

中間赤外線モスアイ光学素子 およびメッシュフィルターの開発

上塚 貴史 (東大天文センター)

宮田隆志、酒向重行、中村友彦、浅野健太郎、
内山瑞穂、岡田一志(東大天文センター)、
今田大皓(筑波大学)、和田武彦、中川貴雄(ISAS/JAXA)
尾中敬、左近樹(東京大学)、

概要

- 中間赤外線(主に30ミクロン帯)をターゲットとした光学素子開発
- モスアイ反射防止構造を用いた高効率光学素子開発
 - TAO/MIMIZUKU搭載にむけた開発
 - モスアイレンズ
 - モスアイグリズム
- 30ミクロン帯金属メッシュフィルター
 - miniTAO/MAX38で活躍するメッシュフィルター
 - SPICA等衛星搭載に向けたメンブレンメッシュフィルター

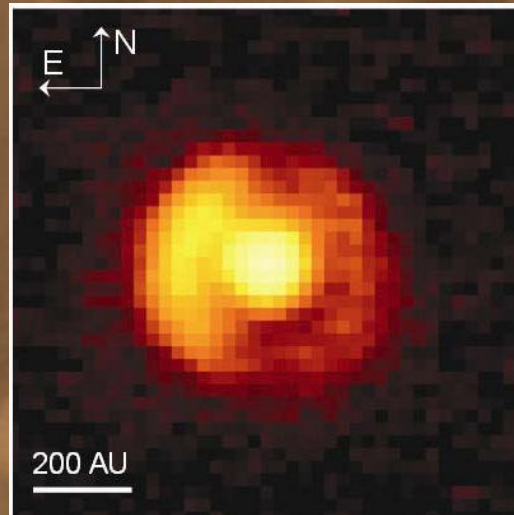
中間赤外線天文学

中間赤外線天文学

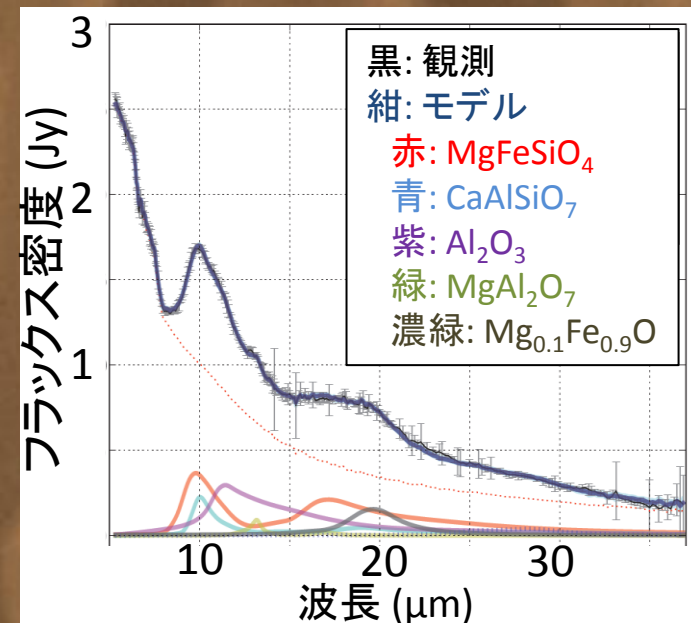
- 波長 : 5—40 μm
- 宇宙の固体微粒子の形成・進化の理解
 - 星の最期に生まれる過程
 - 惑星に成長していく過程
 - 宇宙空間での物質の輪廻



星から生まれたダスト
(AGB星 U Ant; Arimatsu + 2011)



惑星の材料となるダスト円盤
(HD142527; Fujiwara et al. 2006)



ダストの化学組成探査例
(AGB星 CSS553; Smolders et al. 2012)

中間赤外線天文学

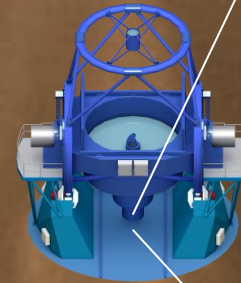
30ミクロン帯観測の開拓

- 大気吸収に長年阻まれてきた波長帯
- 低温ダスト探査 (質量・温度etc)に有効

次世代観測機器

- TAO/MIMIZUKU (地上; 2018頃)
 - 6.5m望遠鏡@Chile Atacama 5640m alt.
 - 高空間分解観測
- SPICA (宇宙; 2018頃)
 - 3m望遠鏡@L2 point
 - 高感度観測

30ミクロン帯光学素子開発
高効率モスアイ光学素子
30ミクロン帯メッシュフィルター



6.5mTAO望遠鏡概略図(左)と
開発途上のMIMIZUKU(右)

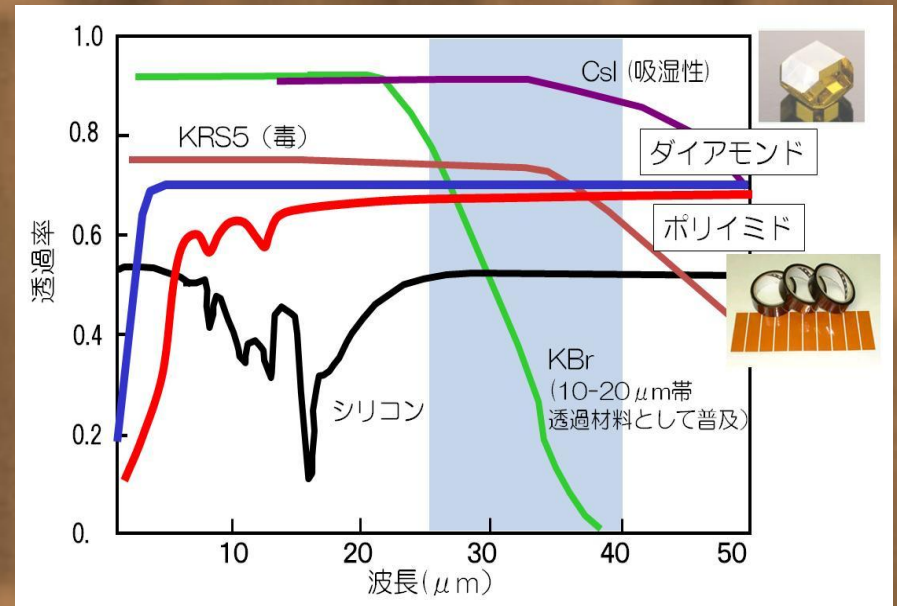


SPICAの概略図

中間赤外線高効率光学素子開発

シリコン

- 数少ない透過材料
- 優れた加工性・入手性
- 表面反射ロスが大きい

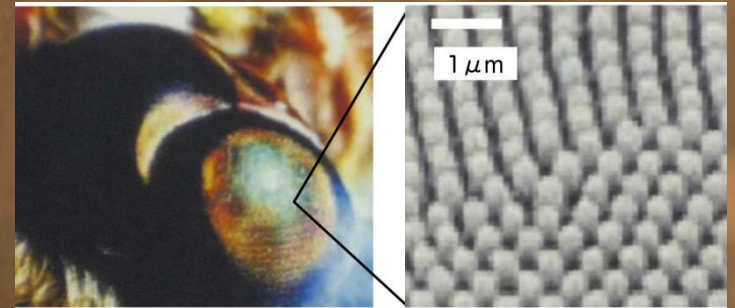


- 反射防止加工で有効な高効率光学素子が実現
- 中間赤外線光学系のコンパクト化
 - 微弱信号の検出効率向上

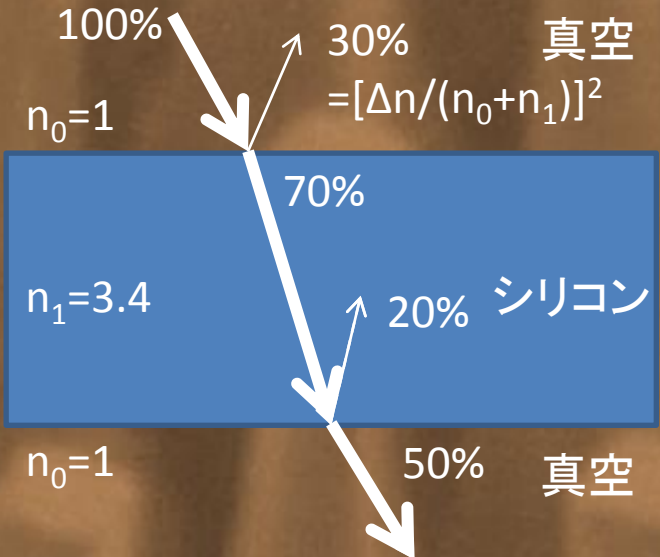
高効率モスアイ光学素子

モスアイ構造

- 無数の錐体構造
- 屈折率変化が連続的
→ 反射防止作用
- 単一材料で構成できる
→ 冷却サイクルに強い
- 実用技術の流用
 - 可視光モスアイ加工技術の応用



