

# CTA 大口径望遠鏡の分割鏡開発(7)

長 紀仁

茨城大学大学院理工学研究科

小野祥弥, 加賀谷美佳, 片桐秀明, 柳田昭平, 吉田龍生 (茨城大理), 手嶋政廣 (東大宇宙線研, Max-Planck-Inst. fuer Phys.), 荻野桃子, 小島拓実, 齋藤浩二, 中島大輔, 花畑義隆, 林田将明, 深見哲志 (東大宇宙線研), 奥村曉 (名大 STE 研, レスター大), 千川道幸 (近畿大理工), 野田浩司 (Max-Planck-Inst. fuer Phys.), 山本常夏 (甲南大理工), 齋藤隆之 (京大理), 他 CTA-Japan Consortium

# CTA-Japan による LST の光学系要素開発

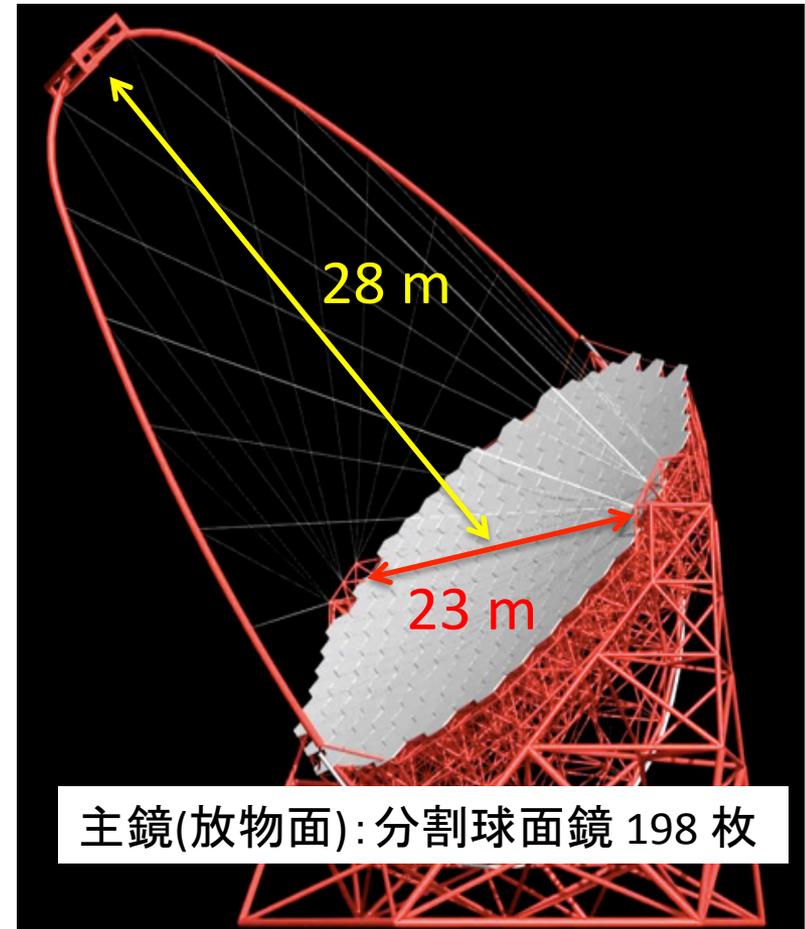
## 主鏡

- ・分割鏡開発
  - 結像・集光能力の評価
  - 耐候性試験
- ・Active Mirror Control (AMC)
  - アクチュエーターの制御システム

### <LST 仕様>

口径(D)	: 23 m
焦点距離(F)	: 28 m $F/D = 1.2$
反射鏡面	: 放物面型複合鏡
カメラPixelサイズ	: 0.1 度 (50 mm)
回転速度	: > 180 deg/20 sec
運用期間	: > 20 年
エネルギー領域	: 20 GeV から 1000 GeV

2016年に本格的建造開始予定



本講演では、分割鏡開発の現状について報告する。

# 分割鏡開発

LST 1 台あたり 198 枚の球面分割鏡を使用。  
三光精衡所(筑波支店)と共同開発。



1.51 m

面積 : 1.958 m<sup>2</sup>

重量 : ~47 kgf

<分割鏡の仕様要求>

焦点距離 : 28 - 29.2 m

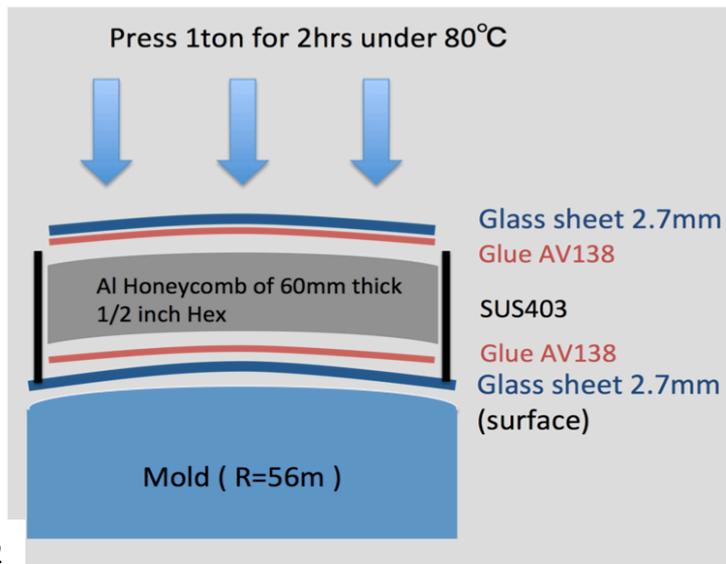
結像性能 : < 16.7 mm (0.03°)

