

近赤外線面分光ユニット SWIMS-IFU: 光学素子の完成と 実験室での組み上げ, 性能評価

可視赤外線観測装置技術ワークショップ 2021

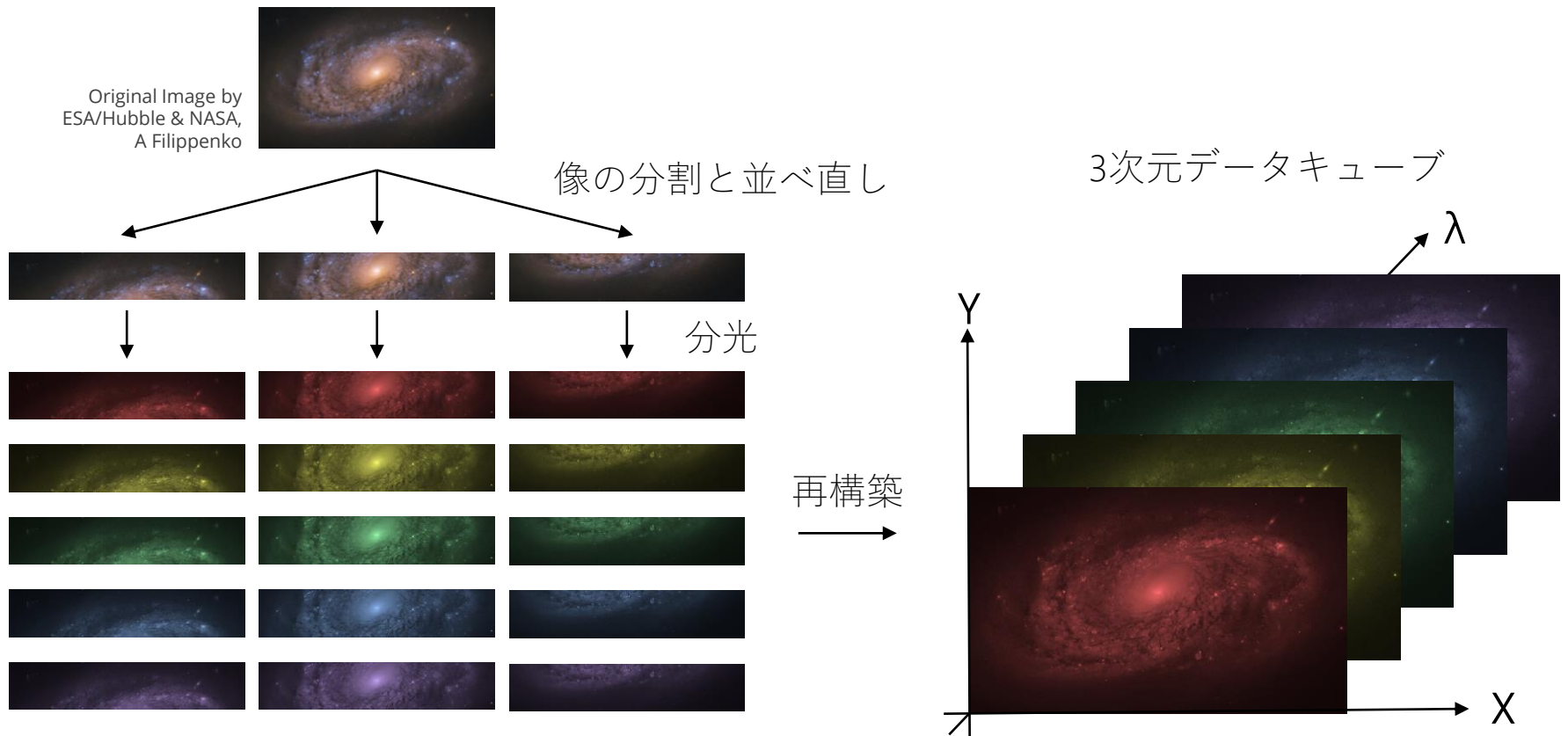
櫛引洸佑 (東京大学),

共同研究者

本原顕太郎(国立天文台,東京大学), 尾崎忍夫(国立天文台),
山形豊(理化学研究所), 細畠拓也(理化学研究所), 竹田真宏(理化学研究所),
森田晋也(東京電機大学), 大竹豊(東京大学), 都築俊宏(国立天文台),
高橋英則(東京大学), 小西真広(東京大学), 小山舜平(東京大学),
加藤夏子(東京大学), 陳諾(東京大学), 穂満星冴(東京大学)