蛾の目 = モスアイの構造

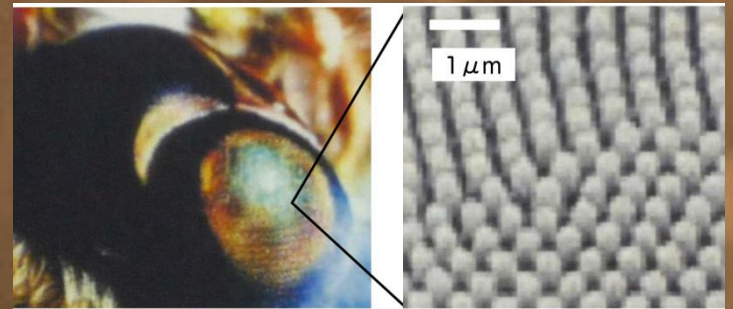


モスアイ構造による反射防止作用

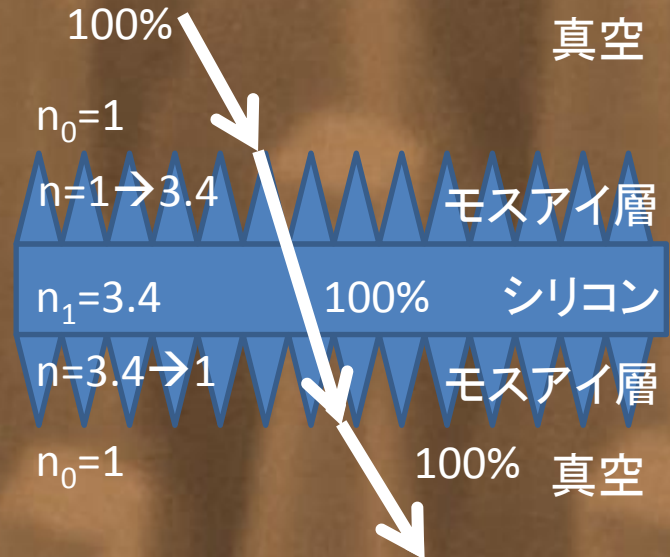
高効率モスアイ光学素子

モスアイ構造

- 無数の錐体構造
- 屈折率変化が連続的
→ 反射防止作用
- 単一材料で構成できる
→ 冷却サイクルに強い
- 実用技術の流用
 - 可視光モスアイ加工技術の応用



蛾の目 = モスアイの構造



モスアイ構造による反射防止作用

TAO/MIMIZUKUにおける モスアイ光学素子開発

Goals

- 両凸両面モスアイシリコンレンズ
- 両面モスアイシリコングリズム

開発体制

- 設計: 東京大学
- 製作: NTT-AT
- 評価 (光学・冷却) : 東京大学・ISAS/JAXA

過去の試作

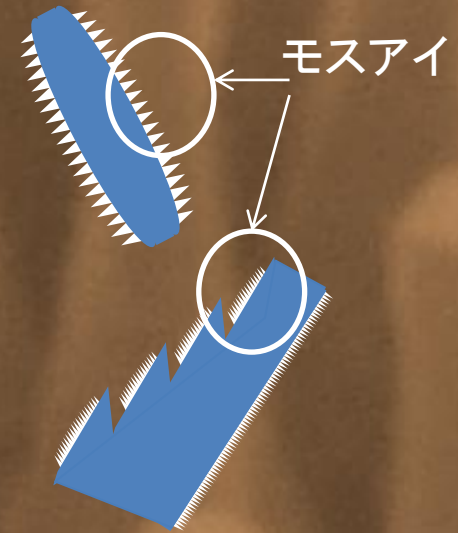
2010年度

- 小面積平面片面モスアイ
- 大面積平面片面モスアイ
- 平面両面モスアイ
- 平凸片面モスアイレンズ

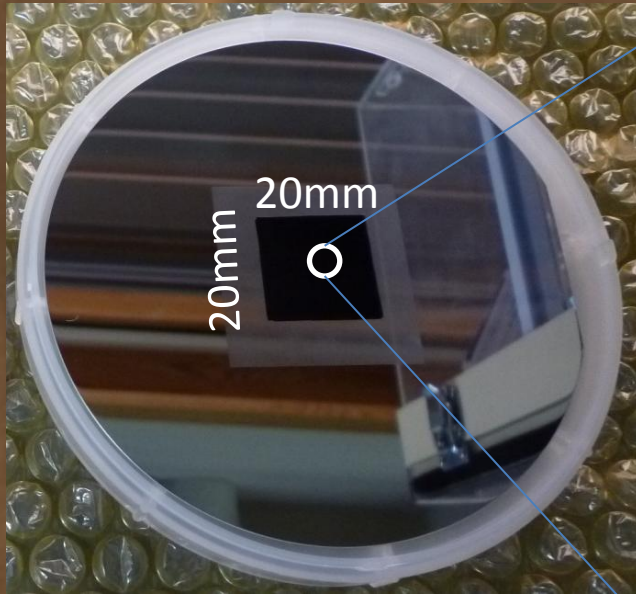
2011年度

- 平面両面モスアイ
- 両凸片面モスアイレンズ
- 片面モスアイグレーティング

(青: 平面, 赤: 曲面, 緑: 凹凸面)



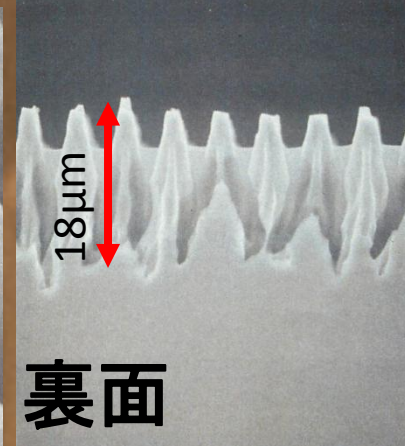
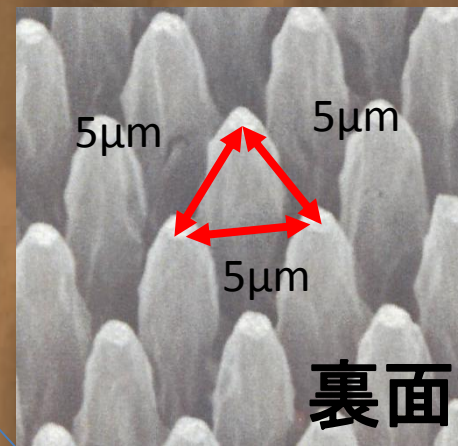
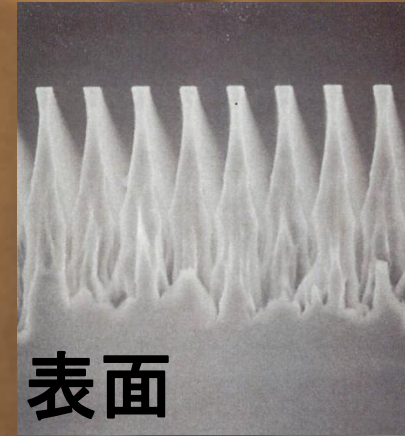
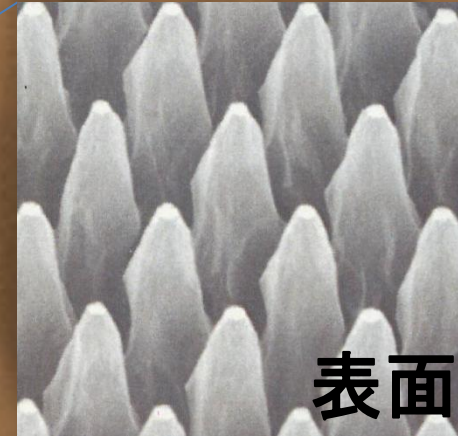
平面両面モスアイ



