

PLANETS軸外し放物面鏡の研磨と計測

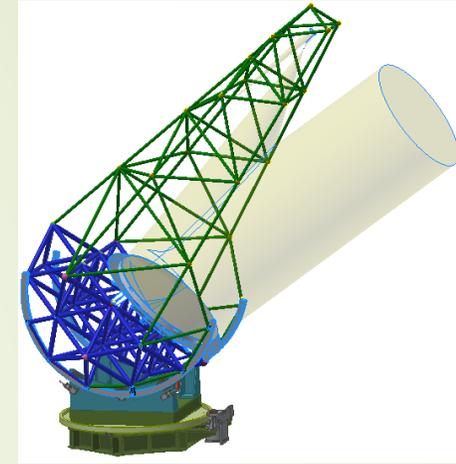
花村悠祐 (名古屋大学・環境学研究科)



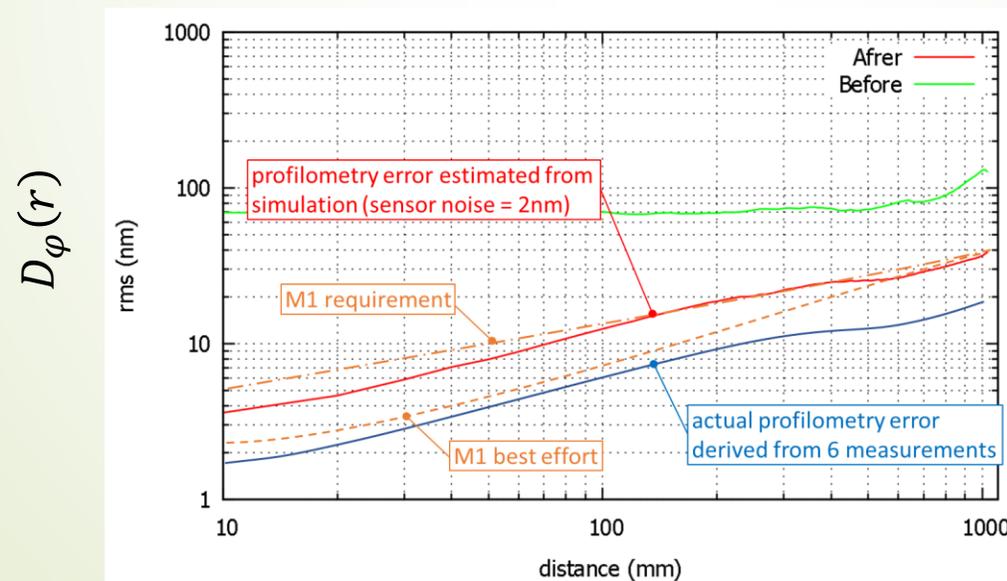
平原靖大(名古屋大学),
古賀亮一(名古屋大学),
鍵谷将人(東北大学),
永田和也(東北大学),
坂野井健(東北大学),
笠羽康正(東北大学),
栗田光樹夫(京都大学・LogistLab社),
森本悠介(京都大学・LogistLab社),
徳地研人(京都大学),
高橋啓介(LogistLab社),

目的: PLANETS望遠鏡主鏡の最終研磨

- ▶ 口径1.85[m]の軸外し放物面(軸外し角 23.5°)を主鏡に持つ。
- ▶ 離角 $<0.1\text{-}10''$ 、コントラスト比 $10^{-4}\sim 10^{-7}$ の観測を達成するために、構造関数で下図の橙線より良い精度の鏡が必要。
- ▶ LogistLab社、東北大学、京都大学と共同で、新しい計測手法(三点引きずり計測法)による高精度鏡の研磨に必要な計測技術を確立する。これを用いてPLANETS主鏡を完成させる。