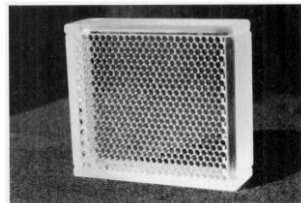
面分光

- 二次元の空間情報を保持したまま、視野全体を一度に分光する観測手法

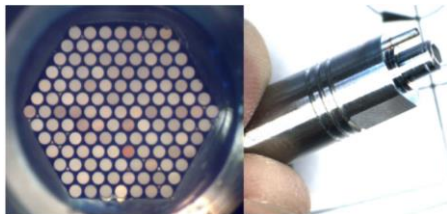


面分光の手法

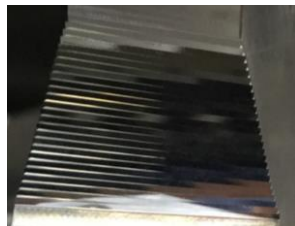
- 主に三つの手法



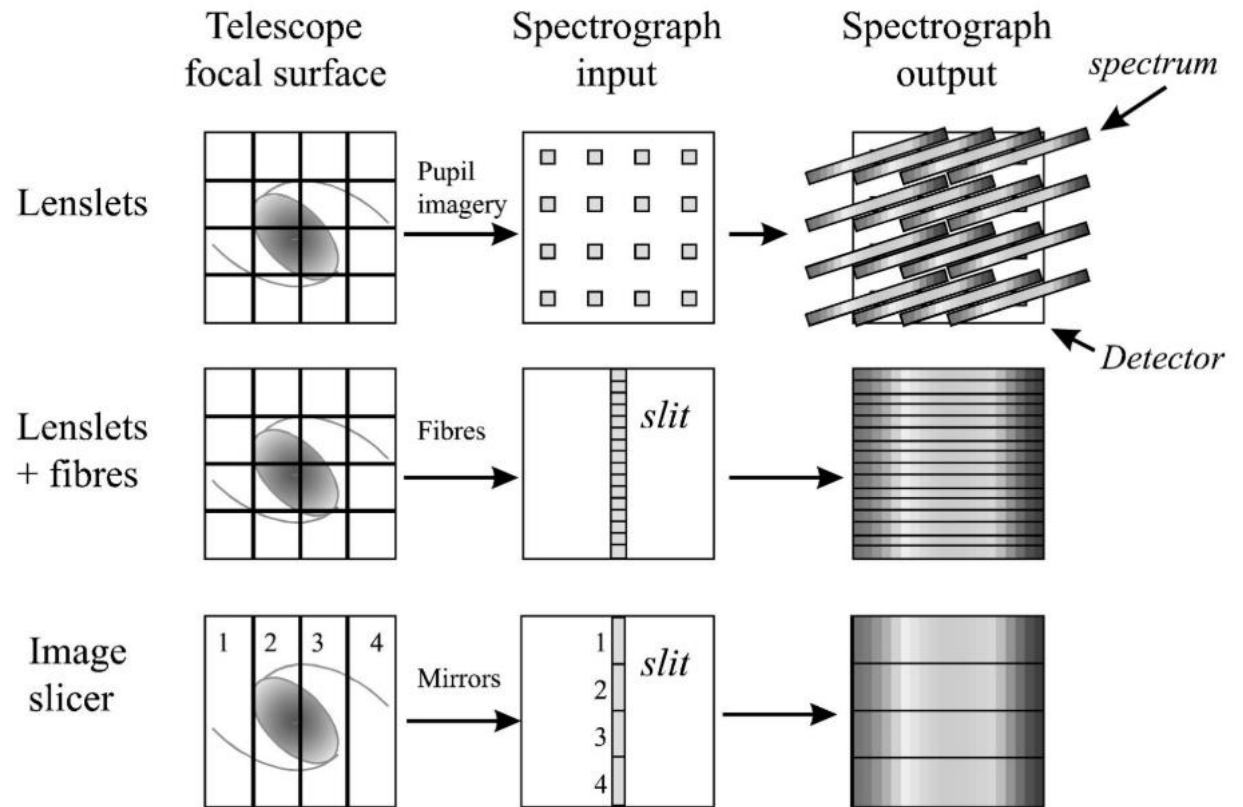
Bacon+1995



SDSS/MaNGA Webpageより



SWIMS-IFU イメージスライサー



Allington-Smith & Content 1998 (一部修正)

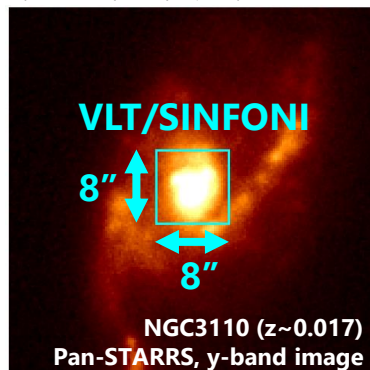
近赤外線での面分光

近赤外線観測の必要性

- ダスト減光の影響を可視光より受けにくい
- 高赤方偏移天体の静止系紫外-可視光の観測

近赤外線面分光の課題

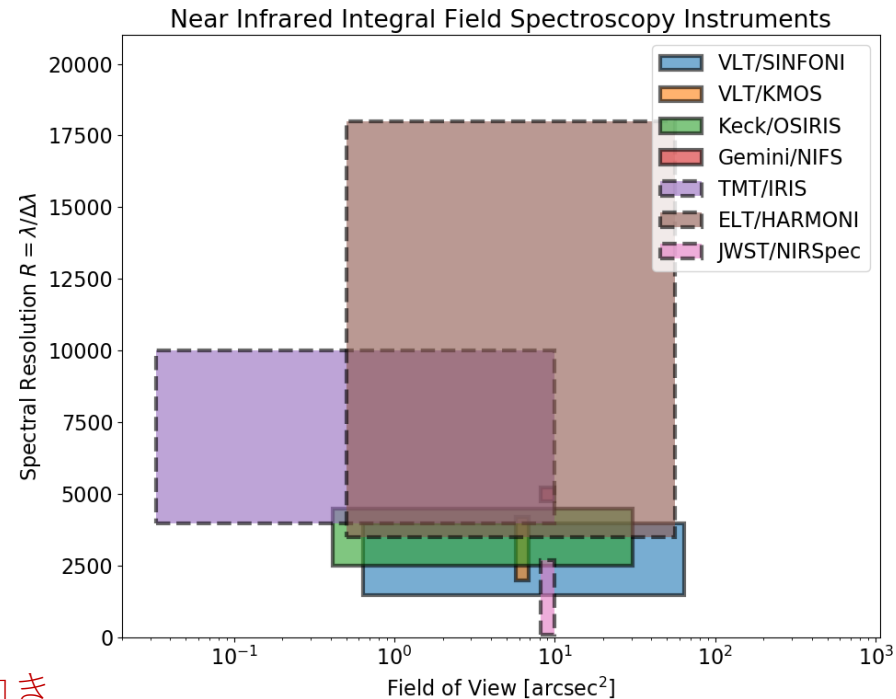
- 観測視野が狭い
⇨ AOを用いた高空間分解能観測は
既存装置や将来装置で実現されている



- 観測波長帯域がバンドごとで狭い

→ 広い範囲を効率的に観測することには不向き

→ 広視野を広波長帯域で効率的に観測するIFUをSWIMSに開発



SWIMS

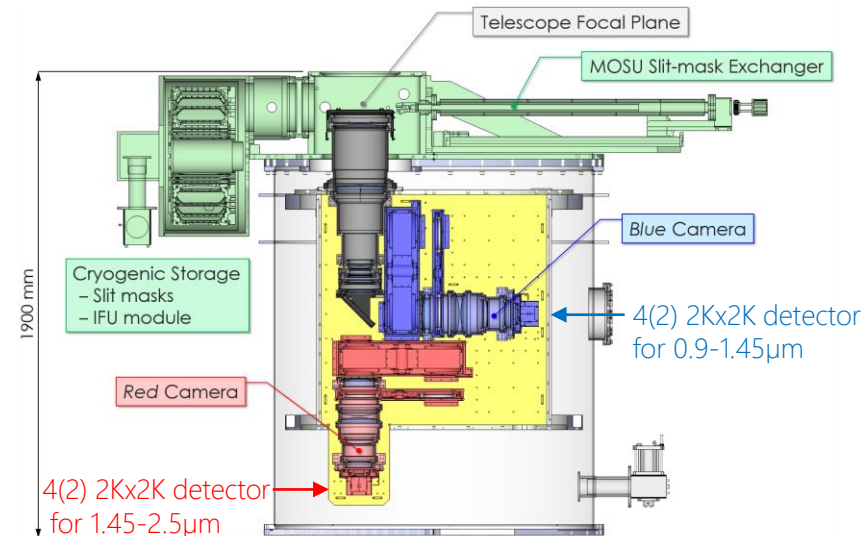
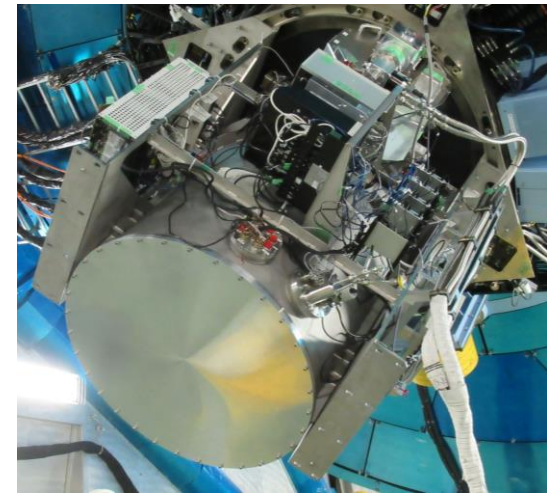
(Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph)

