

可視赤外線観測装置技術ワークショップ2024
(東京大学天文学教育研究センター、2024.11.25-26)

新技術を用いた 高感度小型近赤外線高分散分光器 GARNETの開発

猿楽祐樹、大坪翔悟、佐川英夫、竹内智美、河北秀世、新中善晴、平井彩希子（京都産業大学）、
所仁志、山室智康、池田優二、小林仁美（フォトクロス）、
安井千香子、谷口大輔（国立天文台）、近藤荘平（東京大学）

内容

- GARNET
- 新技術
 - イメージョン回折格子
 - コージライト製反射光学系
- 他の要素開発
 - コージライト製定盤とのインターフェース
 - ミラー部品への黒色塗装
 - アレイカセット

GARNET

参考：Sarugaku+2024, Proceedings of SPIE, Vol. 13096, id. 130967X.

“R=200,000 NIR cross-dispersed echelle spectrograph realized by germanium immersion grating and all-cordierite reflective optical system”

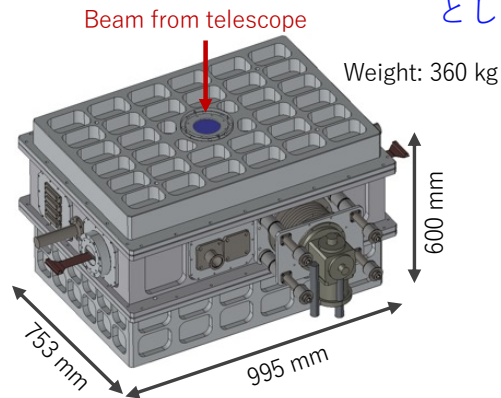
Germanium immersion grating and **A**ll-cordierite **R**eflective optical system employed
NIR (K-, L-bands) **E**chelle spectrograph with **r** = **200,000** (**T**wo hundred thousand)

- これまでにない高い波長分解能、高いスループット → 微弱分子ラインの検出に強み
- コンパクト設計で小口径望遠鏡に搭載可能 → 豊富な観測時間（モニター観測）

* 神山天文台荒木望遠鏡(口径1.3m)のカセグレン焦点に搭載予定

メインの科学目標：惑星大気の物理的・化学的プロセスの解明

イメージング回折格子やコージライト製反射光学系は将来の赤外線観測の標準技術として幅広く用いられることが期待される。その技術実証機でもある。

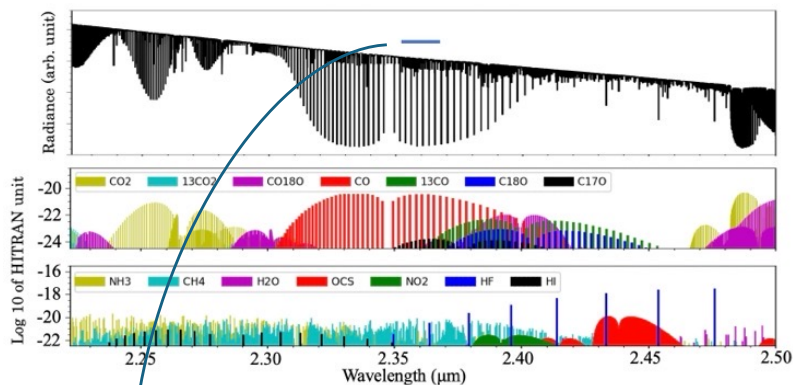
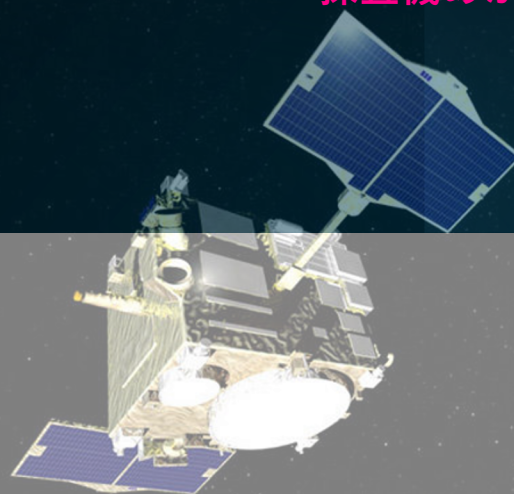


