

CTA報告 170: CTA大口径望遠鏡2-4号基における 分割鏡配置の決定と光学性能の検証

小原 光太郎、稲田 知大^A、野田 浩司^A、深見 哲志^A、
Ivegen Vovk^A、奥村 暁^B、加賀谷 美佳^A、片桐 秀明、
齊藤 隆之^A、手嶋 政廣^{A,C}、千川 道幸^A、山本 常夏^D、吉田 龍生、
他 CTA-Japan Consortium

茨城大理、東大宇宙線研^A、名大 ISEE^B、
Max - Planck - Inst. Phys.^C、甲南大理工^D

Cherenkov Telescope Array (CTA)計画

- ◆ 大中小の異なる口径の望遠鏡を配置
- ◆ 現行の望遠鏡に対して
 - ・ 感度を**10倍**向上
 - ・ 観測可能エネルギー領域を**20 GeV ~ 300 TeV**に拡大
- ◆ LST初号基(LST1)：2018年10月に完成、安定運転中
2号基以降(LST2-4)：要素開発が終了、建設待機段階である。

北サイト：
スペイン・La Palma島

大口径望遠鏡
Large-Sized Telescope(LST)
20 GeV -3 TeV 口径 23 m 視野 4.5°

CTA完成予想図

<https://www.cta-observatory.org/about/>

Credit: Gabriel Pérez Diaz, IAC

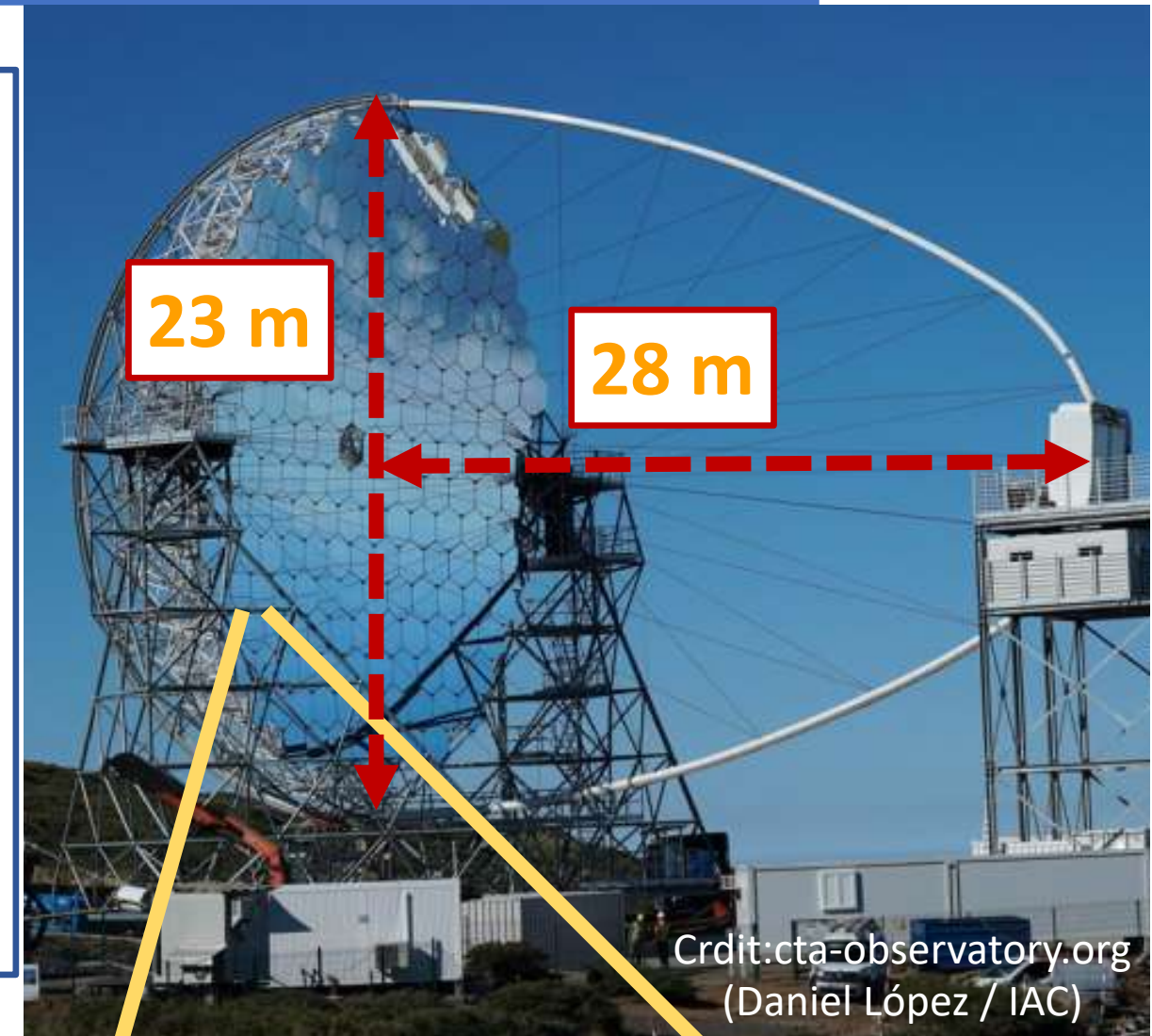
大口径望遠鏡(Large-Sized Telescope : LST)