反射率 : > 90 % at 400 nm,  
> 85 % at 300 - 500 nm

反射率経年変化 : < 2 %/yr

耐水性 : IP66

製法 : Cold Slump 技術



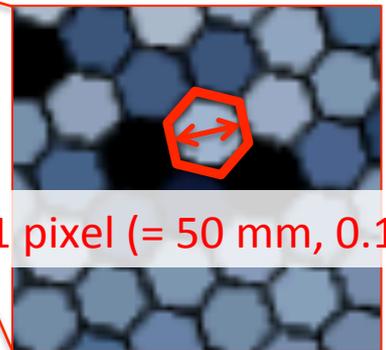
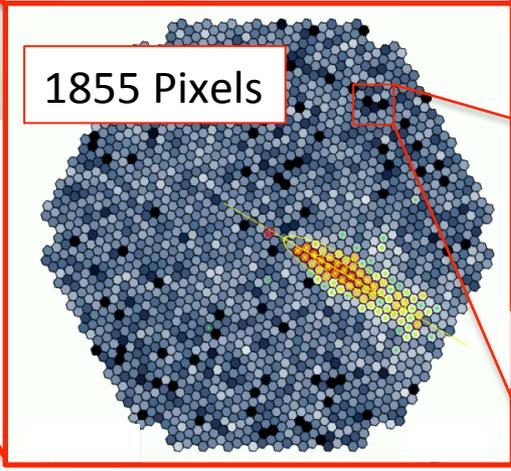
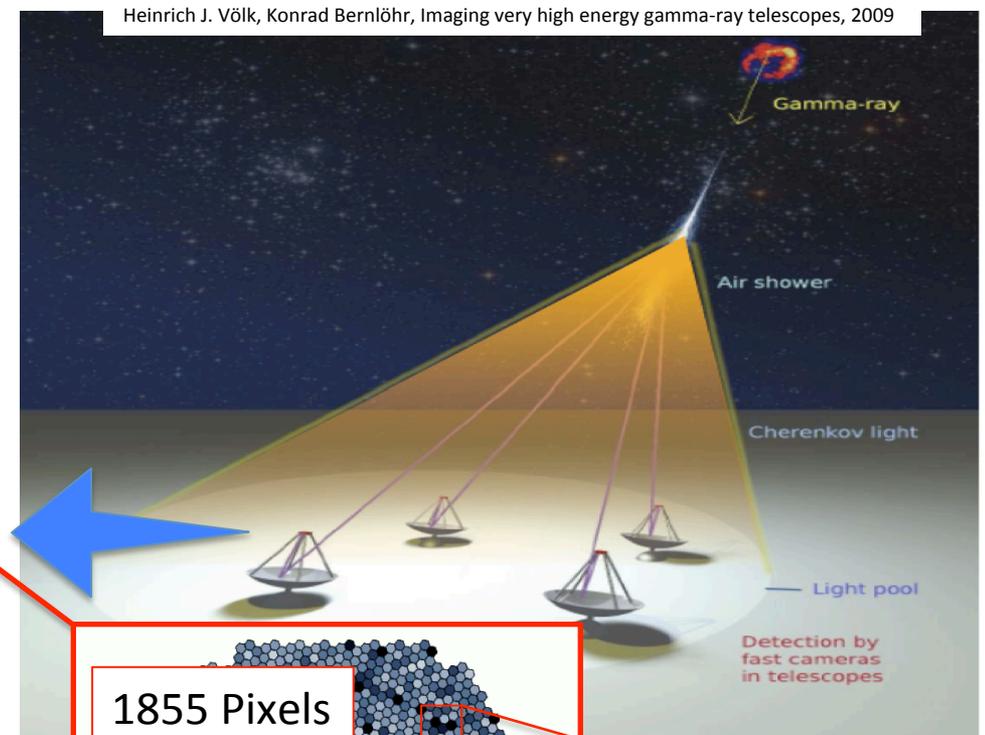
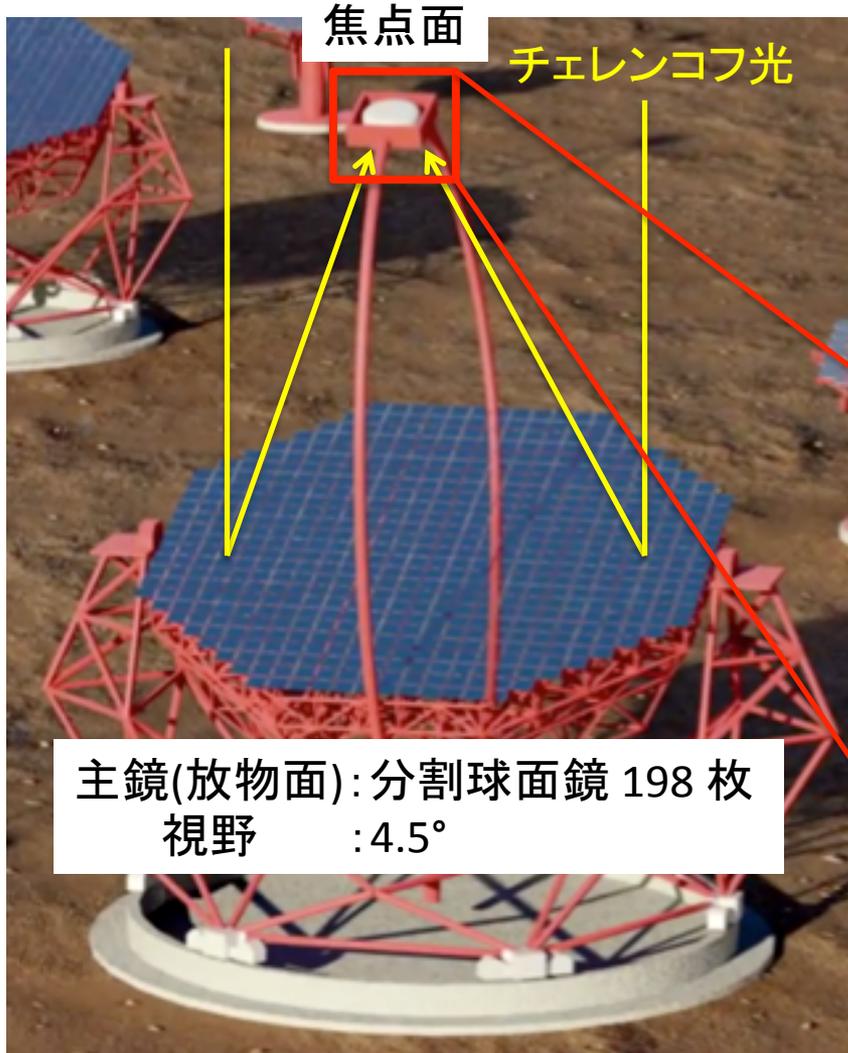
<製造状況>

