

長波長中間赤外線用光学フィルタ・ モスアイ光学素子の開発

上塚 貴史 (東京大学)

宮田隆志、酒向重行、大澤亮

岡田一志、内山允史、毛利清、山口淳平

左近樹、尾中敬(東京大学)

今田大皓(筑波大学)

和田武彦、中川貴雄(JAXA)

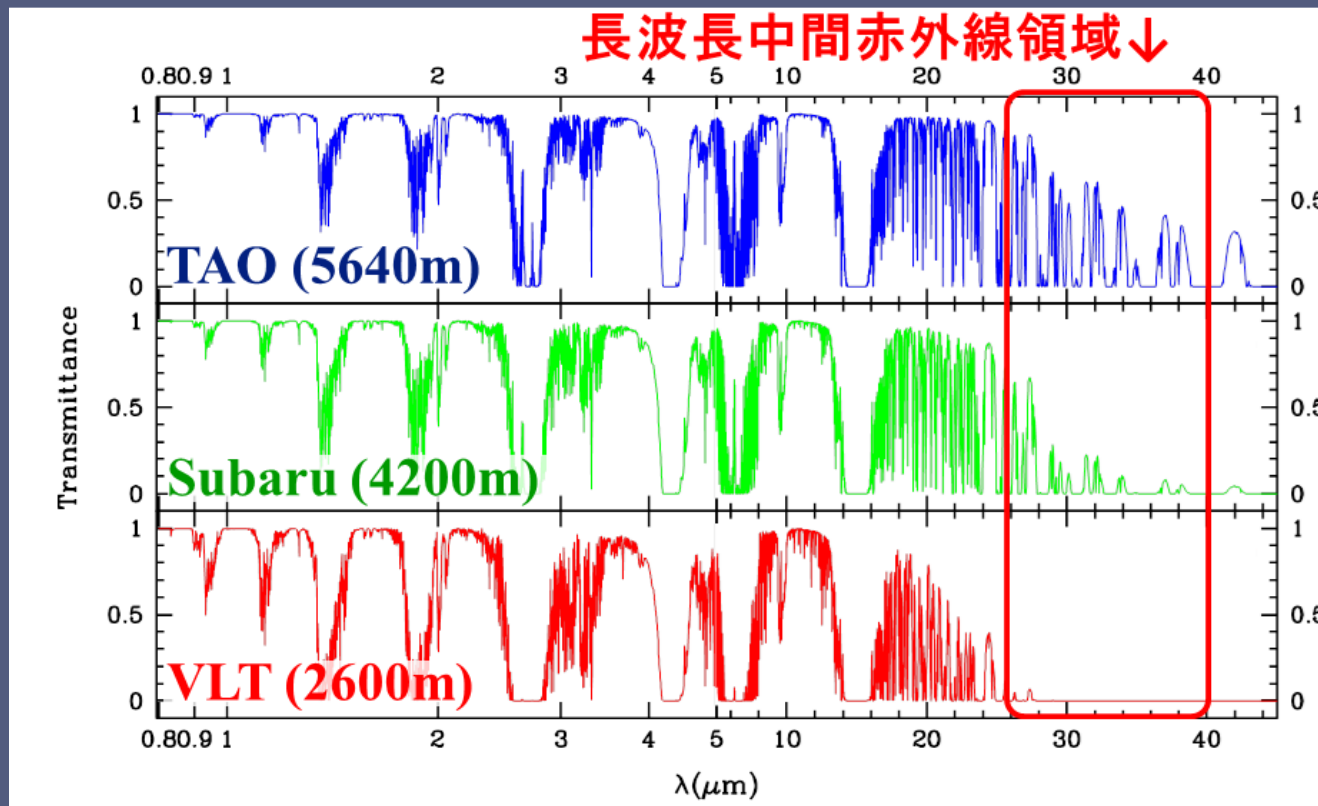
長波長中間赤外線の 光学素子開発

長波長中間赤外線

波長 25 – 40 μm の波長帯

地上からの観測が困難 (水蒸気の吸収)

→ 観測が未開拓のフロンティア波長帯

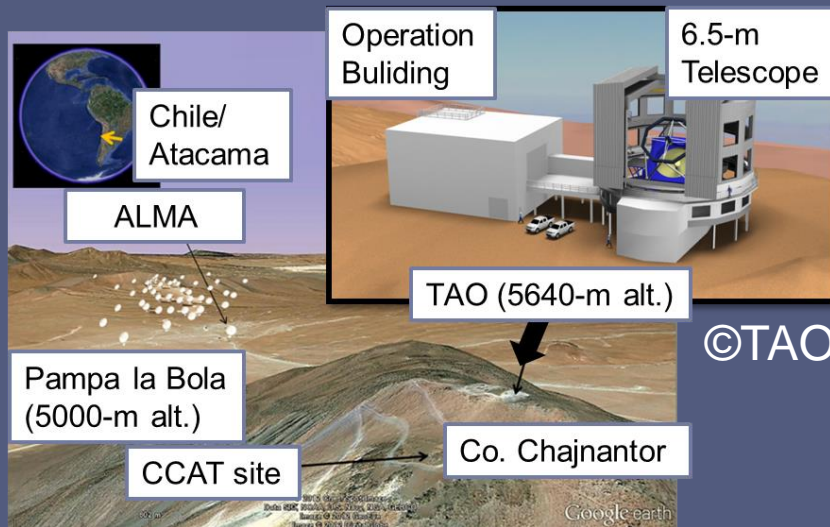


大気透過率の
サイト依存性

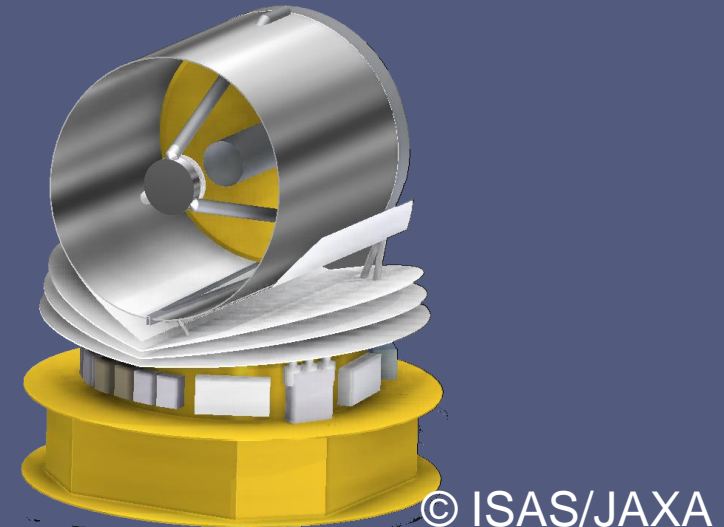
長波長中間赤外線

長波長中間赤外線観測

- 2018 – 東京大学アタカマ天文台 (TAO)
- 2027 – 次世代赤外線宇宙望遠鏡 SPICA



東京大学アタカマ天文台



赤外線宇宙望遠鏡 SPICA

観測に求められる光学素子の開発が必要

長波長中間赤外線

冷却耐性の要求

- ≤ 20 K への冷却耐性 ← 装置放射の抑制
- 多層膜コートを用いる素子に不利
- 多層膜コートに依らない光学フィルタ・反射防止技術の開発



クラックの入った
バンドパスフィルタ

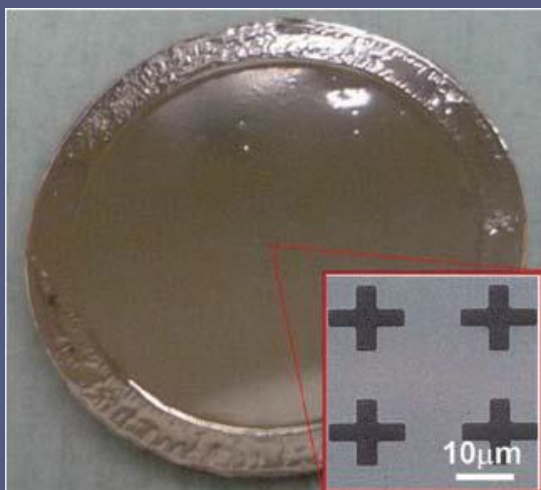
光学フィルタ → メンブレンメタルメッシュフィルタ
反射防止技術 → モスアイ光学素子 (レンズ・グリズム)