Sarugaku+2024

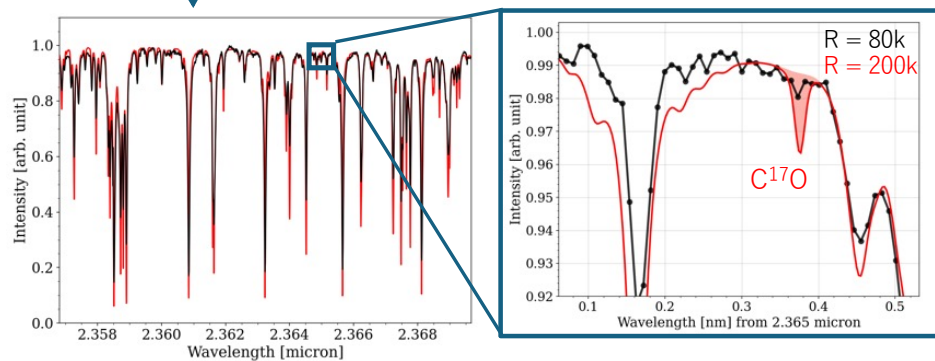


金星大気科学

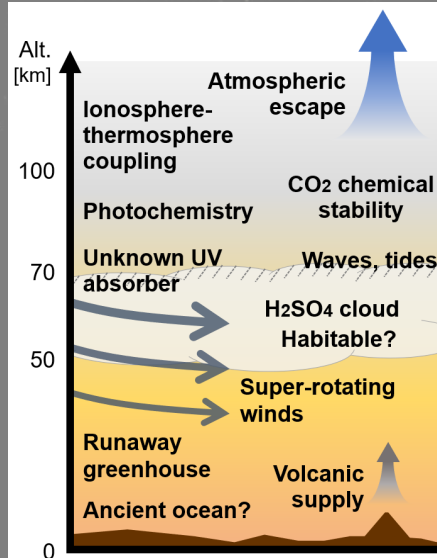
探査機あかつきの成果で日本が世界をリード
→ 本装置でより一層加速



金星のモデルスペクトル (R=200k)