- ・2013年  
29 枚
- ・2014年  
5 枚

安価で軽量な鏡の製造に成功。

→ 現在、大量生産段階に移行。

# 求められる結像性能

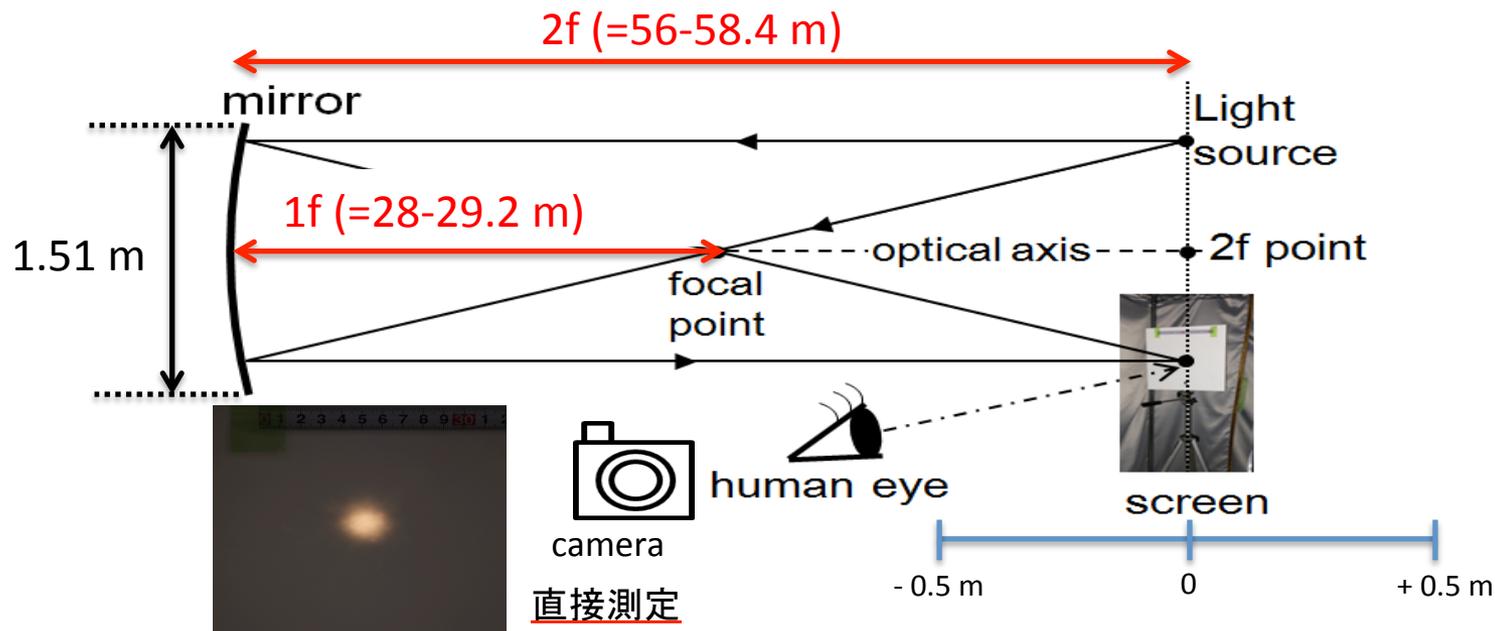


要求される結像性能は、  
集光した光の 80 % (D80@1f) を  
**1/3 pixel (= 16.7 mm, 0.03°)**  
以下に収めること。※D80: 光量の 80 % が入る円の直径

# 結像性能評価法①(2f 法)

球面鏡の評価方法には 2f 法という方法がある。

2f 法は曲率半径において分割鏡のつくる像を直接測定し、結像性能を評価する。



・製造元(三光精衡所)の工場内で納品前の検定方法として活用。