観測エネルギー帯

◆ 20 GeV ~ 3 TeV

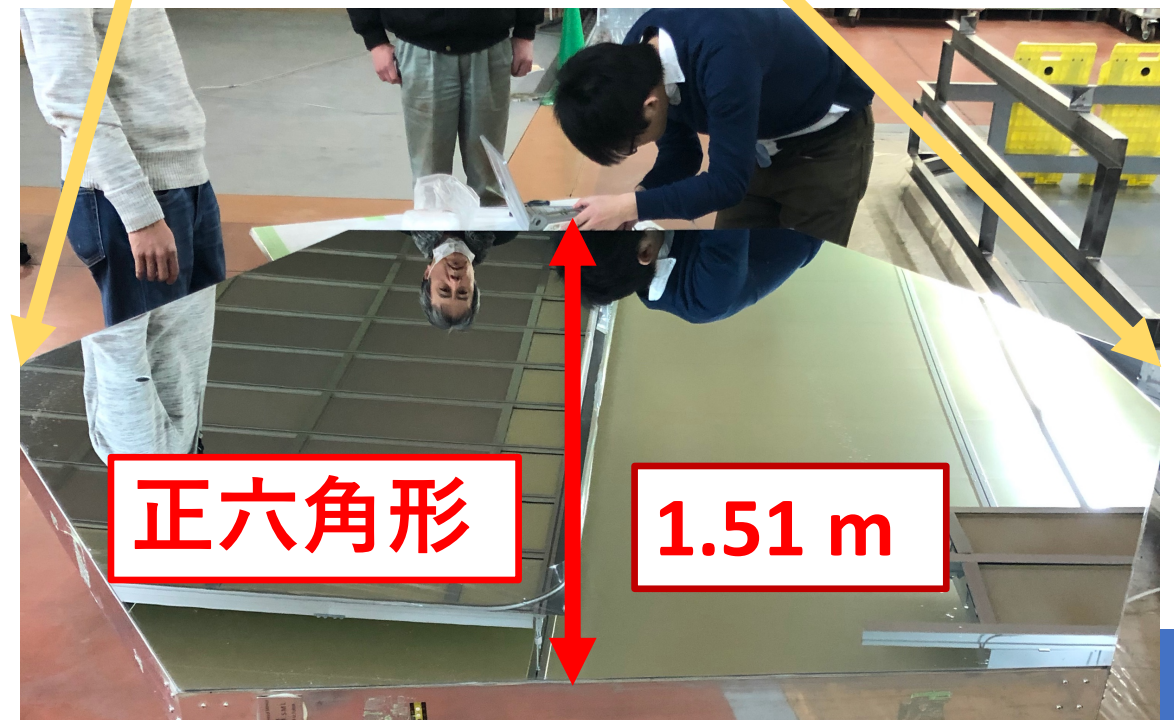
LST光学系仕様

- ◆ 口径 : 23 m
- ◆ 焦点距離 : 28 m
- ◆ カメラピクセルサイズ : 0.1° (50 mm)
- ◆ 主鏡面 : 放物面形状
→ 198枚の球面分割鏡によって実現



分割鏡仕様

- ◆ 重さ : ~ 50 kg
- ◆ 曲率半径 : 56.0 m ~ 58.4 m
→ LSTの放物面形状に対応
- ◆ スポットサイズ
16.7 mm以下 @分割鏡の焦点距離
→ ピクセルサイズの1/3のサイズ



本研究の目的

- ① La Palma島にある741枚の分割鏡から
LST2-4に搭載する分割鏡を決定し、
LST1と同等の光学性能を持つことを示す。

分割鏡の性能

スポットサイズ、曲率半径(2f法測定)
反射率(テストピースの測定)