- TAO6.5m望遠鏡用第一期観測装置
- 近赤外線 撮像&分光
 - 0.9-1.45, 1.45-2.5 μm 二色同時観測
 - $\Phi 9.6'$ の広視野撮像
 - ~30天体のスリット多天体分光
- 2021A期より国立天文台すばる望遠鏡でPI装置として共同運用



広波長帯域のSWIMSに広視野IFUを製作

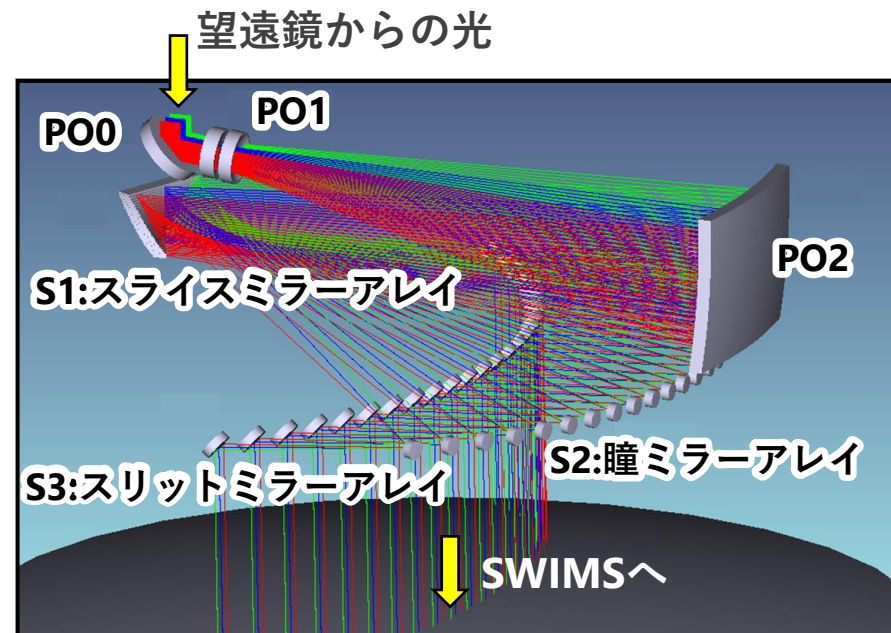
- SWIMSの光学系には変更を加えない
 - 多天体分光マスクと同様にMOSUで焦点面に挿入する
- 面分光モードへとスムーズに切り替え、効率よく空間的に広がった天体の面分光



SWIMS-IFU

- イメージスライサー方式の面分光ユニット
- スライス幅をseeing($\sim 0.4''$ - $0.5''$)に最適化し、近赤外線IFSの中で最大の視野を実現
- 反射角度の大きな両端の7チャンネルずつの瞳ミラーに楕円面鏡を採用することで、結像性能を悪化させずにコンパクトな光学系を実現 $< 220 \times 170 \times 55 \text{ mm}^3$

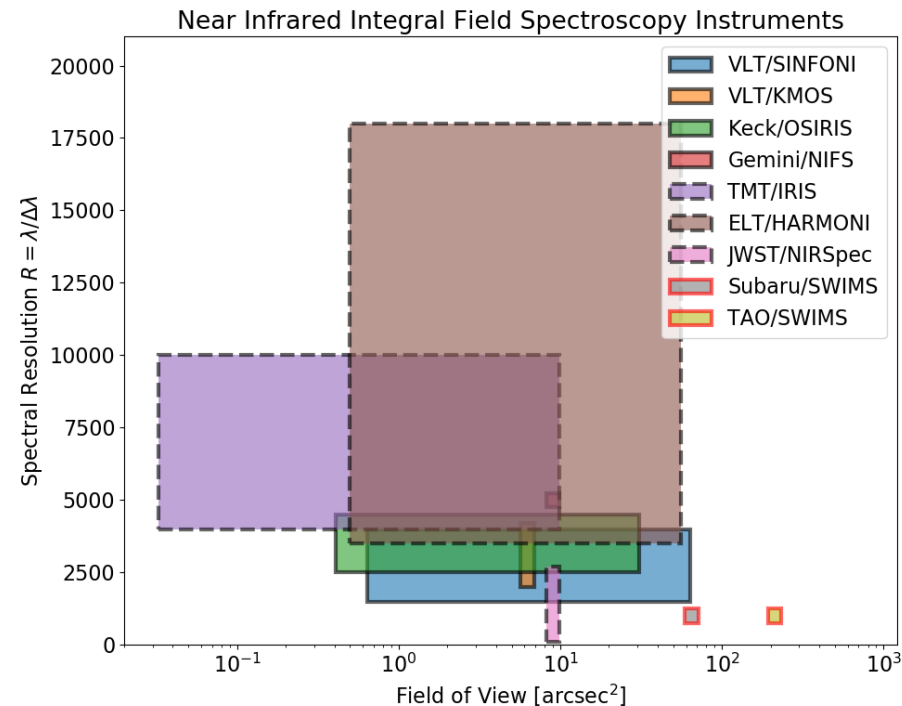
	TAO (6.5m)	Subaru (8.2m)
波長帯域	0.9-1.45 μm (Blue) & 1.45-2.5 μm (Red)	
$\lambda/\Delta\lambda$	1000-1500 (Blue) & 800-1400 (Red)	
検出器数	4	2
視野	16".6 x 12".8	13.5" x 4".8
スライス数	26 (CH-13~-1, +1~+13)	12 (CH-6~-1, +1~+6)



SWIMS-IFU

- イメージスライサー方式の面分光ユニット
- スライス幅をseeing($\sim 0.4''$ - $0.5''$)に最適化し、近赤外線IFSの中で最大の視野を実現
- 反射角度の大きな両端の7チャンネルずつの瞳ミラーに楕円面鏡を採用することで、結像性能を悪化させずにコンパクトな光学系を実現 $< 220 \times 170 \times 55 \text{ mm}^3$

