波面誤差の小さい高精度鏡について

自然科学研究機構　国立天文台
総合研究大学院大学

早野　裕
鈴木竜二、内山瑞穂、浦口史寛、IRIS-Jチーム

内容

- IRIS撮像系の波面誤差割当
- コーティングした球面鏡の冷却時変形の測定
- コーティングした球面鏡のモデルの定性的解析
- コーティングなしの球面鏡の冷却時変形の測定
- 今後

波面誤差の積み上げ

Terms	WFE before DM correction (nm)	WFE after DM correction (nm)
Imager optics		
Nominal (at single wavelength)	7	6
Fabrication / alignment error	10	TBC
Polishing error	33.4	TBC
Cooling effects	6 (TBC)	TBC
Chromatic aberration	5 (TBC)	-
Measurement error	2	-
Vibration	8 (TBC)	-
ADC		
Pupil shift	TBD	TBD
Polishing error	TBD	
NFIRAOS – IRIS I/F error	TBD	
Total (at single wavelength)	37.3+TBD	

光学素子の形状（研磨）誤差の要求仕様

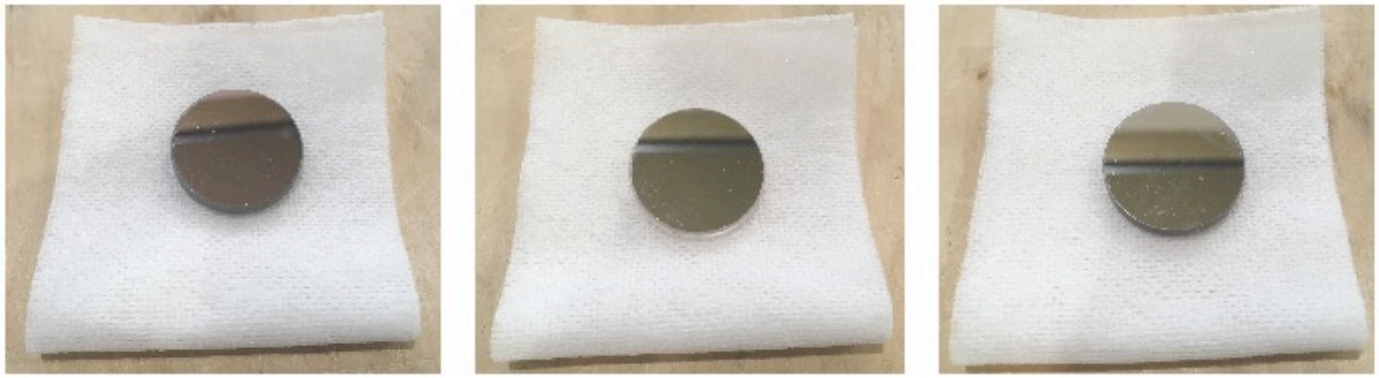
Element	Surface irregularity after coating (RMS) [nm]	WFE [nm]
Window	6	4.24
Filter	6	4.24
Collimator1	6	12.0
Collimator2	6	12.0
Collimator3	6	12.0
Camera1	6	12.0
Camera2	6	12.0
Camera3	6	12.0
Fold mirror1	3	8.49
Fold mirror2	3	8.49
Fold mirror3	3	8.49
Total (RSS)		33.41

- 研磨誤差が最も効いている
- 非球面鏡に対して6nm rms
- 平面鏡に対して3nm rms

冷却鏡の形状変化測定

- 円形Φ25mm平面基板
  - 誘電体多層膜
  - 保護膜付き銀
- 165mm角の球面基板
  - 誘電体多層膜
  - コーティング無し

円形Φ25mm平面基板のコーティングサンプル



Sample A　Sample B　Sample C

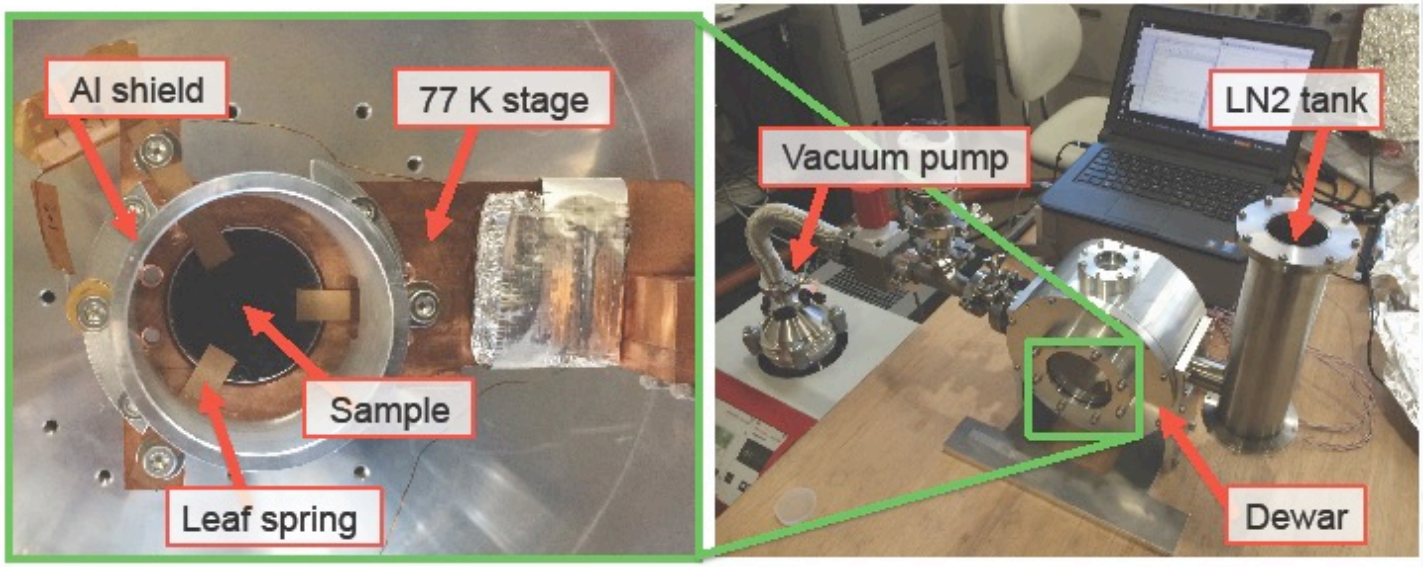
サンプル	基板	コーティング	反射率[a,b]	製造社[c]
Sample A	合成石英	誘電体多層膜	99.7%	SOC
Sample B	合成石英	保護膜付き銀	98-99%	SOC
Sample C	合成石英	保護膜付き銀	98-99%	OCJ

