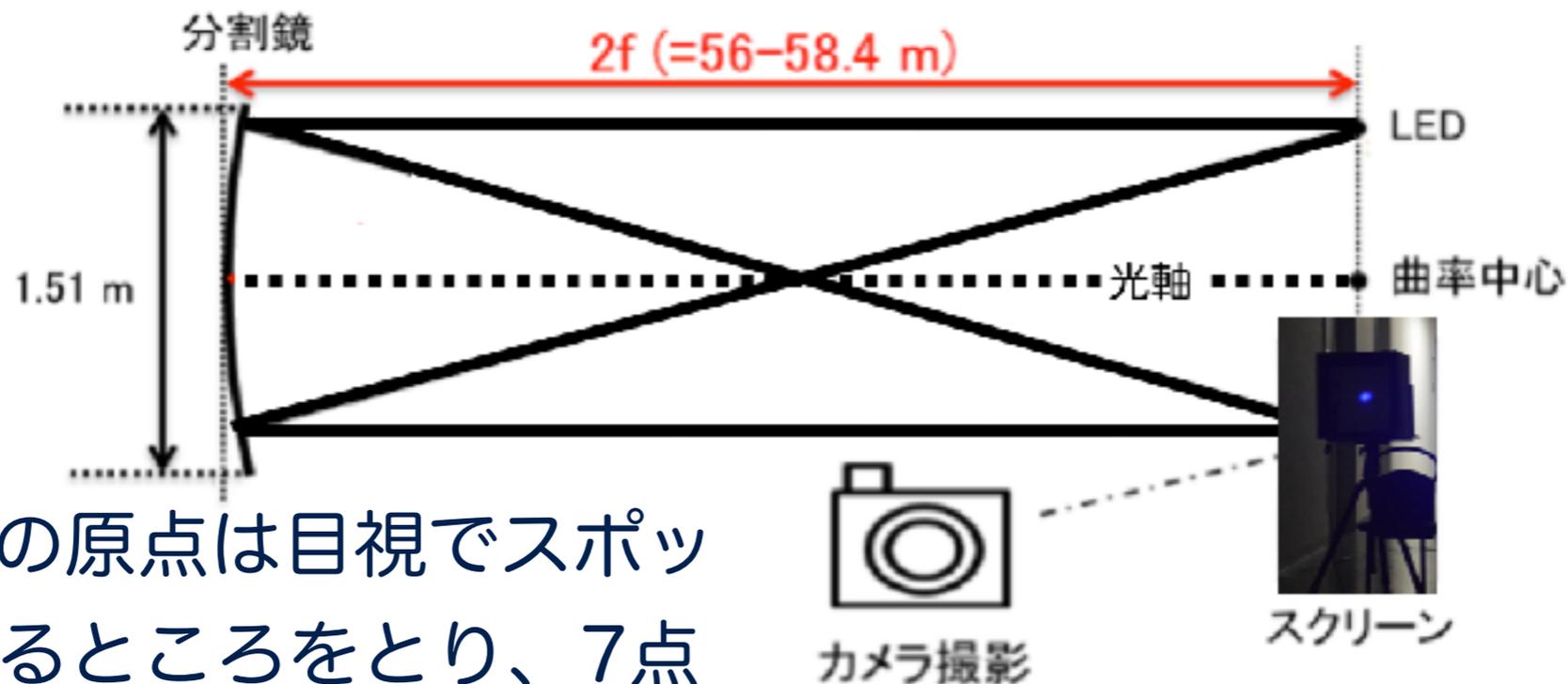
★品質管理のための測定

★望遠鏡放物面への配置の最適化

性能評価手法：2f法

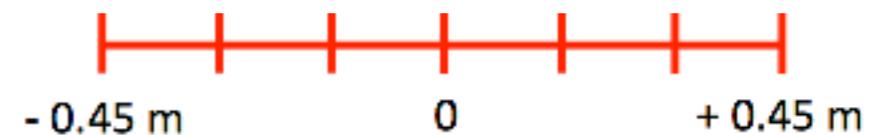
★曲率半径(R)だけ離れた点光源からの反射像の広がりを測定

★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目視でスポットが小さくなるところをとり、7点測定後、双曲線でfittingする。

@ICRR測定



分割鏡の性能評価結果(宇宙線研+三光精衡所)

検査の流れ

- (1)納品前に三光精衡所で全数検査
- (2)納品後に宇宙線研で抽出検査(当初100%, 後に20%)

曲率半径(R)