- ② ピースの測定結果を用いて
LST2-4の全体の反射率が
CTAの仕様を満たすことを検証する。

主鏡面の反射率仕様

> 85 % @ 300 nm ~ 550 nm

> 90 % @ 400 nm

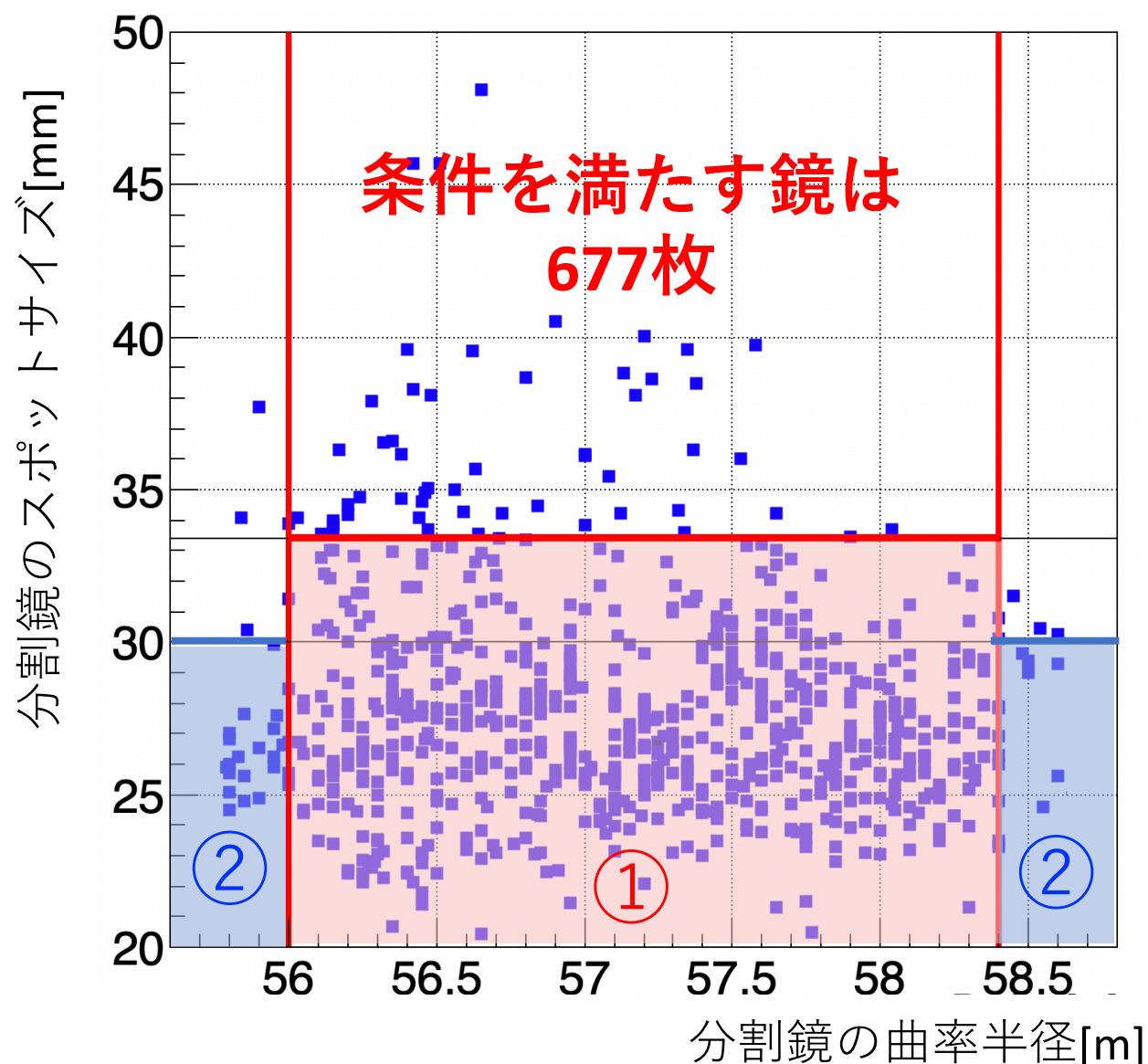
LST2-4号基に搭載する分割鏡の選定

741枚からLST2-4に搭載可能な分割鏡を選ぶ条件

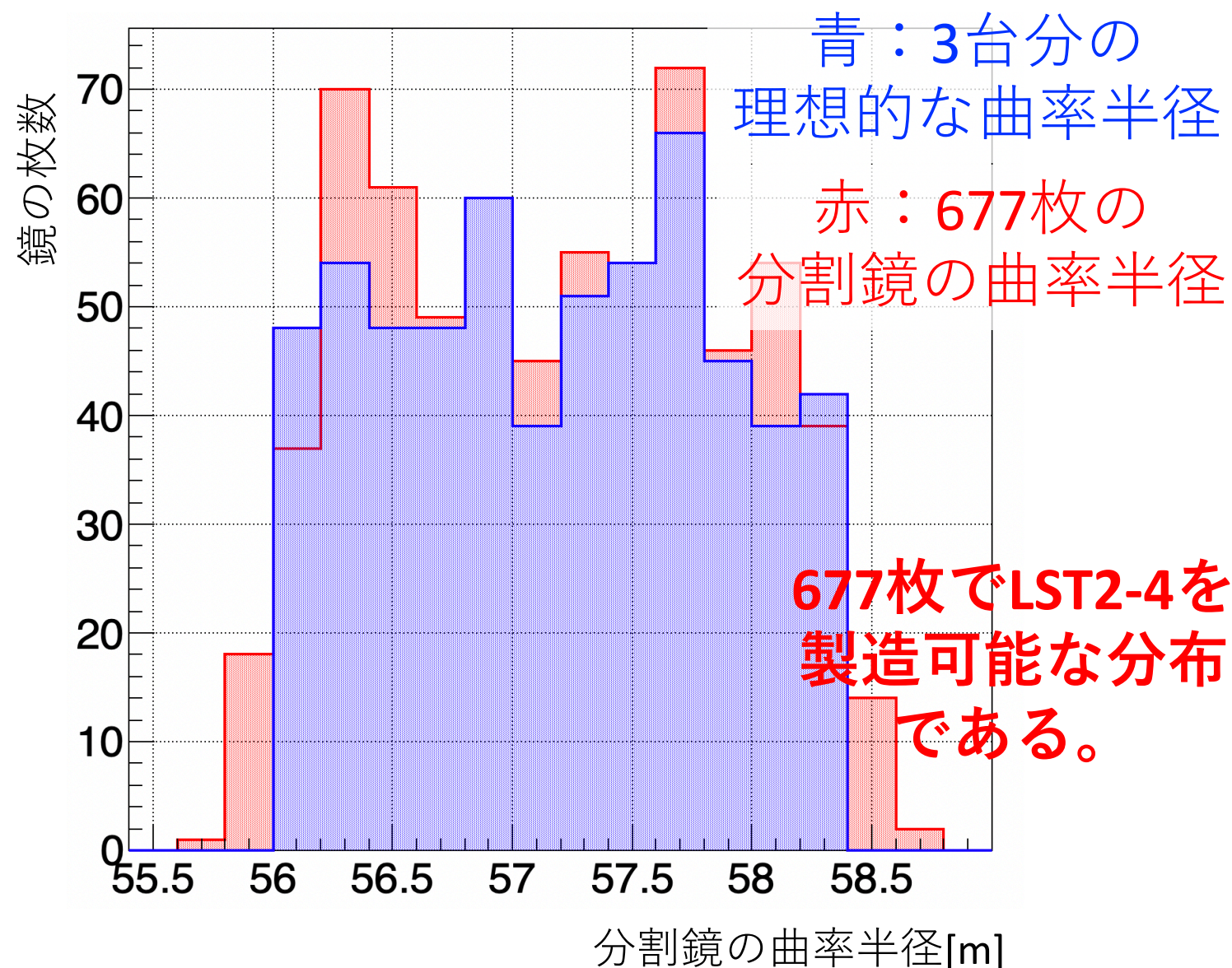
①曲率半径：56.0 m < R < 58.4 m
スポットサイズ：33.4 mm以下