サンプルの外観

両面とも良好なモスアイ構造を形成

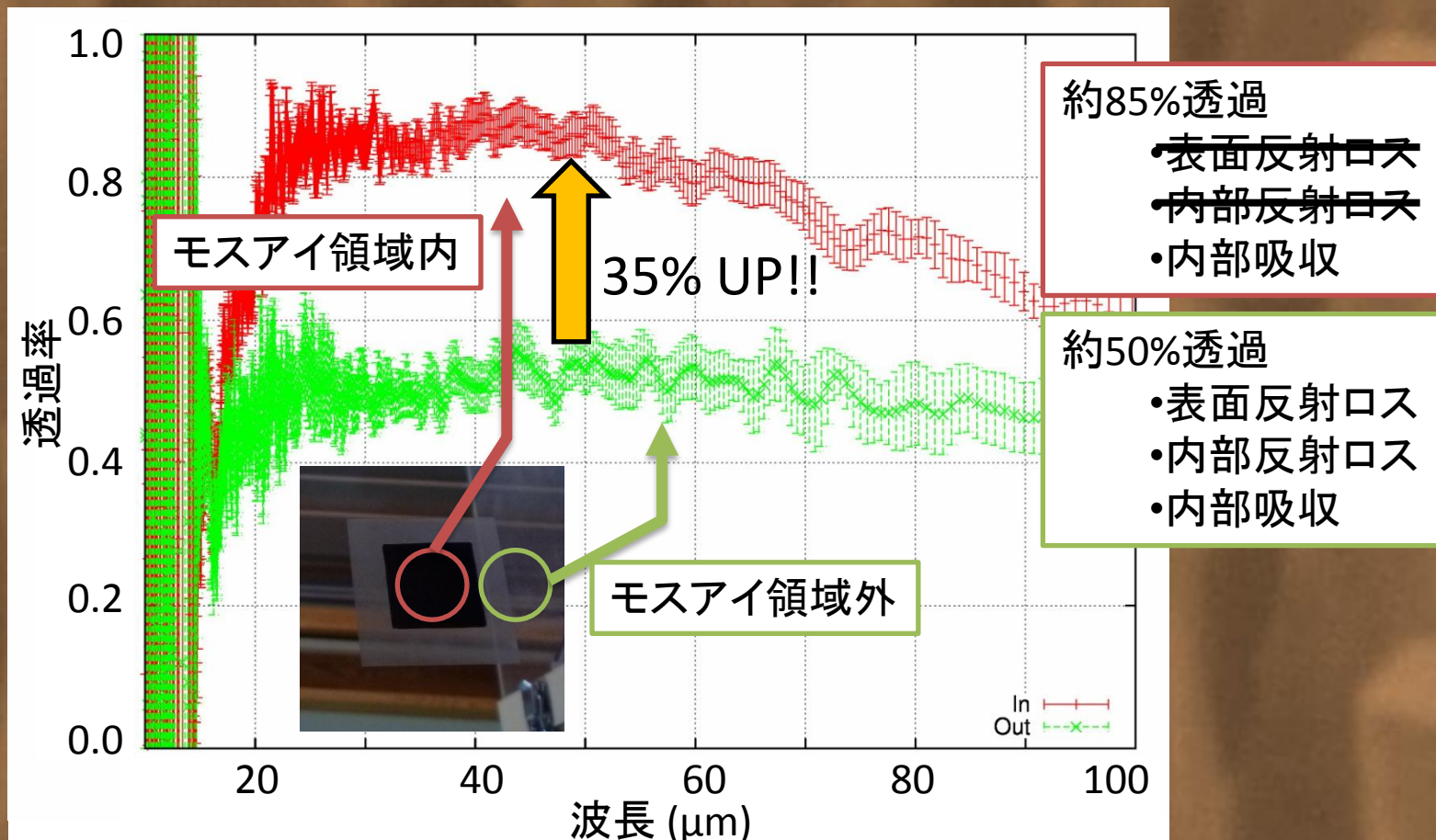
- モスアイ加工域：20mm四方
- パタンピッチ：4.9—5.1 μm
- パタン深さ：18.2—18.5 μm
(30ミクロン帯に最適化されたパラメータ)



モスアイ構造の電顕写真
(左：斜め上から、右：断面図)