しかし、LST の分割球面鏡の曲率半径は 56 m と非常に大きいため測定環境を整えることは容易ではなく、また測定が大掛かりであるため効率が悪い。

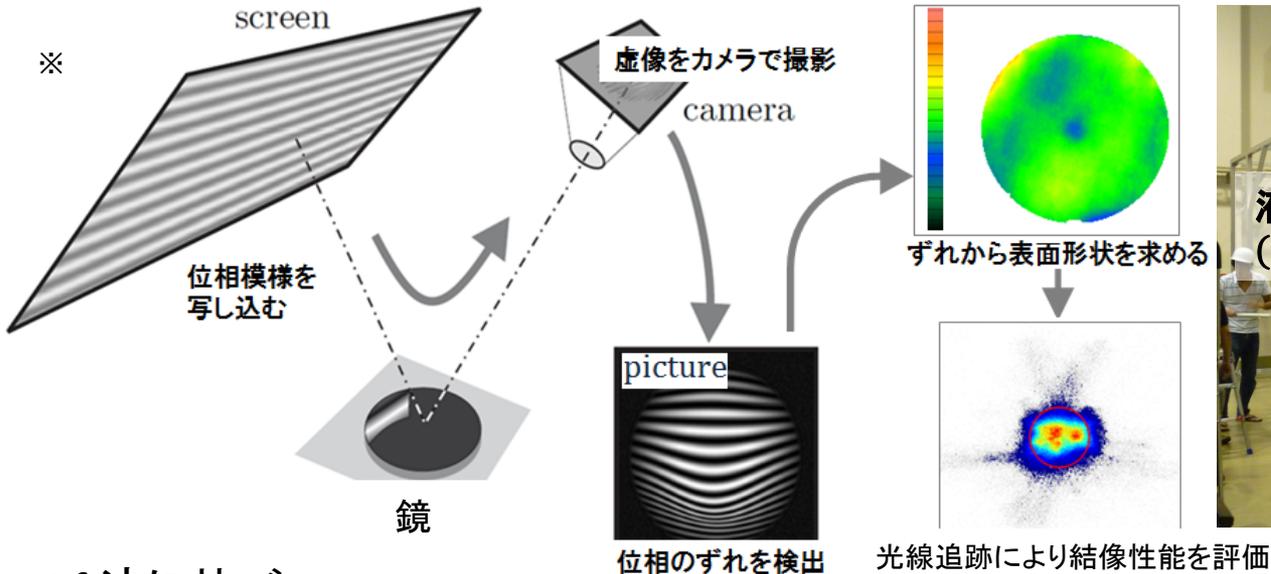
大量に生産される鏡を測定するために  
Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法を採用。

# 評価法②(PMD法)

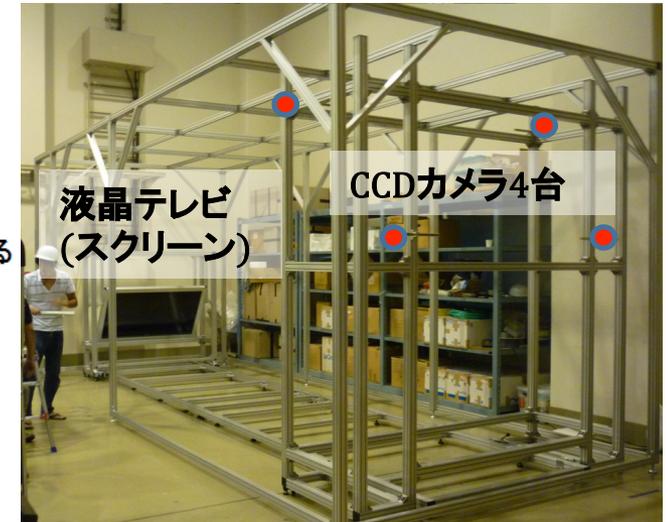
ドイツのエルランゲン大で考案された方法。2f法とは違い、鏡の表面形状を導出。それをもとに光線追跡シミュレーションを行い、結像性能を評価する。