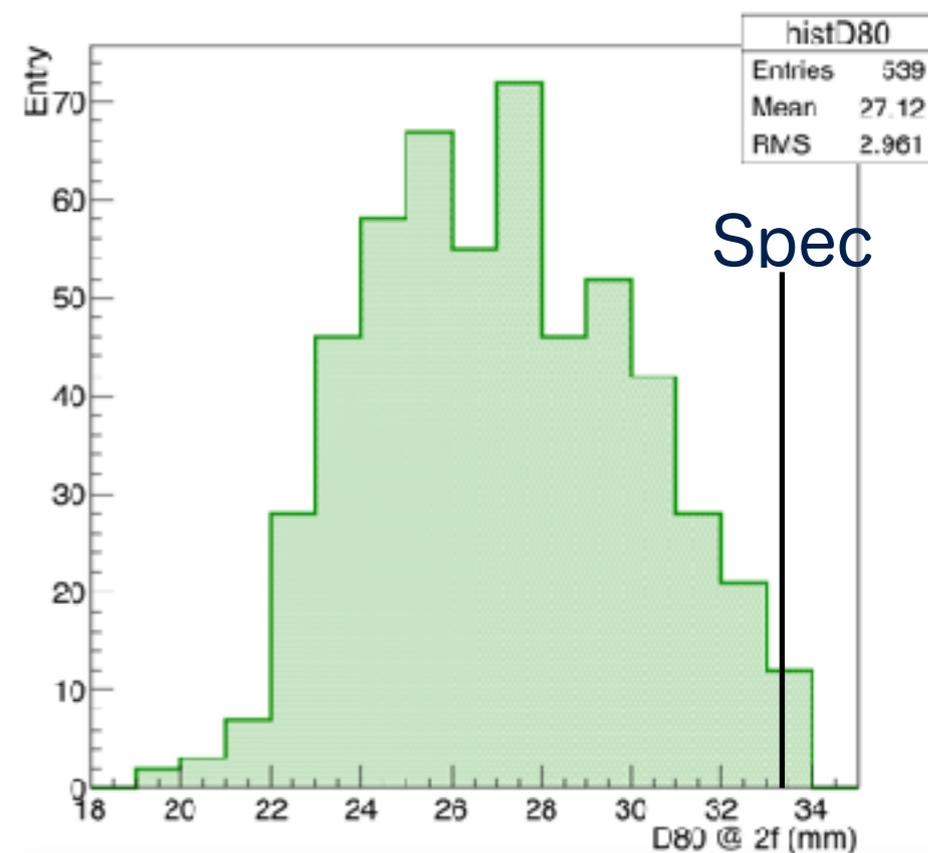
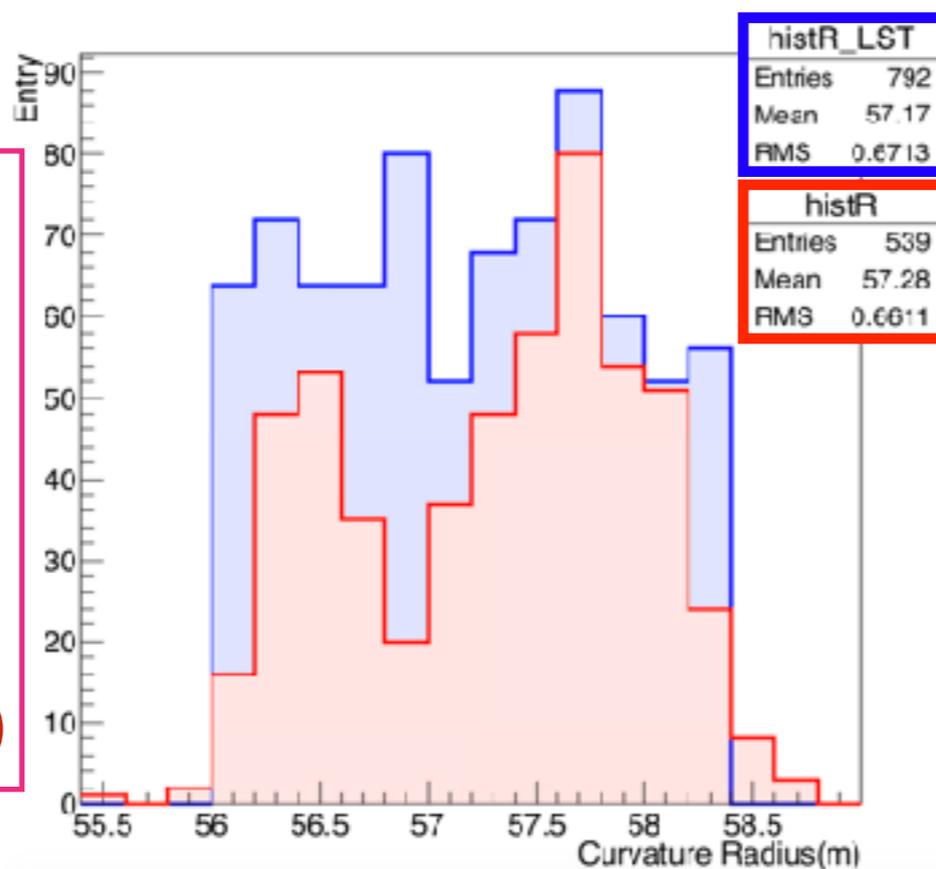
Spec. 56.0 - 58.4m

スポットサイズ(D80)

Spec. D80@2f<33.3mm

青: LST1台分ごとを理想的な放物面と考えると、それを4台分製造したときの分布。

赤: 測定結果
(三光精衡所+宇宙線研)