光学フィルタ

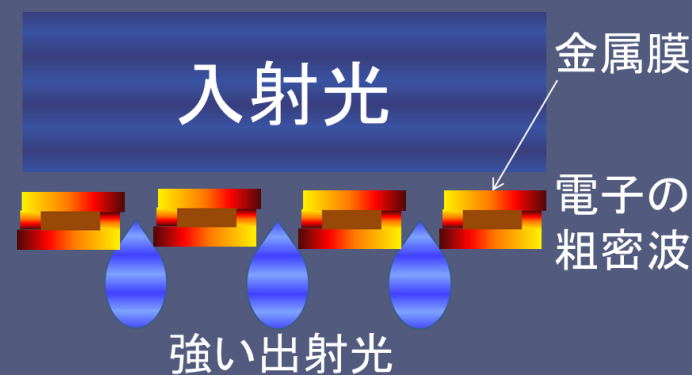
(メンブレンメタルメッシュフィルタ+シリコン板)

メタルメッシュフィルタ (MMF)

- 赤外線 – 電波で有効なバンドパスフィルタ
- 金属板に等間隔の穴を開けた構造
- 冷却耐性も確認済み
- 長波長中間赤外線用は金属薄膜 → 脆い



長波長中間赤外線用 MMF



メタルメッシュフィルタの概念図

メンブレンメタルメッシュフィルタ (MMMMF)

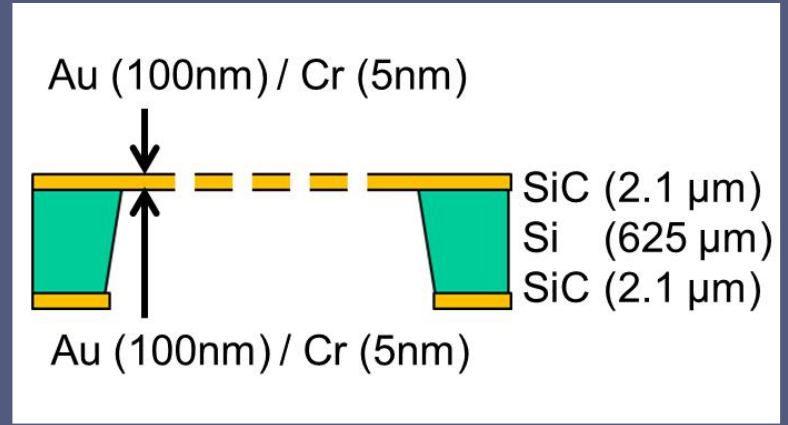
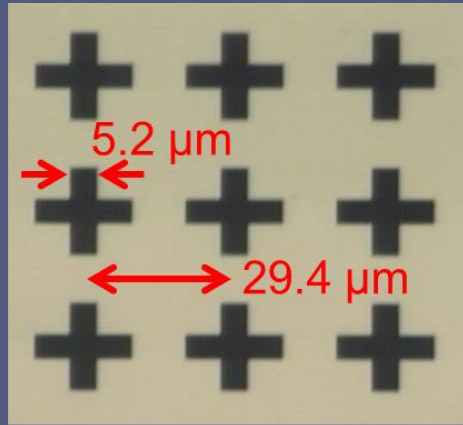
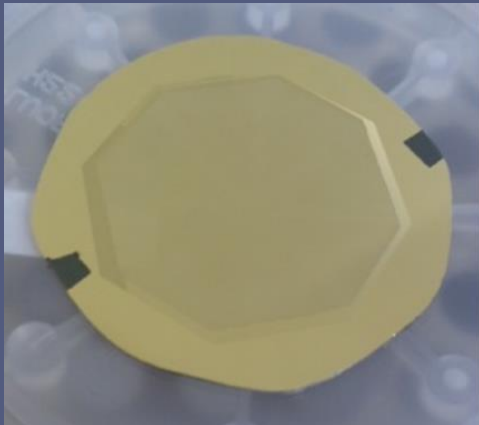
MMF を SiC メンブレンで強化