<測定原理>

位相シフト法 + ステレオカメラ写真測量



宇宙線研に作られた PMD 法装置  
全長: 7 m × 3 m × 3 m



2f法に比べ、

- ・ **表面形状** +
- ・ **容易**
- ・ **短時間**
- ・ **コンパクト**



より詳細な分割鏡の評価が可能。

2013年までの鏡(29枚)を測定。

一方で PMD 法装置の系統誤差を定量的に求め、排除できるかが課題。

PMD 法の手法を確立するために 2f 法による校正が必要。

# PMD 法と 2f 法の光量分布の比較

No.7 R = 56.955 m

No.24 R = 56.84 m

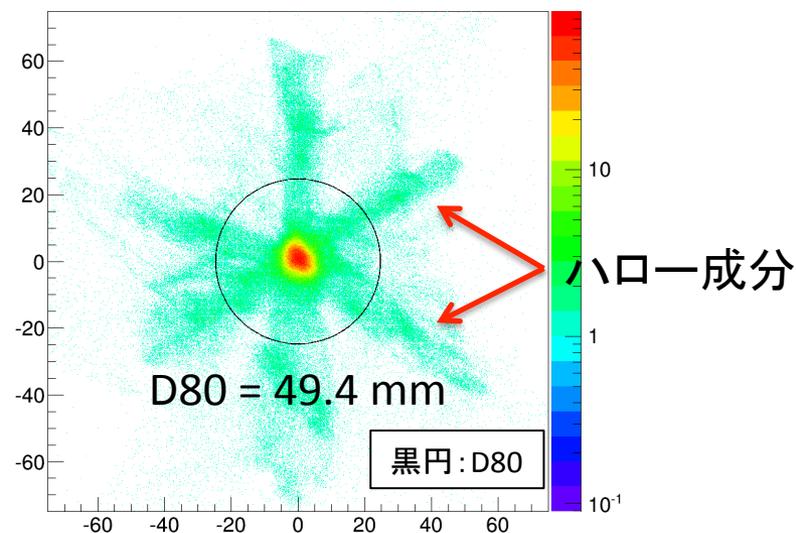
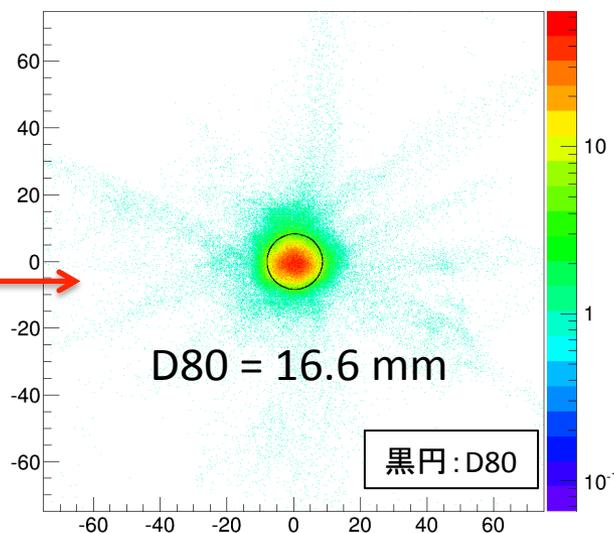
※ R: 曲率半径

## ・PMD 法

鏡面形状情報



レイトレース

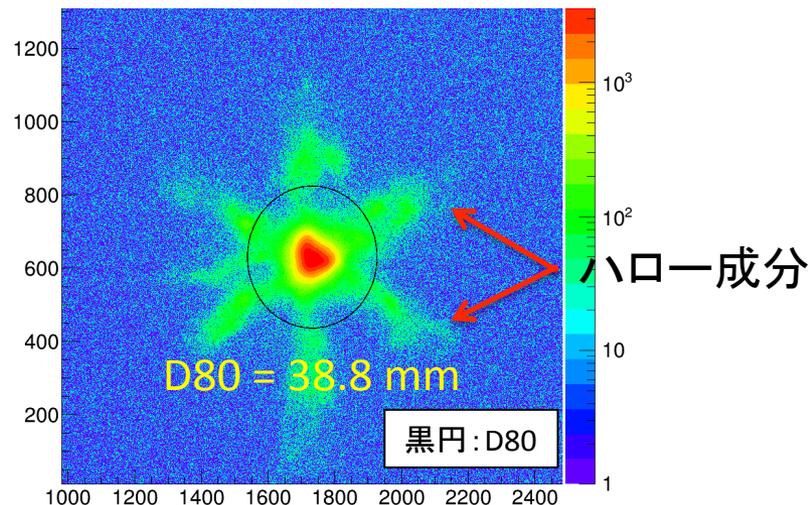
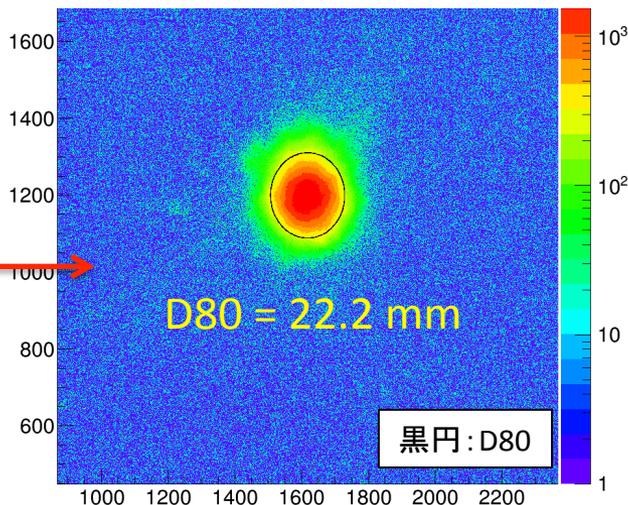


