

極限の安定性を目指した
超低熱膨張セラミックによる光学系の開発

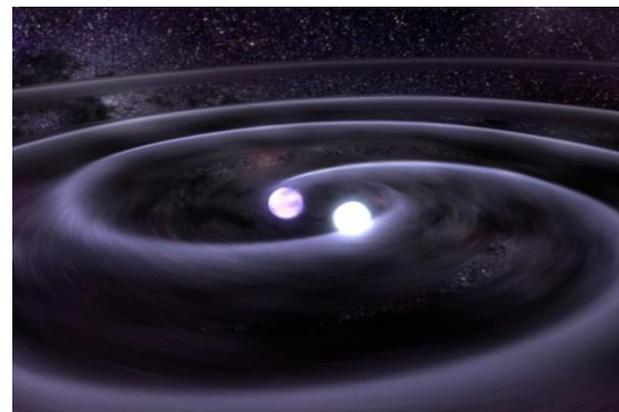
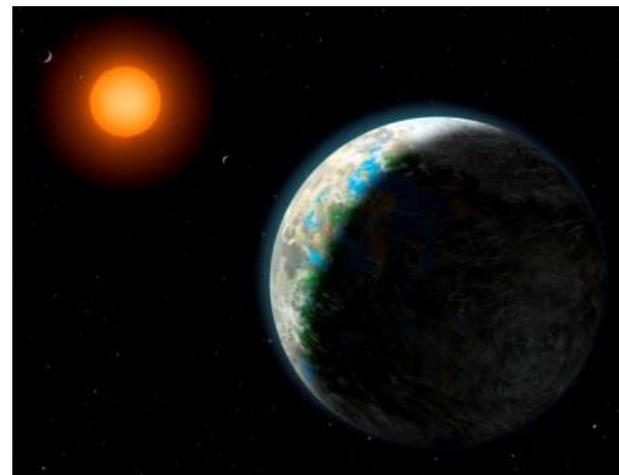
2013/12/17

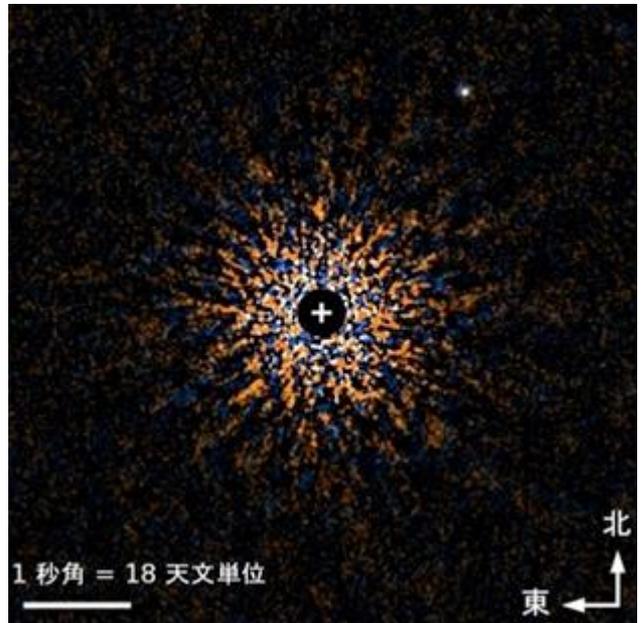
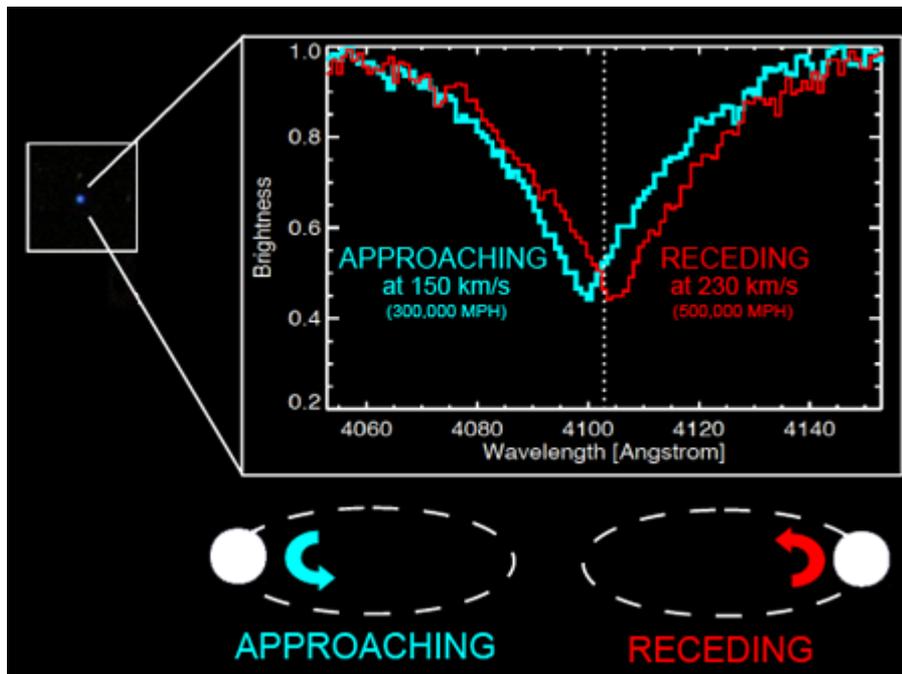
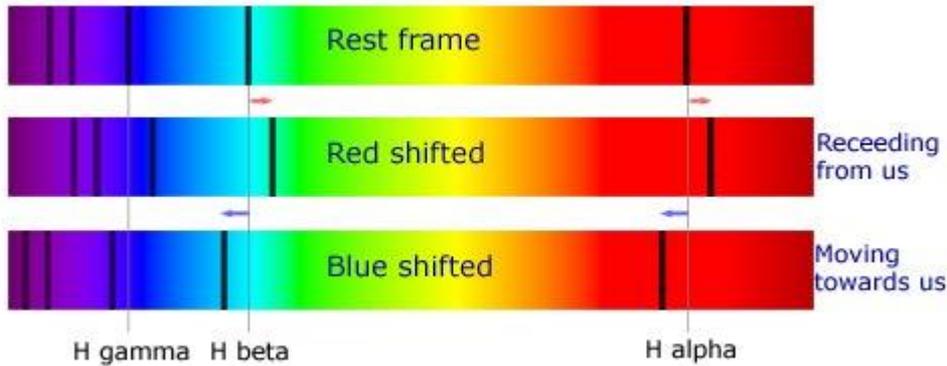
国立天文台 太陽系外惑星探査プロジェクト室