②曲率半径：R < 56.0 m、R > 58.4 m
スポットサイズ：30 mm以下

曲率半径とスポットサイズの分布



677枚の曲率半径の分布

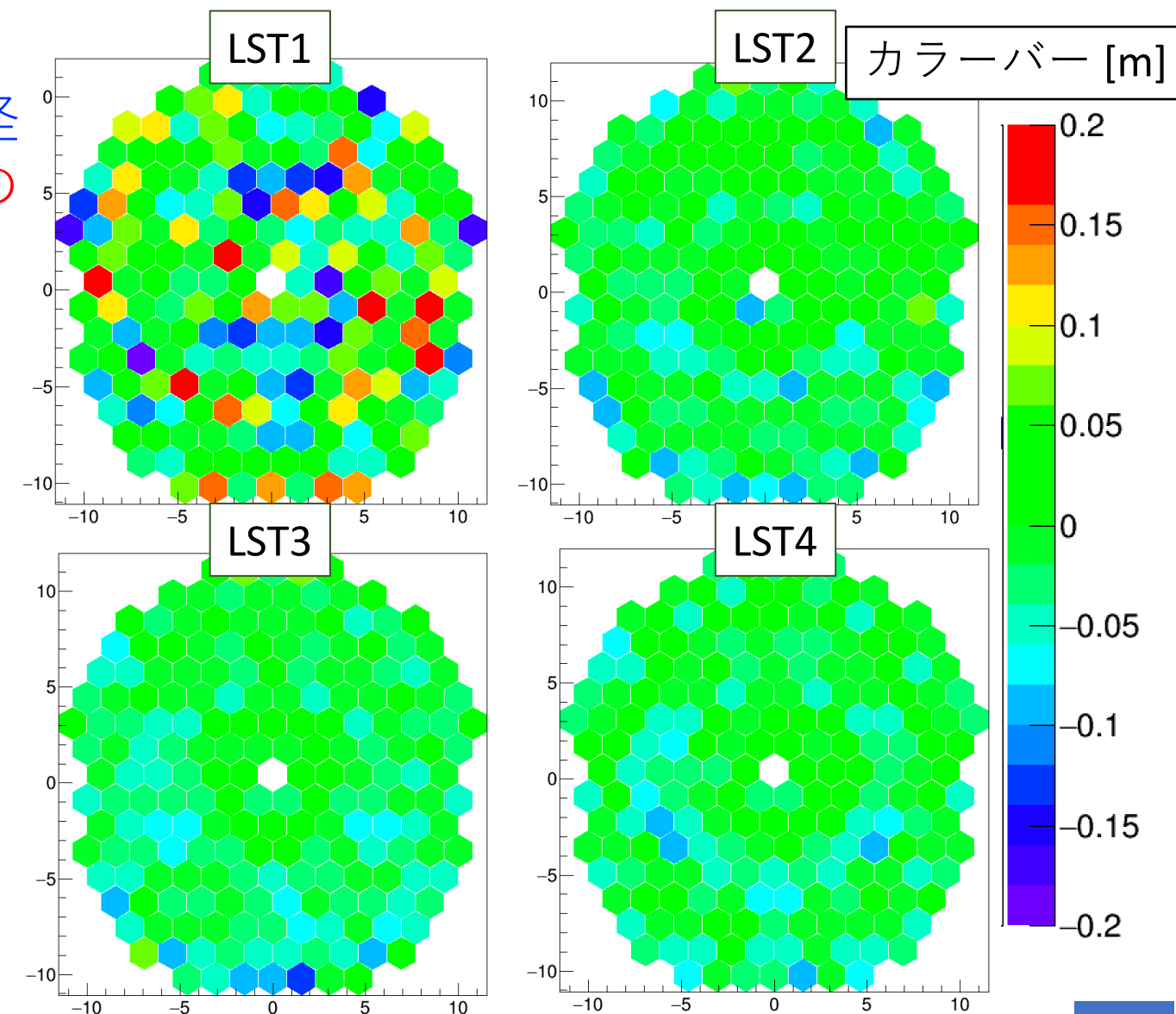
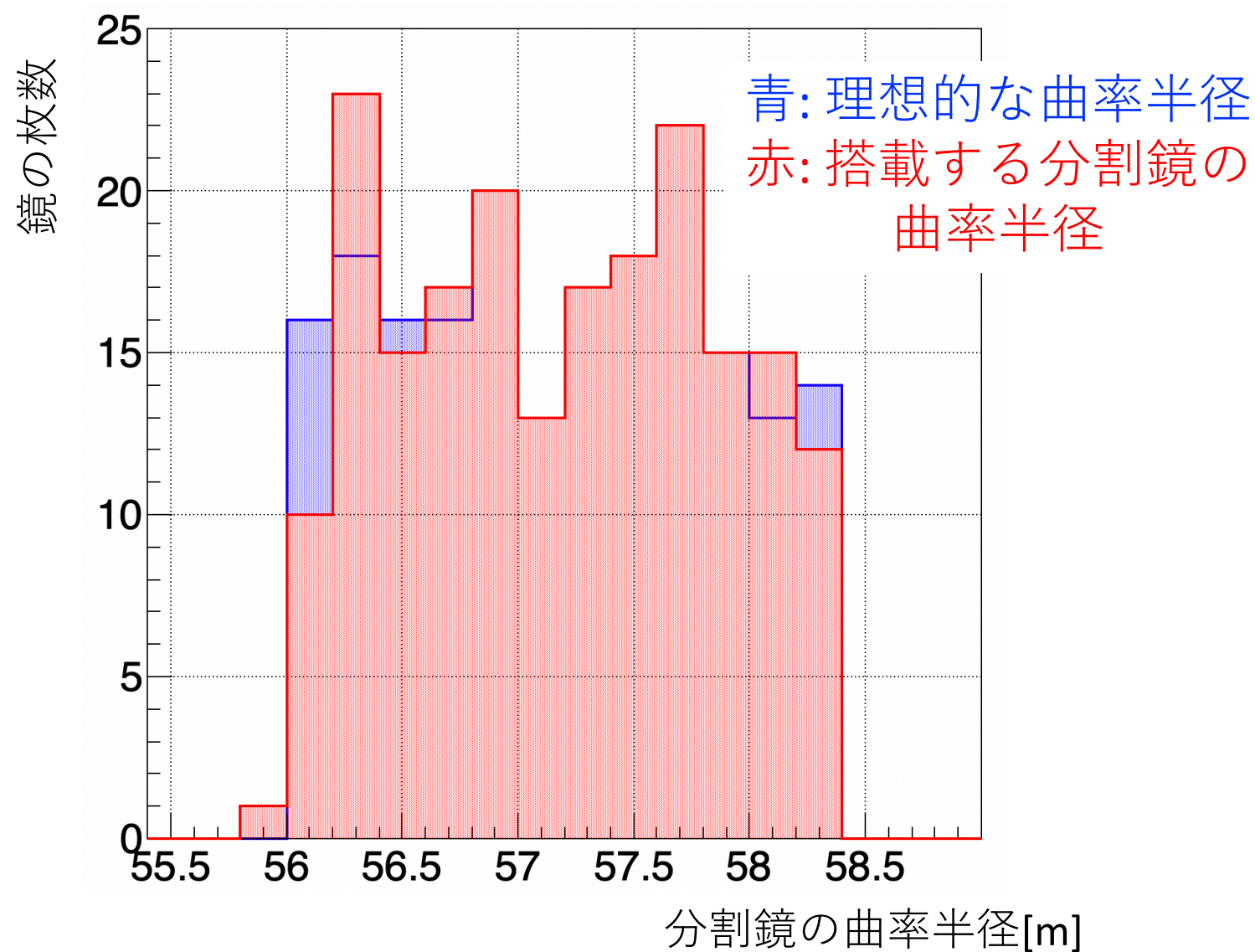