PLANETS望遠鏡



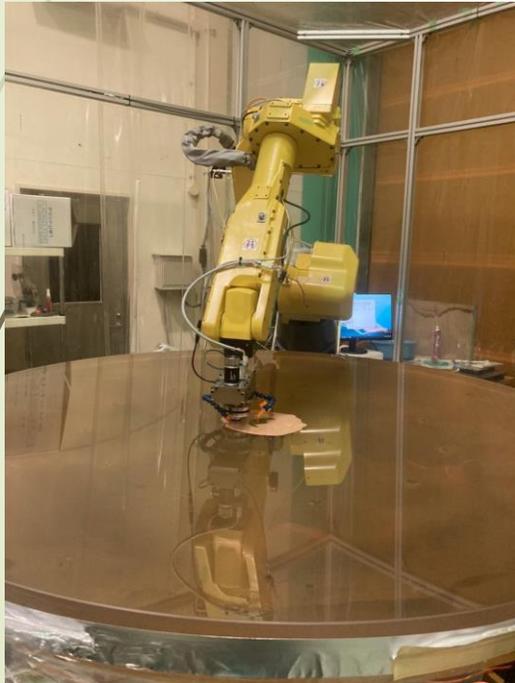
鏡の波面誤差の構造関数

$$D_\varphi(r) = \sqrt{\left\langle (\varphi(x+r) - \varphi(x))^2 \right\rangle_x}$$

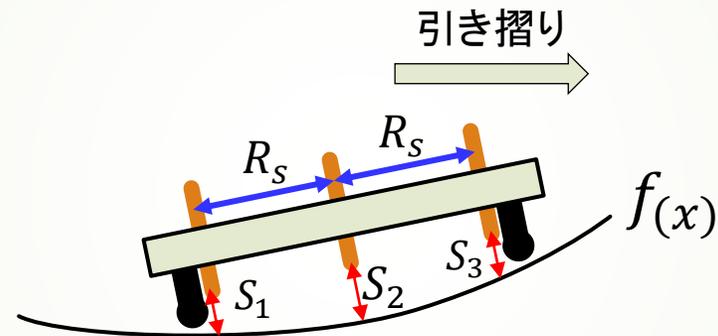
D : 構造関数
 φ : 波面誤差
 x : 鏡面上の各地点
 r : x からの距離

研磨と計測の手法

- 主鏡の研磨・計測にはロボットアームを用いる。
- 三点引きずり計測法で鏡面の形状計測をする。



研磨の様子（肌色の領域は研磨剤）



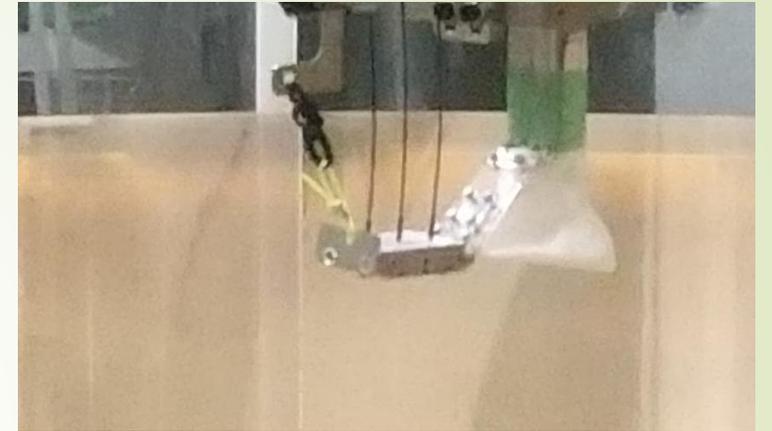
半径 R_s 円内のサグ d_s は、センサー出力 S_1, S_2, S_3 を使って以下のように表される、