小谷隆行

極限の温度安定性が必要な装置

- 太陽系外惑星探査
 - ドップラー測定
 - 1m/sの速度測定精度、数日～数年間
 - トランジット測定
 - 0.1%以下の相対測光精度、数日～数年間
 - 直接撮像分光
 - 高コントラスト測定(波面測定、スペックル安定性)、数時間～1日
- アstrometry
- Gravity wave observation





- 地球型惑星の検出には1m/sの測定精度が必要=1ピクセルの1/1500のシフトを判別
- 数日~1年程度安定性を保つ必要あり

- 地球型惑星の直接検出には、散乱光のレベルを主星の8桁以下まで下げる必要がある
- 散乱光は大気・光学系の熱変形により形状が変化する

温度変化に強い光学系

- 熱膨張係数の小さい素材を使う
 - Zerodurなどの低熱膨張ガラス
 - インバーなどの低熱膨張金属
- 全てのコンポーネントを同じ素材で作る
 - 光学素子、ホルダー、定盤も含めて同じにする
 - 温度変化があっても、相似的に変形するためアライメントが保たれる
- 調整機構がない
 - 調整可能ということは、動く余地があるということ
- 温度変化の影響が少ない光学系支持方法を使う
 - キネマティックマウント
- そもそも温度変化を小さくする

理想的な光学系

- 光学素子、ホルダー、光学定盤を全て低熱膨張素材で一体製作する
- 全て金属で製作する
 - ミラーの面荒さが問題(切削跡が残る)
- 全てガラスで製作する
 - ホルダー、光学定盤までガラスにするのは難しい(自由な形状に加工するのが難しい)
 - 高コスト
- ガラス＋金属の複合構造
 - CTEが完全には同じではない
- 金属・Zerodurともに形状が経年変化する