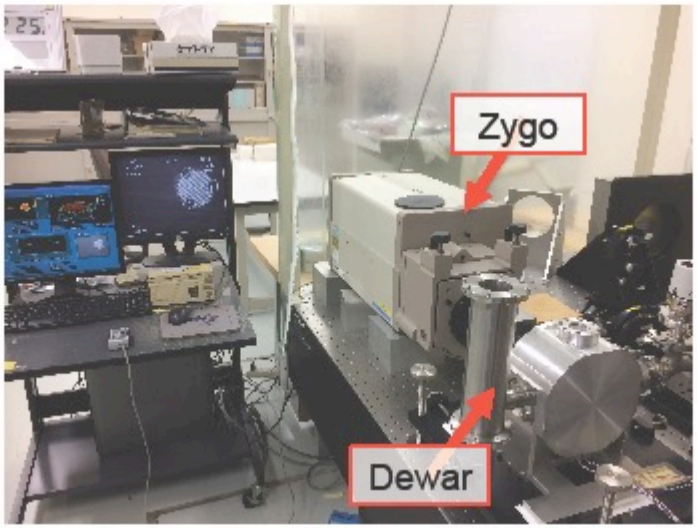
a 波長レンジ 0.84 - 2.4 ミクロン

b 製造メーカー測定値

c OCJ：日本真空光学、SOC：昭和オプトロニクス

コーティングサンプルの冷却時の形状測定実験系

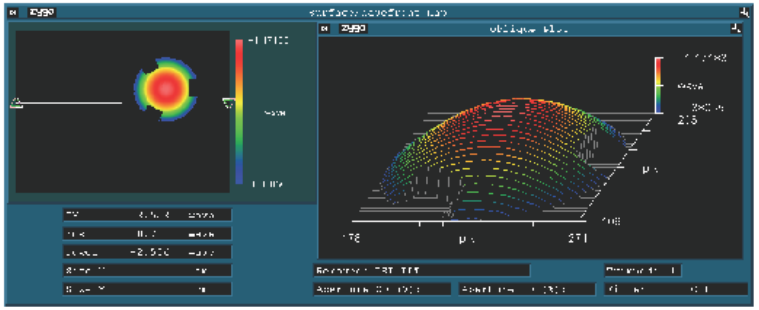




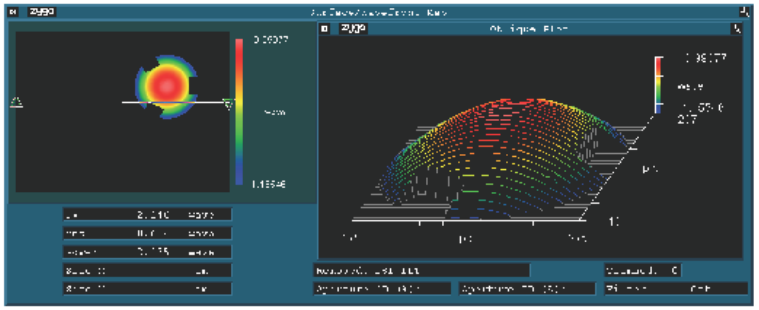
常温と低温の形状

誘電体多層膜が銀に比べて冷却されにくいのは2.5ミクロン以上の反射率が低いため。

294 K

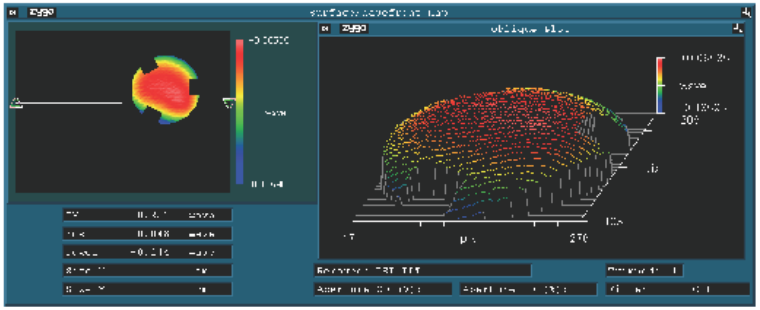


170 K

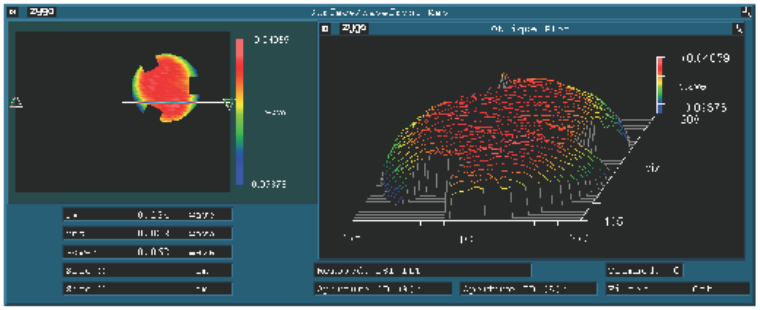


Sample A (誘電体多層膜)