	TAO (6.5m)	Subaru (8.2m)
波長帯域	0.9-1.45 μm (Blue) & 1.45-2.5 μm (Red)	
$\lambda/\Delta\lambda$	1000-1500 (Blue) & 800-1400 (Red)	
検出器数	4	2
視野	16".6 x 12".8	13.5" x 4".8
スライス数	26 (CH-13~-1, +1~+13)	12 (CH-6~-1, +1~+6)

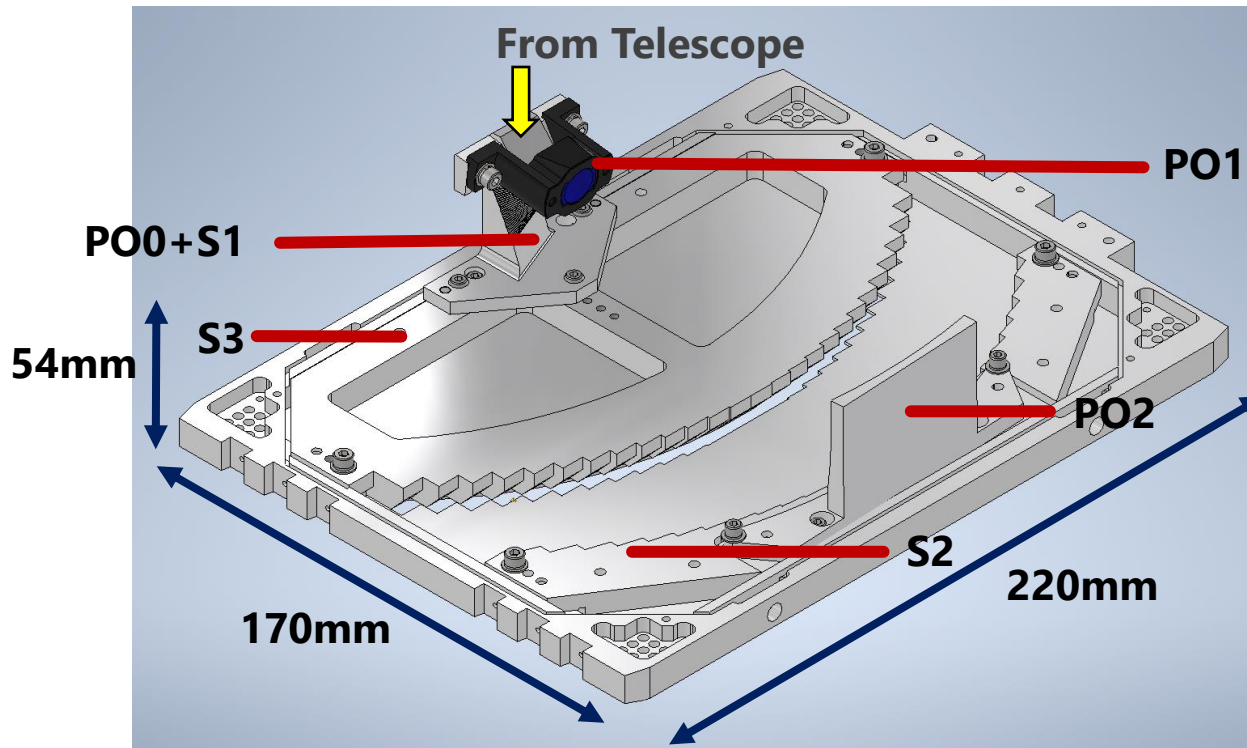


SWIMS-IFU機械系デザイン

困難な点 = とにかく小さいこと

- 数mm直径の小さなミラー&レンズ
- アライメント機構を取り付けることができない

→ 超精密切削加工による一体加工で以下のような機械系を実現



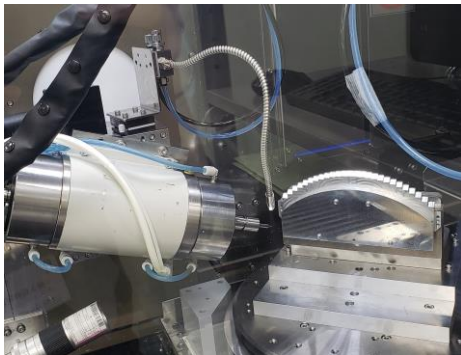
超精密切削加工

nmオーダーの動作精度を持つ超精密加工機: ULG-100D(5A) (芝浦機械)

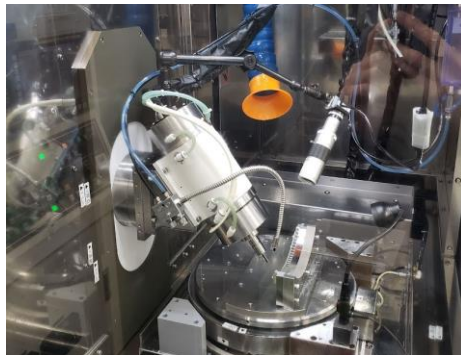
- 高精度な鏡面形状: 平面、球面、楕円面、その他自由形状
- 一体加工で高精度な鏡面の位置と角度 → アライメントの負担を大幅に軽減
- 高精度ダイヤモンド工具を用いることで切削のみで十分な面粗さを実現
より良い面粗さを期待し特殊アルミ合金RSA6061(RSP technology)を使用

理化学研究所 先端光学素子開発チーム(山形豊チームリーダー)との共同研究

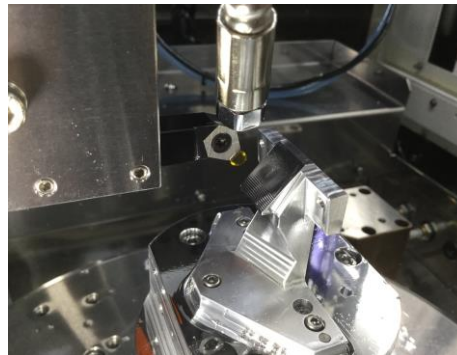
R=0.5mmボールエンドミルによる
スリットミラーアレイ(26球面)の加工



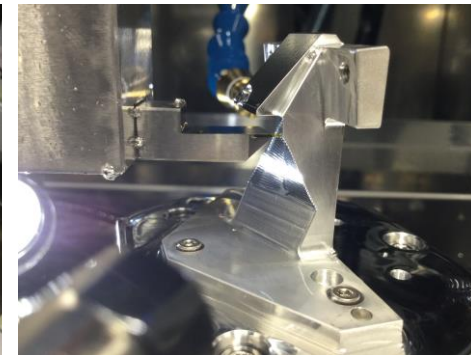
R=1.0mmボールエンドミルによる
瞳ミラーアレイ(12球面+14楕円面)の加工



R=2.0mmバイトによるPO0平面鏡の
シェーパー加工



特注平刃工具による
スライスミラーアレイのシェーパー加工



超精密切削加工

nmオーダーの動作精度を持つ超精密加工機: ULG-100D(5A) (芝浦機械)