677枚の鏡の中からLST2-4用の594枚の鏡を決定する。

LST2-4号基に搭載する鏡の決定

- ◆鏡は5枚1組となってRack(金属製の棚)に収納・保管されている。
- ◆RackごとにLST2-4にランダムに分配し、全てのLSTで理想的な曲率半径を満たす分布を探す。

Rackの分配でできた望遠鏡1台分の分布 分割鏡の曲率半径と放物面の曲率半径の差(LST1との比較)



LST2-4の分配方法を確立し、LST1よりもよい曲率半径分布を達成

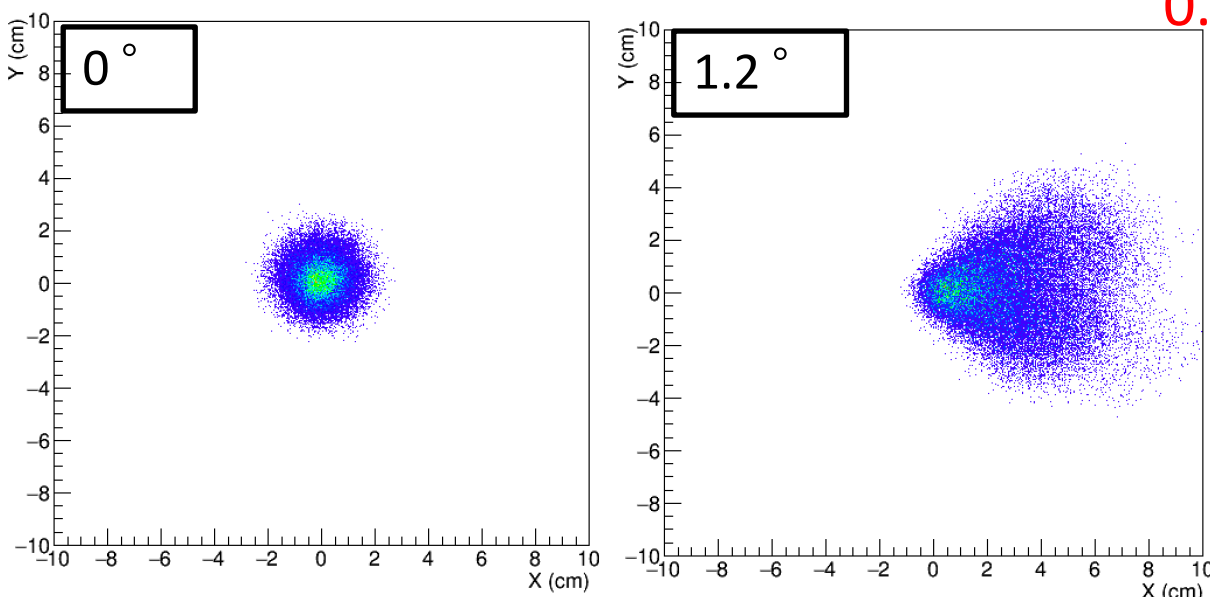
分割鏡配置の決定と望遠鏡光学性能の評価

- ◆ 光線追跡シミュレーションを用いてLST2-4の望遠鏡のスポットサイズを評価
 - ・ 望遠鏡の中心から順に、曲率半径の小さい分割鏡を配置
 - ・ 望遠鏡全体のスポットサイズが仕様を満たすかを検証