294 K



106 K

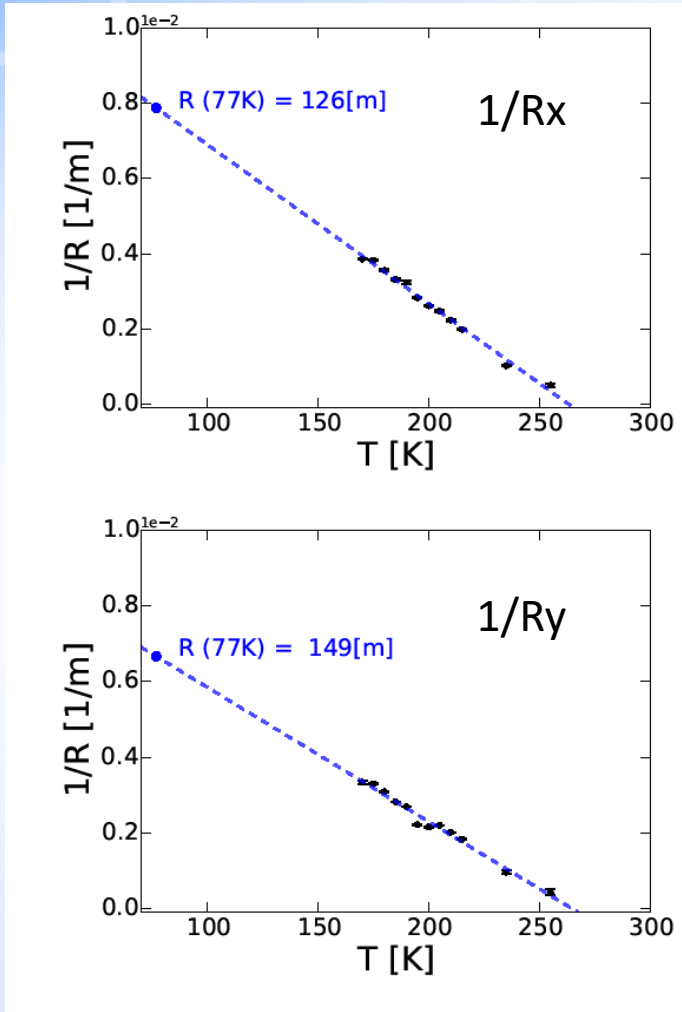


Sample B (保護膜付き銀)

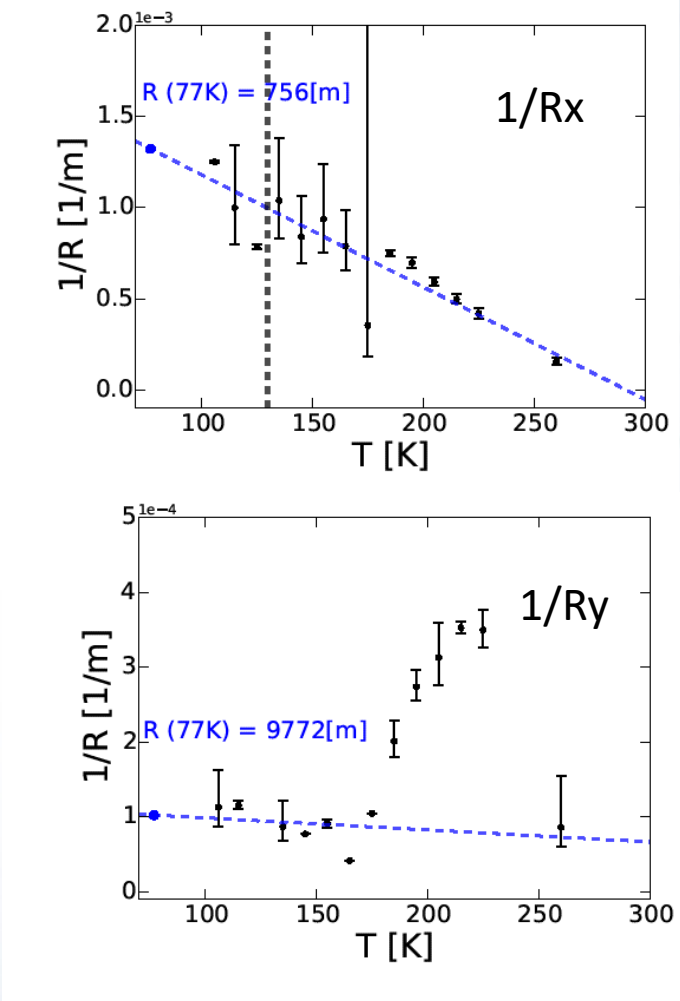
誘電体多層膜の方が曲率変化が大きい。
保護膜付き銀コーティングのサンプルは非点収差的な変化が見られる。

温度による曲率半径の変化

Sample A (誘電体多層膜)

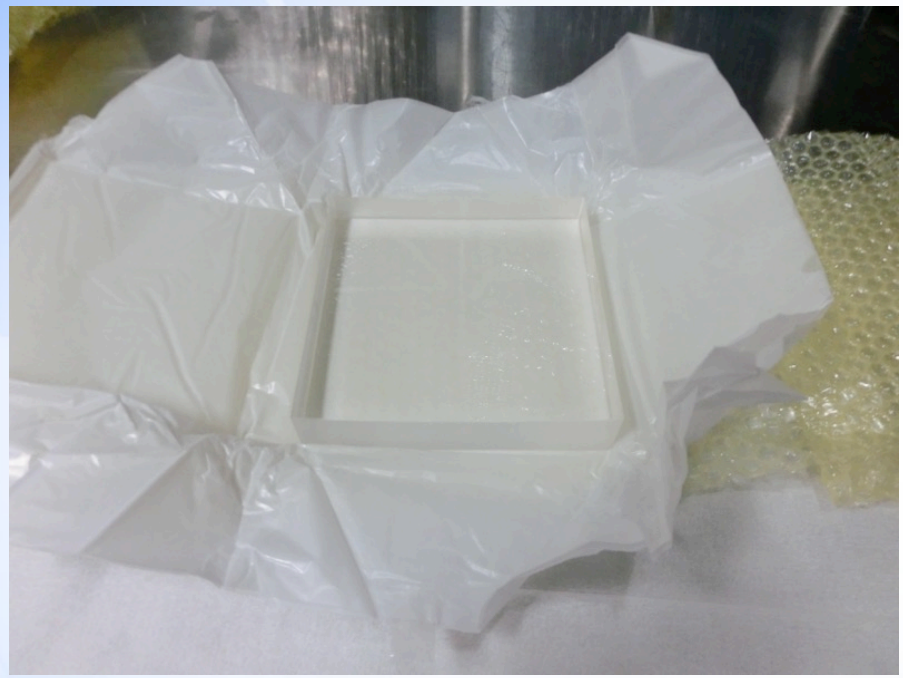


Sample B (保護膜付き銀)