平面両面モスアイ

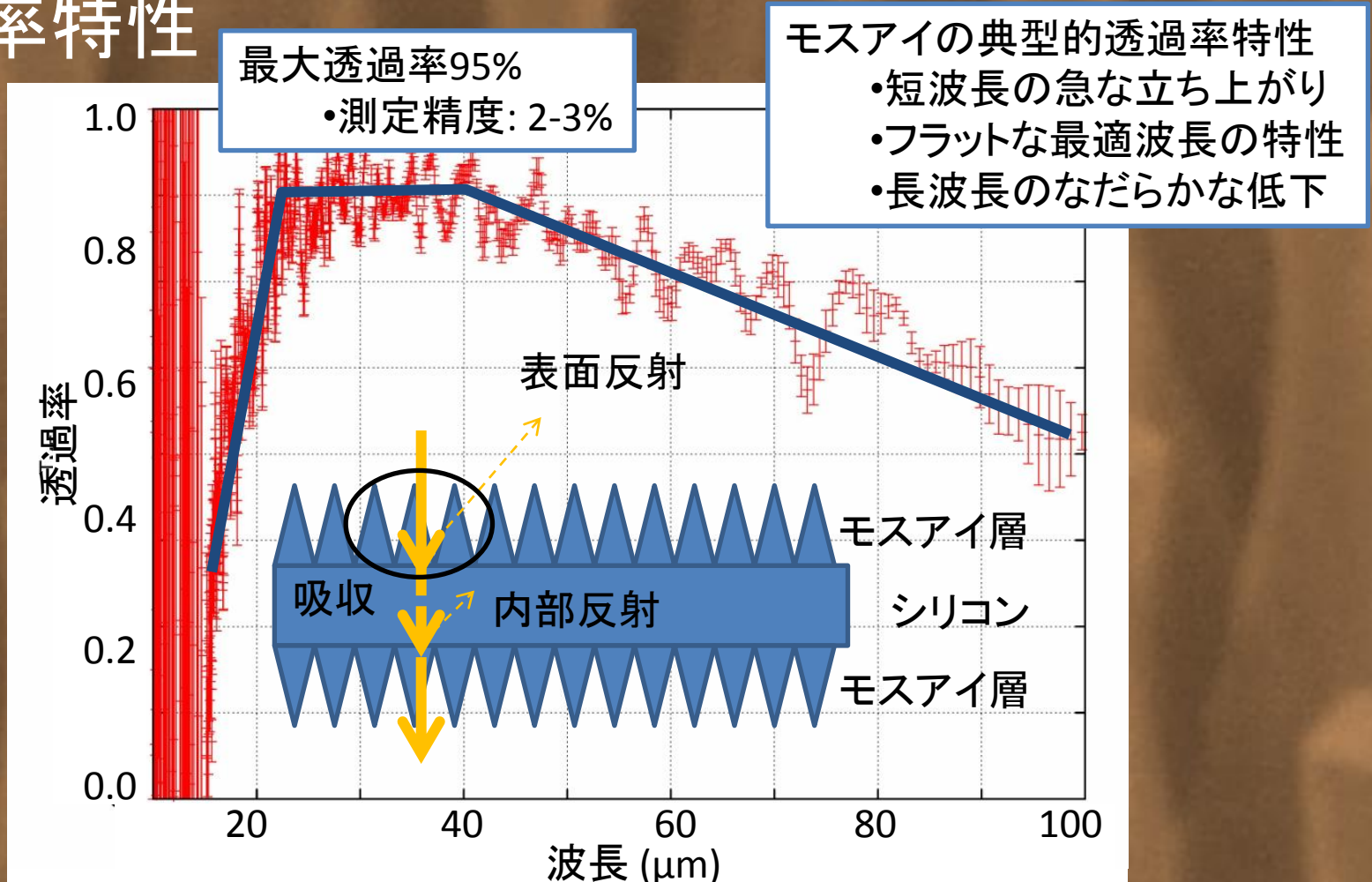
透過率特性



サンプルの透過率スペクトル

平面両面モスアイ

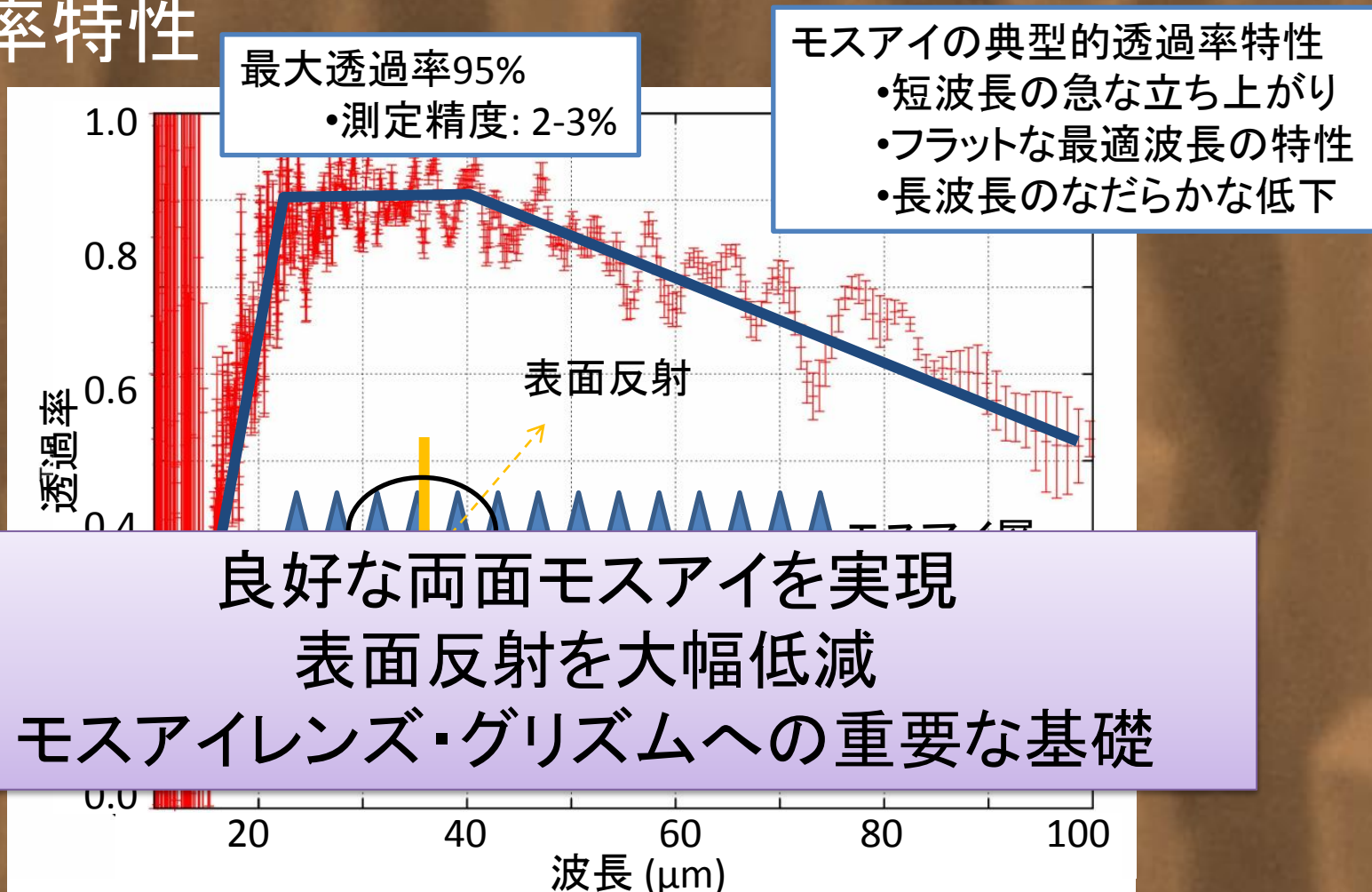
透過率特性



モスアイ層の透過率スペクトル

平面両面モスアイ

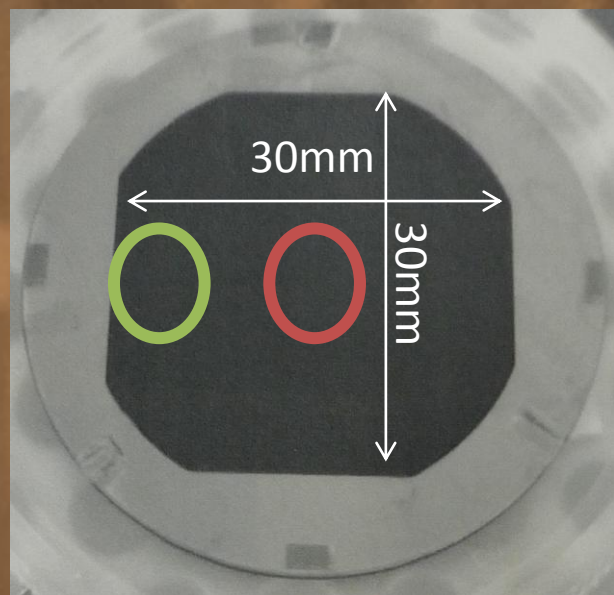
透過率特性



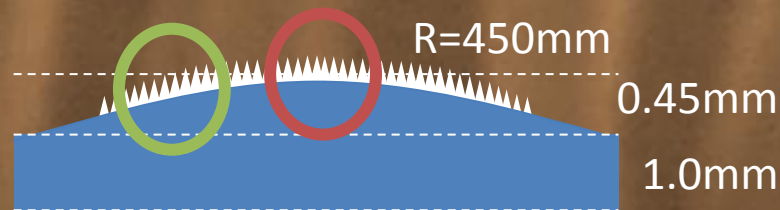
良好な両面モスアイを実現
表面反射を大幅低減
モスアイレンズ・グリズムへの重要な基礎

モスアイ層の透過率スペクトル

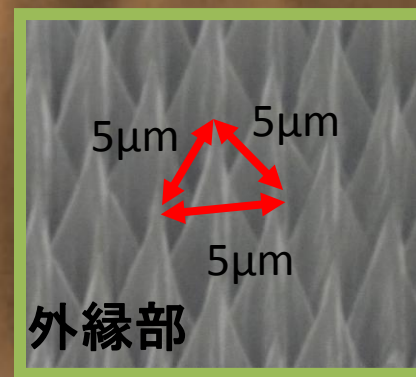
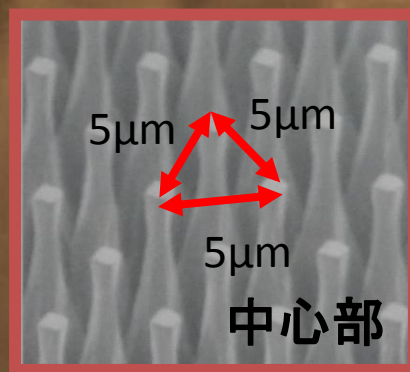
モスアイレンズ