$$d_s = S_2 - \frac{S_1 + S_3}{2} \quad (1)$$

サグ d_s と曲率半径 R_c は以下の関係、

$$R_c = (d_s^2 + R_s^2) / 2d_s \quad (2)$$

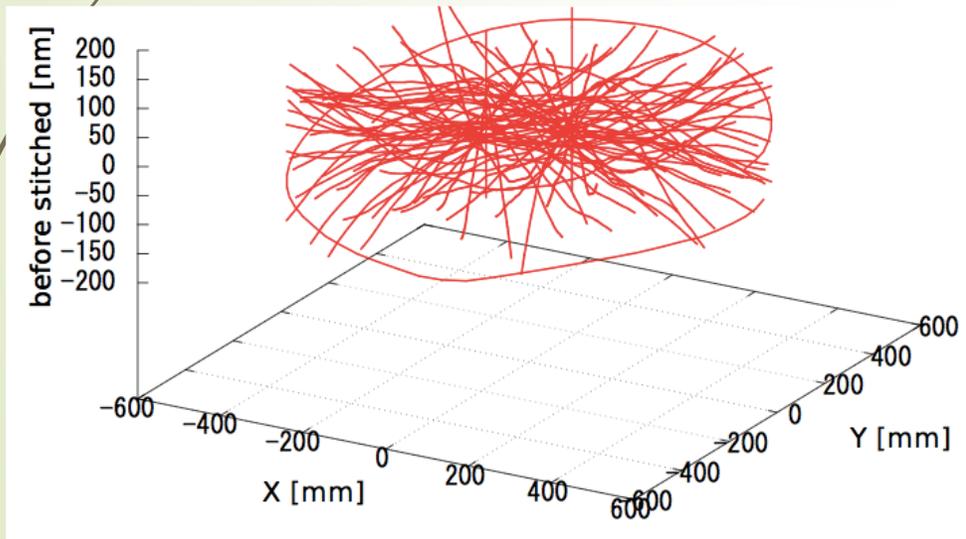
計測パス上の各地点の局所曲率から理想形状のサグ量を算出(2)しそれを実際の計測値(1)から引いて求めた値を逐次和分処理することでパス全体の形状誤差が求まる。



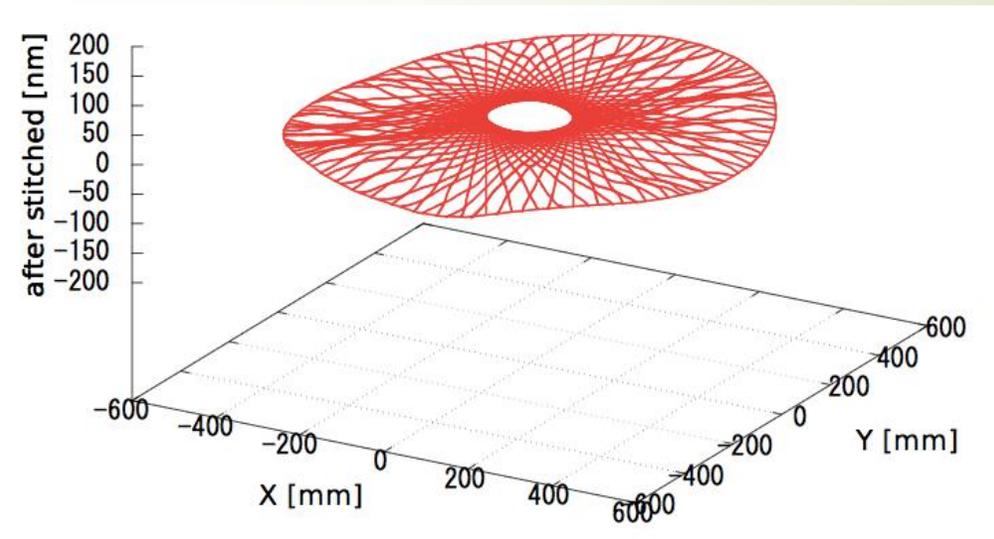
三点引きずり計測のセンサー
三つのセンサーで各点の局所曲率を測る。

弾性体モデルを用いた計測データの接続 (ステッチング)

- 各系列データを弾性体として扱う。
- 重複領域におけるデータの矛盾は、弾性体の性質にしたがって各データを強制変形させることで一致させる。強制変形させられた弾性体データは内部に蓄えられた弾性エネルギーが最小の状態而定まる。自然は最小エネルギーの状態を好むため、この状態が最も真値に近いと考えられる。
- 弾性体の最小エネルギー状態は有限要素法で解くことができる。