## ・2f 法

直接撮影



画像解析



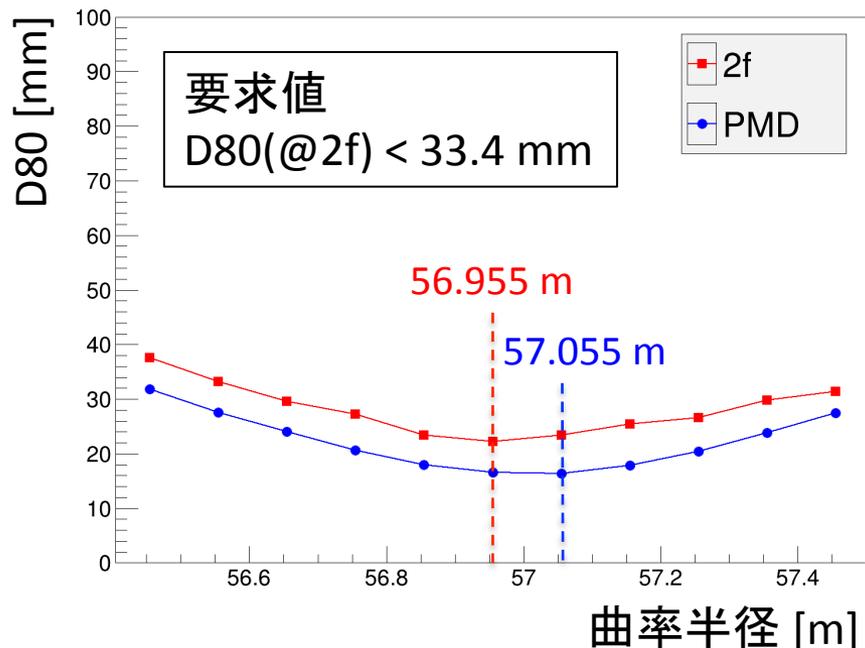
集光の様子は、PMD 法と 2f 法でよい一致を示している。

# 各測定距離での D80(@2f)

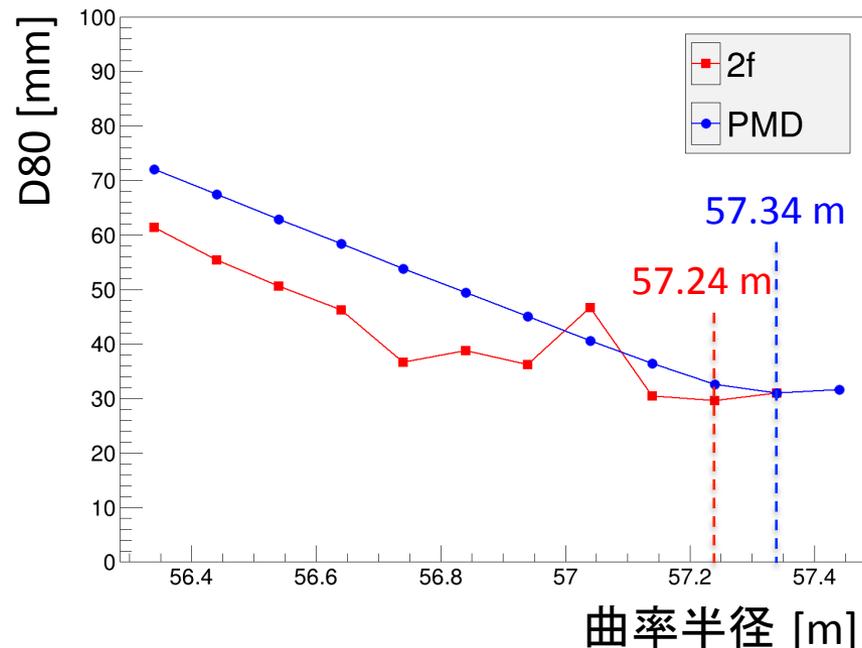
※D80: 光量の80%が入る円の直径

・測定間隔を 0.1 m で測定

No.7



No.24



比較の結果、測定距離による D80 の変化の様子が一致。

曲率半径のずれは 0.1 m 程度とほぼ一致。

➡ PMD 法での曲率半径の要求の判断はできる。

一方、  
結像性能(D80)の差が  
約 6 - 10 mm