→ ロケットの振動・音響試験にも耐えた

冷却耐性も確認済み

透過特性も MMF と同等

長波長中間赤外線に適したフィルタ



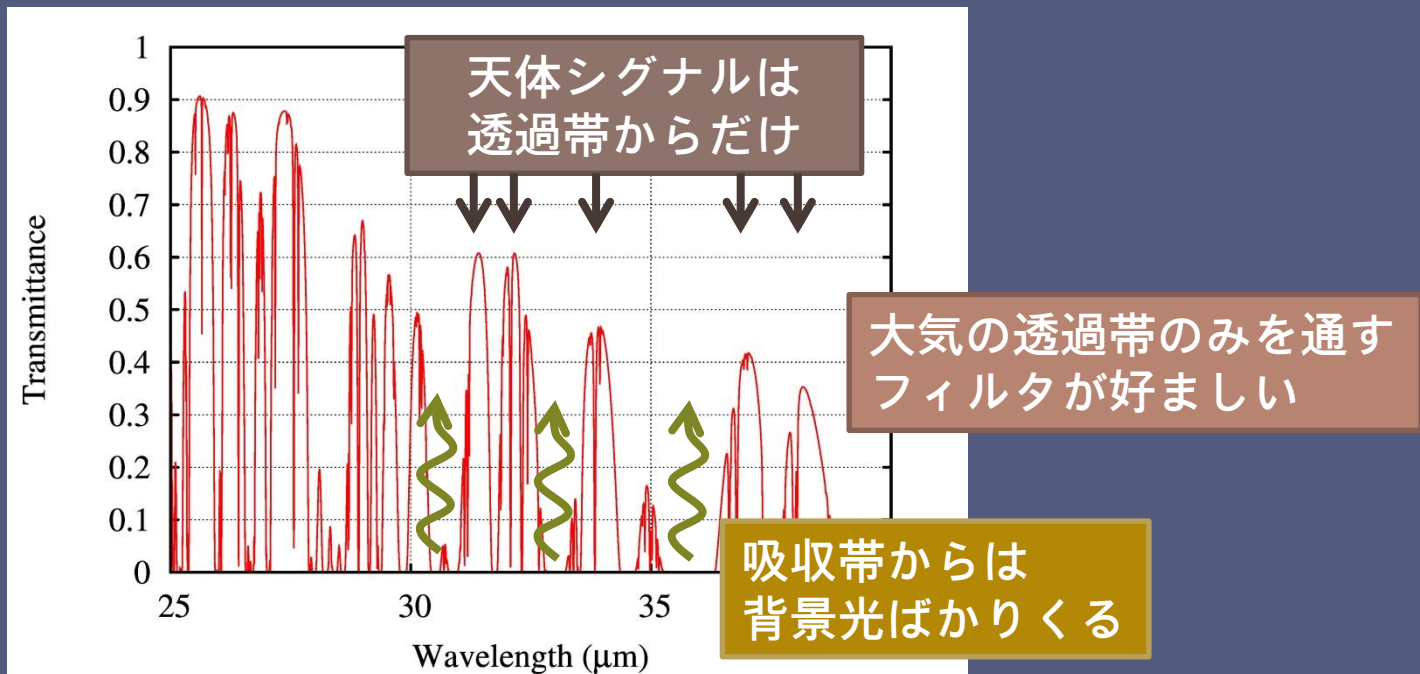
長波長中間赤外線用 MMMF

大気透過率特性とフィルタ特性

地上観測 → 敵は大気の吸収・放射

大気の透過帯のみを抽出するのが好ましい

- 感度の向上 ← 背景光雑音の低減
- 検出器飽和の回避 → 許容読み出し時間が増える

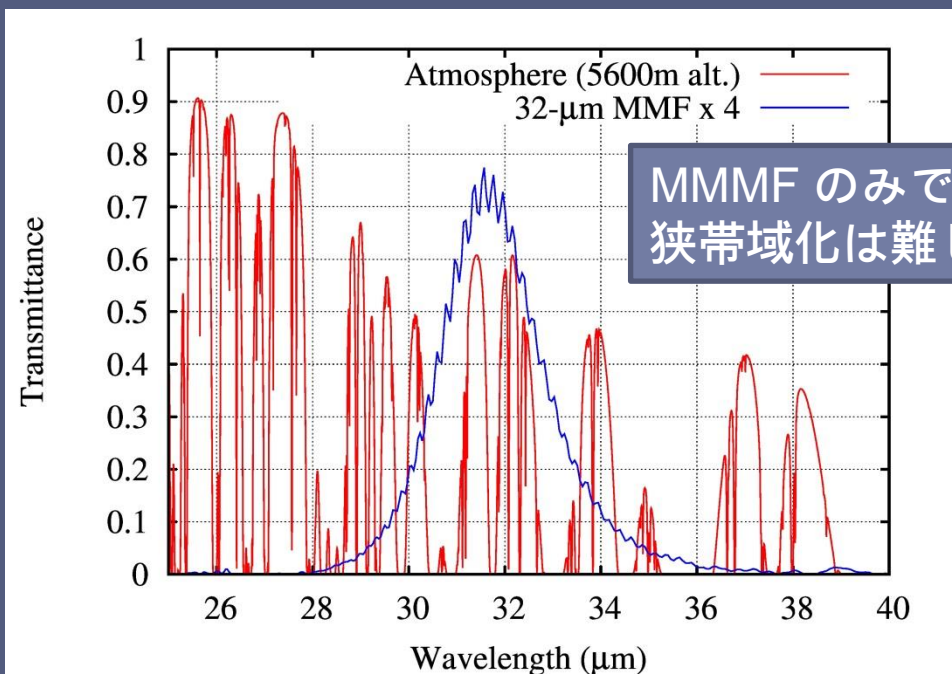


大気透過率特性とフィルタ特性

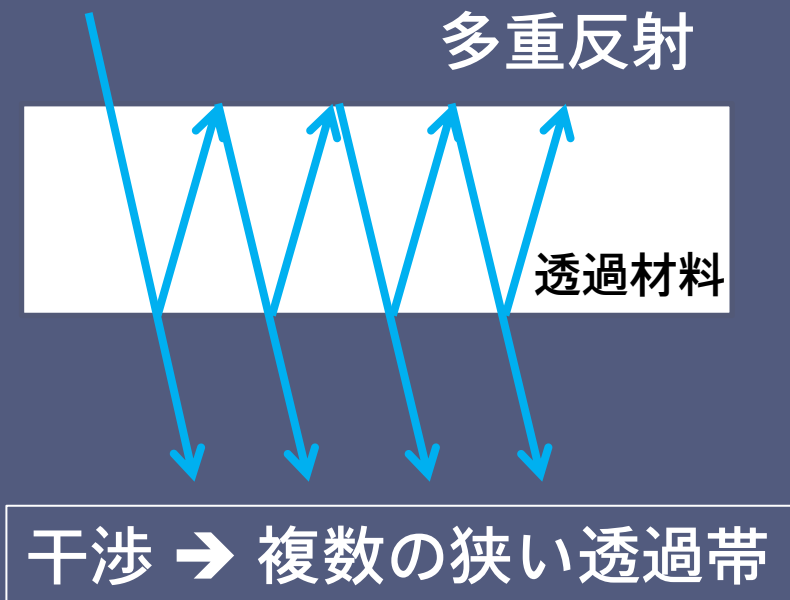
地上観測 → 敵は大気の吸収・放射

大気の透過帯のみを抽出するのが好ましい

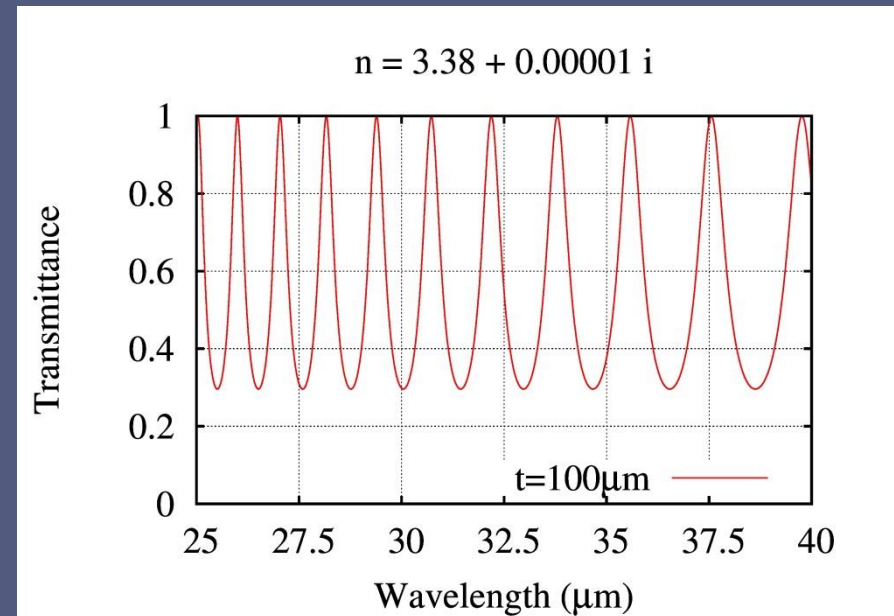
- 感度の向上 ← 背景光雑音の低減
- 検出器飽和の回避 → 許容読み出し時間が増える