試作レンズの外観



試作レンズの構造



モスアイ構造の電顕写真

曲面へのモスアイ加工

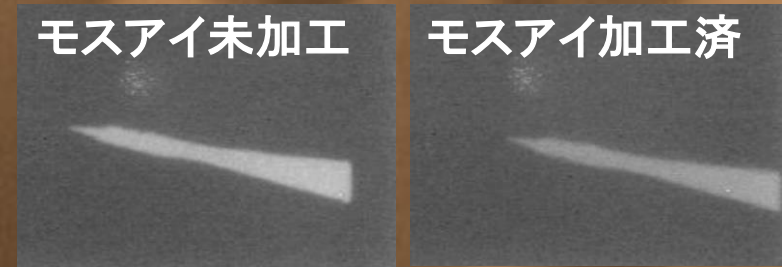
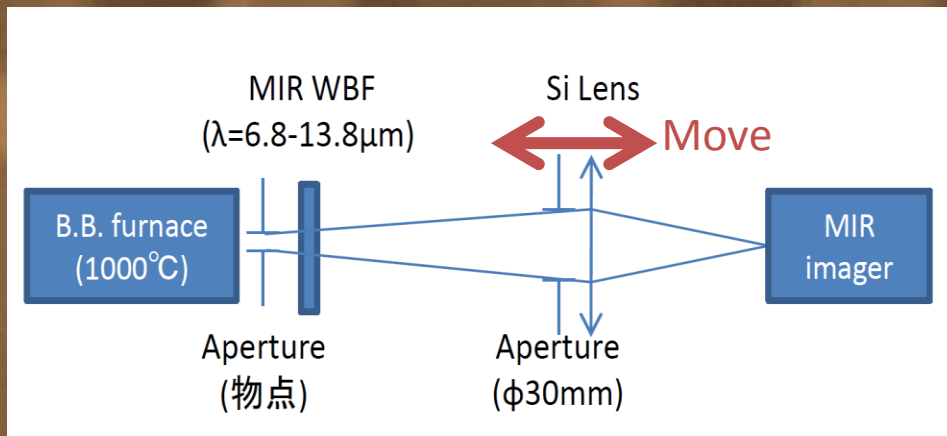
パタンピッチ: $5\mu\text{m}$, 深さ: $15\mu\text{m}$

加工域深さ: 0.25mm

エッチングマスクの均一形成が難しい (EBLの焦点深度の問題)

モスアイレンズ

結像試験 (ただし波長7-14 μm)



結像イメージ

結像試験の構成

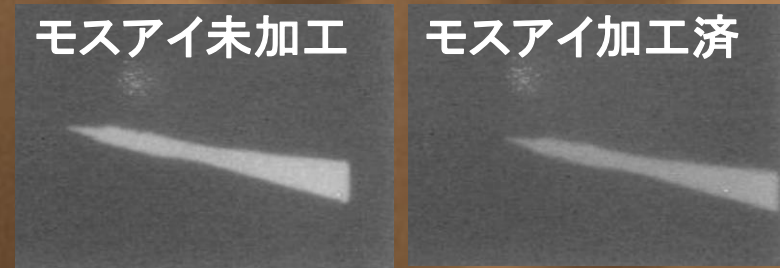
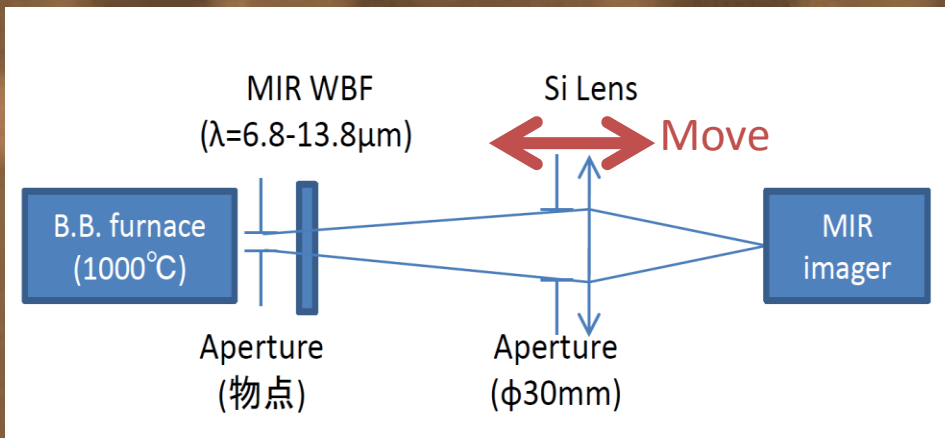
同型でモスアイ未加工・加工済みレンズの結像イメージ・結像位置を比較

- 結像イメージ: 大きな違いはない
- 結像位置: 有意なずれを確認

→焦点距離の差で $0.8 \pm 0.2\text{mm}$ (設計値: 186mm)
モスアイ加工の影響 or レンズの個体差

モスアイレンズ

結像試験 (ただし波長7-14 μm)

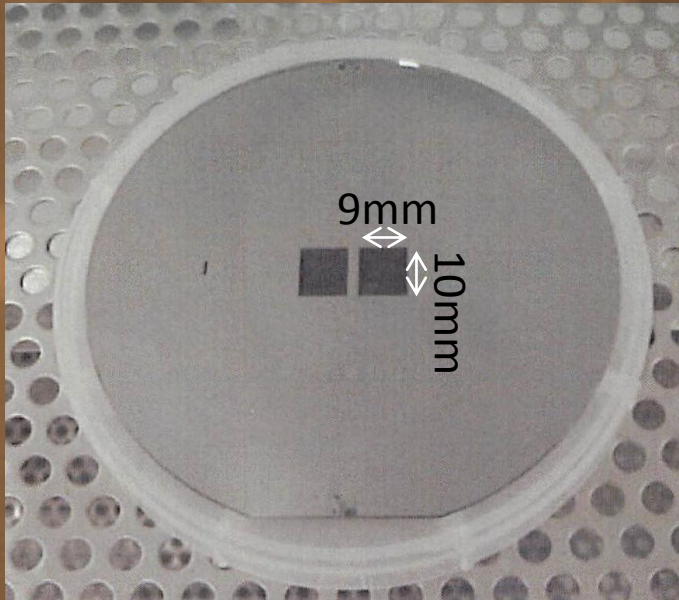


結像イメージ

結像試験の構成

著しいイメージ劣化や焦点距離変化は無い
次の試作レンズを作製中
焦点距離・イメージ・透過率の評価を予定
(30 μm の実験方法は検討中...)

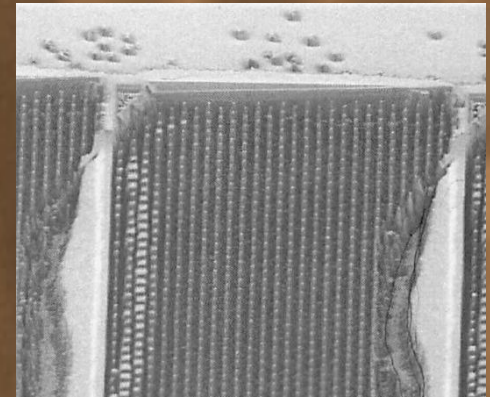
モスアイグレーティング



モスアイグレーティング外観



グレーティング面加工後



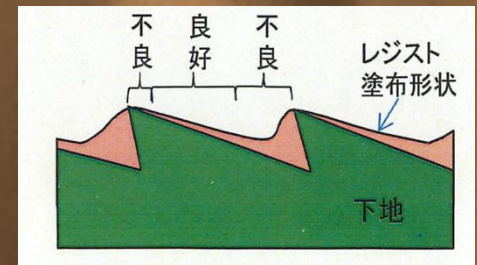
モスアイ加工後

グレーティング面 (ピッチ: $125\mu\text{m}$, ブレーズ角: 4deg)
異方性エッチングで形成
正常に形成

モスアイ (ピッチ $5\mu\text{m}$)