低熱膨張セラミックを使うことで極限の安定性を持つ光学系を目指す

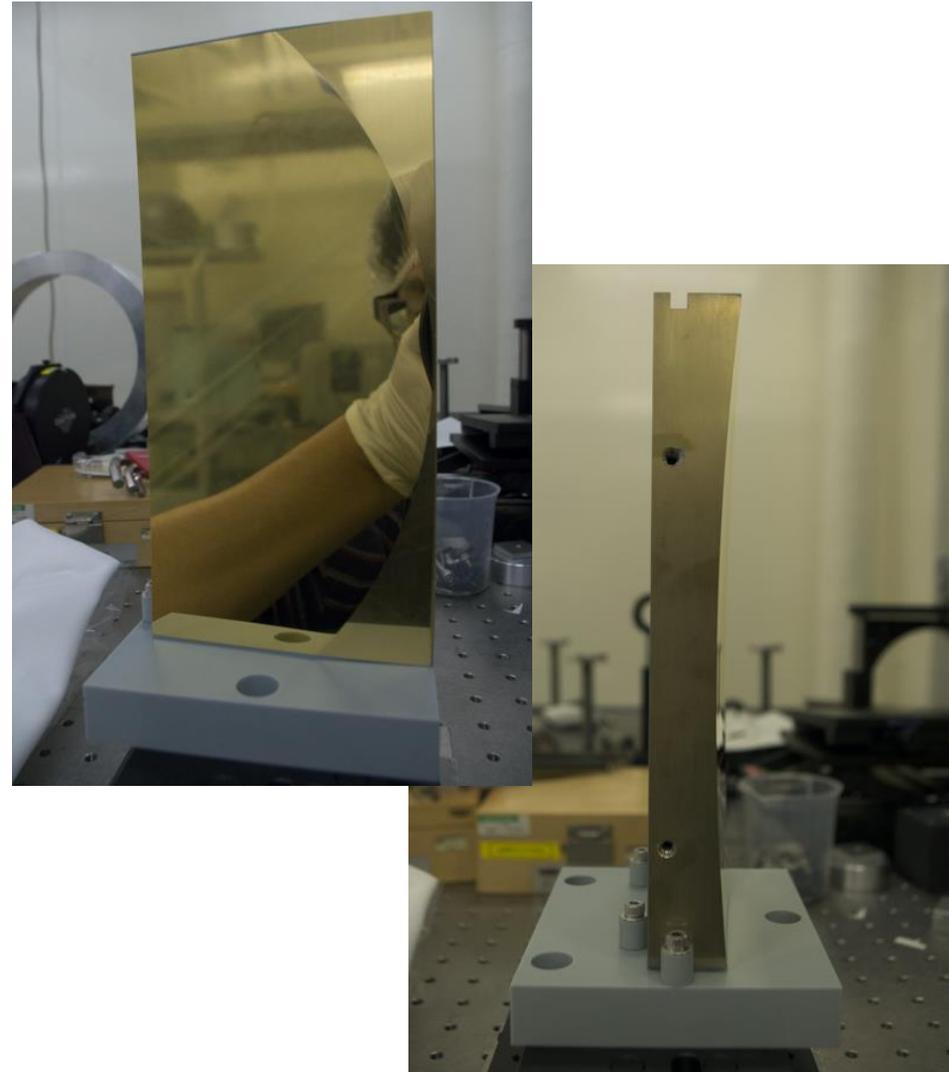
超低熱膨張セラミック

- 加工性が良い、自由な形に形成可能、加工精度も高い
- 鏡面研磨可能
 - 面荒さはガラス鏡より大きい、金属鏡よりは小さい
- 経年変化が少ない
- 形成後も外形を調整し(削る)、光学調整が可能
- ガラスのように割れ・欠けやすい

	CO220 (京セラ)	NEXCERA (黒崎播磨)	ZPF (日本セラテック)	Zerodur	アルミ
密度 (g/cm ³)	2.5	2.6	2.5	2.5	2.7
CTE (300K)	<0.05E-6	<0.03E-6	0.02E-6	<0.05E-6	24E-6
熱伝導率 (W/mK)	5	4.2	5	1.5	236
ヤング率 (GPa)	140	140	150	90.3	69

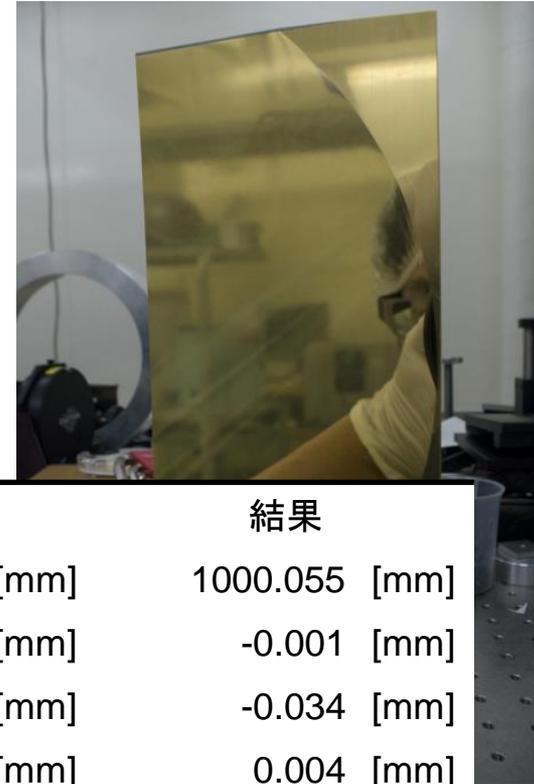
京セラ製コージライトによる光学系開発

- 軸外し放物面鏡
 - 基板材料CO220
 - 曲率半径=1000mm
 - 軸外し量=100mm
 - ミラーサイズ
210x100x30mm
 - 鏡面領域 150x50mm
- ナノオプトクスエナジーにて研削・研磨
- 金コーティング
- 土台も同じセラミックで製作
- 鏡面と土台はヘリサートにより締結



京セラ製コージライトによる光学系開発

- 軸外し放物面鏡
 - 基板材料CO220
 - 曲率半径=1000mm
 - 軸外し量=100mm
 - ミラーサイズ 210x100x30mm
 - 鏡面領域 150x50mm



	目標値	結果
曲率精度	1000±0.5 [mm]	1000.055 [mm]
X shift	0.050 [mm]	-0.001 [mm]
Y shift	0.050 [mm]	-0.034 [mm]
Z shift	0.050 [mm]	0.004 [mm]
面精度 (PV)	0.158 [μm]	0.140 [μm]
面荒さ		2~3 nm Ra
反射率(0.98-1.75um)		98%以上

セラミック鏡の面荒さ

- 金コーティング後の面荒さは2-3nm Ra, PVは150nm程度
- Newport Zerodur鏡はsub-nmレベル
- 放物面鏡、平面鏡で同程度の面荒さ
- セラミック中の固い部分は研磨スピードが遅いため残りやすい

Surface Statistics:

Ra: 2.68 nm
Rq: 3.74 nm
Rz: 73.32 nm
Rt: 154.87 nm

Set-up Parameters:

Size: 736 X 480
Sampling: 840.00 nm

Processed Options:

Terms Removed:
Curvature & Tilt
Filtering:
None

Surface Statistics:

Ra: 3.08 nm
Rq: 4.22 nm
Rz: 45.26 nm
Rt: 92.75 nm

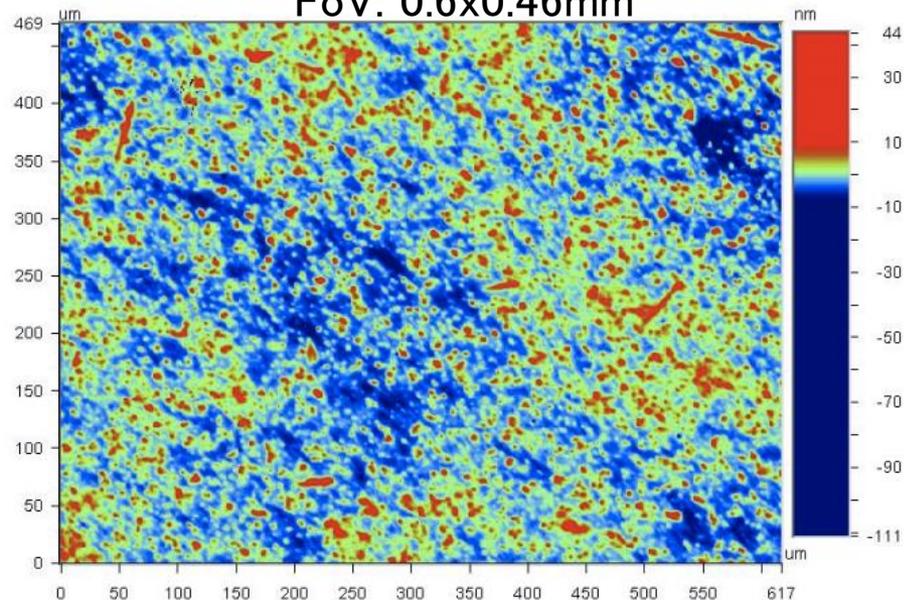
Set-up Parameters:

Size: 736 X 480
Sampling: 168.00 nm

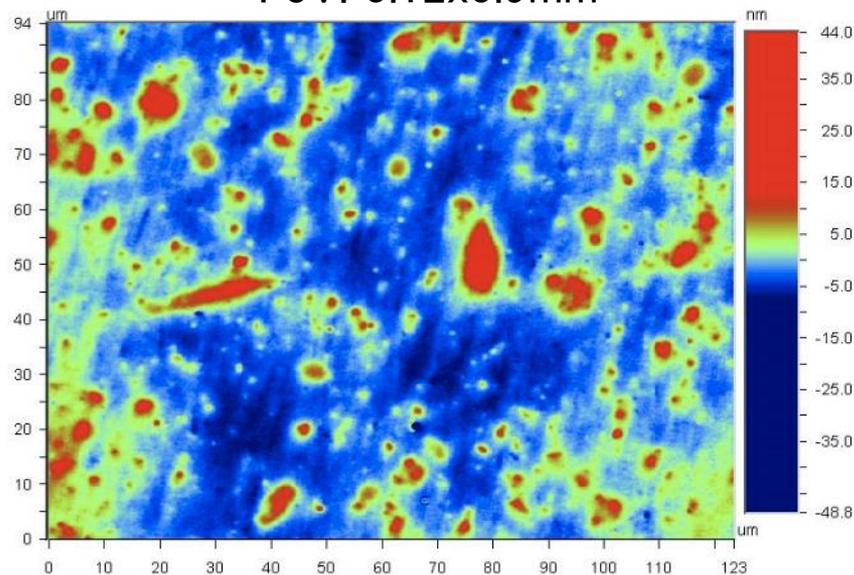
Processed Options:

Terms Removed:
Tilt
Filtering:
None

FoV: 0.6x0.46mm



FoV: 0.12x0.9mm

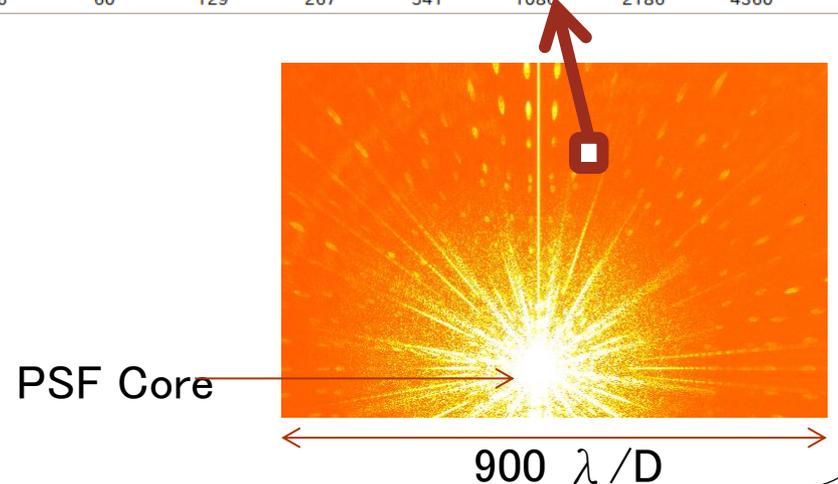
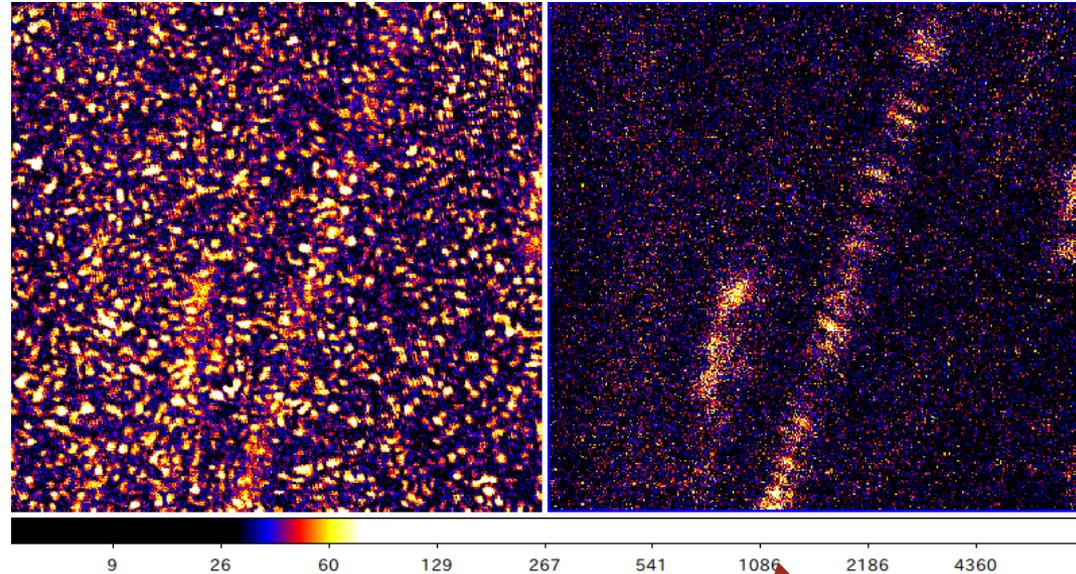


セラミック鏡による散乱光の発生

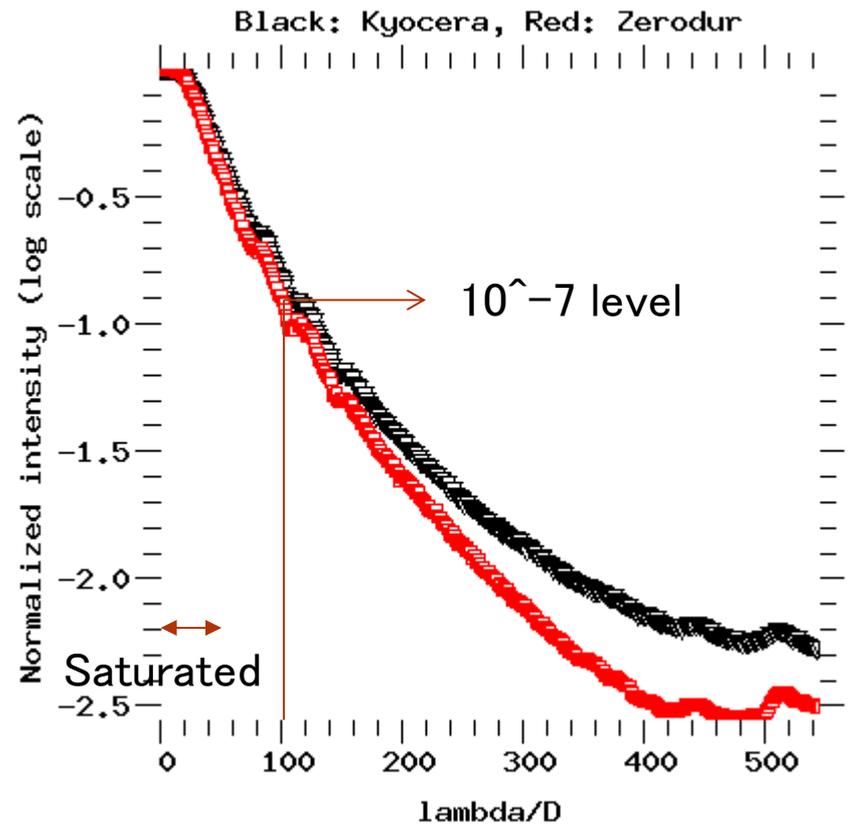
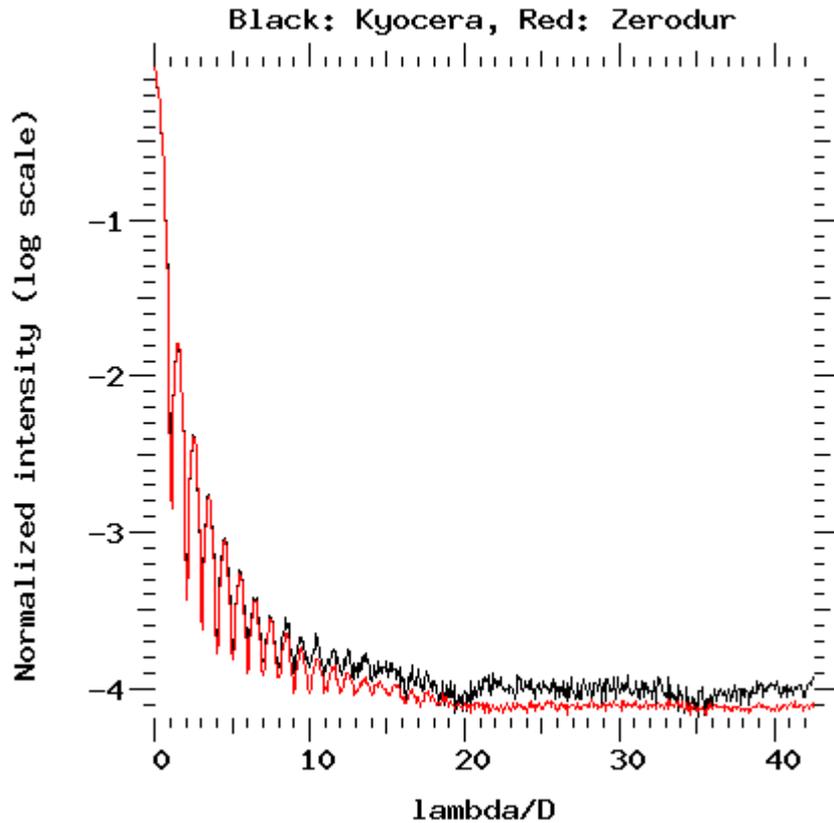
セラミック鏡