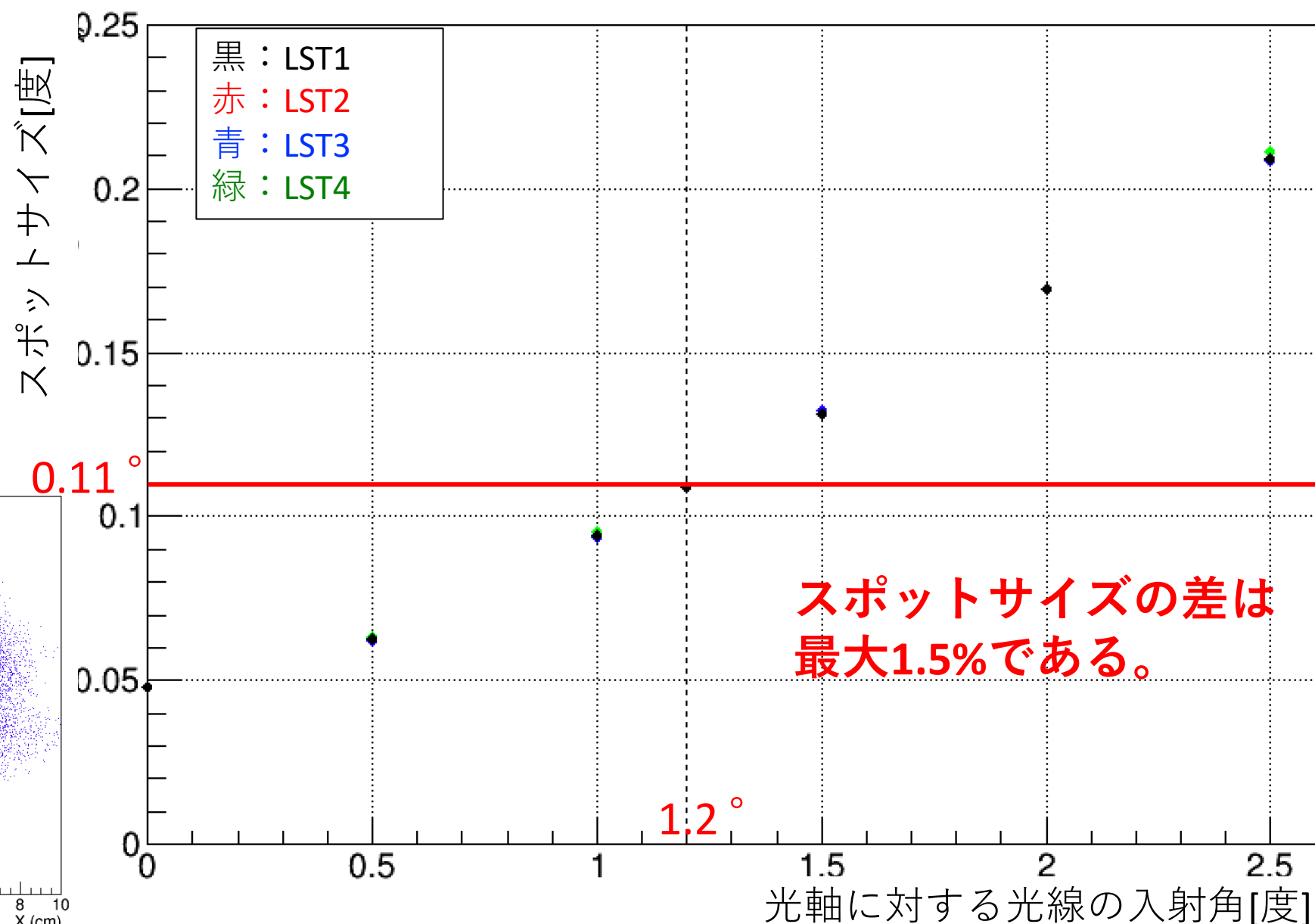
- ◆ スポットサイズの仕様
 - 光軸からの傾きが 1.2° で
 - スポットサイズが 0.11° 以下

ROBAST(A.Okumura,2016)
を用いた光線追跡シミュレーション

光軸からの傾き
 $0^\circ \sim 2.5^\circ$ まで 0.5° 間隔で照射



光線の入射角とスポットサイズの関係



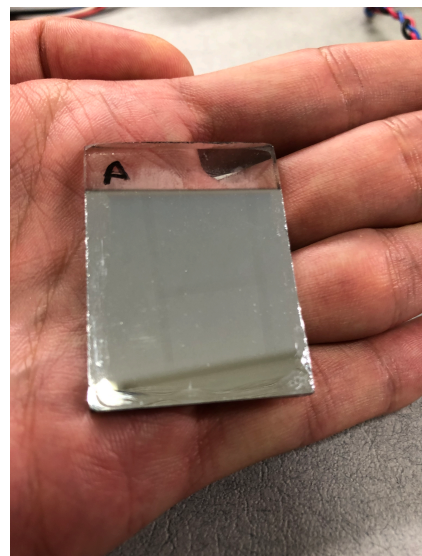
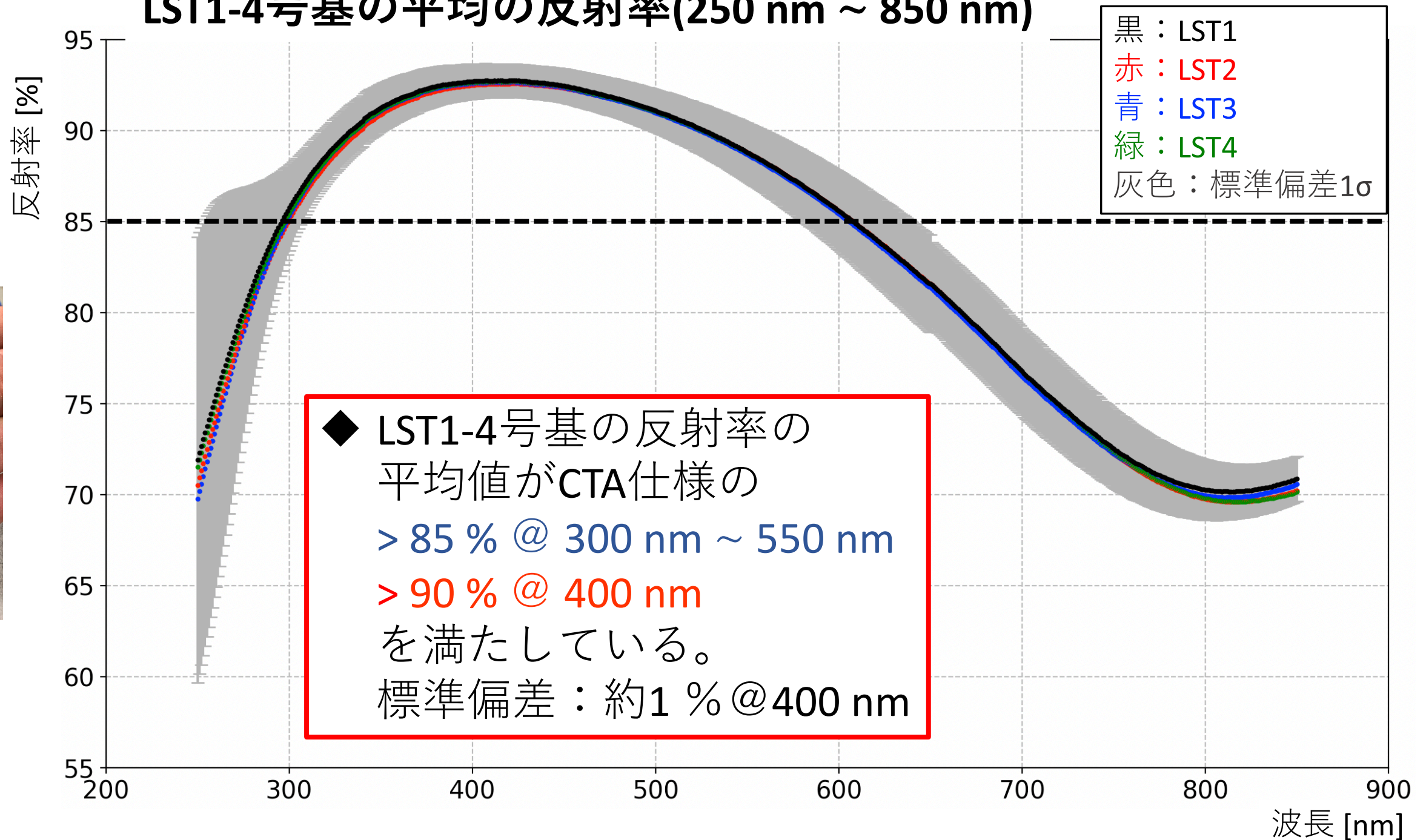
スポットサイズの差は
最大1.5%である。