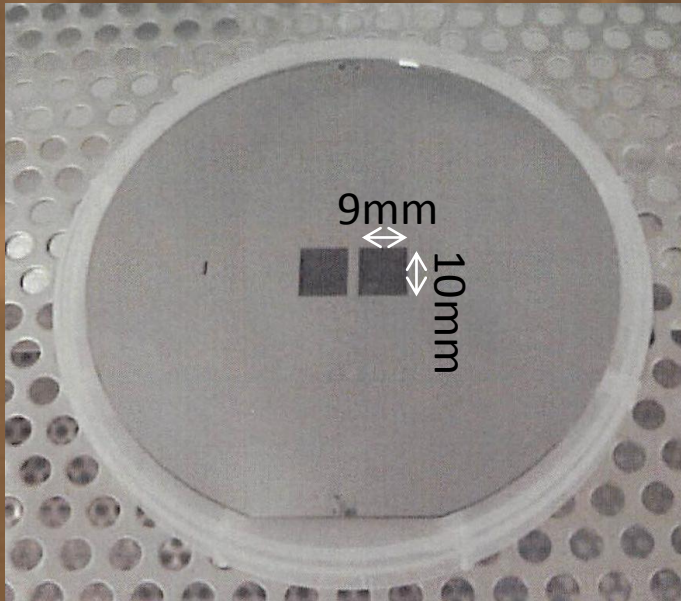
電子線リソグラフィ + 反応性イオンエッチング

電子線リソグラフィのレジスト不均一にともなうエッチングマスクの形成不良



レジスト塗布不良の様子

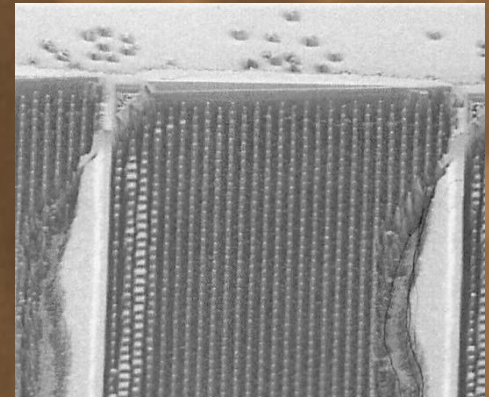
モスアイグレーティング



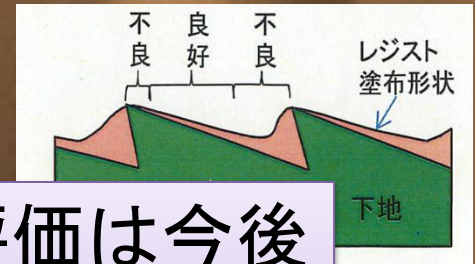
モスアイグレーティング外観



グレーティング面加工後



モスアイ加工後



の様子

グレーティング形状・透過率変化の評価は今後
(30 μ m帯の測定方法は検討中)
レジスト均一塗布も課題

電子線リソグラフィのレジスト不均一にともなうエッチングマスクの形成不良

グレー
異正
モス
電

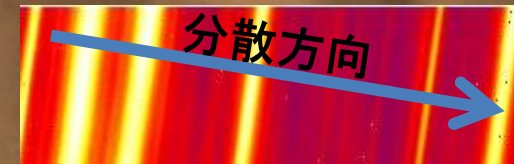
30ミクロン帯メッシュフィルター

バンドパスフィルターの必要性

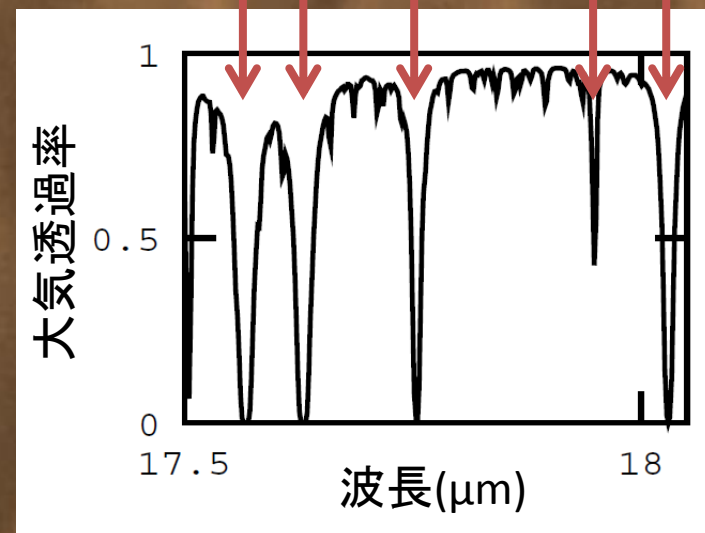
- 測光・撮像観測 (地上・宇宙観測)
 - 目的波長域の選択
- 大気放射の低減 (地上観測)
 - 大気が透明な波長を選択
 - 高S/Nデータを実現

金属メッシュフィルター

- 遠赤外線・電波領域で実績
- 多層膜干渉フィルタの困難を克服
 - 多くの透過材料は不要
 - 冷却サイクルに強い



低透過率=大気放射強 + 天体信号弱
高透過率=大気放射弱 + 天体信号強

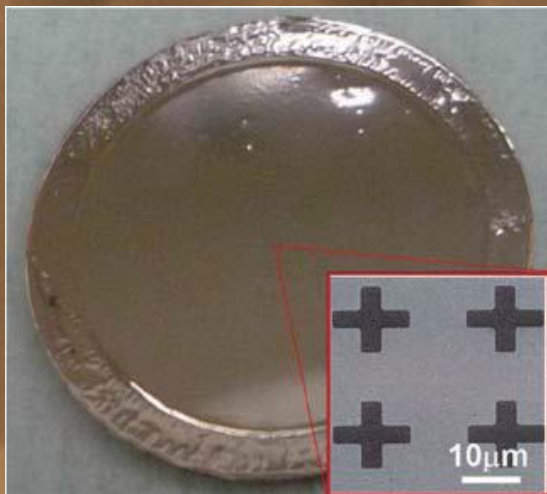


Q-band大気放射スペクトル(上; COMICS)と大気透過率スペクトル(下; ATRAN)

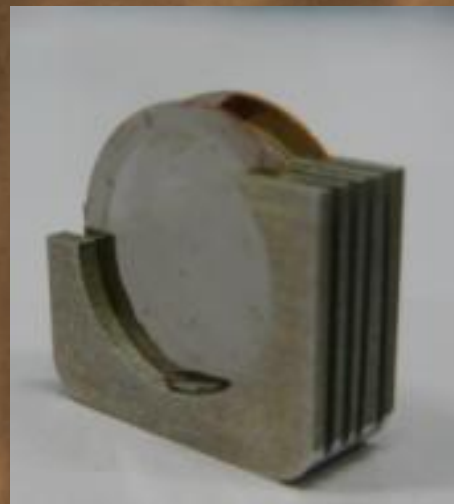
miniTAO/MAX38で活躍する 30ミクロン帯メッシュフィルター

miniTAO/MAX38

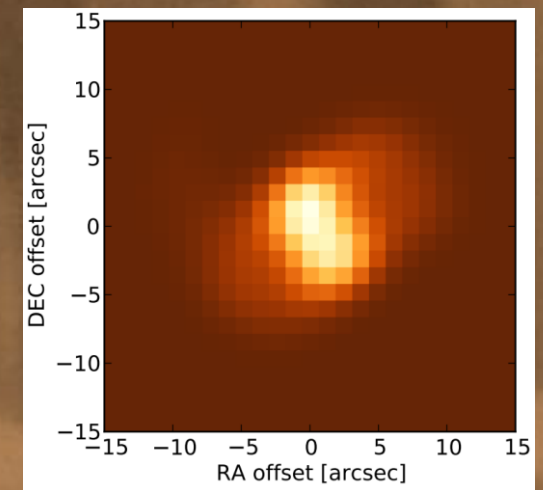
- アタカマで運用中の1m望遠鏡用中間赤外線観測装置
Multi Metal Mesh Filter
- 1ミクロン厚金膜メッシュフィルター
- 四枚スタック→十分なカットオフ性能を実現
- 32, 38ミクロンフィルタを開発