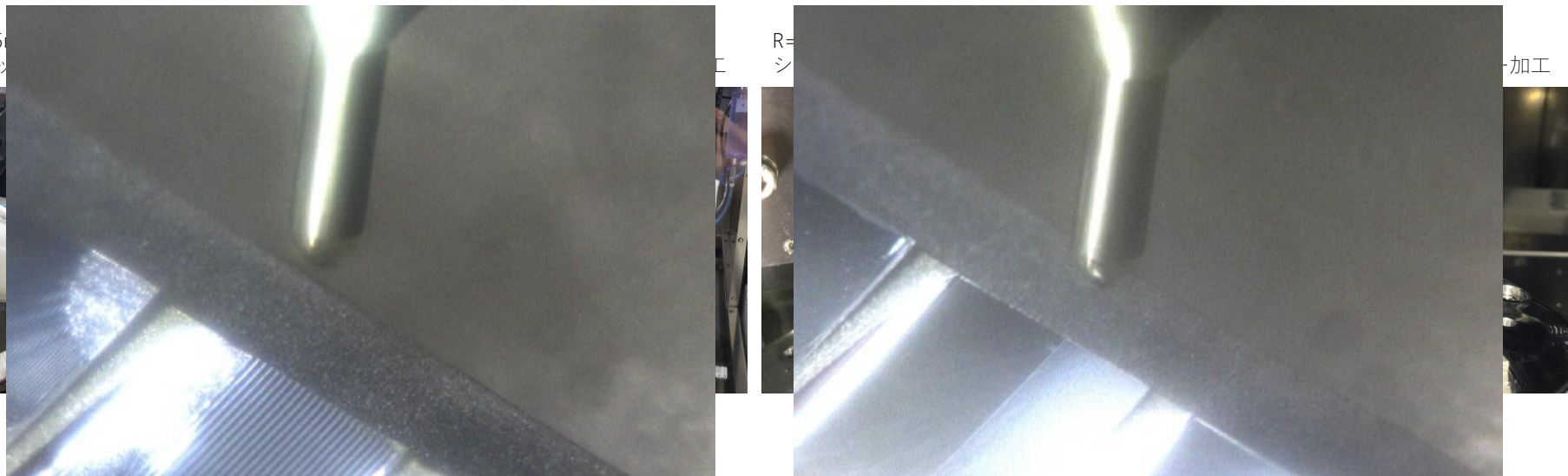
- 高精度な鏡面形状: 平面、球面、楕円面、その他自由形状
- 一体加工で高精度な鏡面の位置と角度 → アライメントの負担を大幅に軽減
- 高精度ダイヤモンド工具を用いることで切削のみで十分な面粗さを実現
より良い面粗さを期待し特殊アルミ合金RSA6061(RSP technology)を使用

理化学研究所 先端光学素子開発チーム(山形豊チームリーダー)との共同研究

R=0.5
スリッ

R=0.5
シ

加工

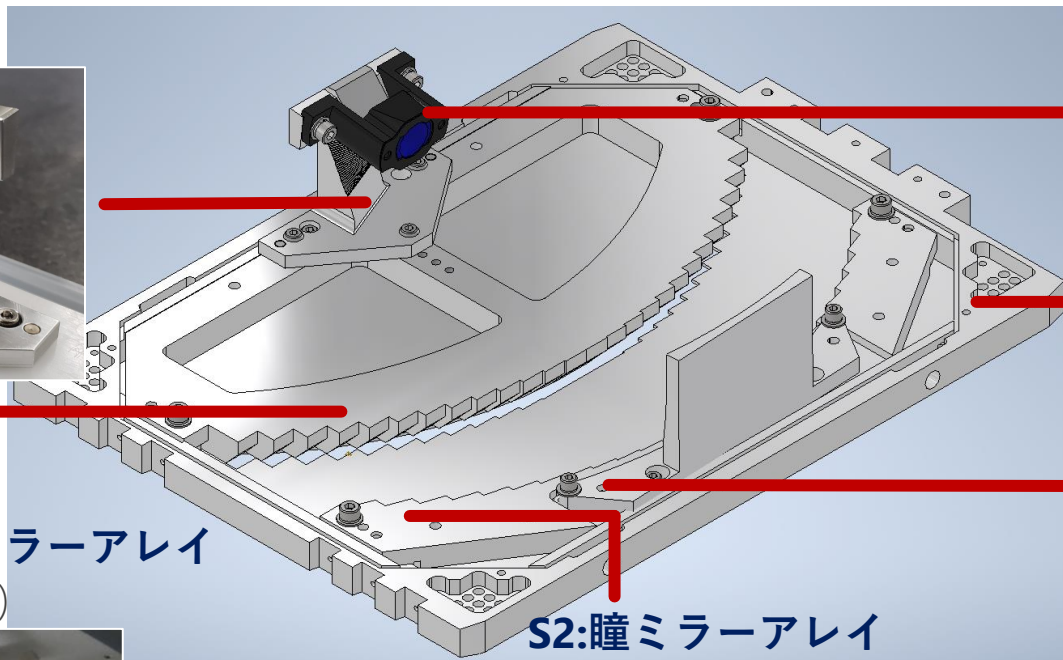


超精密加工による製作完了

- **すべてのパーツが完成** → 組み上げ&光学試験

PO1(超精密加工ではない)
納品済み(2021/8)

PO0+S1:スライスミラーアレイ
完成 (2021/1-4)

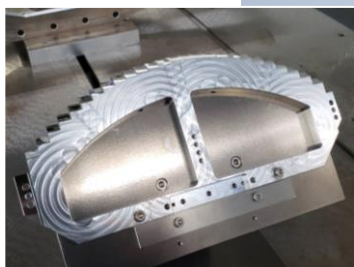


ベース
面出し加工完了
(2021/9)

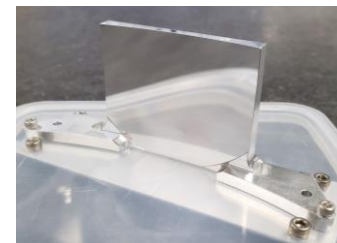


PO2
完成(2021/4)

S3:スリットミラーアレイ
完成 (2019/2-3)



S2:瞳ミラーアレイ
完成 (2020/10-12)