ステッチ前

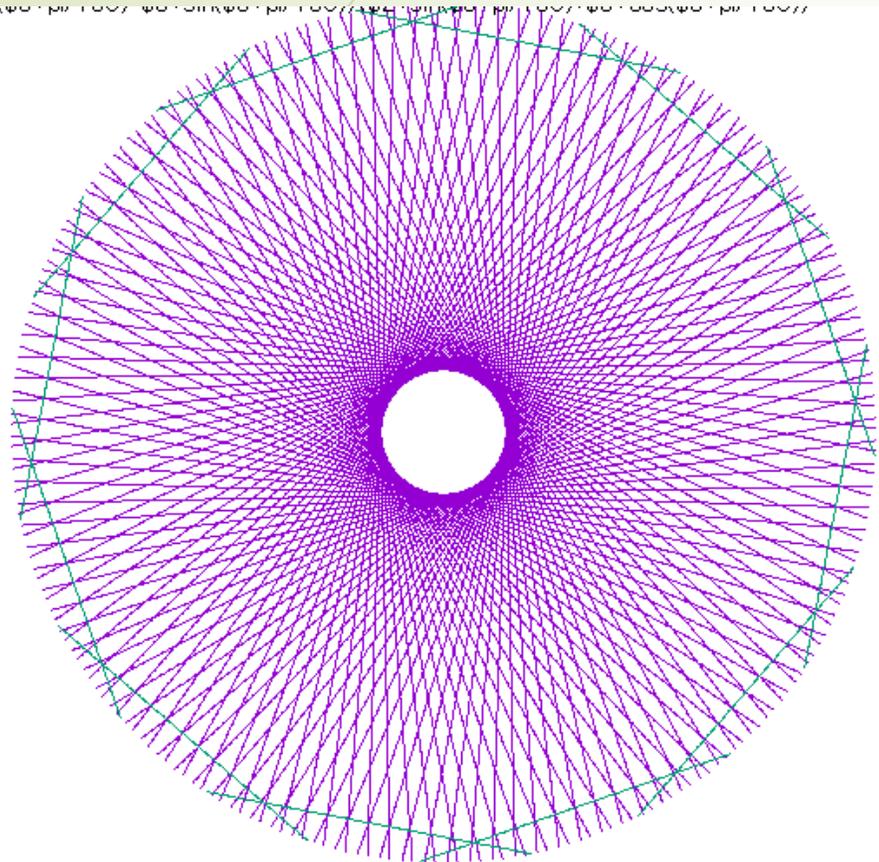


ステッチ後

プローブ引きずりパターン

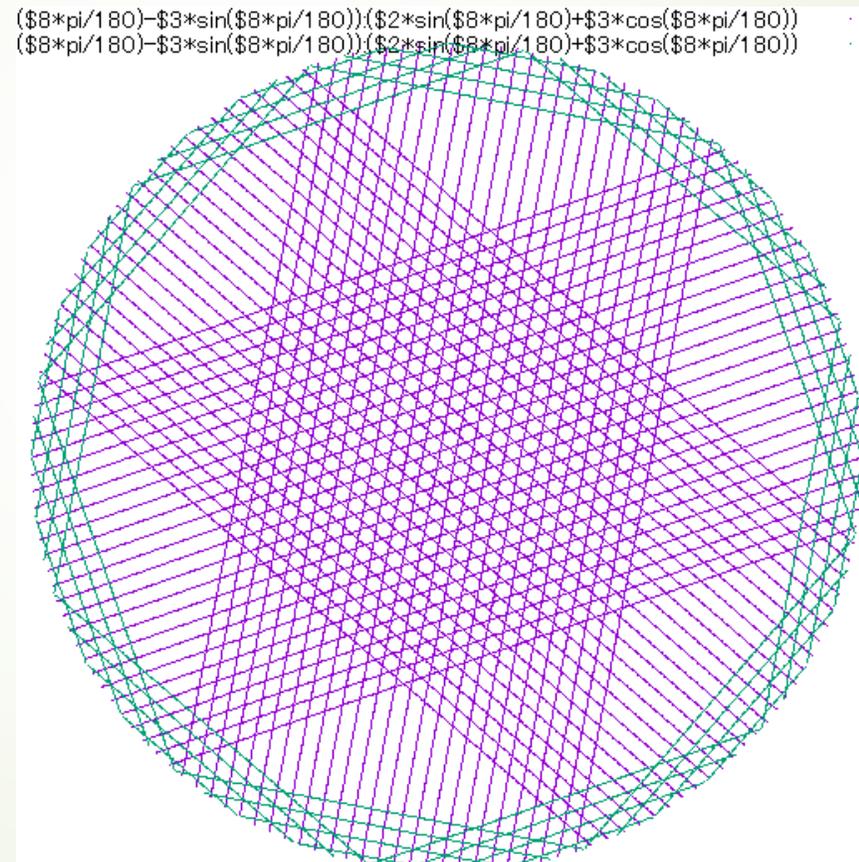
放射パターン

($3^\circ \times 120$ 本+外周 $30^\circ \times 12$ 本)