★今年度さらに400枚製造予定。

◆理想分布の数に足りないRの範囲の鏡を重点的に製造する

分割鏡の性能評価@La Palma

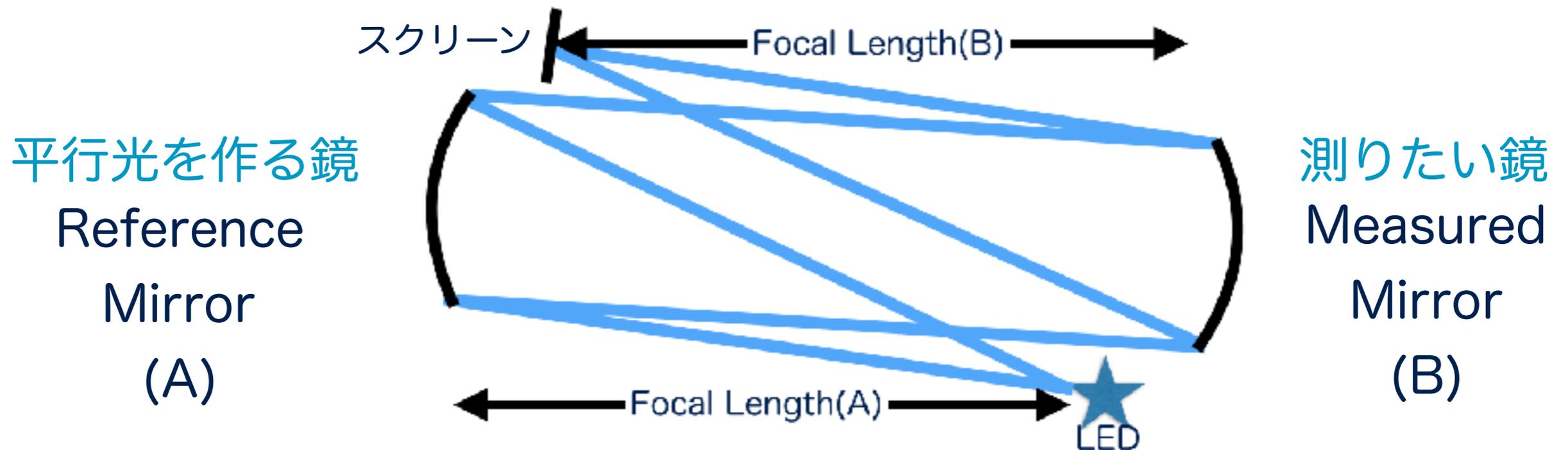
目的

使用する分割鏡の性能を評価

- ★今年の1月, 5月にLa Palmaに向けてshipping(合計約400枚)
- ★shippingの影響がないかを抽出検査

性能評価手法: 1f法

La Palmaには2f法が行える屋内スペースがない
→省スペース可能な1f法を用いた



★宇宙線研での測定でスポットサイズが最も小さい分割鏡を Reference Mirrorとして平行光を作る鏡として用いた。

分割鏡の性能評価@La Palma

7/25 ~ 9/6(6week)、稲田、黒田(ICRR)の
学生2名がLa Palmaに滞在し、測定を進めた



分割鏡の性能評価 1fと2fでの比較

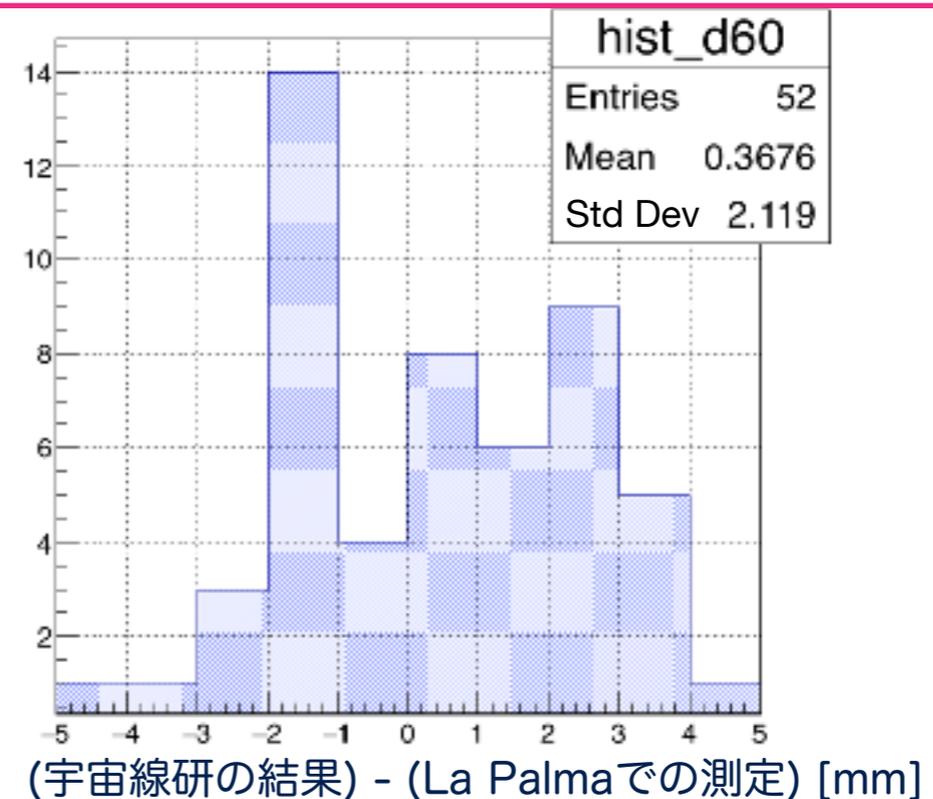
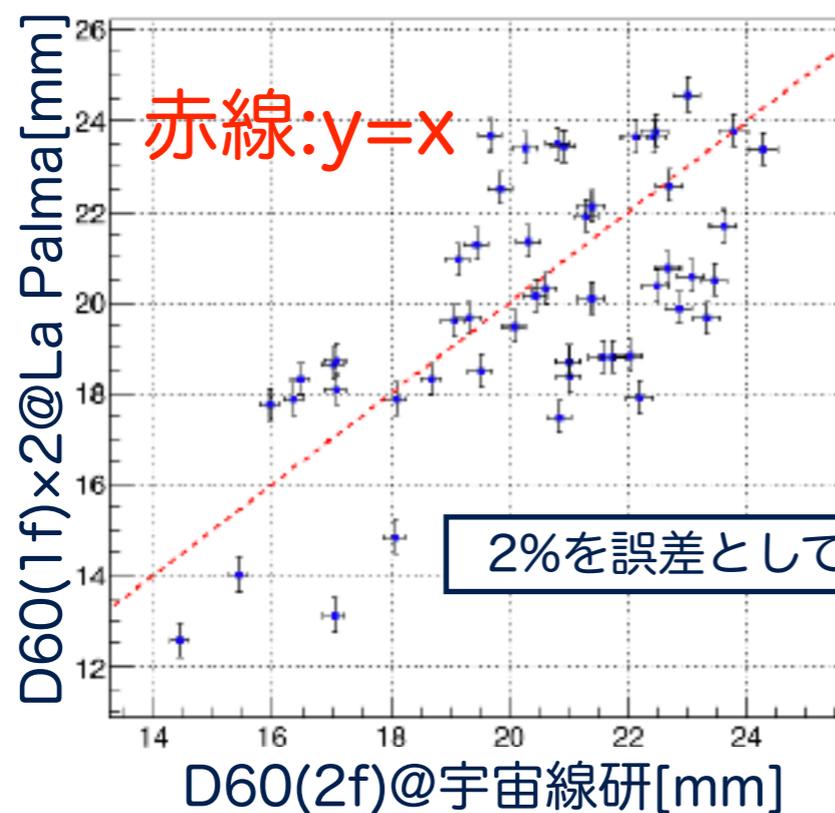
スポットサイズ(D60)