POO+スライスミラーアレイ: 加工における難点

小さなRSA6061材料ひとつに**二種類のミラー**を作成する

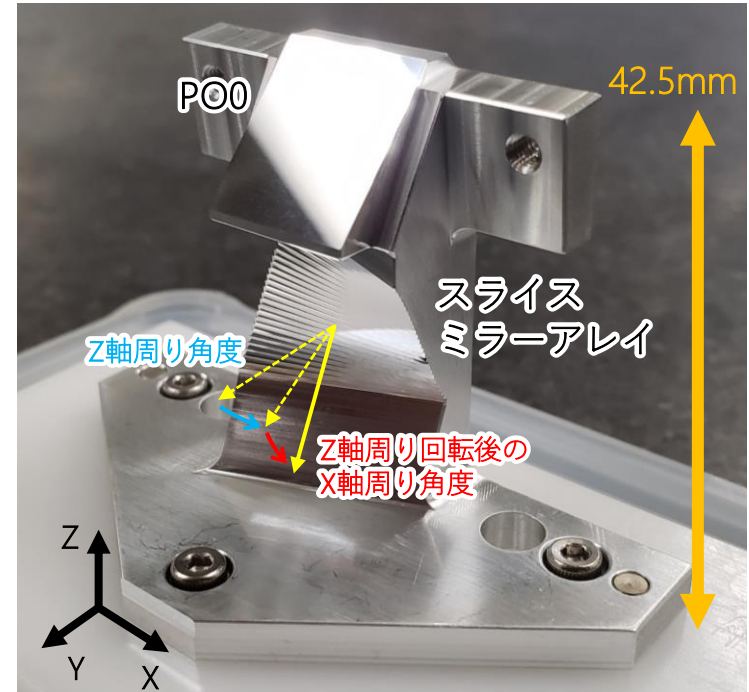
POO: SWIMS-IFUへと光を導く最初のミラー

- X軸周りに48.5degの角度を持った平面鏡
- ~ 14 x 16 mm²

スライスミラーアレイ: 天体像を分割する

- **0.52** x 18 mm²の26個の短冊状平面鏡
- **それぞれに異なった二軸周りの角度**を持つ
(Y軸方向に向いた法線を座標系ごとZ軸周りに各ミラーごとの角度だけ回転し、
新しくできたX軸周りに5.5deg回転する)
- それらの角度が**~0.01deg**という**厳しい公差**

POO + スライスミラーアレイの完成品



POO+スライスミラーアレイ： 解決策

二種類のミラー

→ 二種類の工具を同時に加工機に装着し、
両方で座標を共有する

スライスミラーの幅と角度

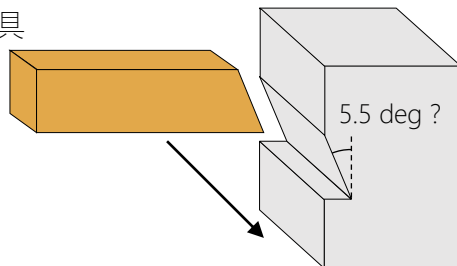
→ 幅0.52mm、刃先角度5.5degを持つ
特注工具を使用

→ 加工機では一軸(B軸)周りの回転のみで
必要な二軸周りの角度を実現

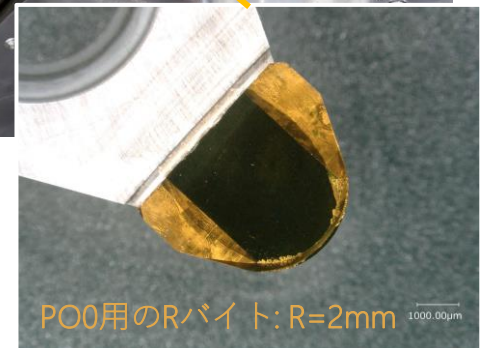
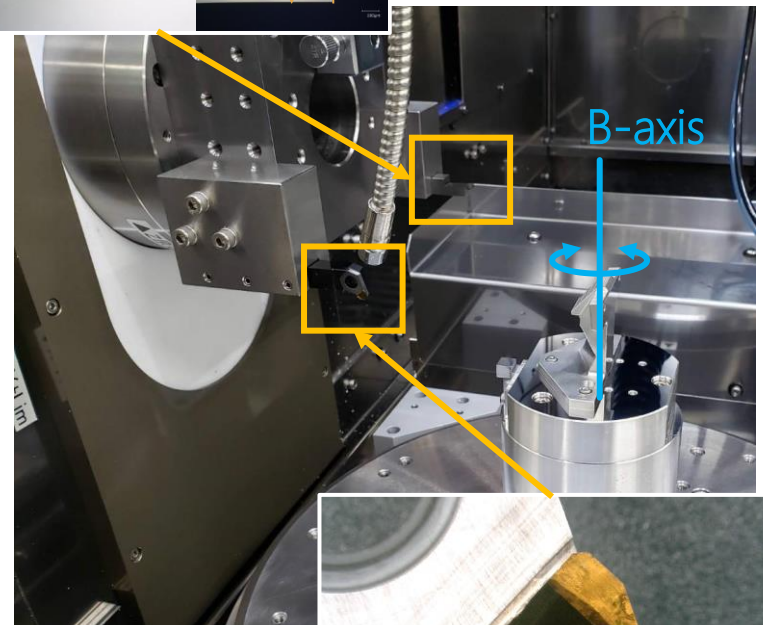
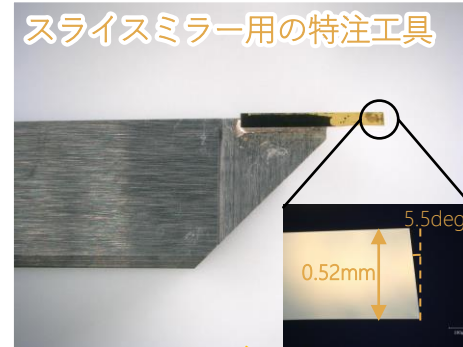
スライスミラー角度の厳しい公差