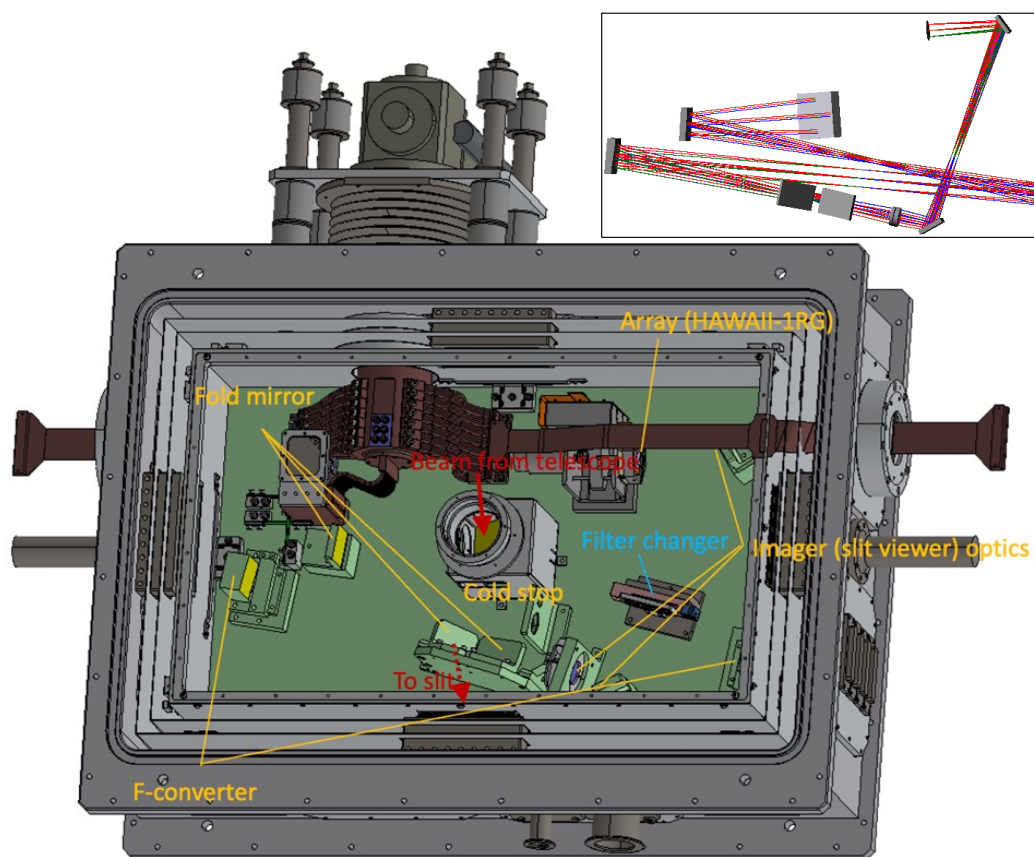


既存装置データ (iSHELL, R=80k) vs R=200kモデルスペクトル



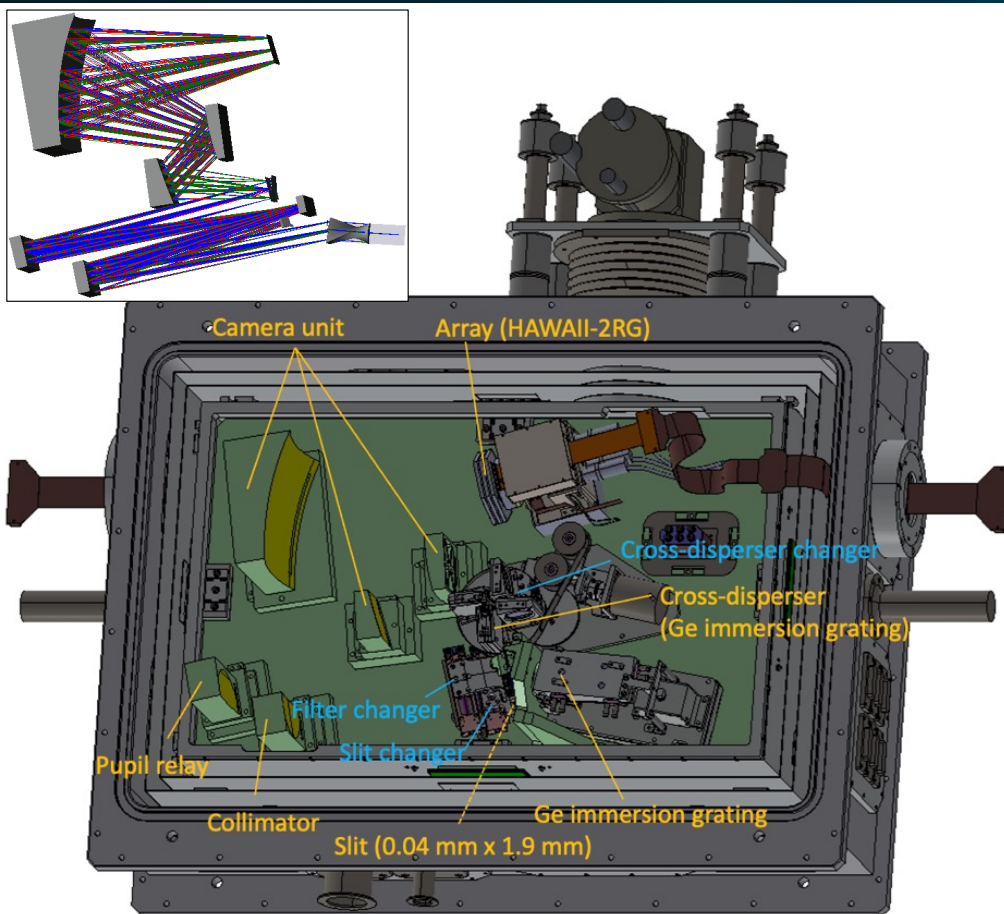
- Alt. [km]
- R ~ 80,000**
- Detection of trace gases: CO, SO₂, H₂O, HCl, HF, OCS, etc.
 - Doppler velocimetry of winds at the cloud-top using Solar lines.
 - Cloud-top height retrieval using CO₂ lines.
- R ~ 200,000**
- Search for minor but key trace gases.** NH₃, N₂O, NO, CH₄, SO₃, ClO, CS_x, PH₃, etc.
 - Detection of isotopologues of trace gases.** H₂¹⁸O, H₂¹⁷O, HDO, ¹³CO, C¹⁸O, C¹⁷O, ³⁴SO₂, etc.
 - Doppler velocimetry of winds** above and below the cloud layer using Venusian lines.

装置仕様：撮像系



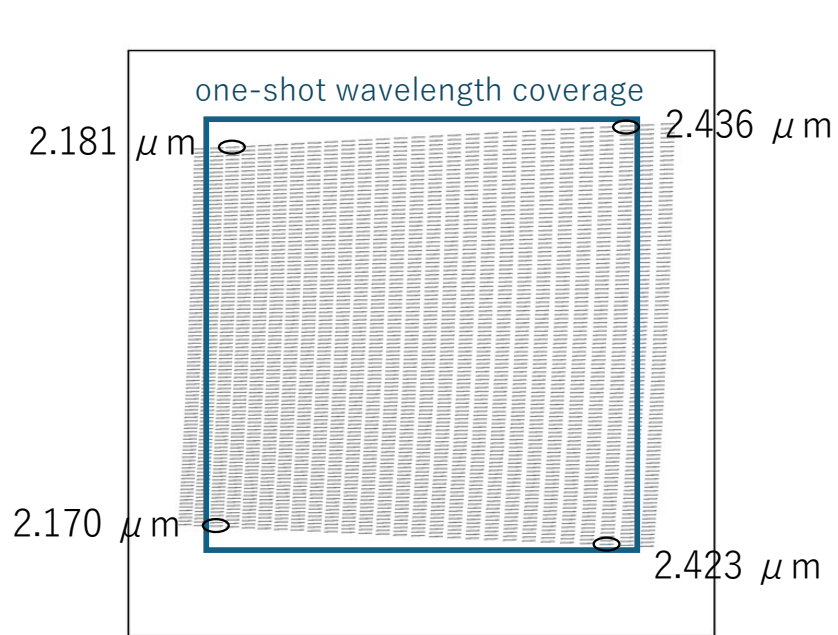
Unit	Items	Note
F-converter Imager	5 mirrors	including 3 fold mirrors
	3 mirrors	including 1 fold mirror
	2 lenses	
	Filter	K, K(narrow) (3 slots are available)
Spectrograph	Detector	HAWAII-1RG (5.3 μ m cutoff)
	Slit	0.04 mm (W) $\times$ 1.9 mm (L)
	2 mirrors for collimator	including 1 fold mirror
	Main disperser	Germanium immersion grating Entrance/exit aperture: ϕ 28 mm Grating area: 31 mm $\times$ 104 mm Blaze angle: 75° Groove pitch: 57.1 μ m Apex angle: 86°
	2 mirrors for pupil relay	including 1 fold mirror
	Cross disperser	Germanium immersion grating I (K-band) Blaze angle: 8.650° Groove pitch: 1.79 μ m Apex angle: 85° Germanium immersion grating II (L-band) Blaze angle: 7.995° Groove pitch: 2.94 μ m Apex angle: 85° (4 slots are available)
	Order sort filter	K, L (4 slots are available)
	3 mirrors for camera	TMA
	Detector	HAWAII-2RG (5.3 μ m cutoff)
	視野：1.6' $\times$ 1.6' @ 荒木望遠鏡	