★1f測定では、直接測定したい鏡のスポットサイズを測ることはできない。

◆測定したスポットイメージはreference mirrorとmeasured mirrorのスポットイメージのconvolution

◆スポットイメージの中心部分(D60)はgaussianだと仮定し、deconvolution

$$\blacksquare (\sigma_{\text{mes}}@1f)^2 = (\sigma_{\text{obs}}@1f)^2 - (1/2 \times \sigma_{\text{ref}}@2f)^2 \quad (\sigma = \text{D60})$$

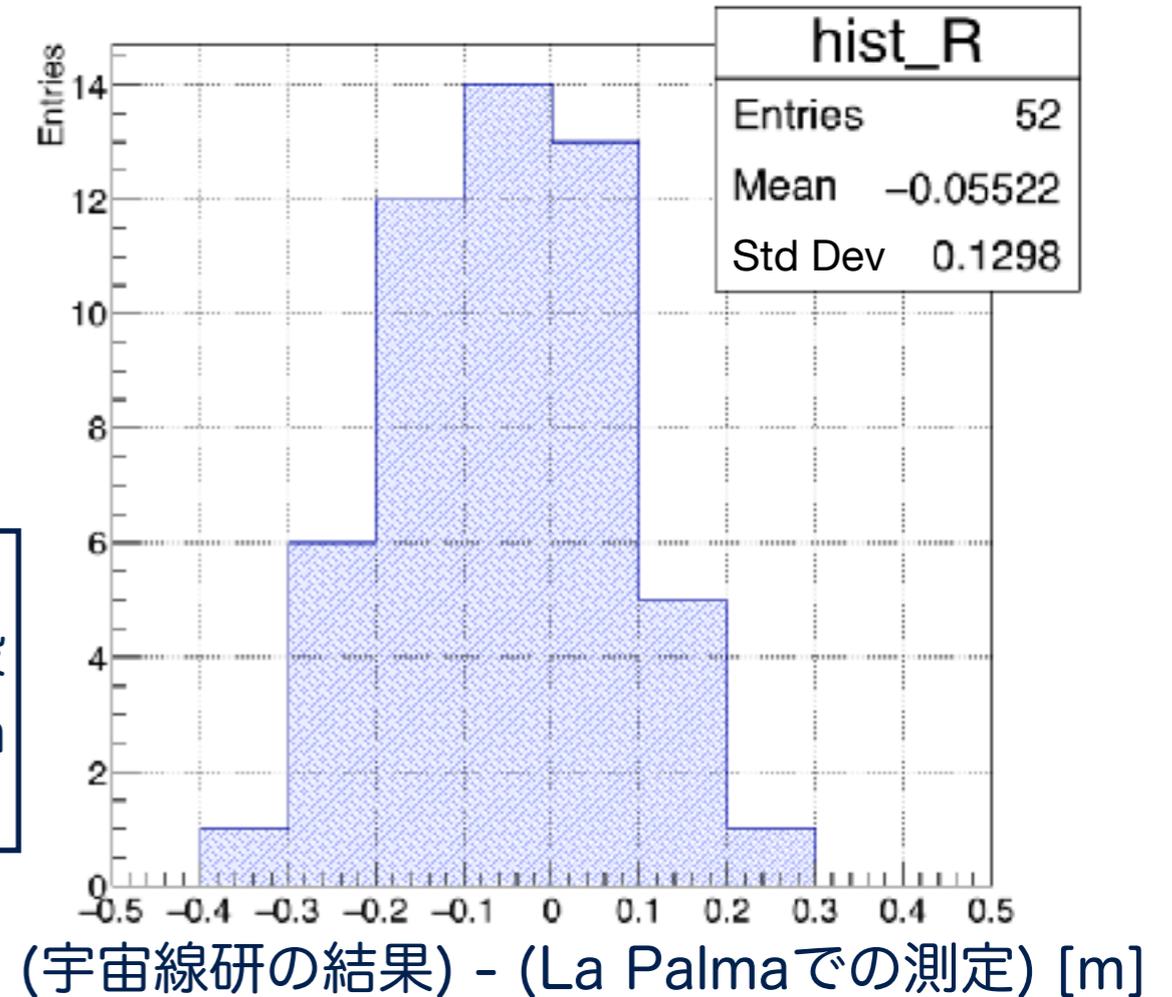
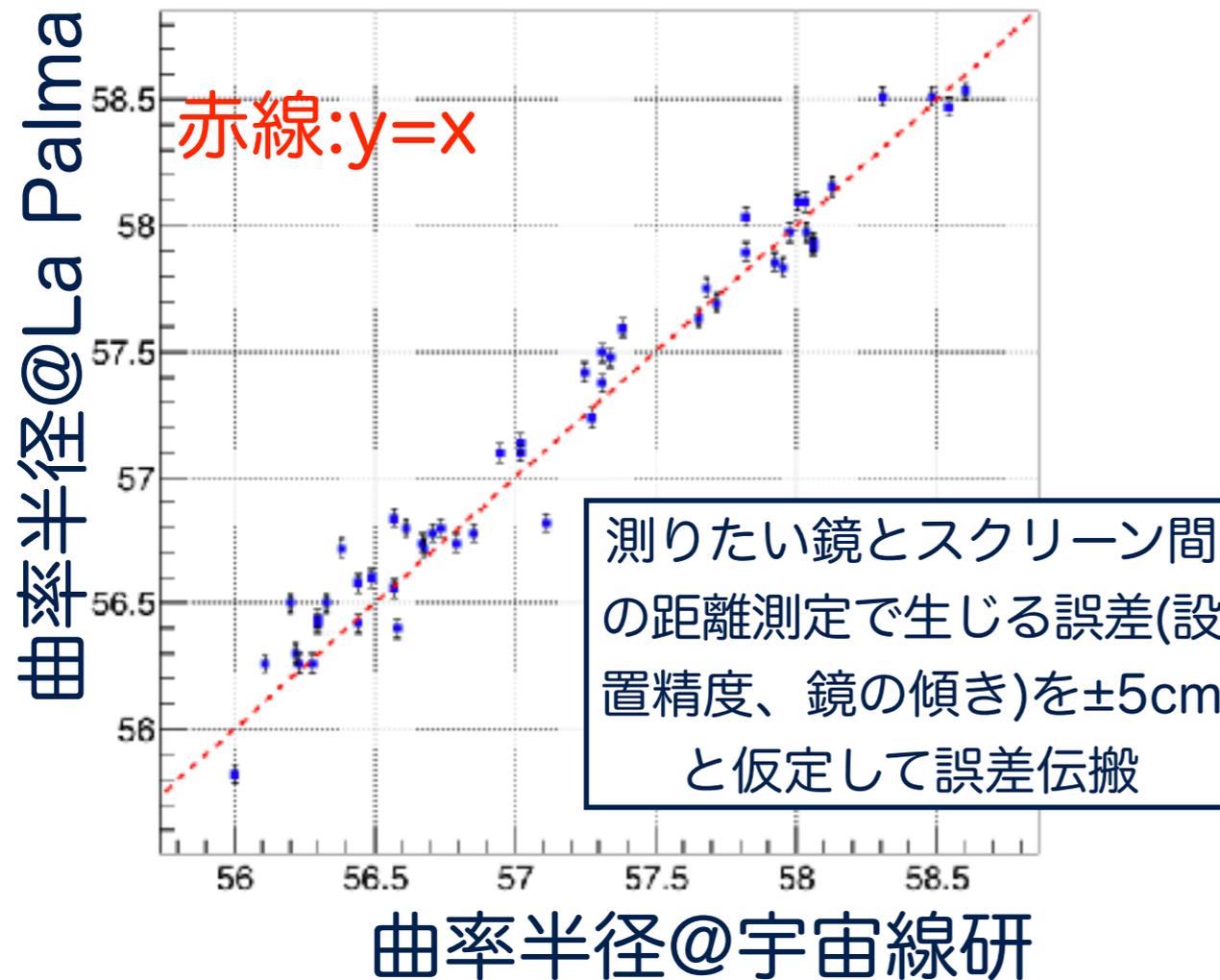