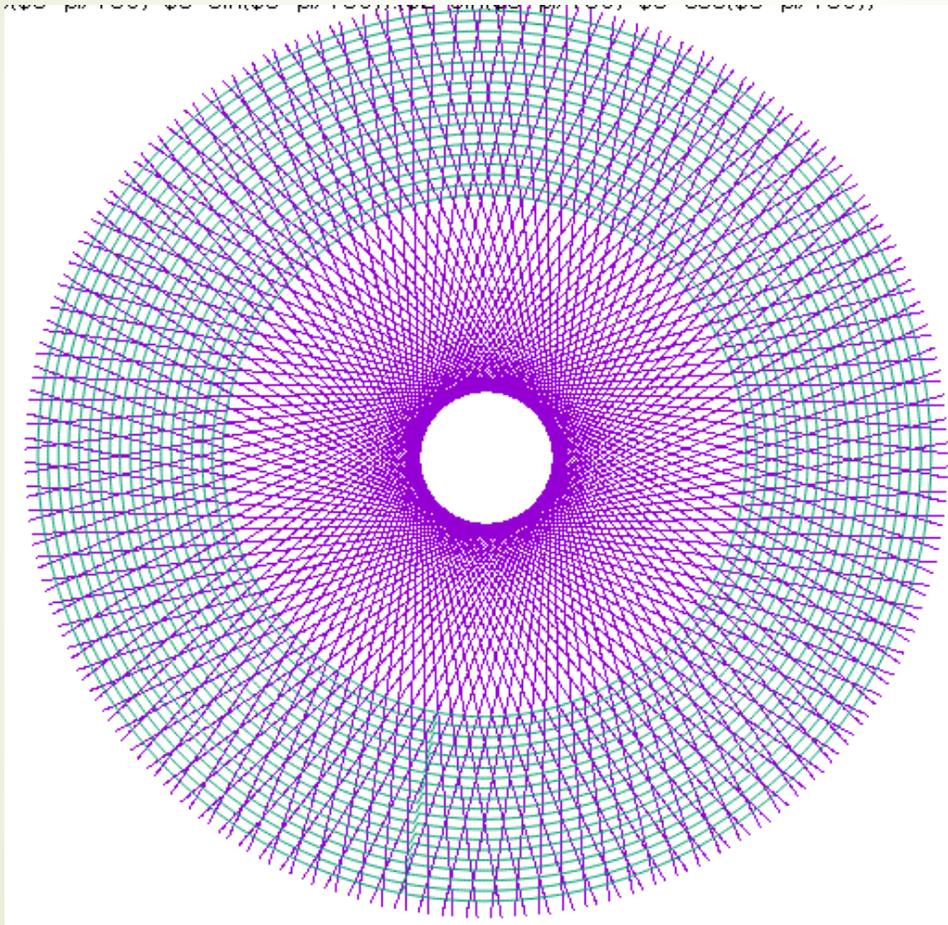
カゴメパターン

($60^\circ \times 78$ 本+外側 $30^\circ \times 48$ 本)