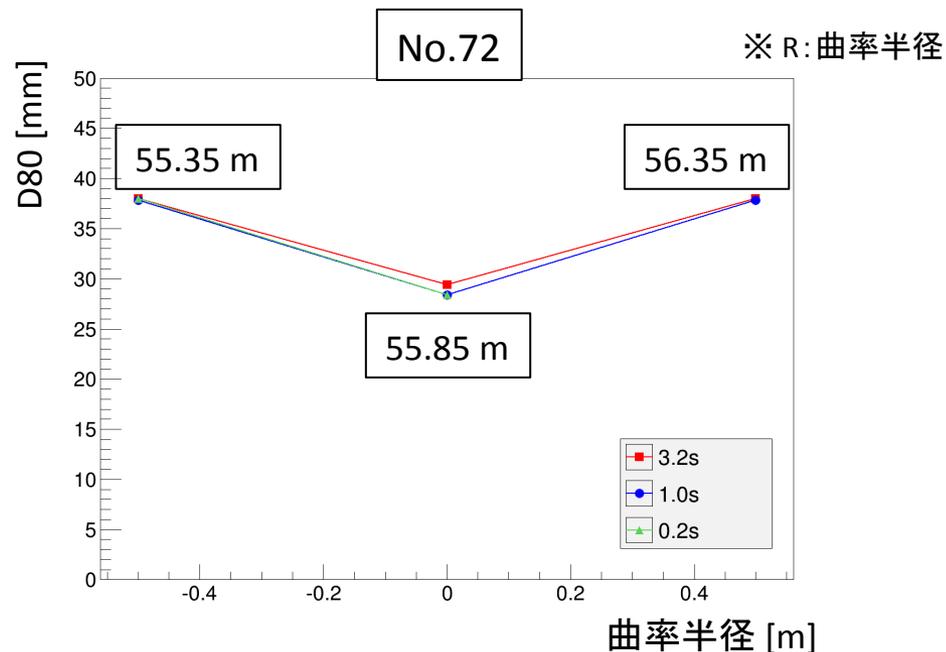
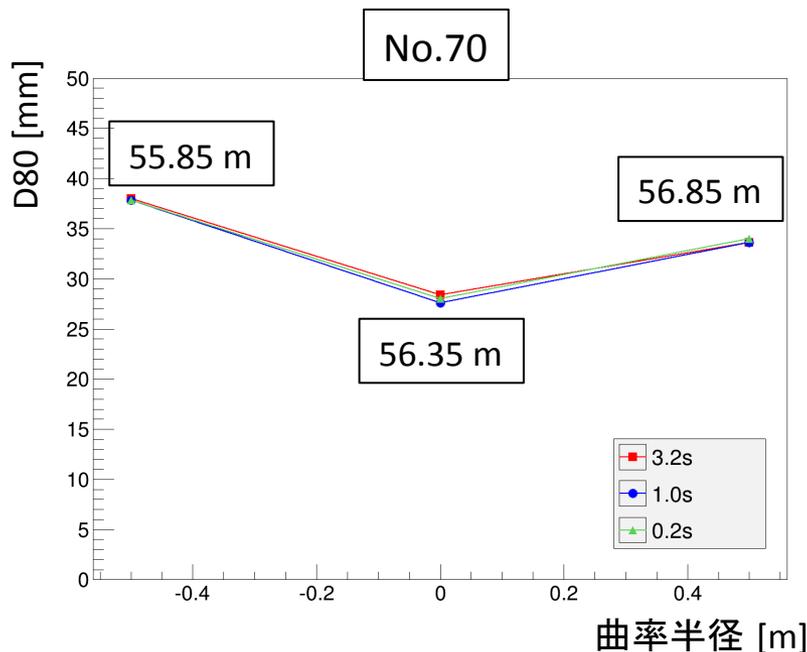


・PMD 法の系統誤差？  
・2f 法の測定精度？

サンプル数を  
増やし検証する必要

# 2014年の鏡(5枚)の 2f 法による D80 の測定

像の最小である位置 R と R-0.5(m), R+0.5(m) の計3カ所で露光時間を変えて測定。



Mirror #	No.70	No.71	No.72	No.74	No.75
R (m)	56.35	56.35	55.85	56.00	57.175
D80 (mm)	27.8	27.6	28.7	28.7	33.1