装置仕様：分光系

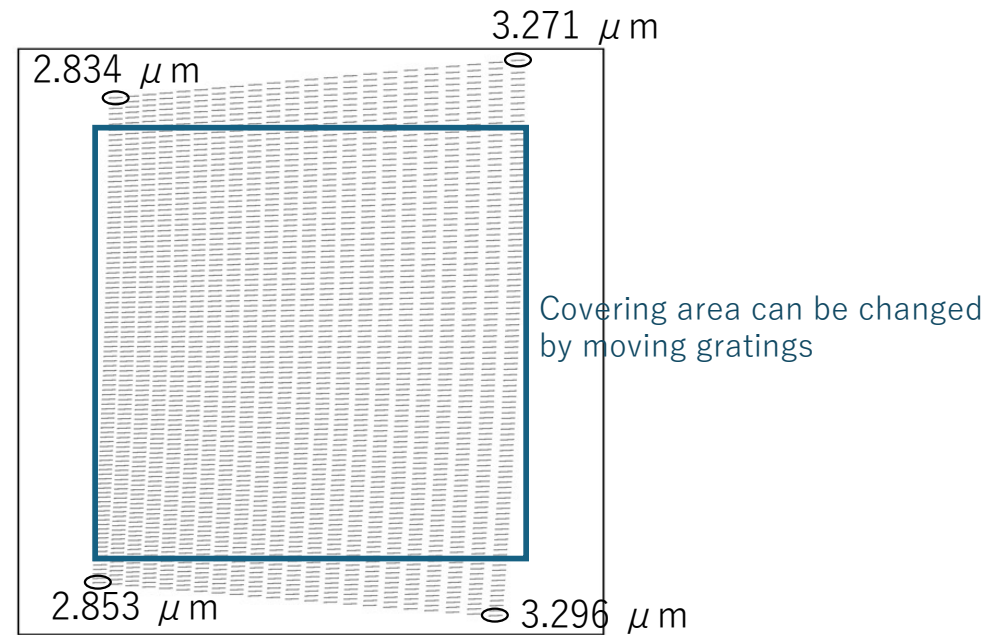


Unit	Items	Note
F-converter	5 mirrors	including 3 fold mirrors
Imager	3 mirrors	including 1 fold mirror
	2 lenses	
	Filter	スループット(スリットロス除く) > 0.33 スリット : 0.42" x 20" @ 荒木望遠鏡 (3 slots are available)
	Detector	HAWAII-1RG (5.3 μ m cutoff)
Spectrograph	Slit	0.04 mm (W) $\times$ 1.9 mm (L) (4 slots are available)
	2 mirrors for collimator	including 1 fold mirror
	Main disperser	Germanium immersion grating Entrance/exit aperture: ϕ 28 mm Grating area: 31 mm $\times$ 104 mm Blaze angle: 75° Groove pitch: 57.1 μ m Apex angle: 86°
	2 mirrors for pupil relay	including 1 fold mirror
	Cross disperser	Germanium immersion grating I (K-band) Blaze angle: 8.650° Groove pitch: 1.79 μ m Apex angle: 85° Germanium immersion grating II (L-band) Blaze angle: 7.995° Groove pitch: 2.94 μ m Apex angle: 85° (4 slots are available)
	Order sort filter	K, L (4 slots are available)
	3 mirrors for camera	TMA
	Detector	HAWAII-2RG (5.3 μ m cutoff)

エシェログラム



Echellogram with K cross-disperser



Echellogram with L cross-disperser

Kバンドにおける惑星大気分子（ CO_2 、 CO の同位体）の観測に最適化

ステータス、ロードマップ

開発 + 既存装置での観測

荒木望遠鏡

海外望遠鏡-

	FY2024	FY2025	FY2026	FY2027	FY2028	FY202?-
開発						
サイエンス						
外部展開、連携						

- ◆ 主分散素子は製作済み、Xディスプレイ製作中
- ◆ 赤外線検出器、二段式GM冷凍機は入手済み
- ◆ クライオスタット製作中
- ◆ 2026年にファーストライト
- ◆ 荒木望遠鏡で惑星観測
- ◆ 海外の観測適地への移設も検討
- ◆ 次世代超大型望遠鏡用装置への技術展開
(※ TMT戦略基礎開発研究経費の成果)