ファブリペロー特性で さらなる狭帯域化？



ファブリペロー特性の原理



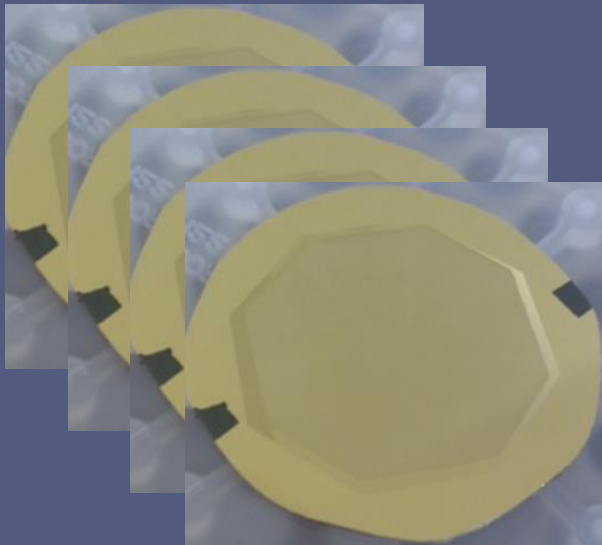
ファブリペロー特性の例

MMMF と組み合わせて高感度化・
背景光抑制が実現できないか？

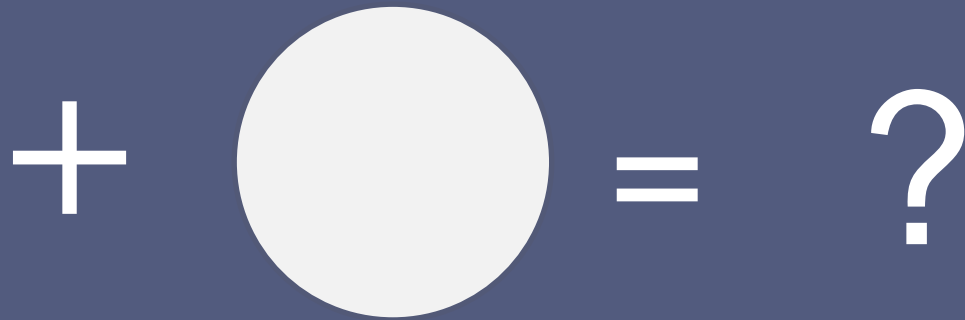
MMMF + シリコン板

長波長中間赤外線の透過材料 → シリコン
4枚の MMMF とシリコン板を
組み合わせ狭帯域化を図る

このシリコン板の
設計・製作を実施

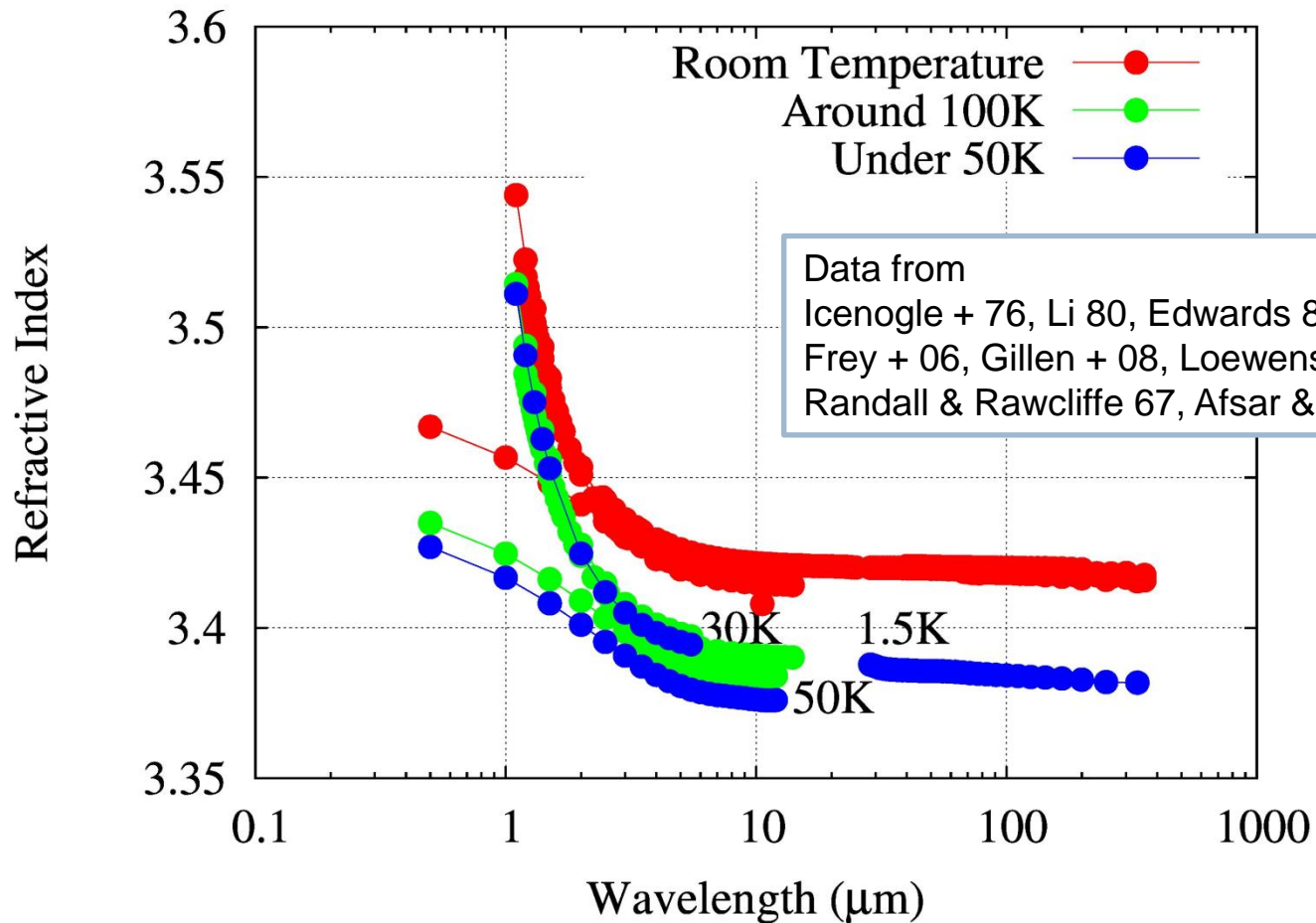


MMMFの四枚重ね

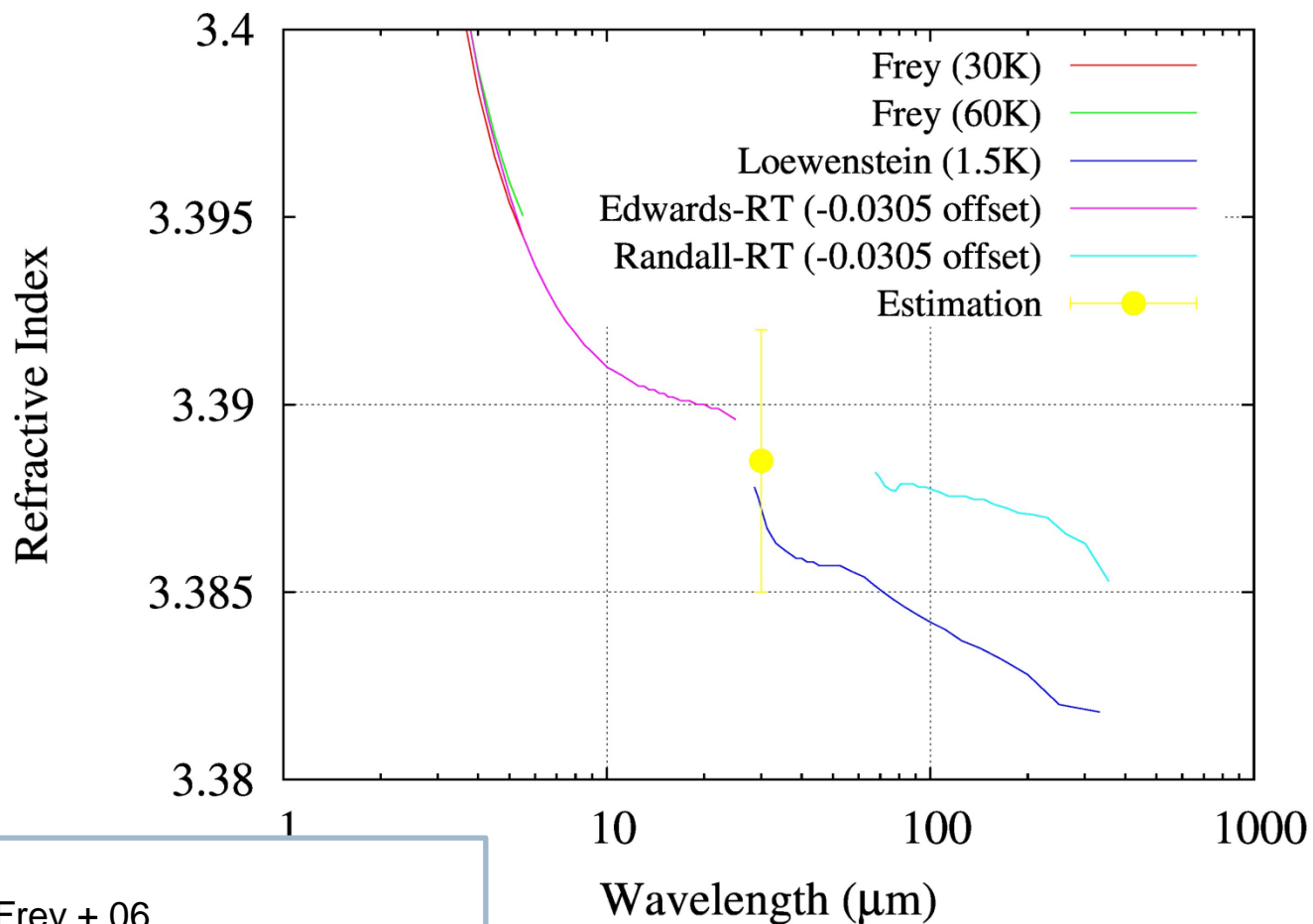


ただのシリコン板

シリコンの屈折率

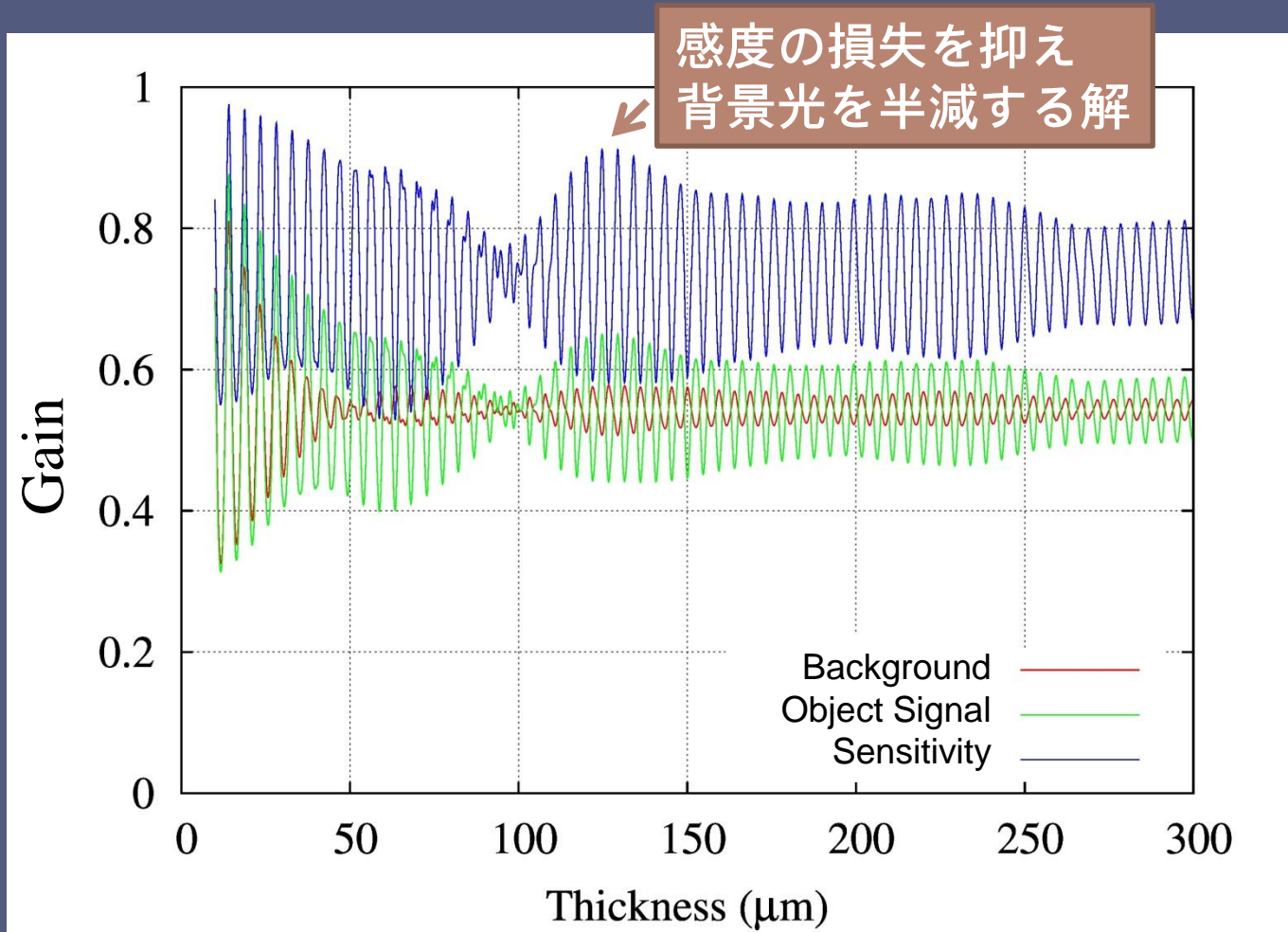