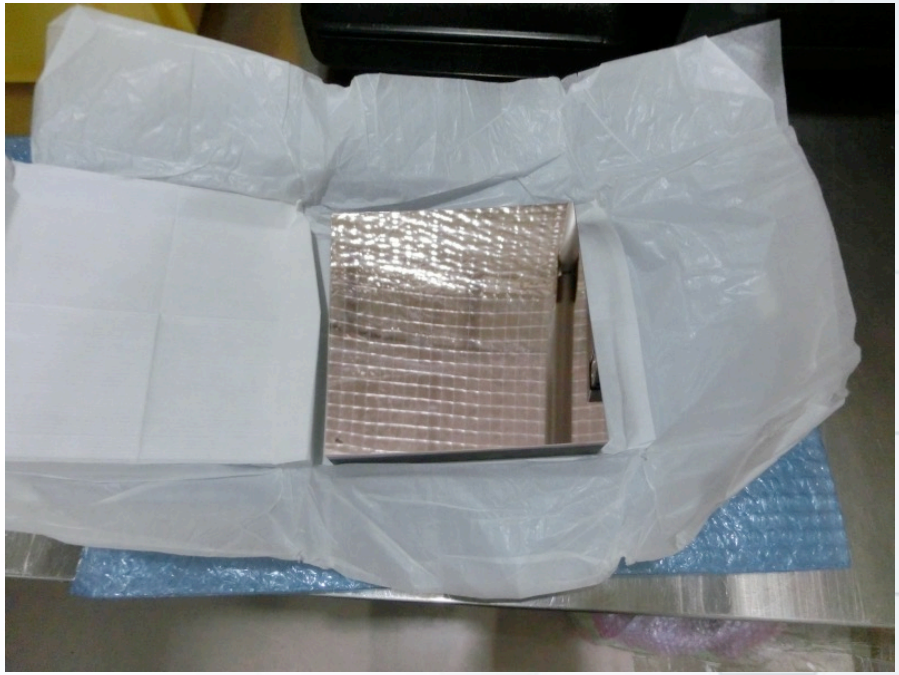


誘電体多層膜は等方的に曲率が変化。銀コーティングは異方性が途中から発生。

165mm角の球面基板
誘電体多層膜コーティング　有無

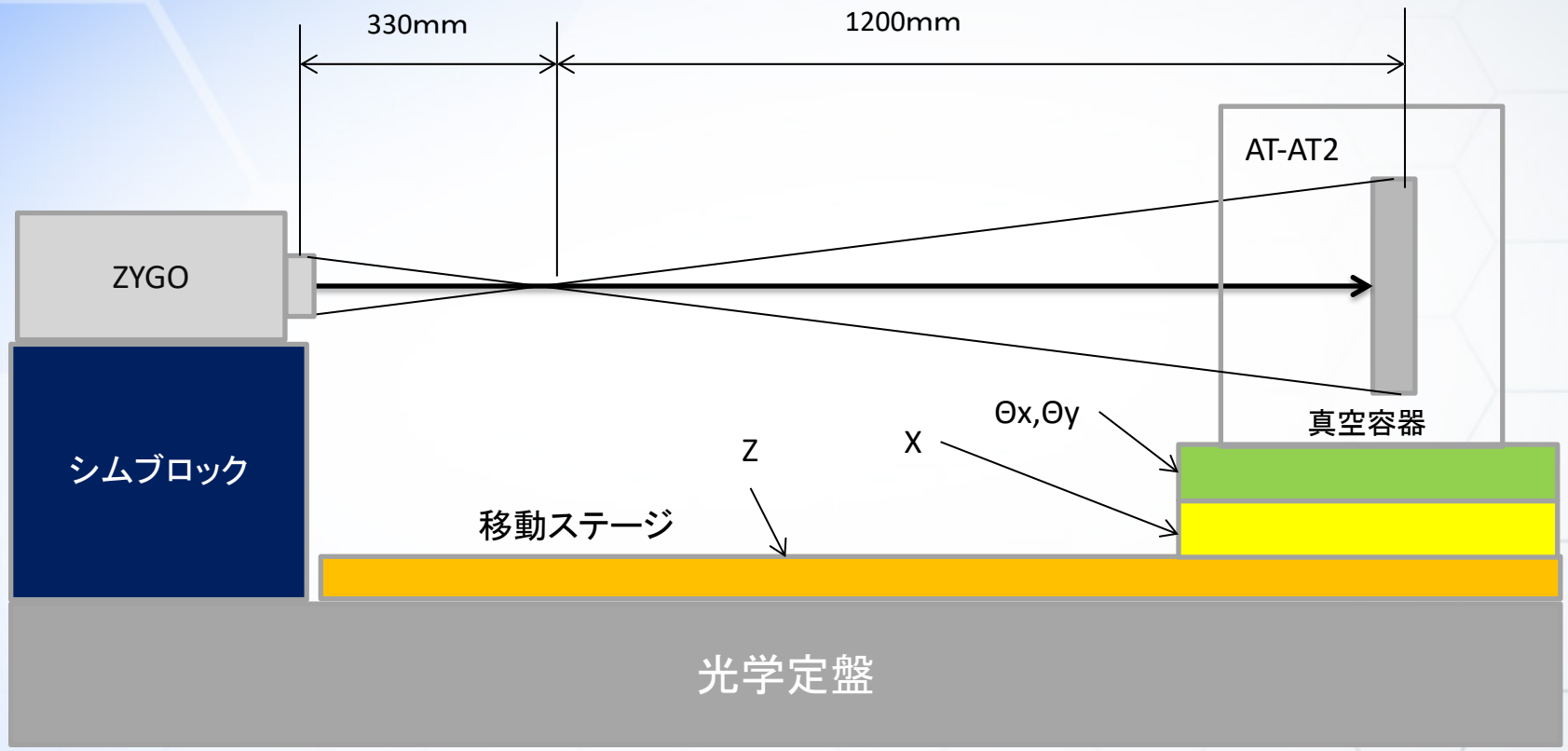


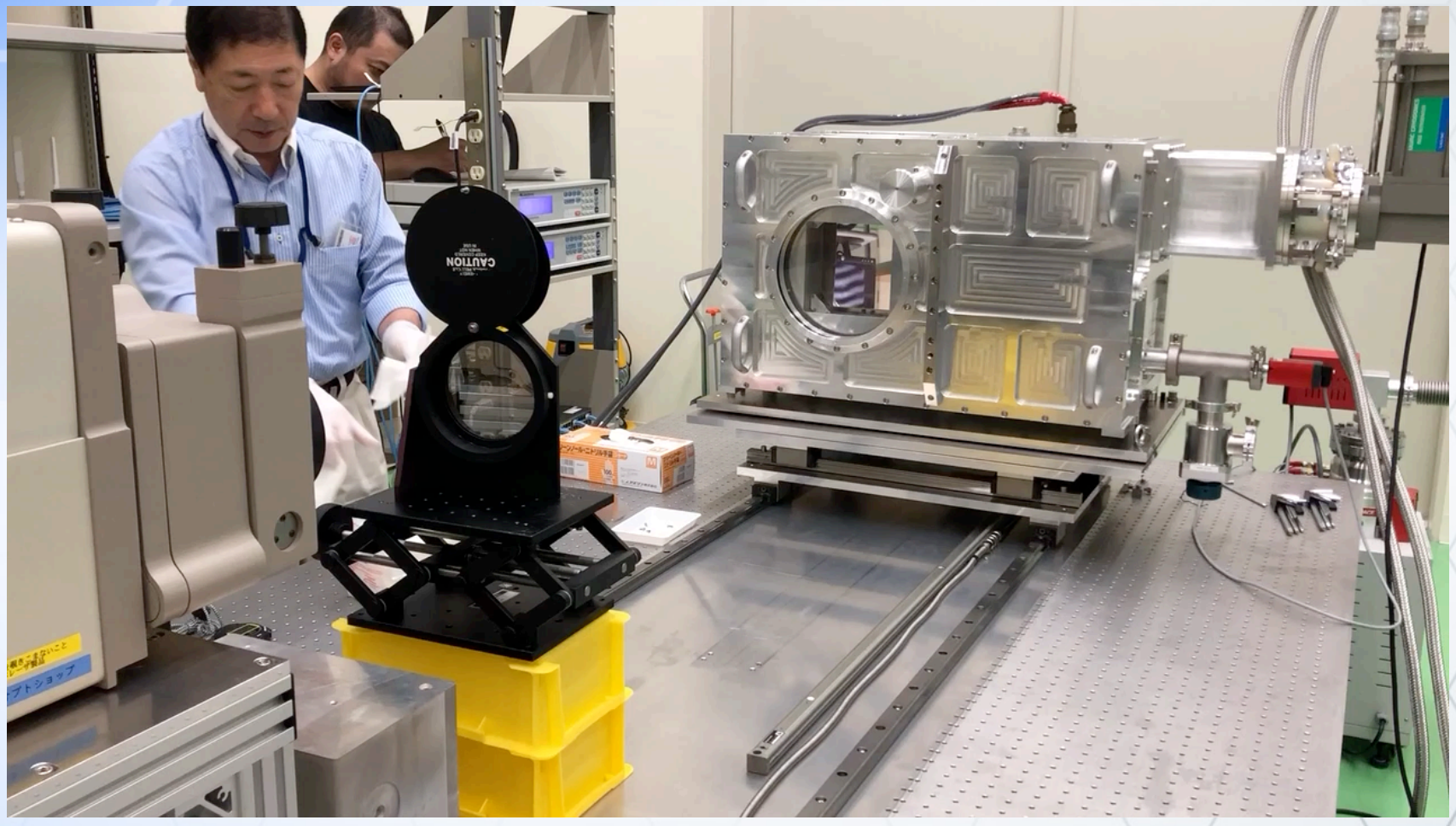
Non-coated substrate