新技術

- ・ イメージョン回折格子
- ・ コーゼライト製反射光学系

イメージョン回折格子 (IG) : 原理

原理

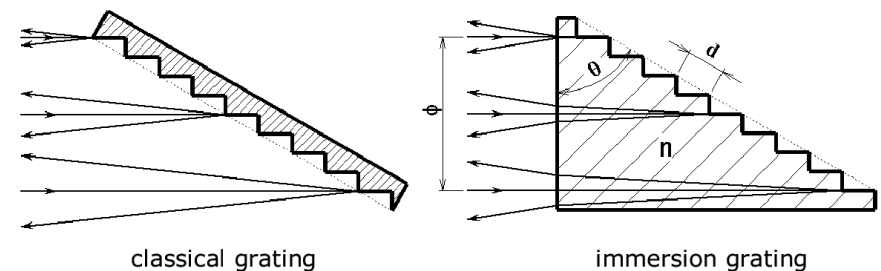
- 光線が媒質(屈折率: n)の中を通過
- 分光器の波長分解能:

シーイングリミットの場合: $\lambda / \Delta \lambda = 2 n \tan \theta / D s$

回折限界の場合: $\lambda / \Delta \lambda = 2 n \phi \tan \theta / \lambda$

(θ : ブレーズ角、 D : 望遠鏡口径、 s : スリット幅、 ϕ : コリメータビーム径)

- 擬似的に波長を λ / n に短縮し、クラシカルな反射型回折格子の **n 倍の高波長分解能**
(同じ波長分解能なら $1/n$ 倍のサイズ)



高効率IG実現の課題

- 材料の選定: 吸収係数 $\alpha < 0.01 \text{ cm}^{-1}$
(100mm長の透過率 > 90%)
- 精密溝加工: 相対回折効率(ピーク) 80%
- コーティング: AR > 95%、反射 > 95%
→ 絶対回折効率 > 60%

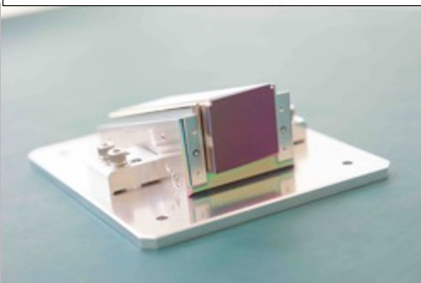
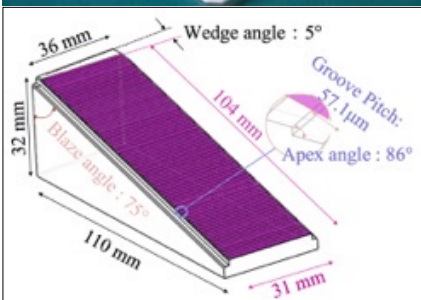
高効率IGに要求される溝加工精度

	影響する特性	必要精度
ランダム溝ピッチ誤差	回折効率 背景散乱光 (コントラスト)	$\sigma_p < 2 \sim 3 \text{ nm}$
周期溝ピッチ誤差	ゴースト光 (波長純度)	$\epsilon < 1 \text{ nm}$
角 R	回折効率	$R/d < 1/50$
面粗度	回折効率 背景散乱光 (コントラスト)	$\sigma_s < 2 \sim 3 \text{ nm}$
面精度	回折効率 波長分解能	$\Delta \lambda / \lambda < 1 / (8n)$

池田 & 小林 2017

高効率Ge製イメージョン回折格子

Canon Inc.



Ge製イメージョン回折格子

Geometrical parameters

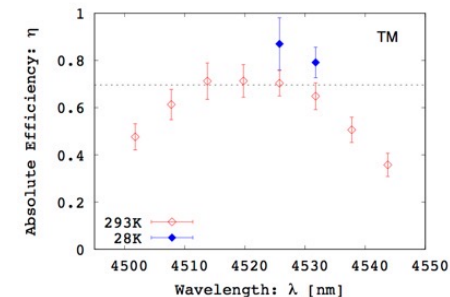
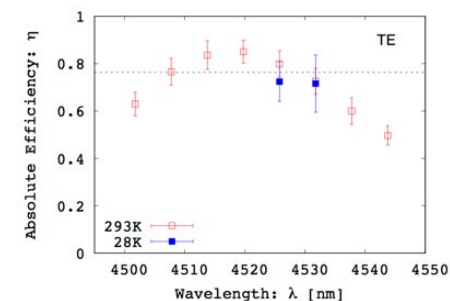
Material	Single-crystal Ge ($n = 4.0$)
Blaze angle	75°
Apex angle	86°
Groove Pitch	$57.1 \mu\text{m}$
Tilt angle of entrance/exit surface	5°
Area of entrance/exit surface	$32.0 \text{ mm} \times 32.0 \text{ mm}$
Area of diffraction surface	$31.0 \text{ mm} \times 104.0 \text{ mm}$

Diffraction surface

Surface roughness	$< 8 \text{ nm (RMS)}$
Surface irregularity	$< 65.6 \text{ nm (PV)},$ $< 18.7 \text{ nm (RMS)}$
Rowland's ghost	$< 0.1 \%$
Coating	Ag (with protective coating)

Entrance/exit surface

Surface irregularity	$< 175 \text{ nm (PV)}$
Coating	Broadband anti-reflective coating



絶対回折効率(常温/低温)

- LiHを拠点として、赤外線用イメージングレーティング(IG)の開発プログラムを展開。
- LiH、フォトコーティング(現フォトクロス)の地道なR&Dとキャノンの技術力によって天文観測に応用できる高効率Ge-IGを実現。
- 天文観測が要求する十分に高い光学性能(絶対回折効率=70-80%)をもつことを低温で実証。