メッシュフィルタの外観



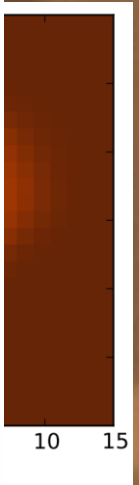
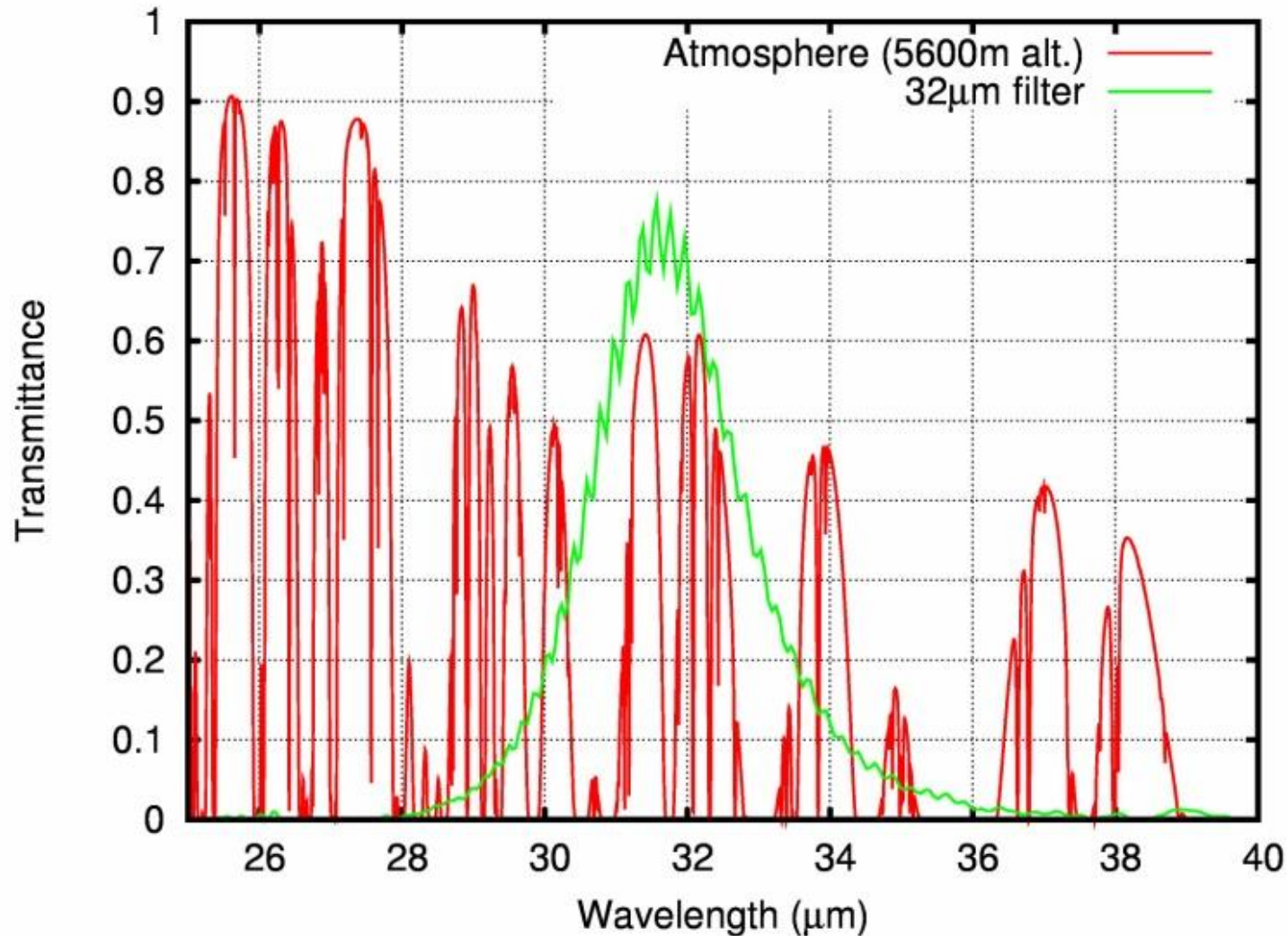
4枚スタックした様子



32ミクロンで見たLBV η Car
(中村D論より)

miniTAO/MAX38で活躍する 30ミクロン帯メッシュフィルター

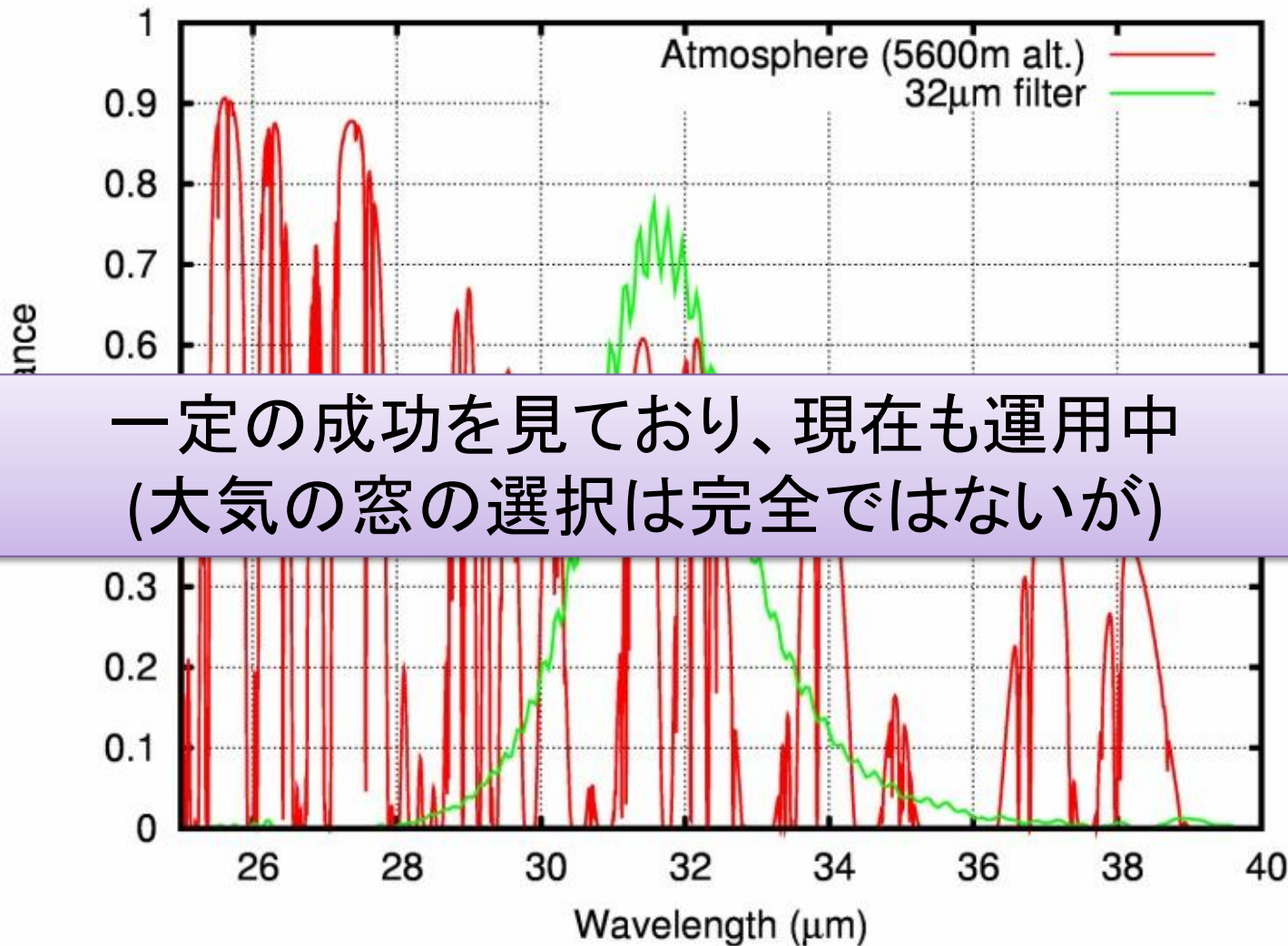
mir
•
Mu
•
•
•



V η Car

miniTAO/MAX38で活躍する 30ミクロン帯メッシュフィルター

mir
•
Mu
•
•
•



一定の成功を見ており、現在も運用中
(大気の窓の選択は完全ではないが)