LST2-4でスポットサイズの仕様を満たし、LST1と変わらない
スポットサイズを見積もることができた。

LST1-4号基の198枚の反射率

- ◆ ミラーピースの反射率を元にLST1-4号基の主鏡全体での反射率を求める。
ミラーピースとは、分割鏡と同時にスパッタリングされ製造された鏡である。
→分割鏡の反射率の代表値

LST1-4号基の平均の反射率(250 nm ~ 850 nm)



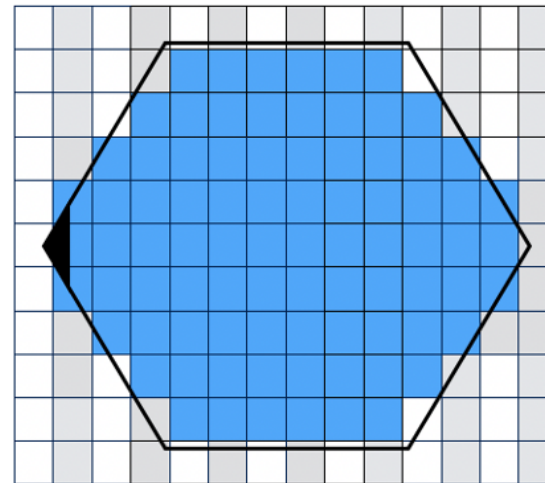
ミラーピース

- ◆ 実際の分割鏡は場所による反射率のムラがある。
→分割鏡の鏡面全体の反射率を測定することで、より正しい反射率を見積もる。

分割鏡の反射率の場所依存性の測定

測定方法

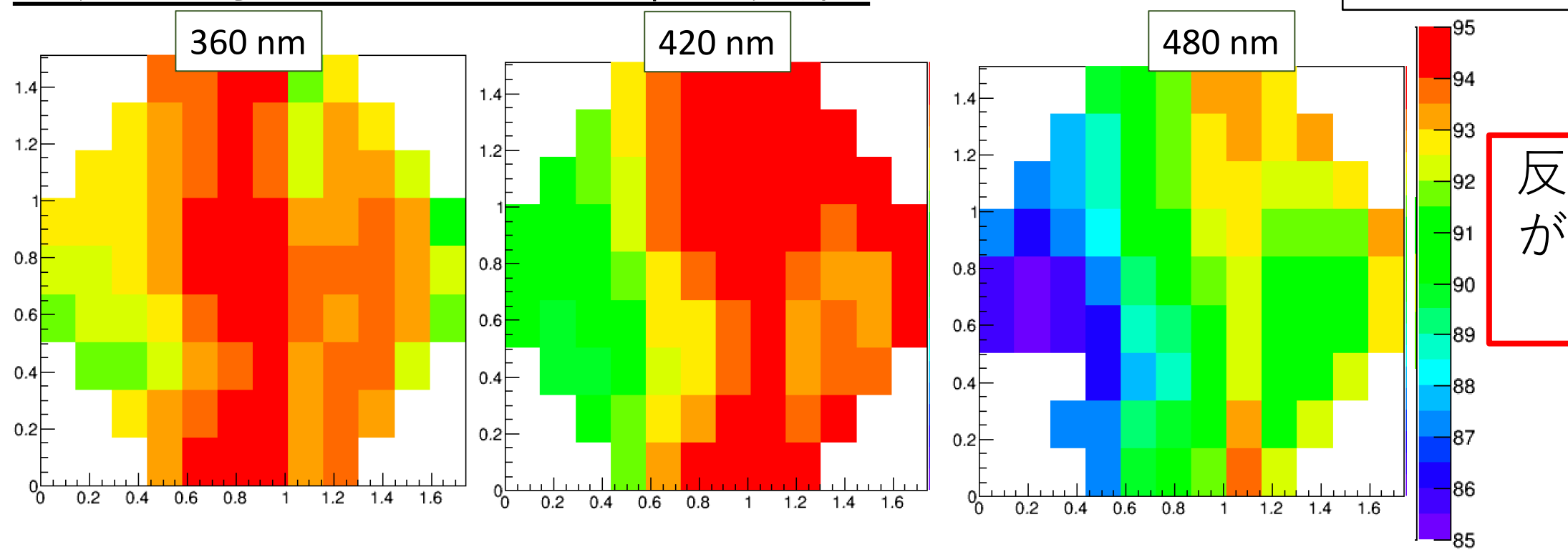
- ◆ 測定機器：KONICA MINOLTA 分光測色計 CM-2600d
- ◆ 測定した鏡：2枚@三光精衡所(ピースの反射率なし)、3枚@ICRR(ピースの反射率あり)
- ◆ 波長帯：360 nm ~ 740 nmまで10 nm間隔
- ◆ 測定箇所：15 cm間隔で84点測定