コージライト製反射光学系：背景

反射光学系の利点

- 原理的に色収差を発生しない
- 金属を反射膜にすることによって広い波長帯域がとれる
- 光路を折り曲げることでコンパクトなレイアウトが可能
- 軸外し(非)球面鏡を用いるレイアウトによって高度な収差補正が可能
- 大型の光学系が実現可能
- オプトメカとの親和性がよく、保持具や定盤に同一の素材を用いたアサーマルな設計が容易

理想的な光学系を実現できる可能性

問題点

- 面形状、アライメントに高い精度が要求される
- 軸外し系が基本のためアライメント作業に多大な労力を要する

限られた開発期間と予算の中では、反射系の利点を放棄してでも透過光学系が選択される傾向
この傾向は、赤外線観測装置(や飛翔体用)の光学系のように真空低温下で用いる光学系でより強まる

コージライト製反射光学系：アイディア

コージライト(超低熱膨張セラミック)

- 光学鏡に適用できる製品を入手可能(京セラCO-720等)
- 光学系保持具のような複雑形状を製作しやすい
- 金属機械加工レベルの高寸法精度の部品を実現可能
- 線膨張係数が低い



反射光学系への応用

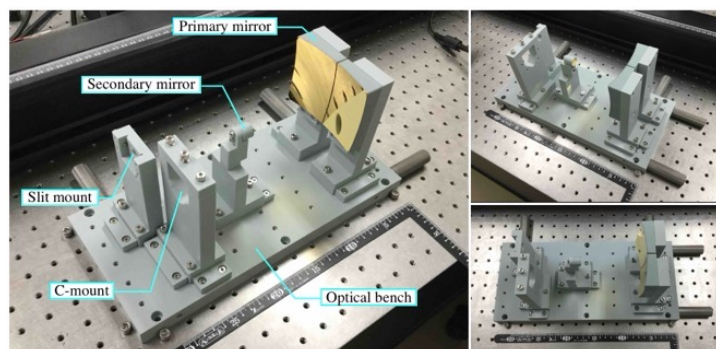
- 鏡と構造体すべてを同一素材で製作
- 機械精度の組上げのみでアライメント完了
- 冷却時の形状変化が小さい
- 究極的には締結部のない完全一体物として製作

	ガラス (普通)	ガラス (低CTE)	アルミ	S-SiC	CVD-SiC	コージライト (CO-220)	コージライト (CO-720)
研磨性	○	○	×	△	△	○	○
ボイドレス	○	○	○	△	○	△	○
構造材	×	△	○	○	△	○	○
複雑形状への 精密加工	×	×	△	○	△	○	○
低熱膨張性	×	○	×	△	△	○	○

反射光学系がもつ利点を最大に活かす

特に冷却赤外線光学系に大きなブレークスルーをもたらすことが期待される

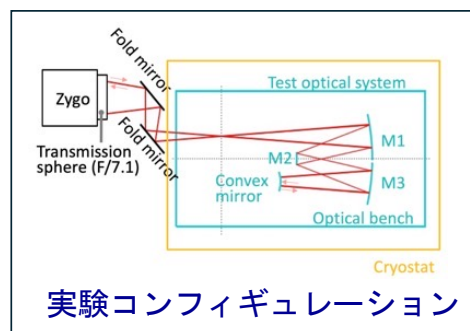
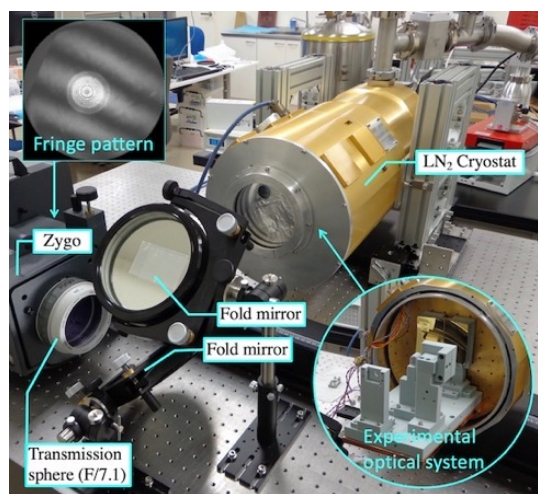
コージライト製反射光学系



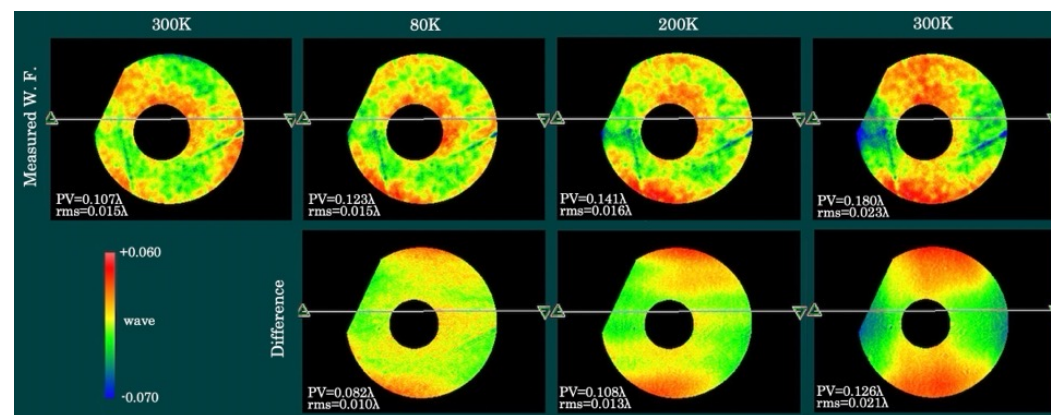
試験光学系 鏡はCO-720(京セラ)、他はCO-220(同)