シリコンの屈折率



Data from
Edwards 80, Frey + 06,
Loewenstein + 73, Randall & Rawcliffe 67

厚みの最適化



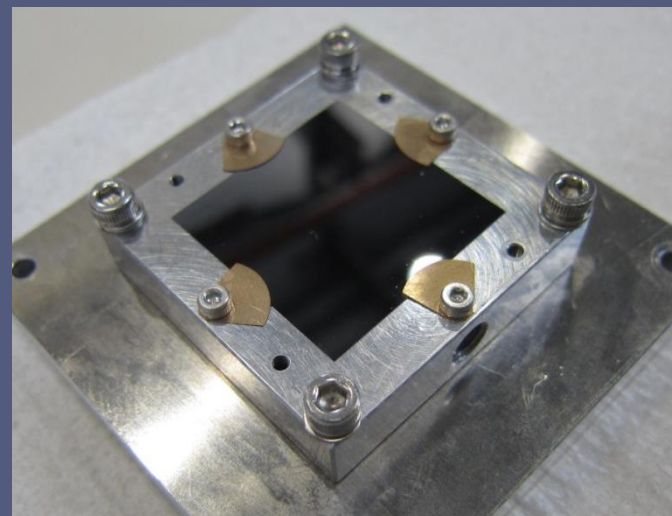
背景光・天体シグナル・感度の
シリコン板無しの時との比較値

シリコン板の製作

32- μm 用シリコン板の要求精度と達成値

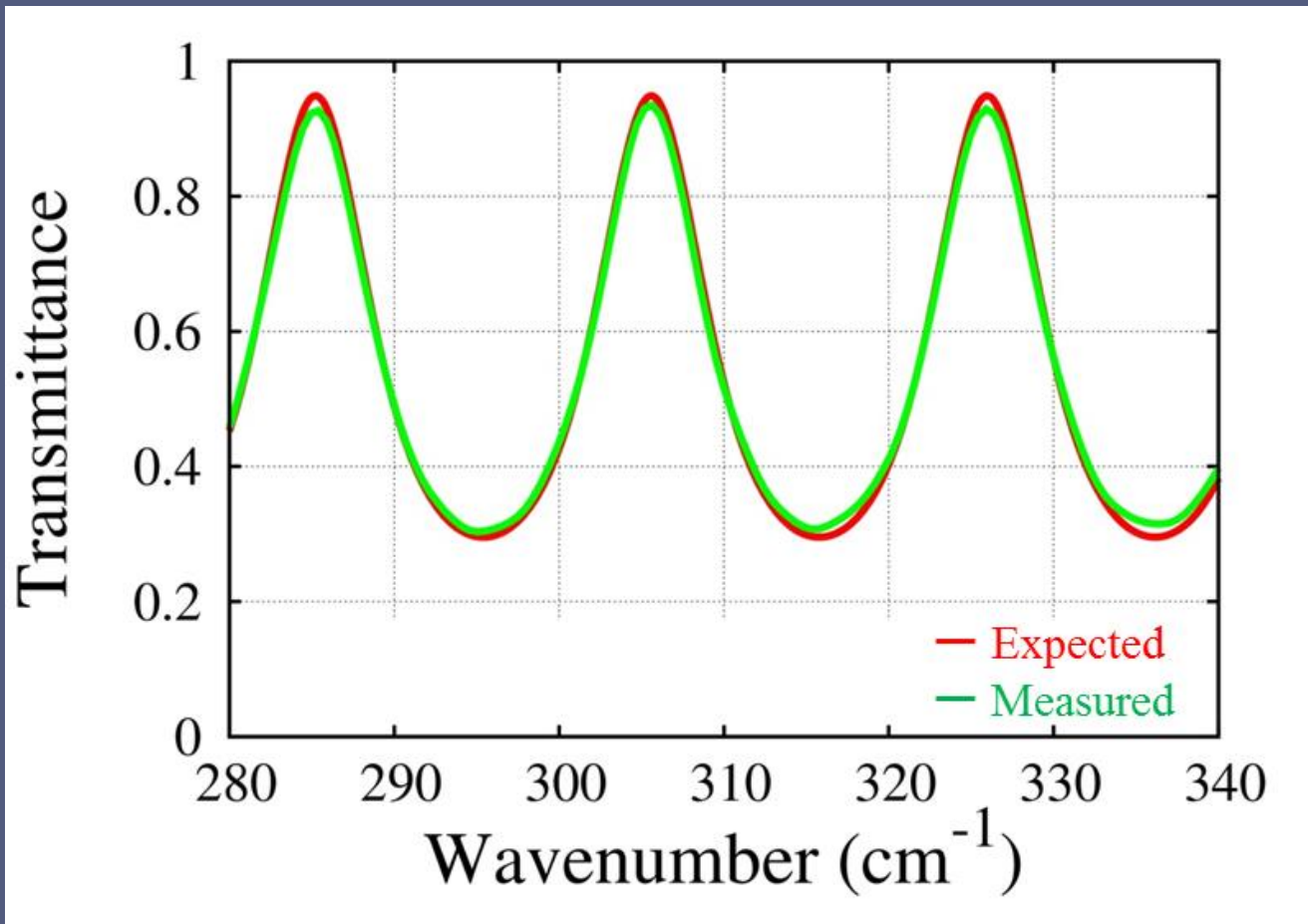
項目	要求精度	達成値
有効直径	1インチ	(評価領域)
厚み	$129.4 \pm 0.2 \mu\text{m}$	$\sim 129.3 \mu\text{m}$
抵抗値	$> 10 \Omega \text{ cm}$	$> 1000 \Omega \text{ cm}$