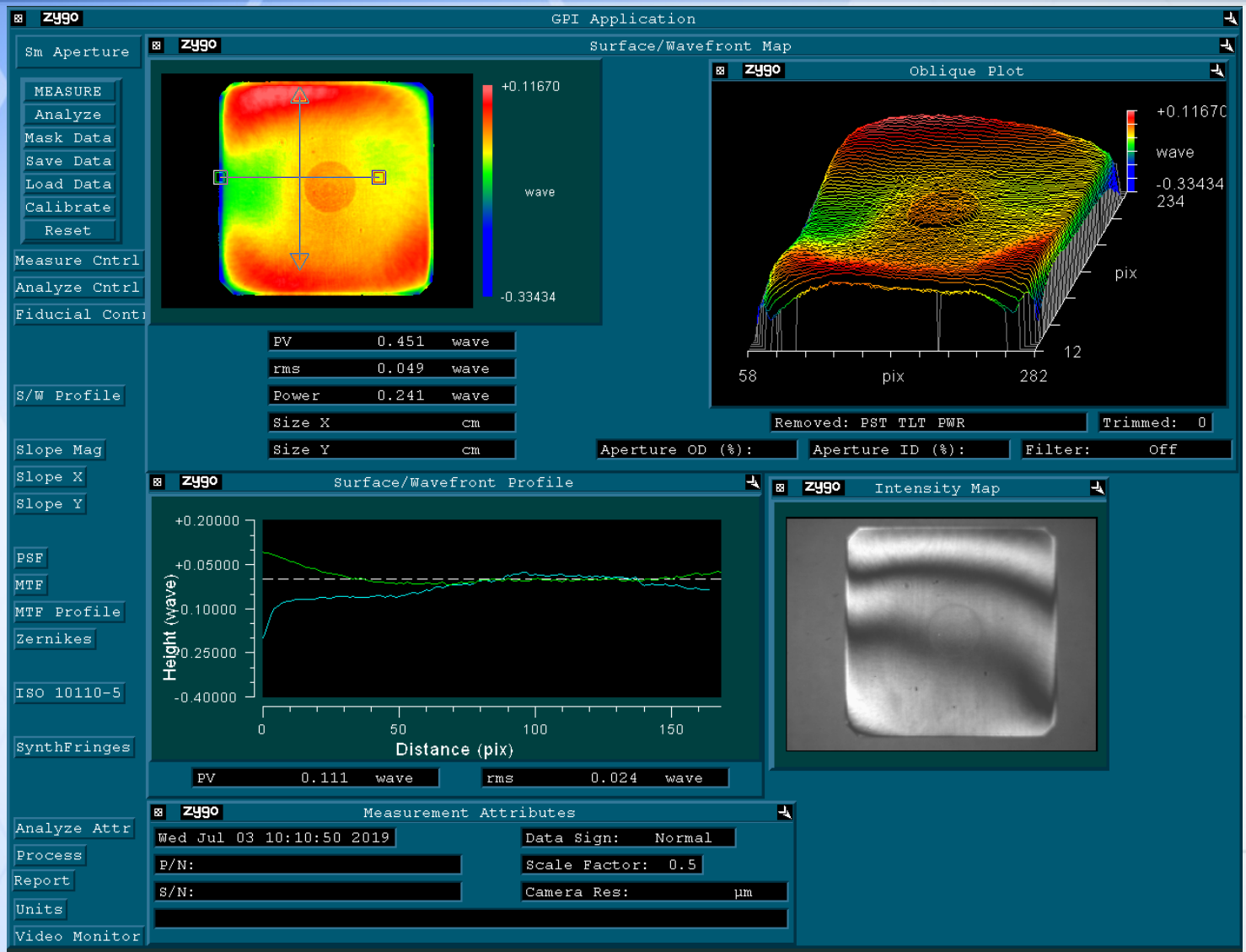
Coated mirror

球面鏡形状の測定系




CAUTION

Tilt focus removedの冷却時の鏡の表面形状（103K）

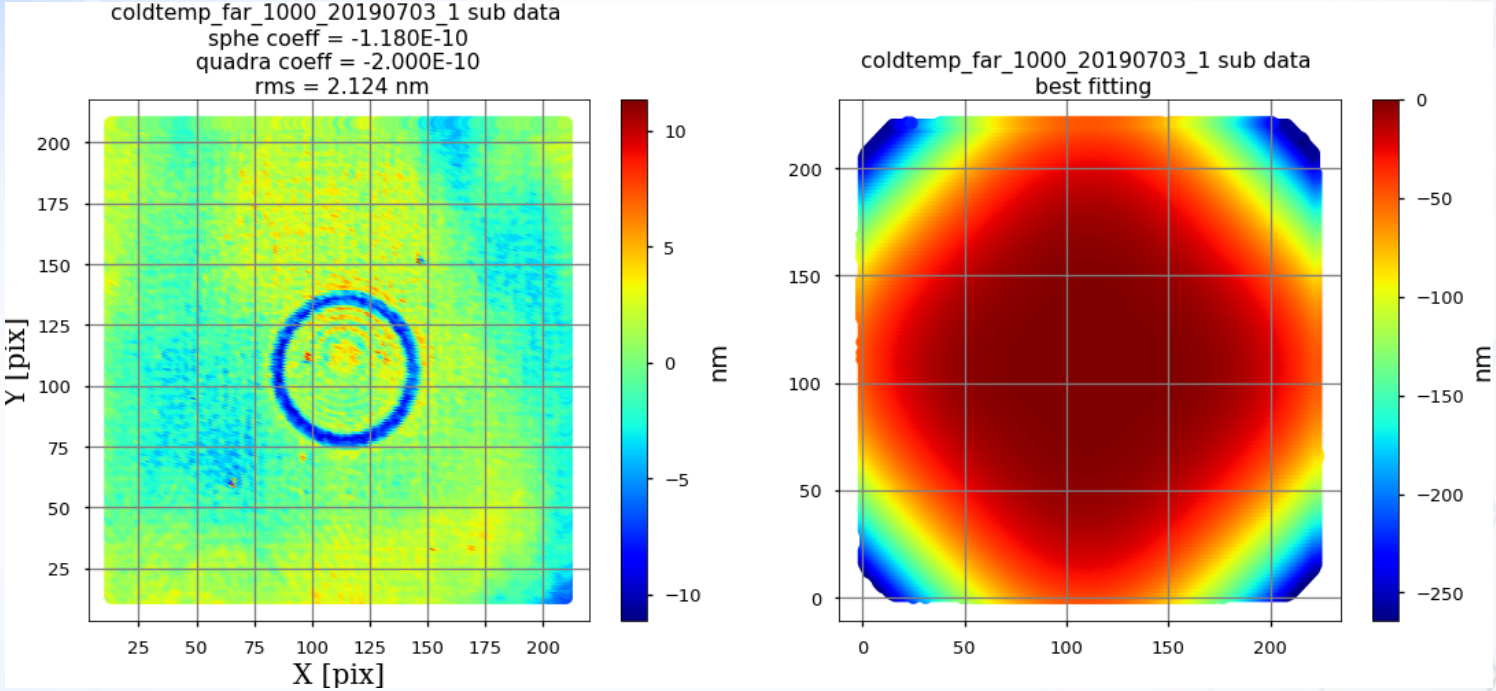


コーティングあり。
保持機構なし。

鏡中央部の円形パターンは、何かからの干渉が原因かもしれない。