★deconvolutionや測定の精度より、運搬中に変形したのかはすぐに切り分けることはできないが、全ての鏡が両測定でスペックを満たしているため、望遠鏡の結像性能には問題ない。

分割鏡の性能評価 1fと2fでの比較

曲率半径(R)

★宇宙線研での測定とLa Palmaでの測定の比較



★こちらも測定精度により、本当に運搬中に変形したのかはすぐに切り分けることはできない。

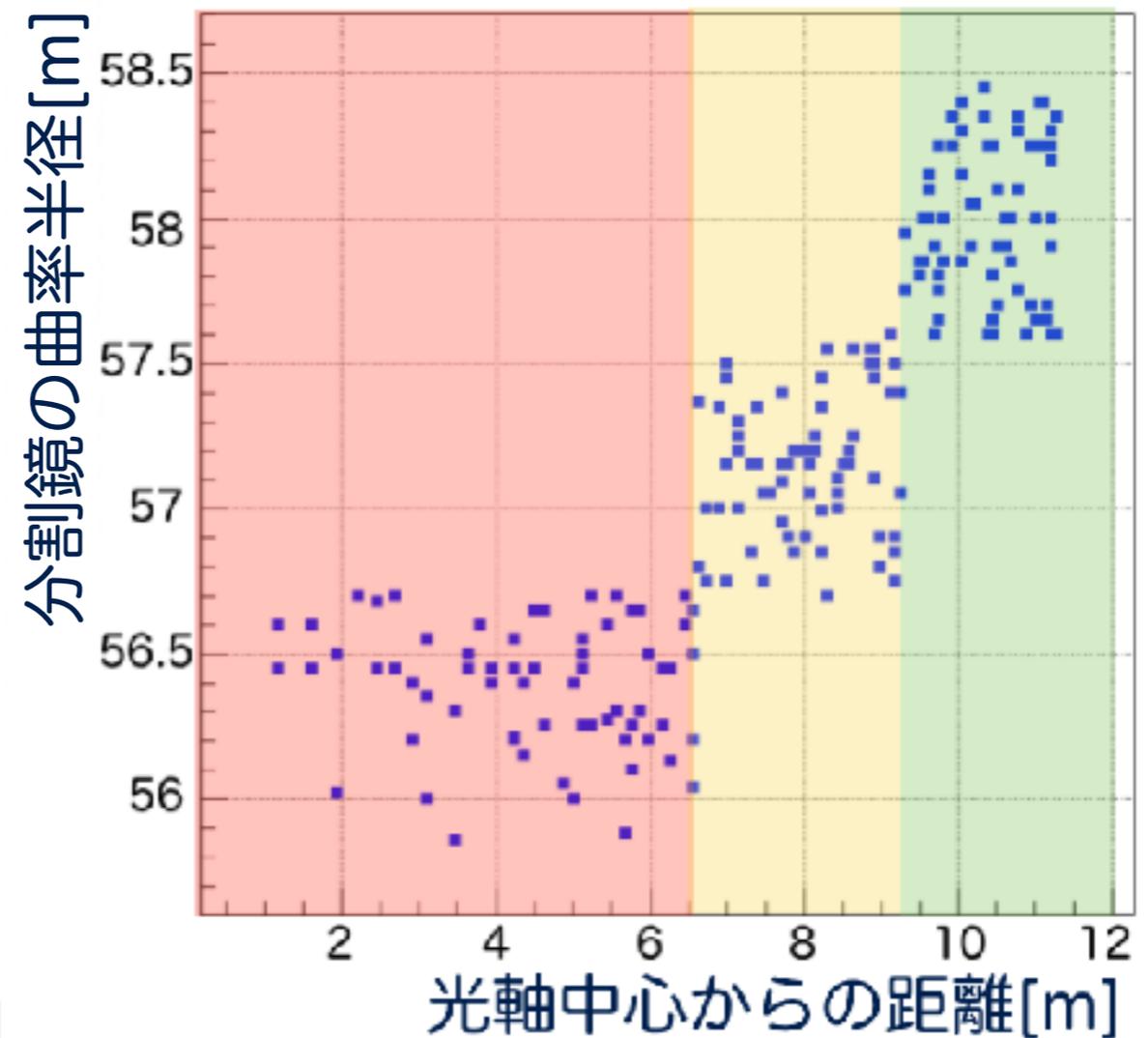
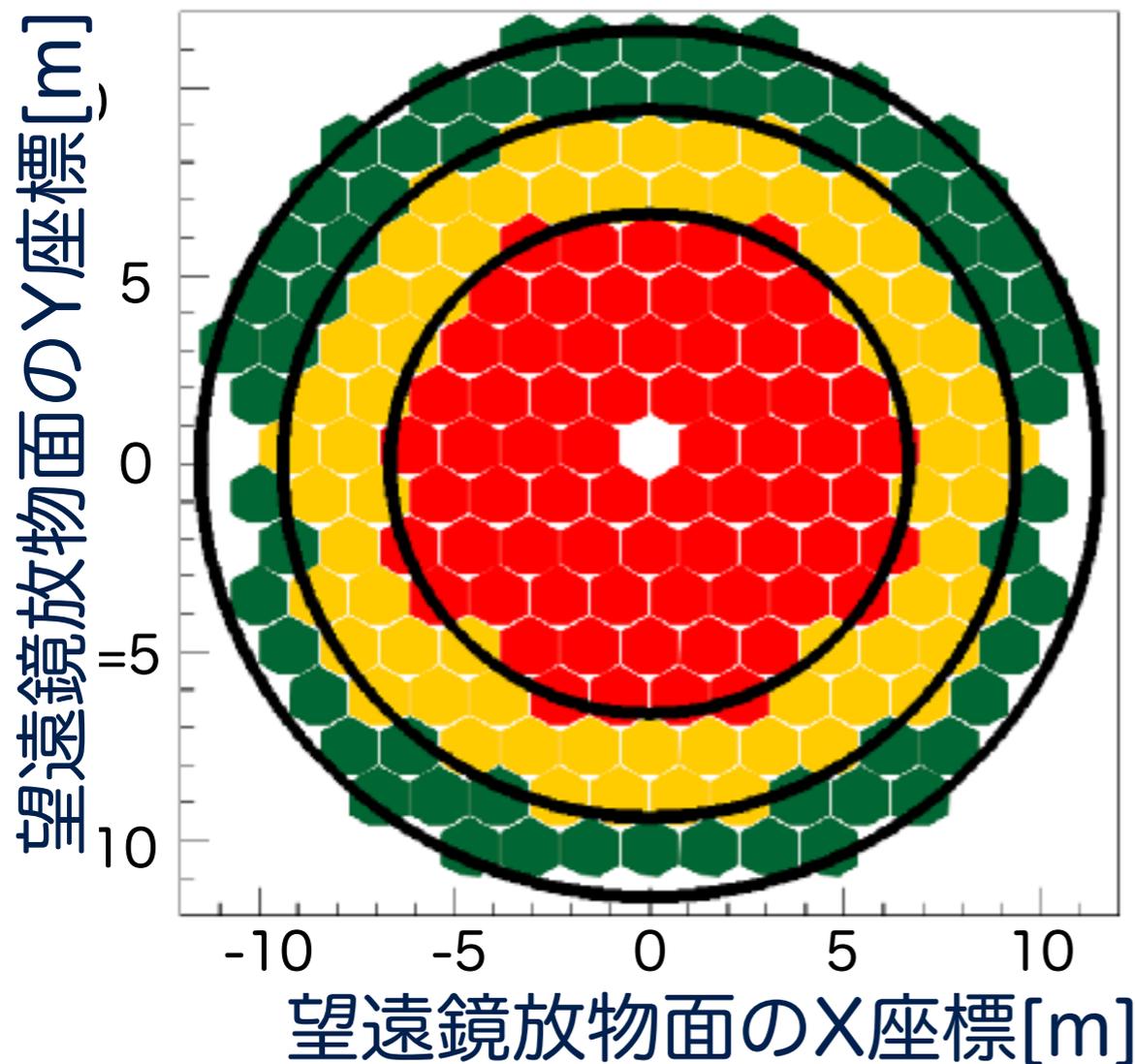
★標準偏差で12cm(R)ほどの差が出てしまおうが、後述する配置手法により、望遠鏡への結像性能には影響を与えない程度

分割鏡配置の基本方針：Ring method

分割鏡の配置方法

★”Ring method”