面粗度	$< 100 \text{ nm}$	$< 10 \text{ nm}$
平行度	< 8 秒角	~ 0.5 秒角

(感度低減を 10% 以下に
抑えるための精度を要求)



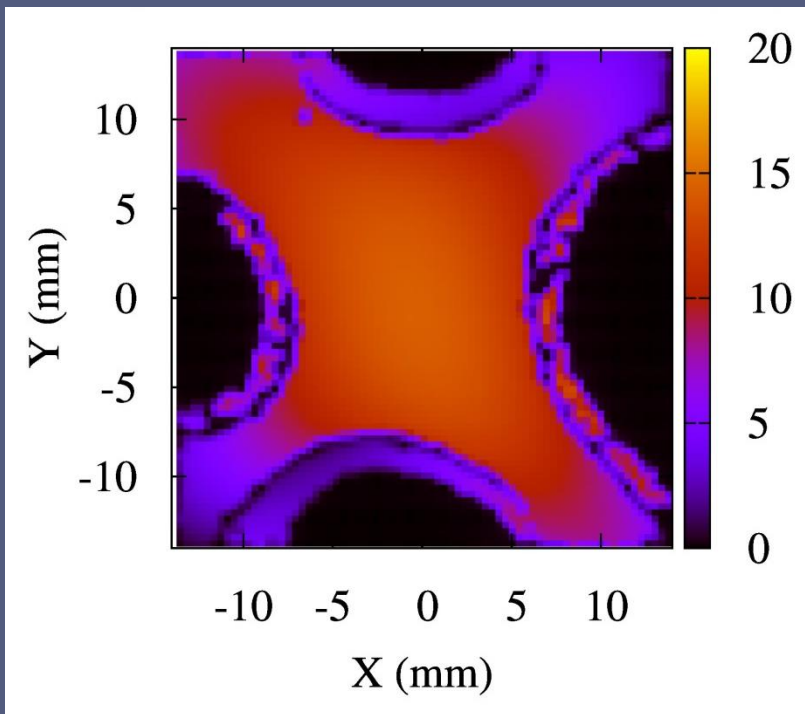
完成したシリコン板

シリコン板の製作



シリコン板の透過率特性 (RT)

シリコン板の保持



板バネで抑えた時の面形状

保持時の面形状(Zygo)

- 板バネ周辺で大きく歪む
- P-V : 7 – 8 μm
(測定できた領域で)

平行度は良いので
波面への影響は限定的？

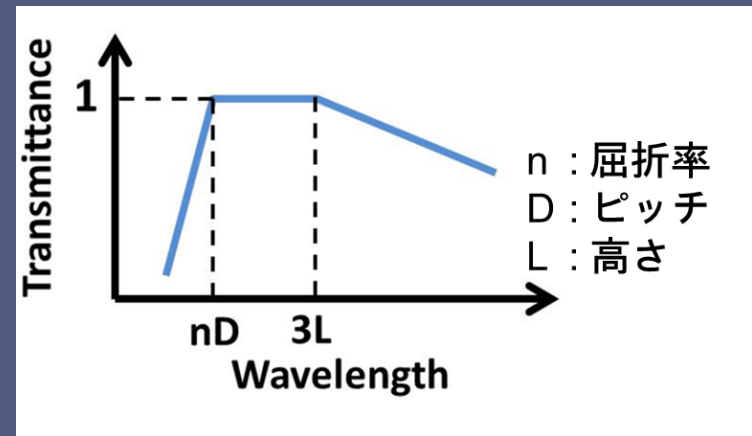
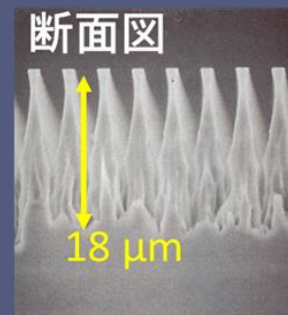
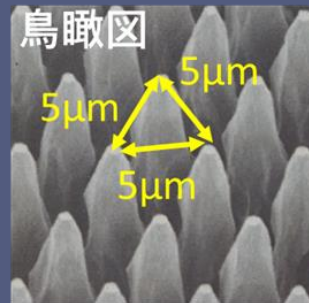
別の保持方法を考える？