30nm rms
310nm PV

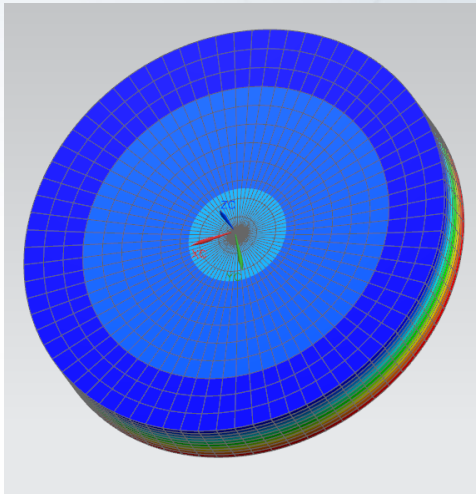
鏡の形状のFitting @ 103K

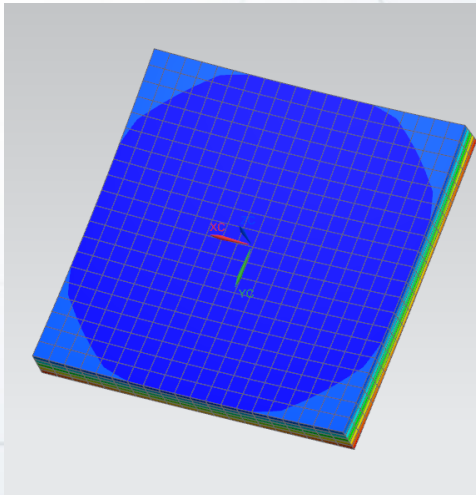


形状成分はtilt、defocus、quadrafoil、球面収差でfittingした。fitting範囲はクリアアパーチャ内。fittingの残差rms~2-4nm。