実際の測定の様子



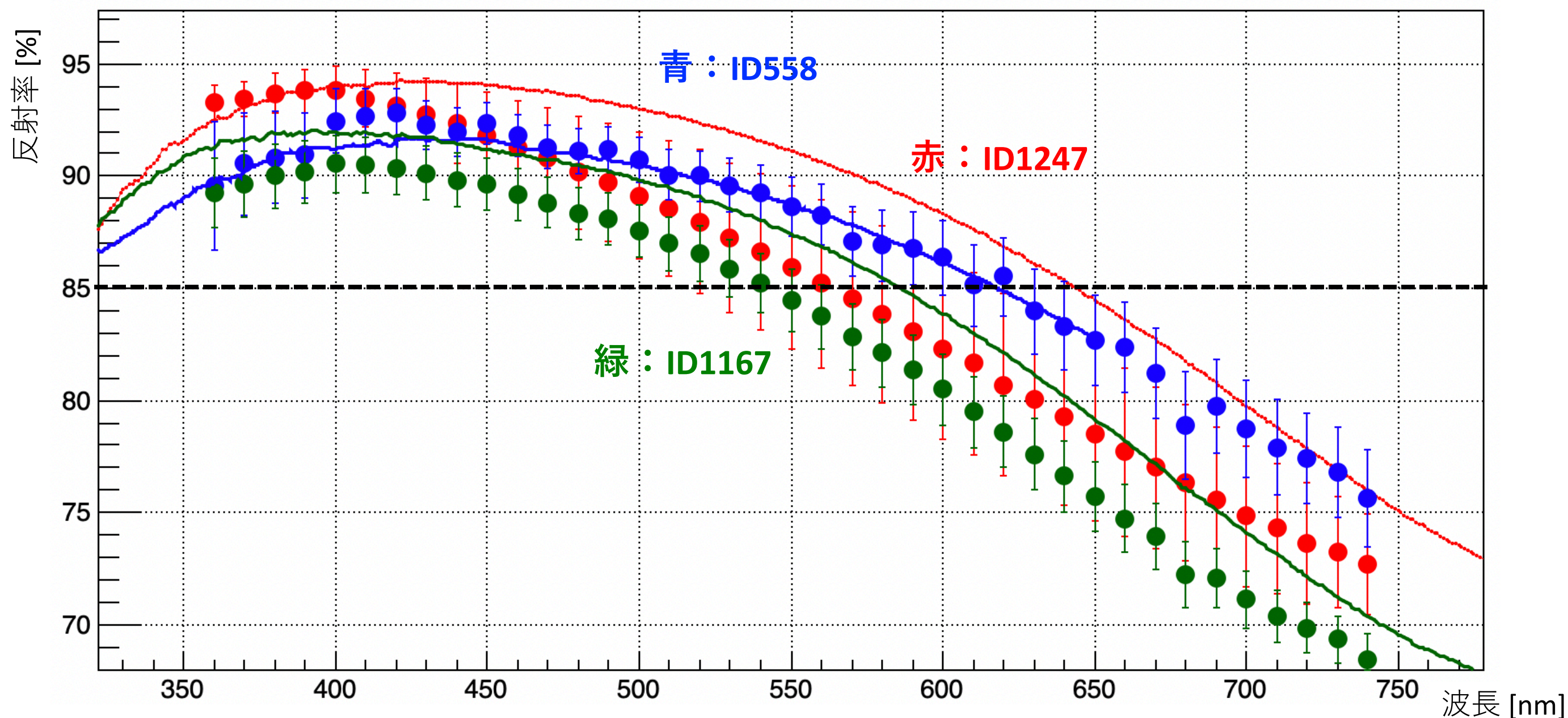
波長に対する84点反射率の変化



反射率は場所依存性があり非一様であることがわかる。

分割鏡の場所依存性の測定結果

ピースの反射率(実線)と84点の平均反射率(点)の比較



- ◆ 非一様性(エラーバー)は $\sim 1.5\%$ @ 400nm, $\sim 4\%$ @ 550nm
- ◆ ピース反射率(実線)と84点の平均反射率(点)の差 $\sim 1.4\%$ @ 400 nm, $\sim 5\%$ @ 550 nm
- ◆ ピース反射率と84点の平均反射率の差は非一様性の影響であると考えられる。
- ◆ この影響を考慮し、Monte Carloに入れる方法を検討中

まとめ

- ◆ LST2-4号基に用いる分割鏡の選定
 - ・ 198枚 × 3台分、**計594枚の選定が終了**
 - ・ Rackごとに分配する方法を確立
 - 曲率半径の理想的な分布を満たし、
輸送や作業の効率化ができる分配方法である。

- ◆ 光線追跡シミュレーションによる望遠鏡の評価
 - ・ LST2-4でLST1と**同等の集光性能を持つ望遠鏡**を製造可能

- ◆ LST1-4の分割鏡の反射率
 - ・ LST1-4の反射率をミラーピースを元に作成
 - CTA仕様を満たす反射率の平均値となっている。
 - ・ 分割鏡の場所依存性を測定
 - 非一様性**の影響を考慮し、Monte Carloに入れる方法を検討中