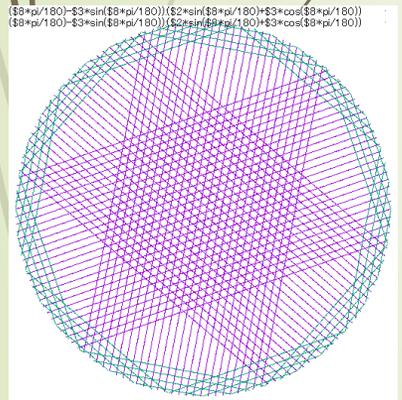
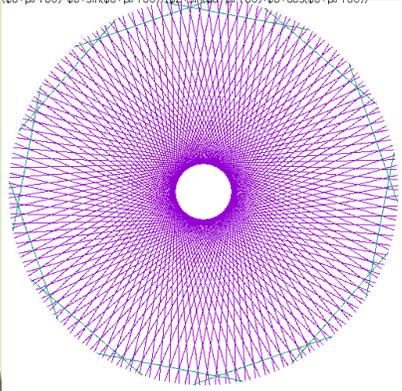
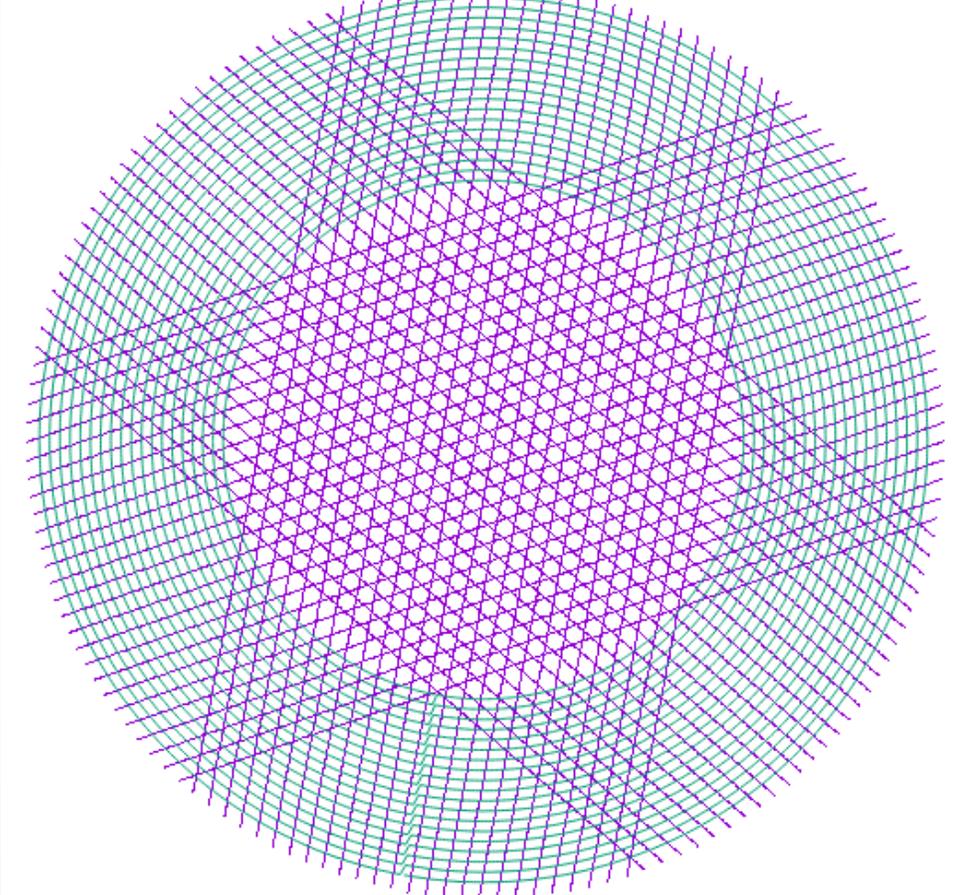
籠目模様

内側放射120本+外側円環19本



内側カゴメ+外側円環19本

$$z(\$8*\pi/180)-\$3*\sin(\$8*\pi/180))\{ \$2*\sin(\$8*\pi/180)+\$3*\cos(\$8*\pi/180))$$



$$\begin{aligned} &(\$8*\pi/180)-\$3*\sin(\$8*\pi/180))\{ \$2*\sin(\$8*\pi/180)+\$3*\cos(\$8*\pi/180)) \\ &(\$8*\pi/180)-\$3*\sin(\$8*\pi/180))\{ \$2*\sin(\$8*\pi/180)+\$3*\cos(\$8*\pi/180)) \end{aligned}$$