- ✓ コージライト製反射光学系の赤外線天文学への適用性を実証するため、**3枚の球面からなる試験光学系を製作** (w/京セラ)。
- ✓ レーザ干渉計を用いて常温で可視波長 ($\lambda = 633\text{nm}$) における波面誤差を測定した結果、**機械精度の組み上げのみでいわゆる回折限界性能 ($PV < \lambda/4$, $\text{rms} < \lambda/14$) を達成**していることを確認。
- ✓ 次に試験光学系を液体窒素式クライオスタットにインストールし、同様にレーザ干渉計を用いて低温 (80K) における波面誤差を測定した結果、**低温でもその性能が維持**されていることを確認。

Sarugaku+2023



測定の様子



波面の変化

$\lambda = 633\text{nm}$

他の要素開発

- ・ コージライト 製定盤とのI/F
- ・ ミラー部品への黒色塗装
- ・ アレイカセット

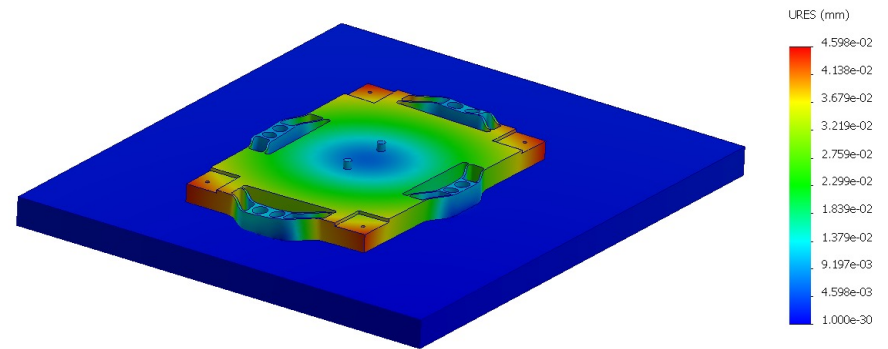
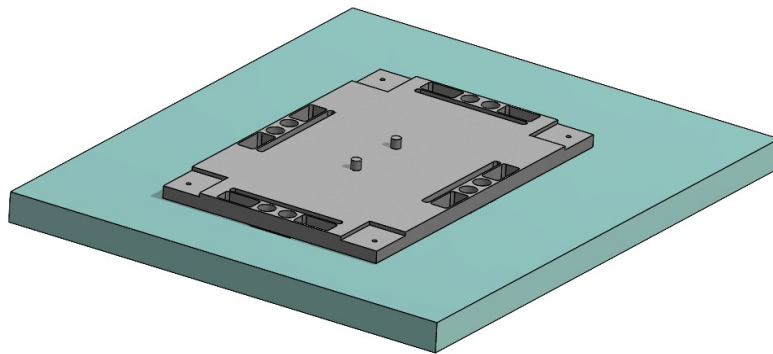
コージライト製定盤とのインターフェース

課題

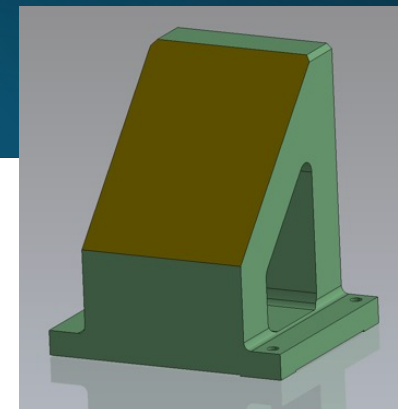
- 検出器、IG、駆動機構など異素材の使用は避けられない
→ 異素材の部品とコージライト製定盤の熱収縮差による影響をどう解消するか？

対応

- スリットを入れてバネ性を持たせたインバー製インターフェース
 - 構造解析により、熱収縮による変位、締結部にかかる応力、摩擦による応力が基準値以下になるように設計
 - 冷却試験を年内に実施予定