鏡の変形モデルによる定性的な検討

- 解析の条件(1)
  - 外形状
    - 円形基板 直径226.274 mm (=160 x sqrt(2) mm)
    - 四角形基板　一辺 160 mm
  - 曲率
    - なし(平面)、球面(曲率半径1,200mm、凹面)
    - 「基板厚さ」の設定は一番薄い部分の厚さに適用
  - 基板の厚さ25mm
  - コーティング
    - 基板のCTEより大きな材質の物性を仮定
    - 厚さ10ミクロン



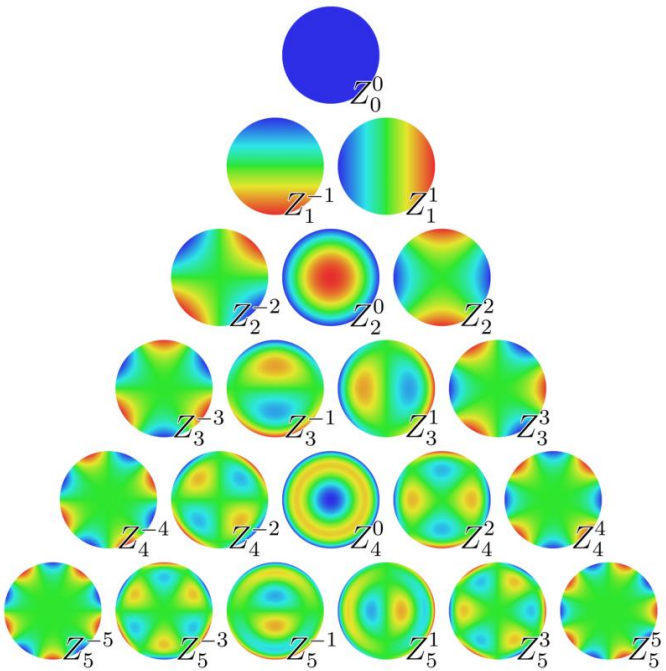


鏡の変形モデルによる定性的な検討

- 解析の条件(2)
  - 温度
    - ΔT = -223 K (300 K から 77 Kへの冷却を想定)
  - 境界条件
    - 無拘束(慣性リリーフを有効化)、温度変化による熱ひずみのみを表現
  - 物性
    - 基板:Fused silica (E = 71 GPa, ν = 0.17, α = 0.0774 ppm/K)
    - コーティング: 仮の物質（インバー材、IC-DX） (E = 177 GPa, ν = 0.259, α = 0.189 ppm/K)

鏡の変形モデルによる定性的な検討

- 解析の条件(3)
  - 形状の多項式フィッティング
    - Zernike多項式（ツールはSigFit）
    - 正規化半径(RNORM) 113.14 mm
      - 円形基板の半径、四角形基板の対角の半分と同一
    - 第37項までをフィッティングし以下と球面鏡については曲率半径変化(dRoC)を抽出
      - Z_2^0 : Power (Defocus)
      - Z_4^0 : Primary Spherical
      - Z_4^4 : Primary Tetrafoil
      - Z_6^0 : Sec Spherical
      - Z_6^4 : Sec Tetrafoil



鏡の変形モデルによる定性的な検討

コーティングなし基板

					Round-Flat	Round-Spherical	Square-Flat	Square-Spherical
Thickness					25 mm	25 mm	25 mm	25 mm
Coating-Front					-	-	-	-
Coating-Back					-	-	-	-
Corner-R					-	-	-	-
Constraint					I/R	I/R	I/R	I/R
	K	N	M					
Power (Defocus)	3	2	0	nm	0.00000	46.35101	0.00000	46.35113
Pri Spherical	7	4	0	nm	0.00000	0.10347	0.00000	0.10352
Pri Tetrafoil	9	4	4	nm	0.00000	0.00001	0.00000	0.00011
Sec Spherical	13	6	0	nm	0.00000	0.00024	0.00000	0.00025
Sec Tetrafoil	15	6	4	nm	0.00000	0.00000	0.00000	0.00004
dRoC				mm	-	-0.02072	-	-0.02072

- I/R: Inertia Relief, E/C: Edge Constraint
- RoC: Radius Of Curvature

- Flatは冷却しても各項が変化しない
- Sphericalは冷却によりpowerとpri/sec sphericalが増加
  - **増加するのはpowerだけではない**
- Round、squareともに冷却により**tetrafoilは増加しない**

鏡の変形モデルによる定性的な検討

コーティングあり基板

					Round-Flat	Round-Spherical	Square-Flat	Square-Spherical
Thickness					25 mm	25 mm	25 mm	25 mm
Coating-Front					IC-DX, 10um	IC-DX, 10um	IC-DX, 10um	IC-DX, 10um
Coating-Back					-	-	-	-
Corner-R					-	-	-	-
Constraint					I/R	I/R	I/R	I/R
	K	N	M					
Power (Defocus)	3	2	0	nm	21.49357	65.37994	31.19237	77.89863
Pri Spherical	7	4	0	nm	0.40422	0.39869	8.04352	9.52937
Pri Tetrafoil	9	4	4	nm	0.00502	0.00498	16.19690	19.27202
Sec Spherical	13	6	0	nm	0.58524	0.79104	2.96382	3.62813
Sec Tetrafoil	15	6	4	nm	0.00290	0.00313	6.01776	7.24339
dRoC				mm	-	-0.02932	-	-0.03000