要求値 D80(@2f)  
< 33.4 mm

全ての鏡で、結像性能(D80)は要求値を満たしている。

# 耐候性試験

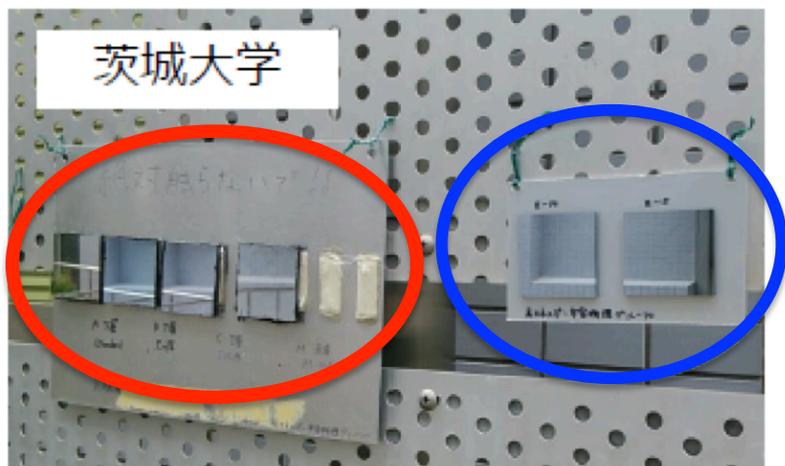
試験用小型鏡を屋外に暴露し、反射率低下の時間変化を調べることで10年の耐久性を見積もる。

## <現ミラー>

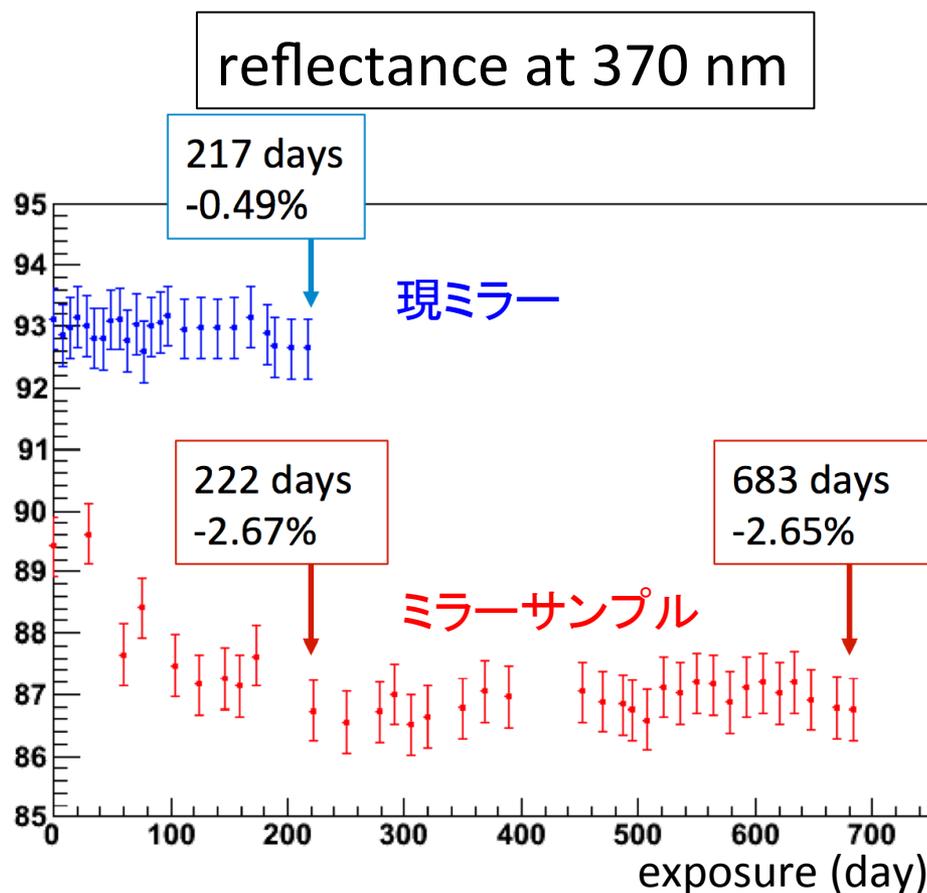
- ・現在実際の鏡に施されているコーティングをしたもの。
  - 短波長側で反射率が90%以上(>要求値)
  - 5層スパッタリングコーティング

## <ミラーサンプル>

- ・開発段階初期のミラーサンプル



赤円:ミラーサンプル 青円:現ミラー



現ミラーでは大きな反射率低下が見られない。→ **耐候性能が高い。**

- ・茨城大、東大宇宙線研、近畿大、甲南大の4カ所で試験中
- ・実際の建設地である La Palma



今後も試験を継続し、場所による違いが生じるかを検証

# まとめ

- 分割鏡開発

- 安価で軽量な鏡の製造に成功。  大量生産段階へ
- 現在 34 枚製造。

- PMD 法と 2f 法の比較

- 焦点距離の比較ではほぼ一致した結果が得られた。
- D80 では約 6 - 10 mm 程度の差。

- ・PMD 法の系統誤差    サンプル数を増やし検証
- ・2f 法の測定精度

PMD 法の系統誤差を理解し、手法の確立

- 2014年の鏡は 2f 法評価で要求を満たす。
- PMD 法で今後評価予定。 

- 耐候性試験

- 大きな反射率低下が見られない。→ 耐候性能が高い。