(シリコン)モスアイ光学素子

モスアイ反射防止構造

- 波長スケールの凹凸
- 単一材料 → 冷却耐性
- 広帯域に高い反射防止効果

レンズ・グリズムへ応用
→ 高効率光学素子実現



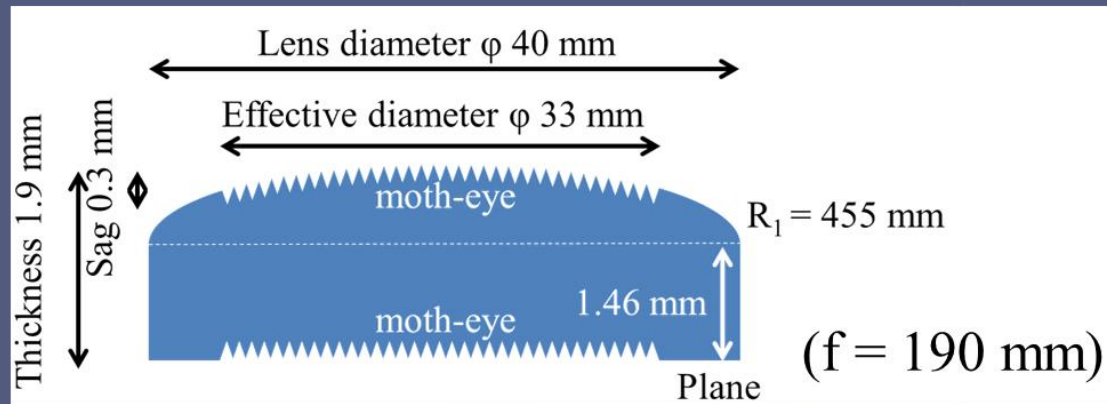
シリコンに施したモスアイ加工

モスアイ構造の特性

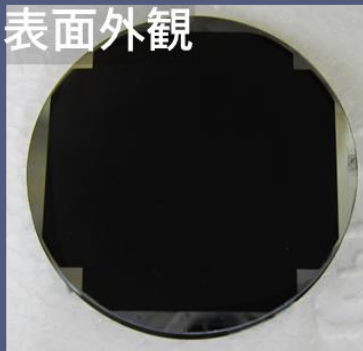
モスアイレンズ

両面平凸モスアイレンズを実現

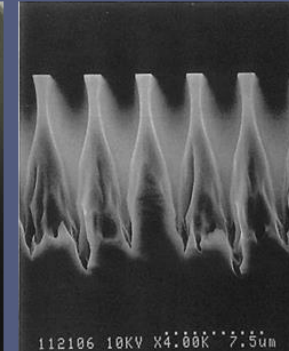
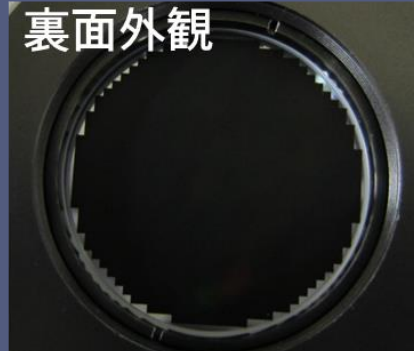
- $D_{\text{eff}} = 33 \text{ mm}$, $f = 190 \text{ mm}$



表面外観



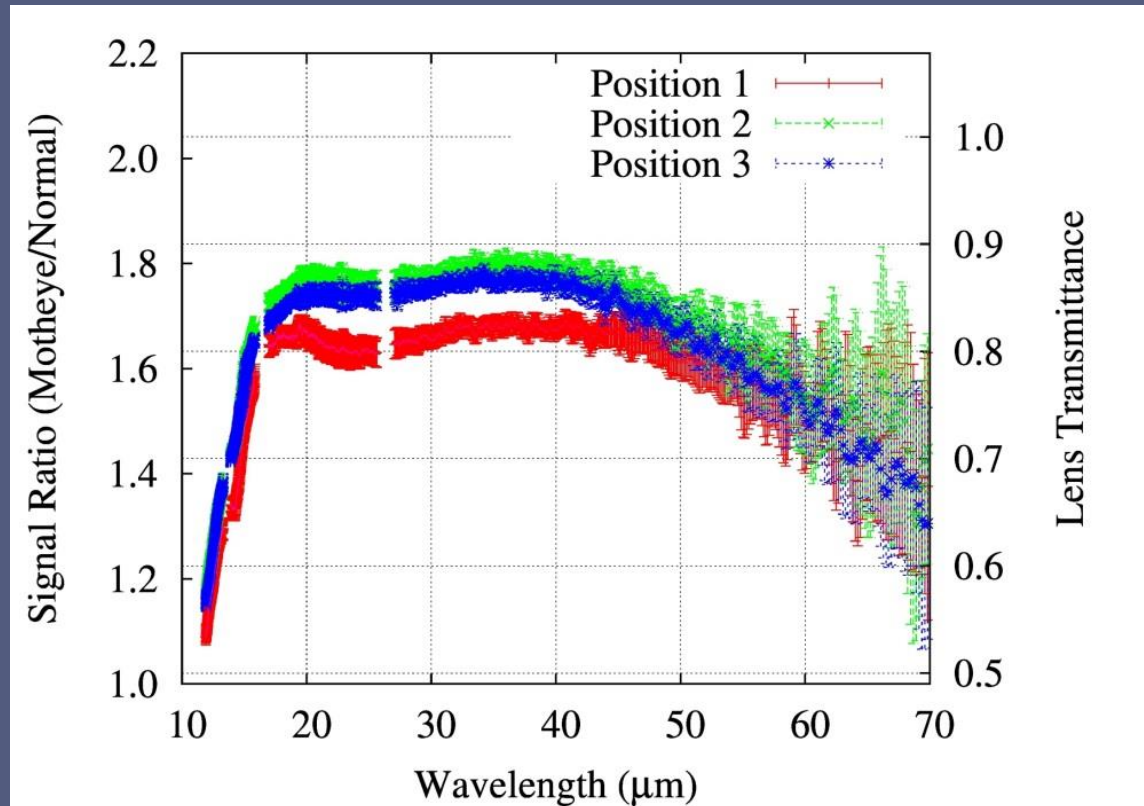
裏面外観



両面モスアイレンズの構造と外観

モスアイレンズ

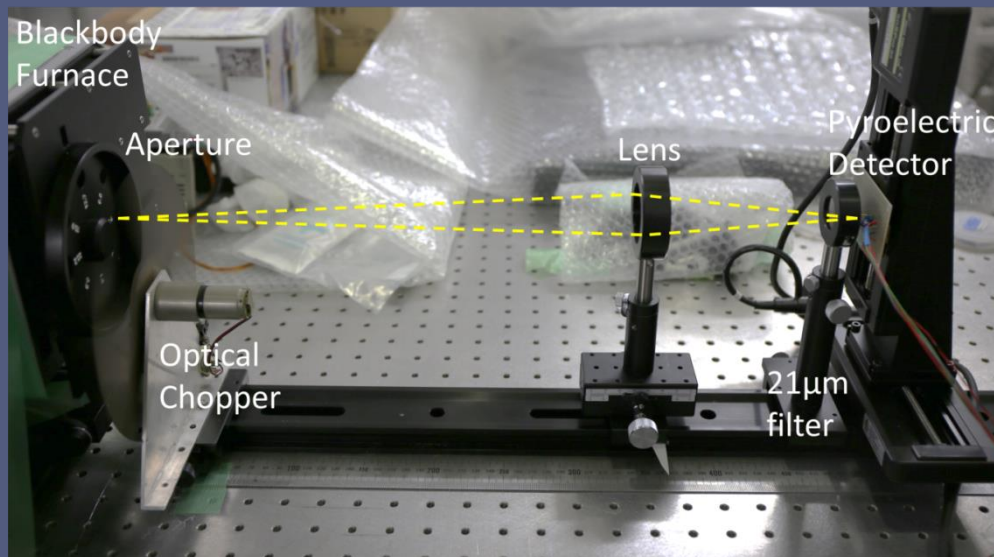
波長 20 – 45 μm にて高透過帯を確認
透過率は約 85% (シリコンレンズの 1.7 倍)