- I/R: Inertia Relief, E/C: Edge Constraint
- RoC: Radius Of Curvature

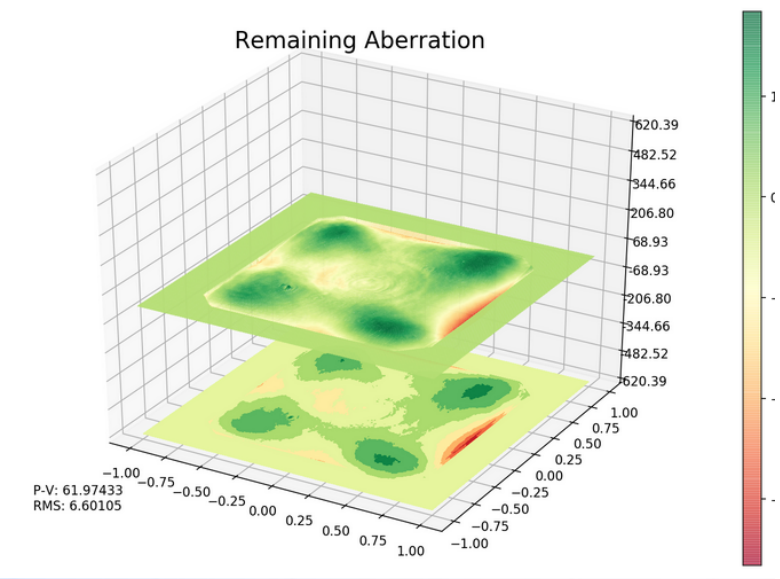
- 総じてpower、sphericalが増加する
- Sphericalでは曲率半径が小さくなる
- **Roundは冷却してもtetrafoilは顕著に増加しない**
- **Squareは冷却するとtetrafoilが増加する**

コーティング無し球面鏡 冷却時変形測定と解析

- 112K付近で常温時と比較してdefocus, tetrafoil, spherical の発生
  - コーティング有りと非常に類似した結果
  - 常温時の形状も似ている
  - Zygoのfocusingの甘さを考慮してedge領域を5, 10mm削っても結果は大きくは変わらない→リアルな構造？

コーティング無し球面鏡
冷却時変形測定と解析

- 112Kで測定された形状をZ4項 (focus) まで除去した結果

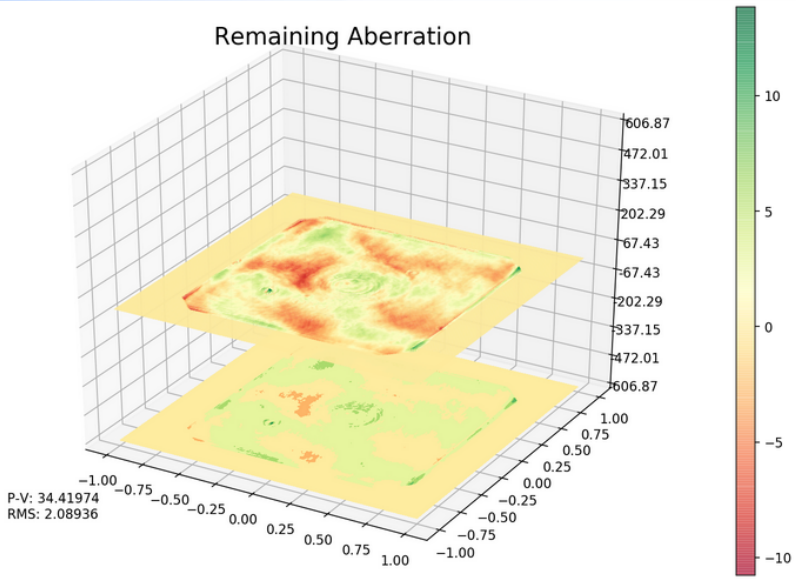


Zernike Polynomials List

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
-52.731	50.207	47.588	112.776	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z11	**Z12**	**Z13**	**Z14**	**Z15**	**Z16**	**Z17**	**Z18**	**Z19**	**Z20**
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z21	**Z22**	**Z23**	**Z24**	**Z25**	**Z26**	**Z27**	**Z28**	**Z29**	**Z30**
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z31	**Z32**	**Z33**	**Z34**	**Z35**	**Z36**	**Z37**			
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			

コーティング無し球面鏡 冷却時変形測定と解析

- 112Kで測定された形状をZ15項（Primary tetrafoil)まで除去した結果



Zernike Polynomials List

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
-64.071	47.855	46.339	98.647	0.637	-2.759	-1.027	-2.572	2.266	-4.491
Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20
-9.546	-0.167	-0.493	-16.800	-0.430	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z21	Z22	Z23	Z24	Z25	Z26	Z27	Z28	Z29	Z30
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z31	Z32	Z33	Z34	Z35	Z36	Z37			
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000			

Z11:球面収差とZ14:Primary tetrafoil

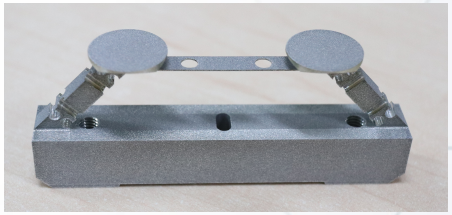
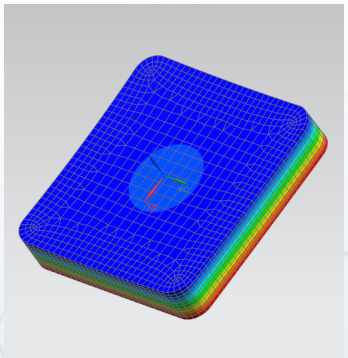
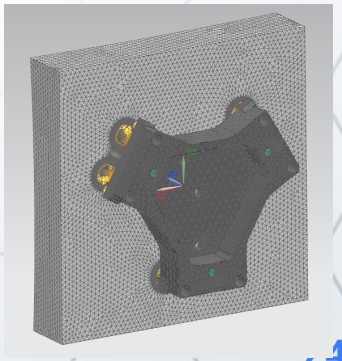
鏡の変形モデルと実験が合わない

- 実験系、測定方法、データなどの再確認
  - 真空容器の大型入射窓（石英）の温度分布の不均一性が波面測定に影響している可能性が高い。
  - 小型のフッ化カルシウムの入射窓が使えるように実験系を改良する。

- 鏡のモデルとZernike多項式のfitting誤差の確認

今後について

- 小型のフッ化カルシウムの入射窓を使って、
  - コーティングなしの球面基板測定
  - コーティングありの球面基板測定
  - 鏡保持機構を基板背面に取り付けて影響を測定



- モデルを使って、
  - 基板形状（角を丸くするなど）の最適化。
  - 保持機構の場所の最適化。
  - 基板の厚みの影響。