ミラー部品への黒色塗装

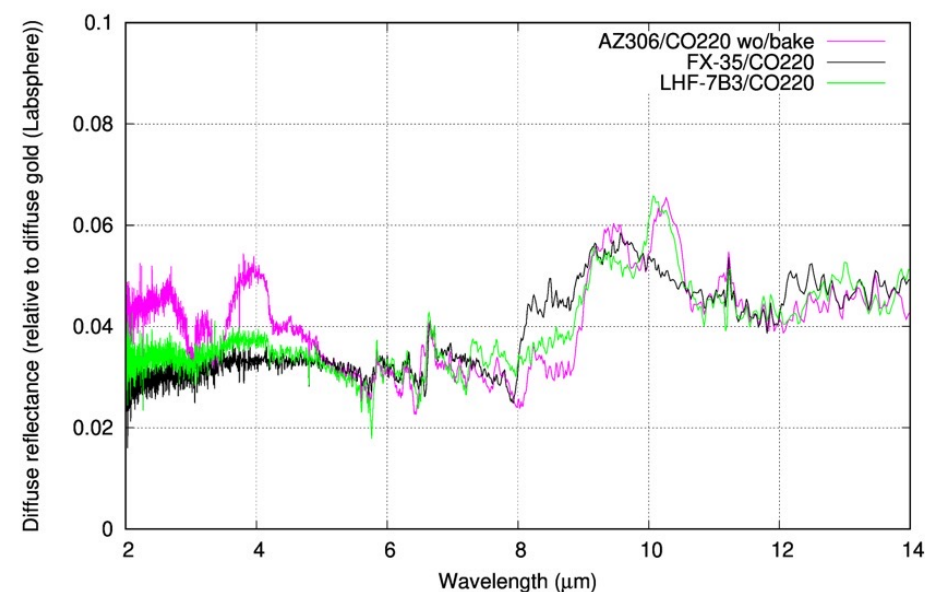


課題

- ミラーと保持具が一体となったコージライト製部品への黒色塗装
- ミラー蒸着後に塗装 → 塗料硬化のためのベーキングができない（温度を上げられない）
- 乾燥時の揮発性成分の付着

対応

- 塗装方法の検討進行中
- ベーキングなしでも使用可能な塗料の選定（Aeroglaze Z306）
- ミラーは「Ag or Au + enhanced coat」



候補塗料の反射率

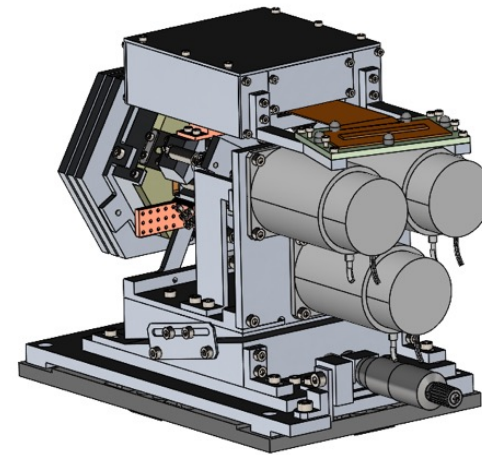
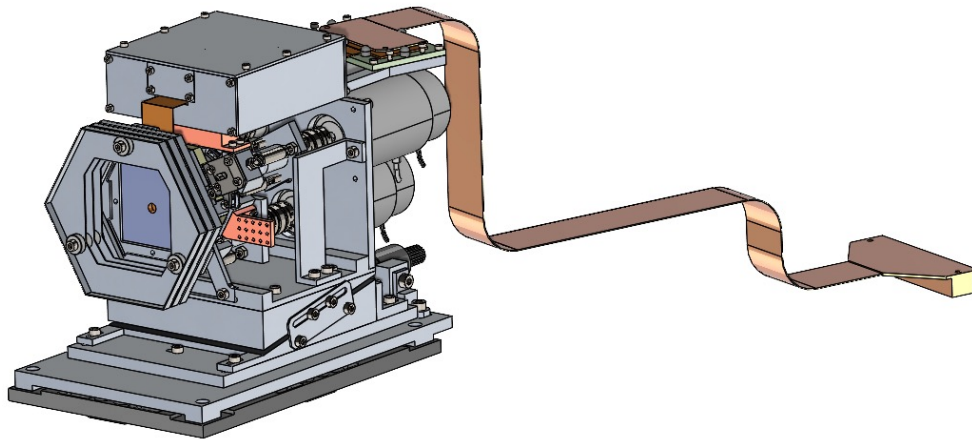
アレイカセット

課題

- 真空冷却下でオフセットとティルトの両方を調整

対応

- モーターと送りネジを用いた伸縮機構（3セット）で調整する機構を独自に設計



まとめ

- 近赤外線高分散分光器GARNET
 - 波長帯：K, Lバンド、波長分解能：200,000
 - 高スループット
 - 非常にコンパクト(口径1.3m荒木望遠鏡のカセグレン焦点に搭載)
- メインの科学目標：惑星大気の物理的・化学的プロセスの解明
 - 2026年に荒木望遠鏡でのファーストライト目標
 - 海外の観測適地への移設も検討（恒星、彗星、原始惑星系円盤、系外惑星、などテーマ拡大）
- 独自の新技术「Ge製イマージョン回折格子」「コージライト製反射光学系」（LiH、フォトコーディング（現フォトクロス）の地道なR&Dと、キヤノン、京セラらの技術力によって実現）の初応用
 - これらの技術は将来の赤外線観測の標準技術として幅広く用いられることが期待（本開発はその技術実証の意義も）
- 他の要素開発
 - コージライト製定盤と異素材部品との熱収縮差による影響を解消するインバー製インターフェース
 - ミラーと保持具が一体となったコージライト製部品への黒色塗装
 - 真空冷却下でオフセット・ティルト調整を可能にする独自設計のアレイカセット