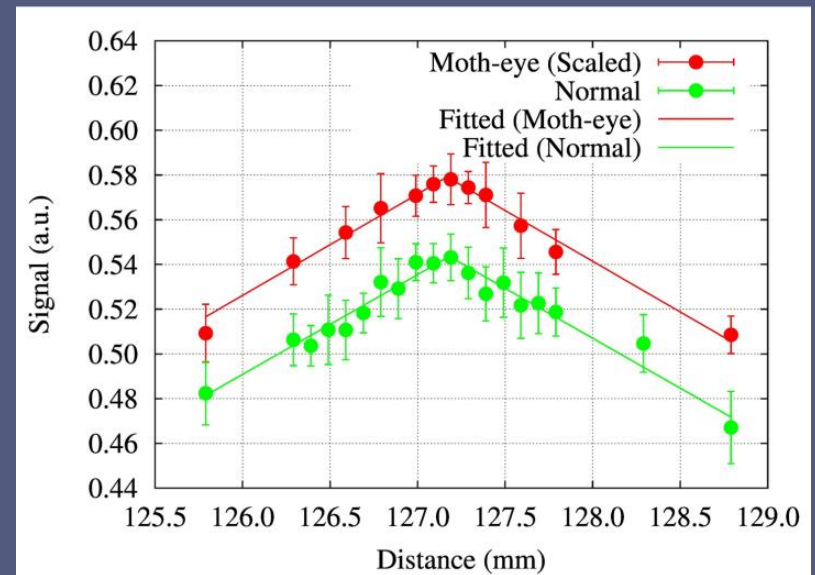
透過率特性の測定結果

モスアイレンズ (焦点距離)

モスアイ加工前と同じ結像位置を確認
→ 顕著な焦点距離変化は起きなかった



結像位置変化測定実験
セットアップ



結像位置変化の測定

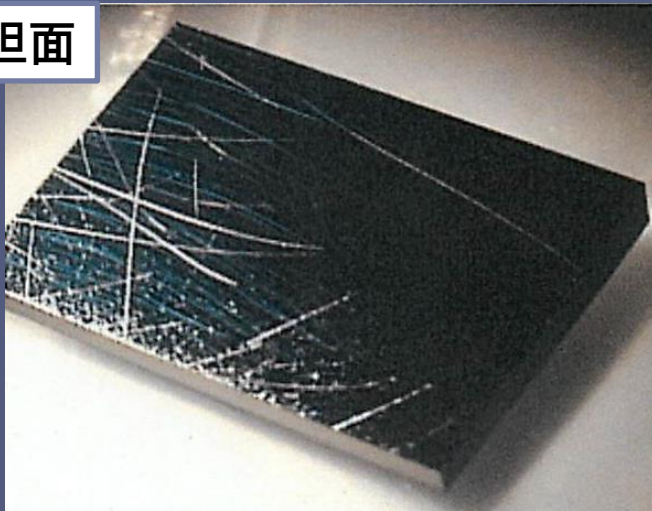
TAO 搭載観測装置 MIMIZUKU に実装・実用予定

モスアイグリズム

過去の試作の課題

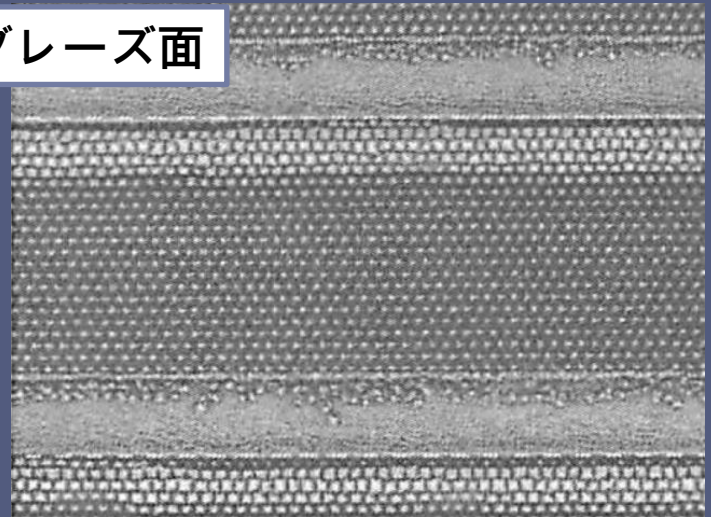
- 平坦面の研磨痕の先鋭化
- ブレーズ面のモスアイ不良

平坦面



平坦面のキズ

ブレーズ面



モスアイ形成不良

加工工程の見直し・レジストコート変更を実施

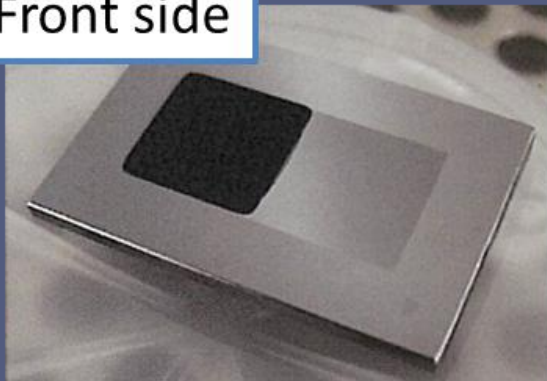
モスアイグリズム

両面モスアイグリズムを完成

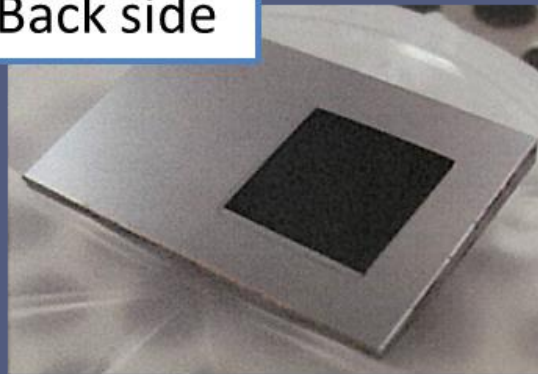
- 格子定数 $124 \mu\text{m}$
- ブレーズ角 4 deg

今後透過率評価および
透過波面評価を行いたい

Front side

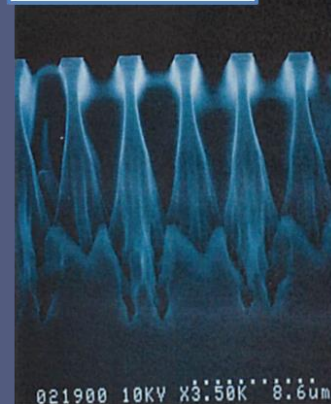


Back side



完成したモスアイグリズム

Cross-section
of moth-eye



Moth-eye on
blaze pattern



まとめ

まとめ

長波長中間赤外線用の
冷却耐性のある光学素子を開発中

光学フィルタ→MMMMF + Si 板 フィルタ
→感度の損失を抑えて背景光を半減
→保持の仕方に課題あり(?)

反射防止技術→モスアイ反射防止
→レンズ・グリズムがついに完成
→今後評価試験を実施