10 15

V η Car

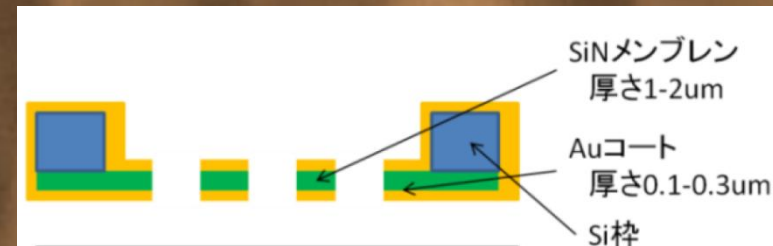
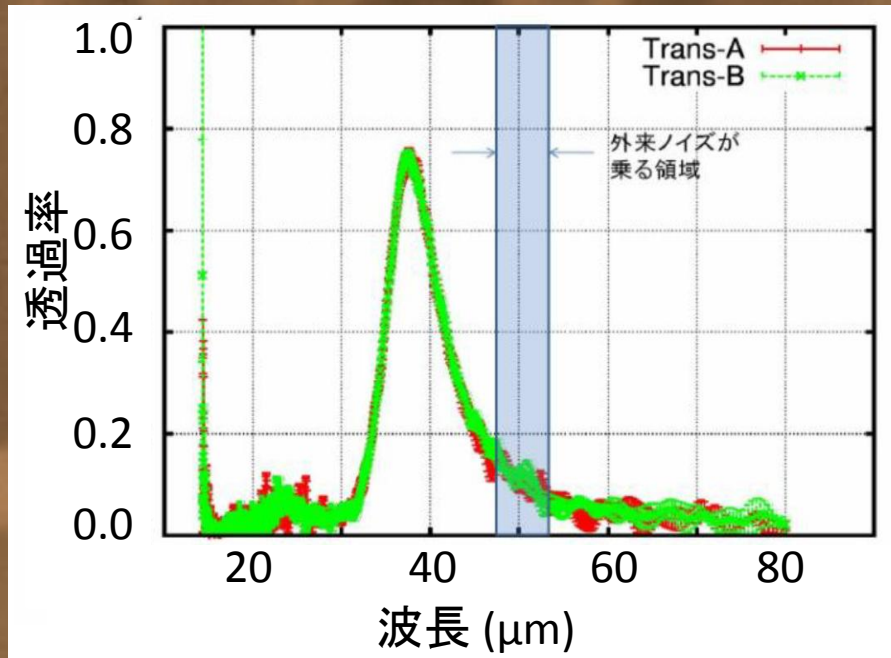
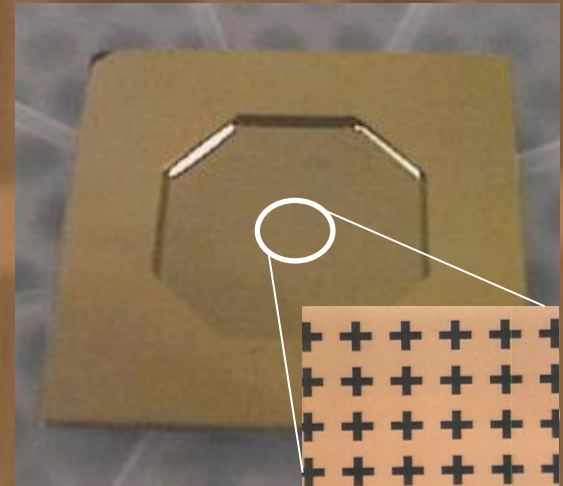
SPICA等衛星搭載に向けた メンブレンメッシュフィルター開発

強度のあるメッシュフィルタ

- 1ミクロンの金膜 = 脆い
- 衛星搭載には強度が必要

→ SiC or SiN 膜に金を蒸着した
メンブレンメッシュフィルタを試作

→ 金膜メッシュフィルタと同等の特性



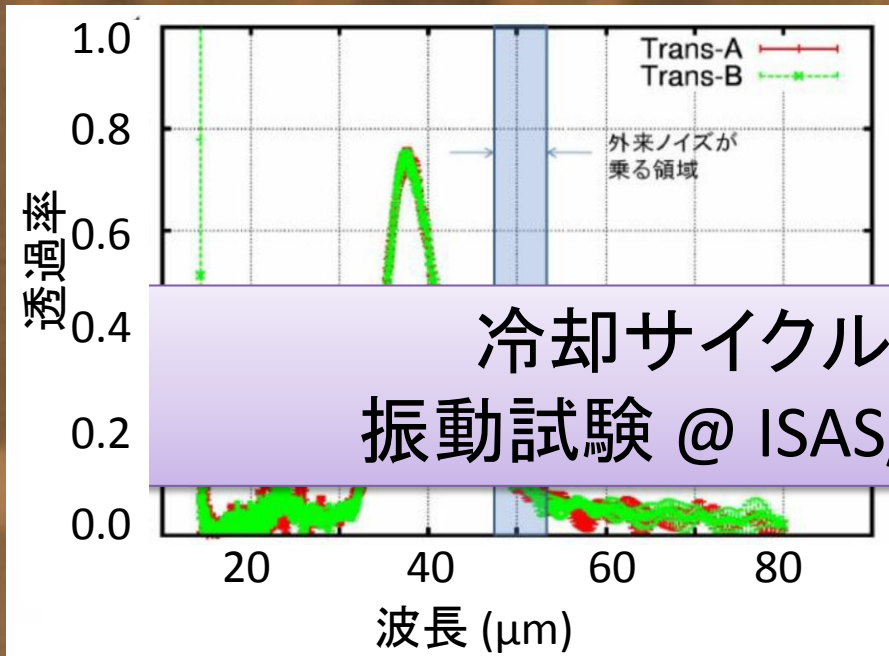
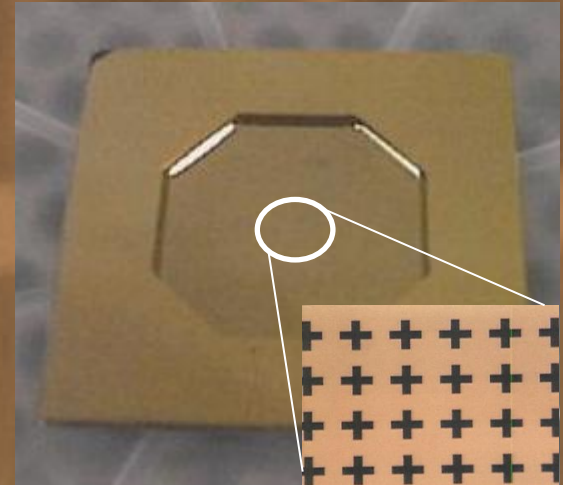
上: メンブレンメッシュフィルタの外観と構造
左: メンブレンメッシュフィルタ透過率特性

SPICA等衛星搭載に向けた メンブレンメッシュフィルター開発

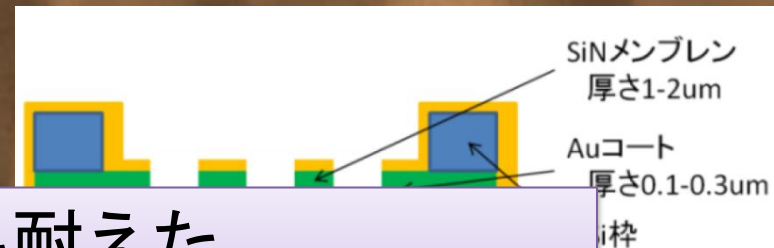
強度のあるメッシュフィルタ

- 1ミクロンの金膜 = 脆い
- 衛星搭載には強度が必要

→ SiC or SiN 膜に金を蒸着した
メンブレンメッシュフィルタを試作
→ 金膜メッシュフィルタと同等の特性



冷却サイクルにも耐えた
振動試験 @ ISAS/JAXAを検討中



上: メンブレンメッシュフィルタの外観と構造
左: メンブレンメッシュフィルタ透過率特性

まとめ

30ミクロン帯天文観測用光学素子開発を進行中

- TAO/MIMIZUKU
- SPICA等次世代衛星

モスアイ光学素子開発

- モスアイレンズ・グリズムの実現が目標
 - 平面への加工は確立
 - レンズ・グレーティング面への加工・評価が進行中
 - 30ミクロン帯での評価環境構築も課題

メタルメッシュフィルタ

- 金膜メッシュフィルタは良好に稼働中
- メンブレンメッシュフィルタの強度評価が課題