Zerodur

- コリメート光中に平面鏡を置き、レンズで結像しPSFを測定
 - ビームサイズ ϕ 5, 10mm
 - He-Ne laser
 - 京セラCO220(金コート)
 - Newport Zerodurミラー(AIコート)
- $>10 \lambda/D$ で散乱光が見られる
 - Zerodur鏡PSFより20%程度強度が大きい。散乱光強度はPSFピークの0.1%以下
- $>$ 数百 λ/D で散乱光が目立つ
 - 散乱光強度は、PSFピークの0.1%よりかなり小さい
 - 鏡面凹凸の空間周波数に対応しているように見える
- 通常の用途では問題ないレベル
- 高コントラスト観測用としては散乱光が大きい
 - Sub-nmの面荒さを目指すには、研磨方法の工夫をするか、セラミック粒子の均一性が高いNEXCERA(黒崎播磨)が有望

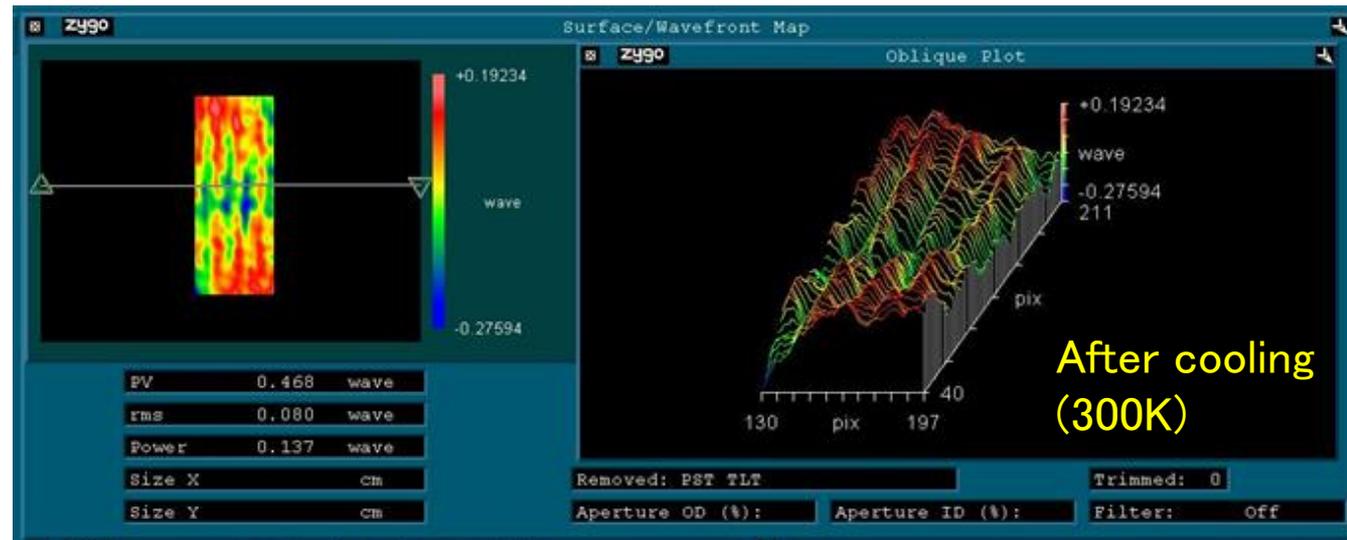
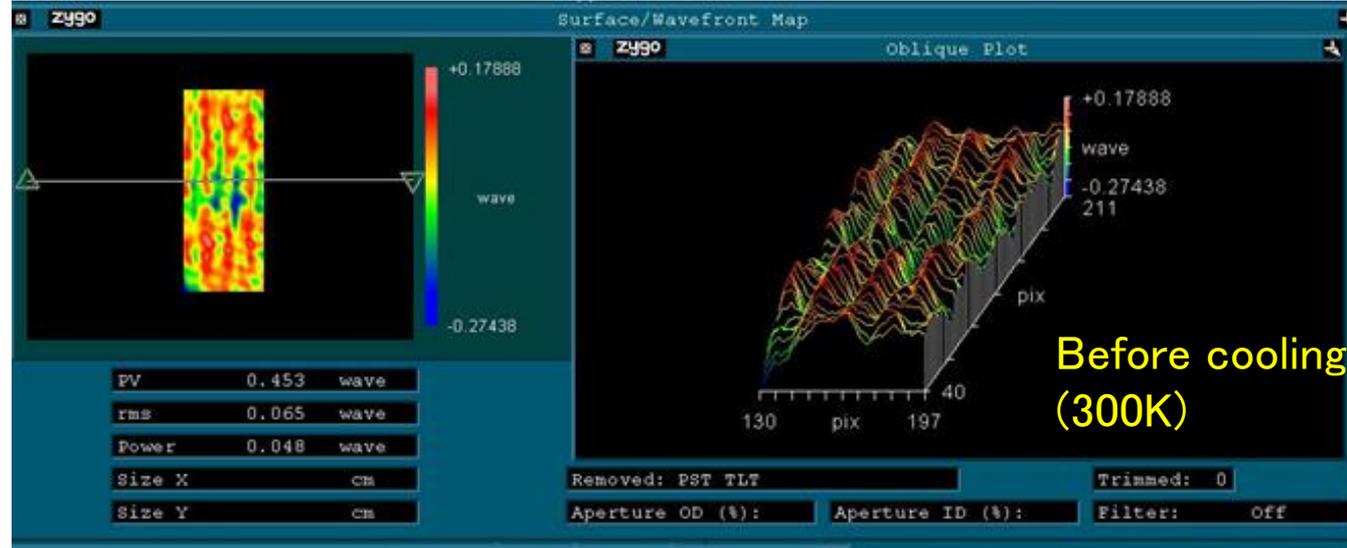