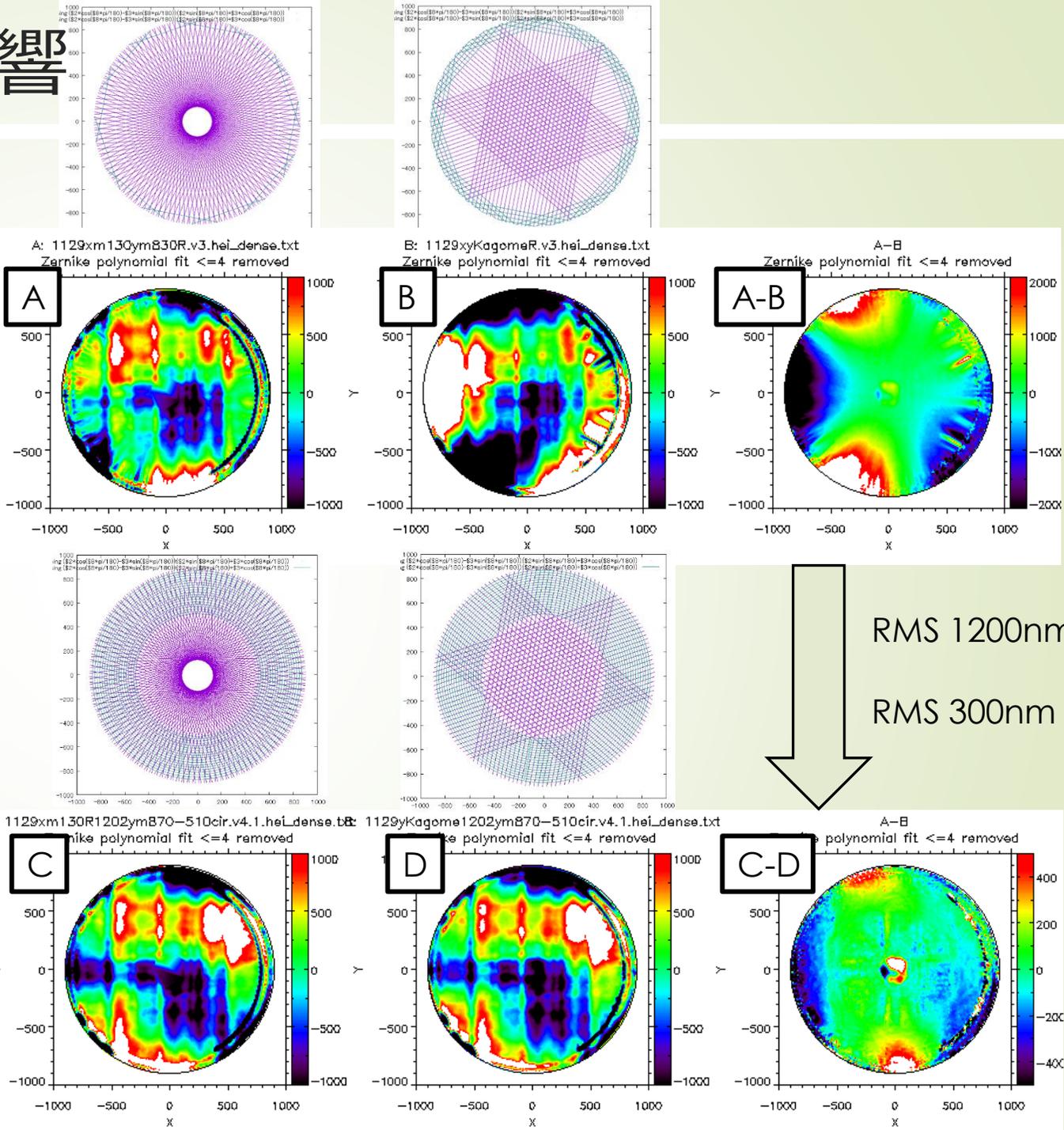
計測パスの違いによる影響

7

計測パスの違いによる形状計測結果の違いを検証した。

- A) 放射状+外側12角パス } A-B, RMS1200[nm]
- B) カゴメ+外側12角パス } A-B, RMS1200[nm]
- C) 放射状+外側円環パス } C-D, RMS300[nm]
- D) カゴメ+外側円環パス } C-D, RMS300[nm]

円環パスを取り入れたことで、個々の直線パスが持つ2次の不確定性が軽減されて、計測パスの違いによる結果の差が縮まった。



まとめ

引き摺り3点計測法により、PLANETSの主鏡の形状を計測した。

計測経路として、直線計測に加え閉じた円環パスを採用することで、形状2次成分の不確定性を補うことができ、計測経路による導出形状の違いをRMS<300[nm]以下に抑えることができた。

最適な計測パスの組み合わせ(現状カゴメ格子と円環パス)を見出し、

2021年2月中旬までに要求仕様以上の波面精度の達成を目指す。



籠目模様