→ 工具による加工痕を測定し、その角度が
±0.01degの精度で5.5degになるように
取り付け角度を手作業調整

特注工具



スライスミラー用の特注工具



POO+スライスミラーアレイ： 解決策

二種類のミラー

→ 二種類の工具を同時に加工機に装着し、
両方で座標を共有する

スライスミラーの幅と角度

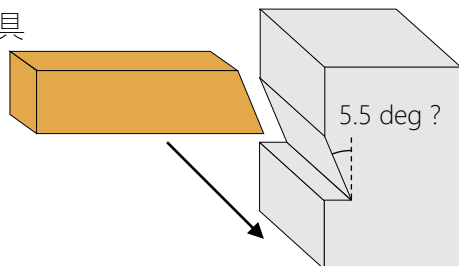
→ 幅0.52mm、刃先角度5.5degを持つ
特注工具を使用

→ 加工機では一軸(B軸)周りの回転のみで
必要な二軸周りの角度を実現

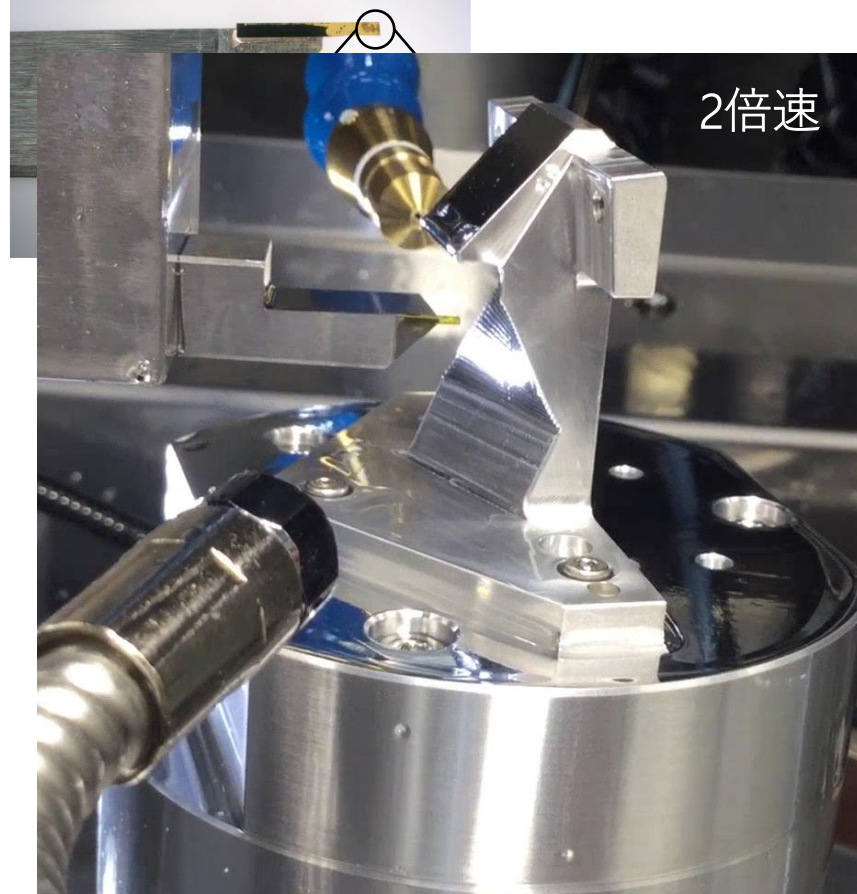
スライスミラー角度の厳しい公差

→ 工具による加工痕を測定し、その角度が
±0.01degの精度で5.5degになるように
取り付け角度を手作業調整

特注工具



スライスミラー用の特注工具



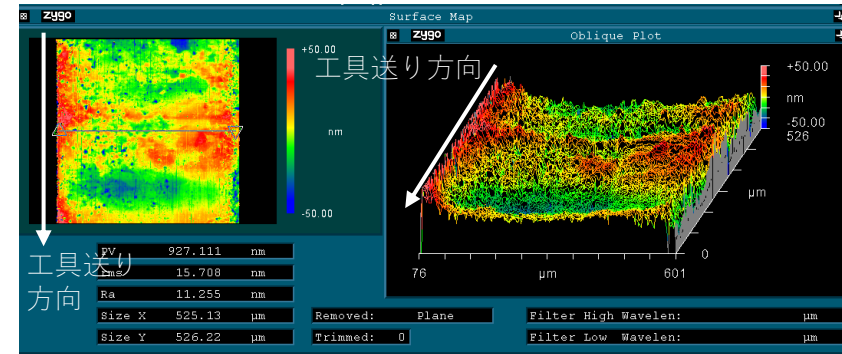
POO用のRバイト: R=2mm 1000.00µm

PO0+スライスミラーアレイ: 性能評価

面粗さ RMS値

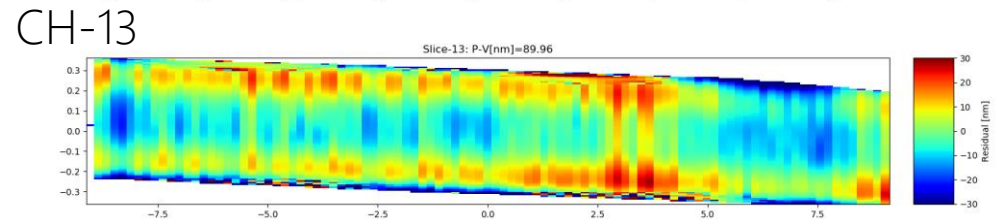
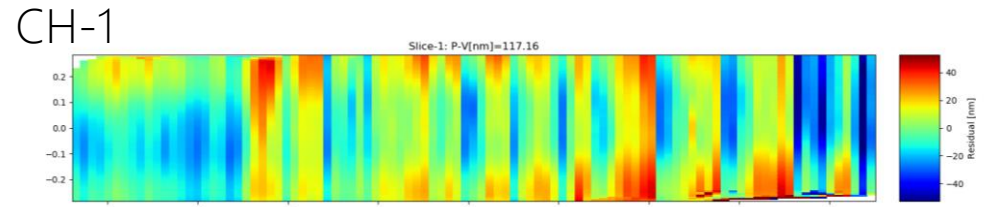
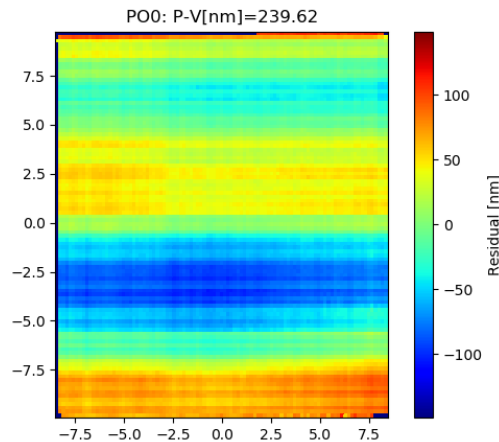
- PO0 = 6-10nm < 要求10nm
- スライスミラー = 9-20nm > 要求10nm
→ RSA6061の素材由来のもの?
RSA6061で必ず良好な面粗さが得られるわけではない?