散乱光強度測定(Azimuthal average)



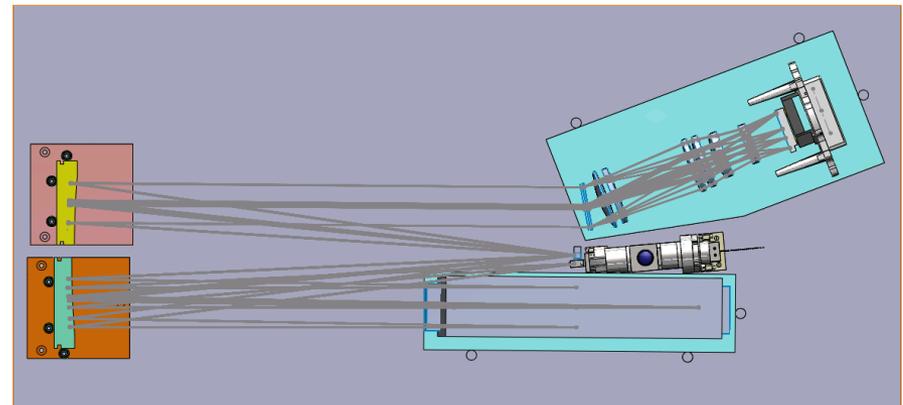
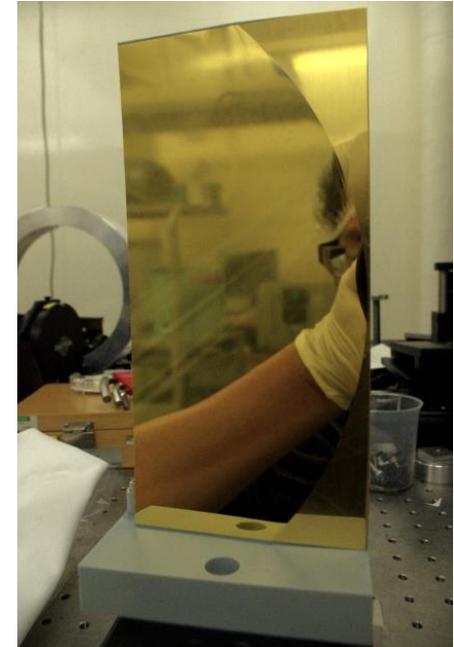
セラミック鏡冷却試験