◆それぞれのringは同じ面積=同じ枚数の鏡



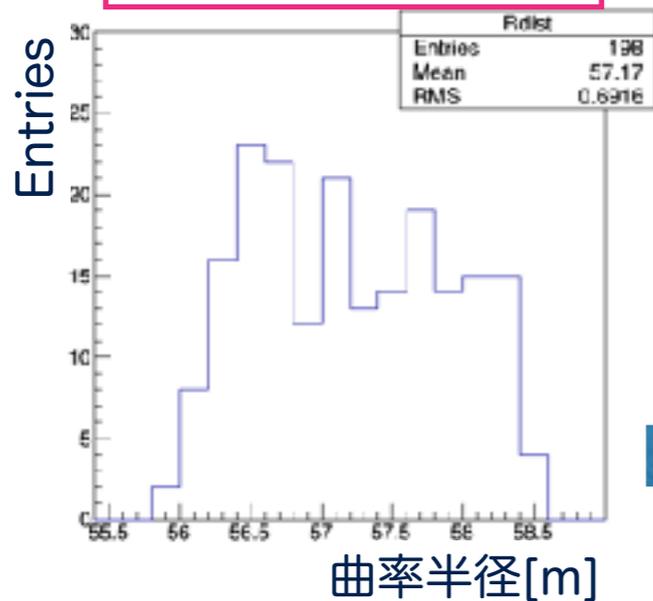
★望遠鏡の結像性能とインストールの際の利便性を考慮して、最適なリング数を決める

放物面の結像性能：光線追跡シミュレーション

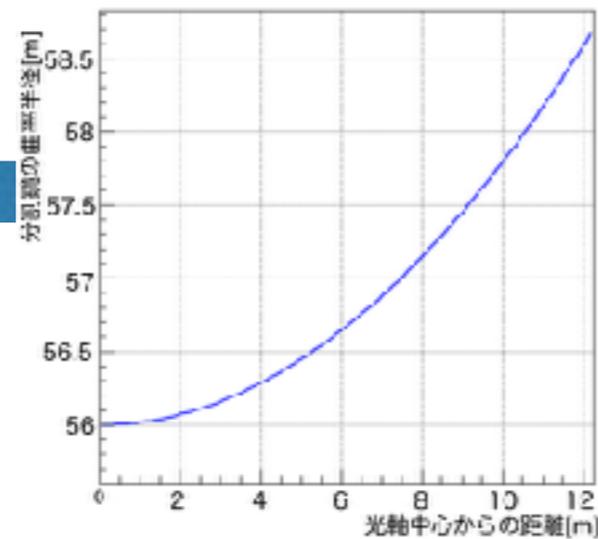
★2fでの測定結果539枚から理想分布に近い198枚を抽出

◆放物面への配置方法を変えて、光線追跡シミュレーションを行い、望遠鏡スポットサイズを比較する。

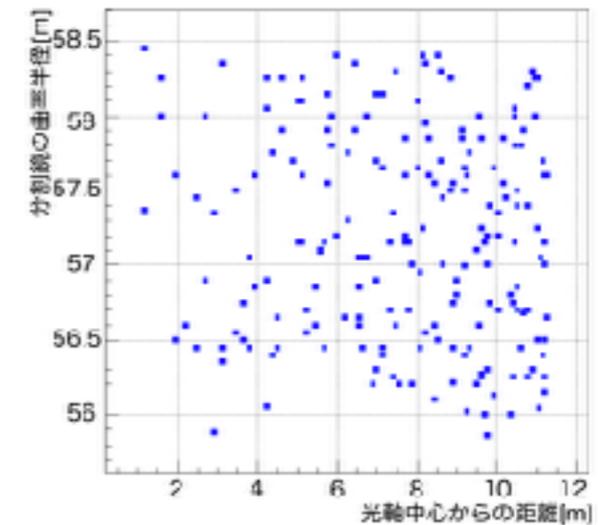
抽出した分布



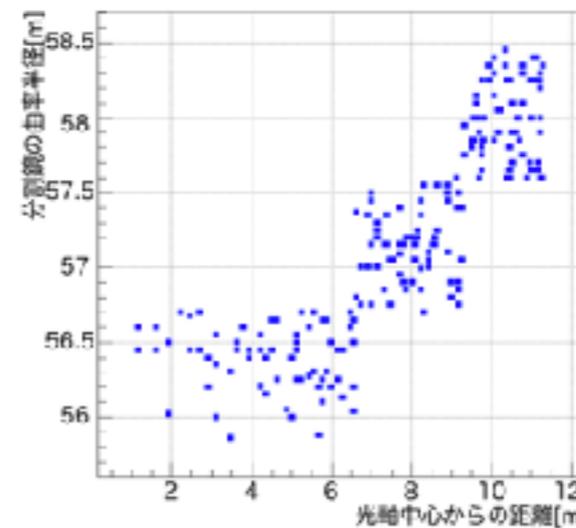
cf. 放物面上の曲率半径と
光軸からの距離の関係



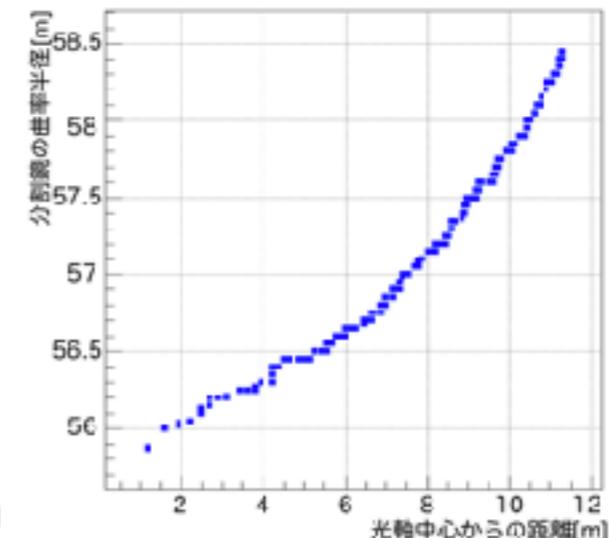
放物面への配置方法



Random

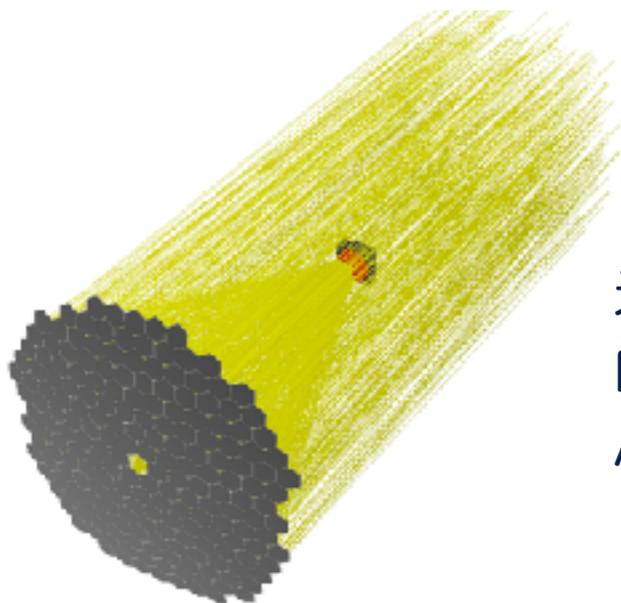


3 ring

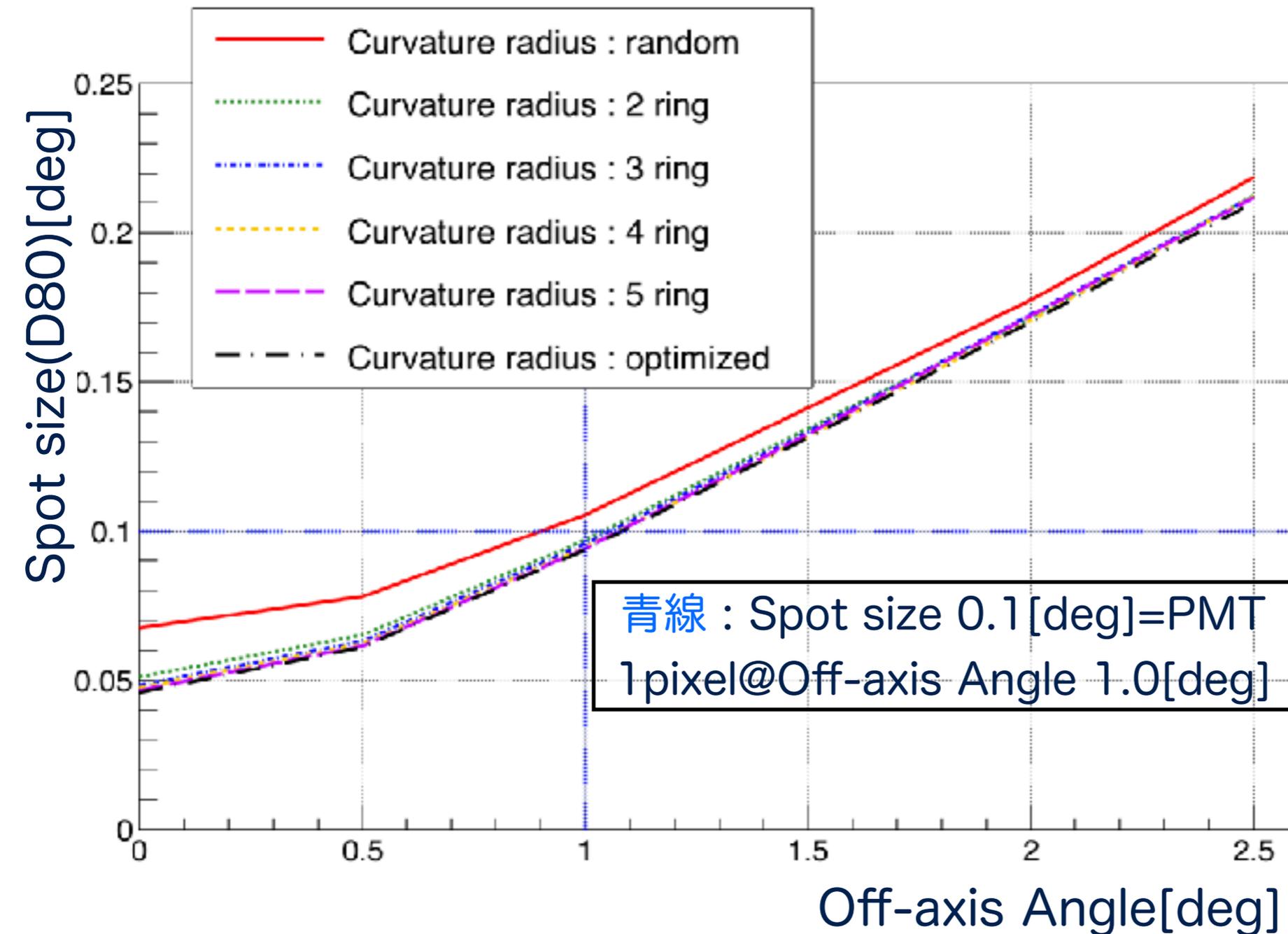


Optimized

光線追跡シミュレーションには
ROBASTライブラリを用いた
A.Okumura(2016)



放物面の結像性能：光線追跡シミュレーション結果



Off-axisAngle=0.0[deg]
の時の”random”の値で
規格化

Method	Ratio[%]
2 ring	75.9
3 ring	71.6
4 ring	70.2
5 ring	69.1
Optimized	67.6

★ring数を3以上に増やしても、数%しか向上が見込めない。
インストールの際の利便性も考慮して、3 ringが妥当

建設に向けて

★今年度500枚の分割鏡を製造予定

◆すでに100枚は納品済み、残り400枚

★合計約1000枚を望遠鏡4台へ振り分ける

★来年冬から建設中の初号機へ段階的にインストール予定

◆2台目以降も順次建設予定

まとめ

★約500枚の性能評価が終了

- ◆Specificationを満たしており、製造は順調
- ◆年内に400枚製造予定

★La Palma島でも分割鏡の性能評価を行なった

- ◆shippingの影響の有無を確認
- ◆望遠鏡の結像性能に影響を与えるほどの変形は見られなかった

★今年度中に製造予定の合計約1000枚を望遠鏡4台へ振り分ける

- ◆配置方法は”Ring method”