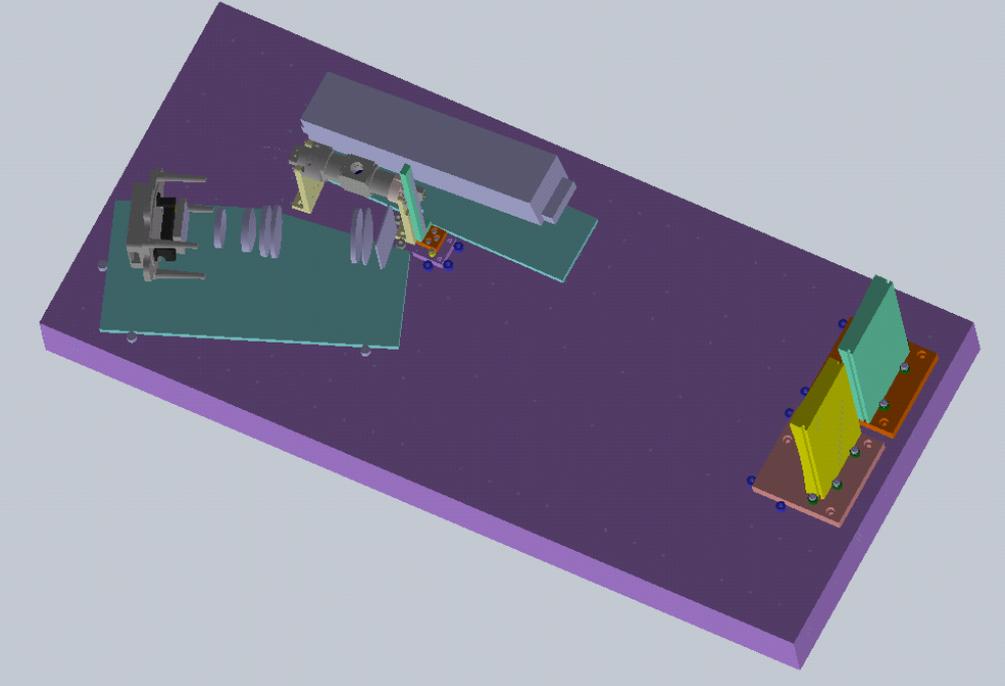
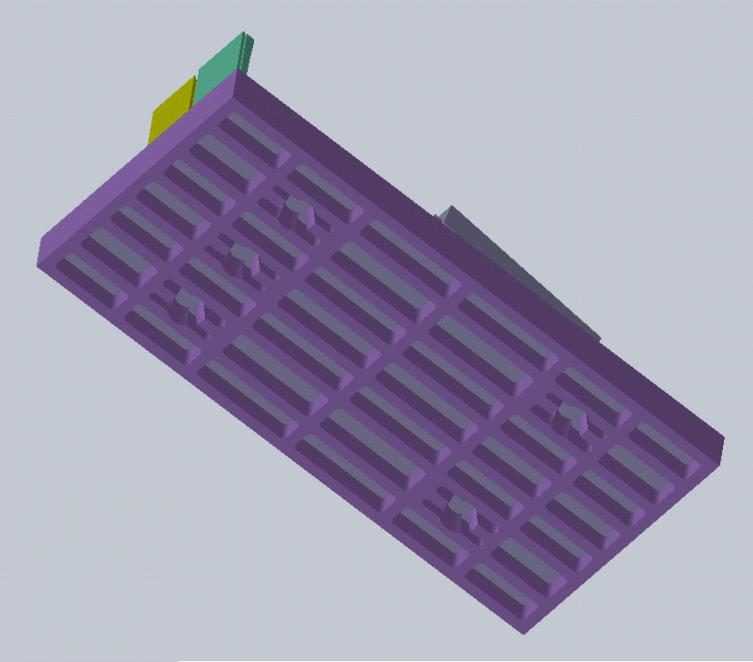
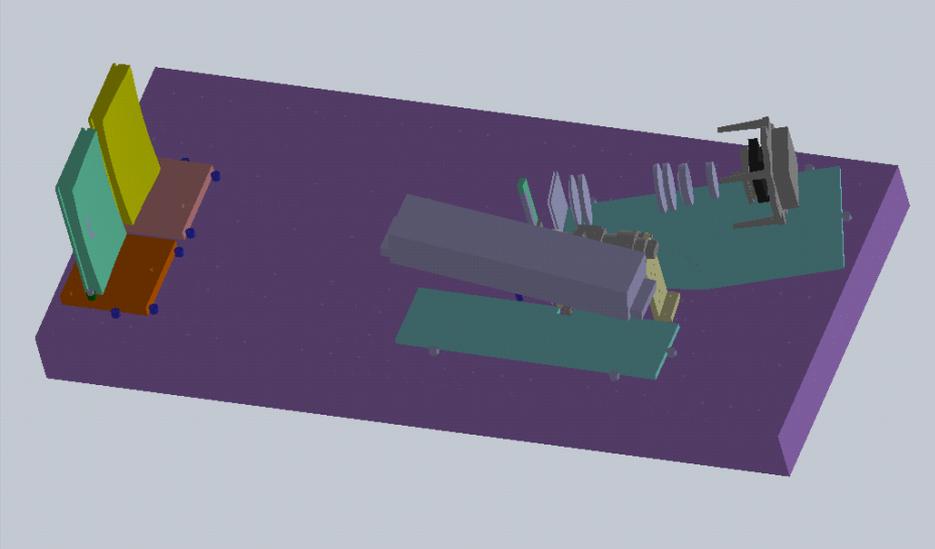
- 200Kまで冷却・昇温することによる破損・恒久的な形状変化はなかった



地球型惑星の検出を目指すInfrared Doppler

- すばる用近赤外線高分散分光器 (0.97–1.75 μm , $R=70000$)
- 光学定盤・コリメーター・スリットホルダーをセラミックで製作
- 3次元測定器で光学素子位置を測定・調整、一度位置を決めた後は動かさない
 - 設置位置 x, y, z トレランス: 50 μm
 - 角度 α, β, γ トレランス 1分角
- 光学定盤をキネマティック支持することで定盤土台の熱変形の影響を低減
- 極めて温度安定性が高いすばる望遠鏡の「クーデルーム」に設置
 - 温度変化 $<0.1\text{K}$





まとめ

- 超低熱膨張セラミックを用いることで、極限の安定性を持つ光学系の実現を目指す
- 加工性に優れ、形状の微調整が可能なため、光学調整が可能
- 鏡面加工が可能、通常の用途であれば面荒さは問題なし
- 高コントラスト観測などに用いる場合は、もう少し面荒さを小さくしたい