スライスミラー表面パターン



形状誤差 P-V値

- PO0 = 239nm < 要求300nm
- スライスミラー(一部) = 85 - 228nm < 要求300nm



POO+スライスミラーアレイ: 性能評価

スライスミラー角度

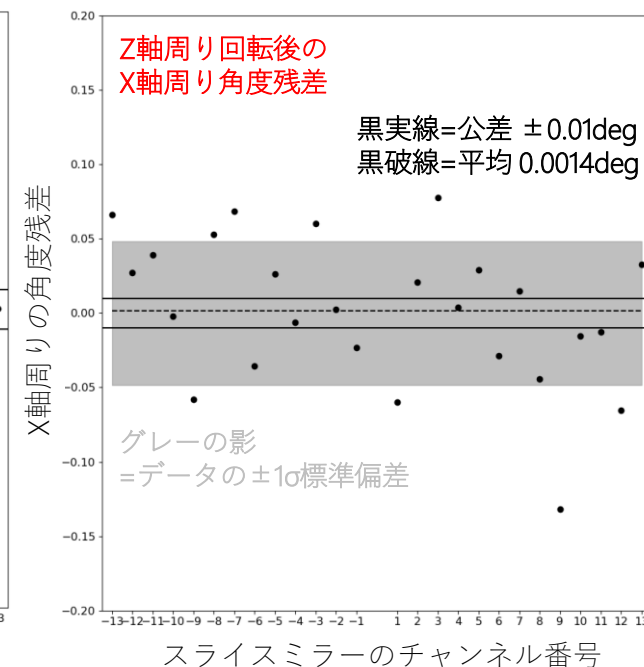
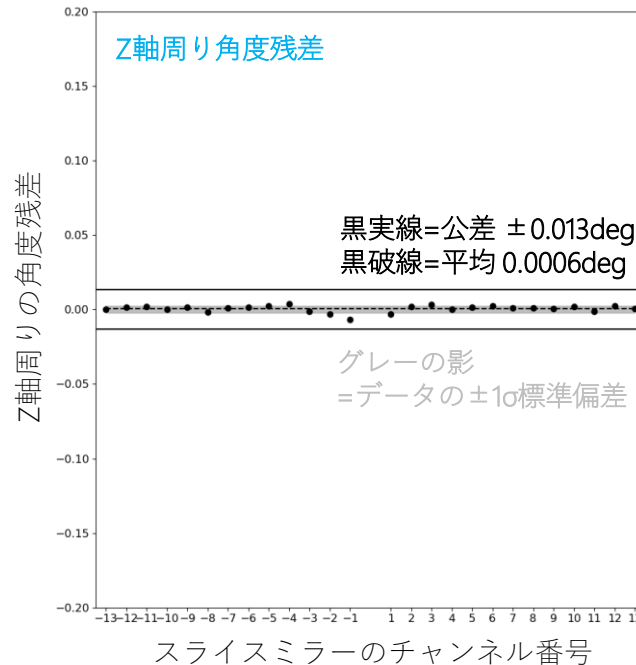
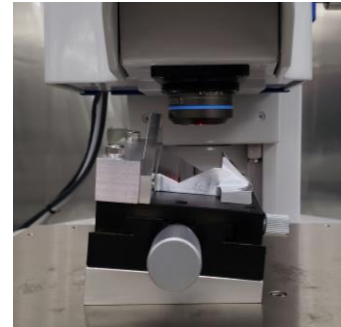
非接触三次元測定機 (8CH)

- Z軸周り残差
= $-0.002 \sim -0.001 \text{ deg}$
< 公差 0.013 deg
- X軸周り残差
= $0.007 \sim 0.015 \text{ deg}$
~ 公差 -0.01 deg

X線CT測定

(東大精密工学専攻
大竹豊准教授)

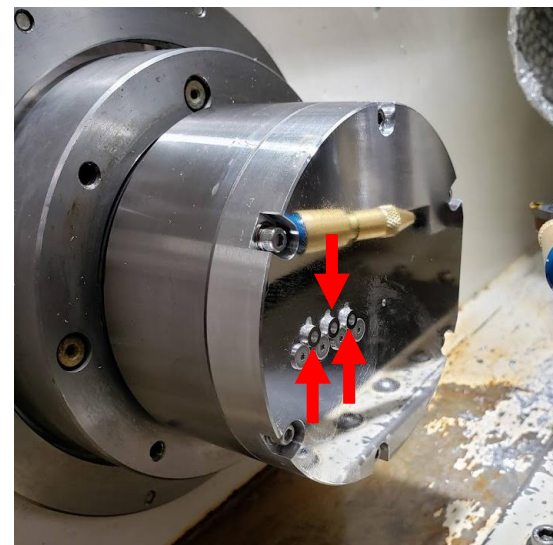
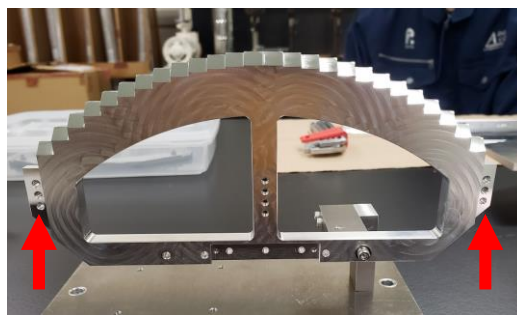
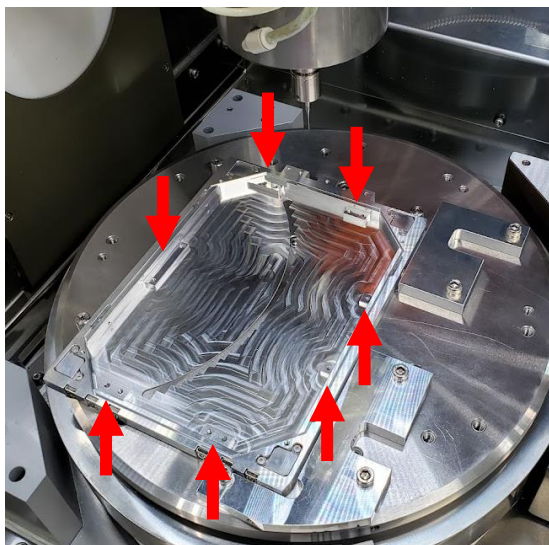
- 面フィット $\sigma \sim 3 \mu\text{m}$
- Z軸周りは全CHで公差内
- X軸周りは測定精度不足だが、平均値は公差内に含まれる



SWIMS-IFU 組み上げ調整

超精密加工を使用

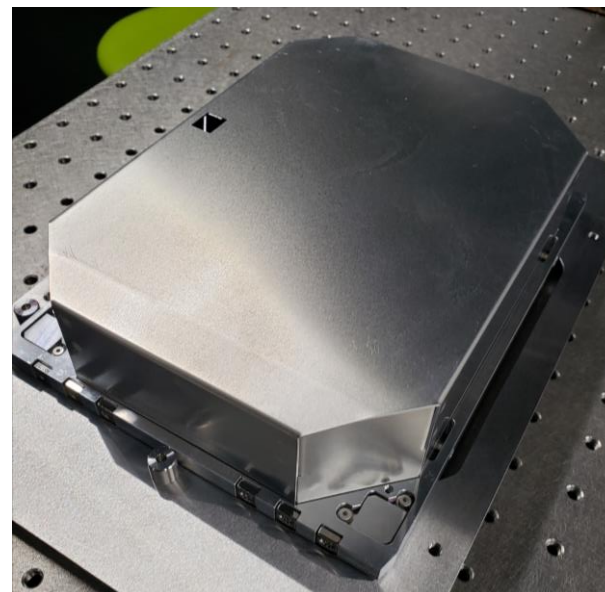
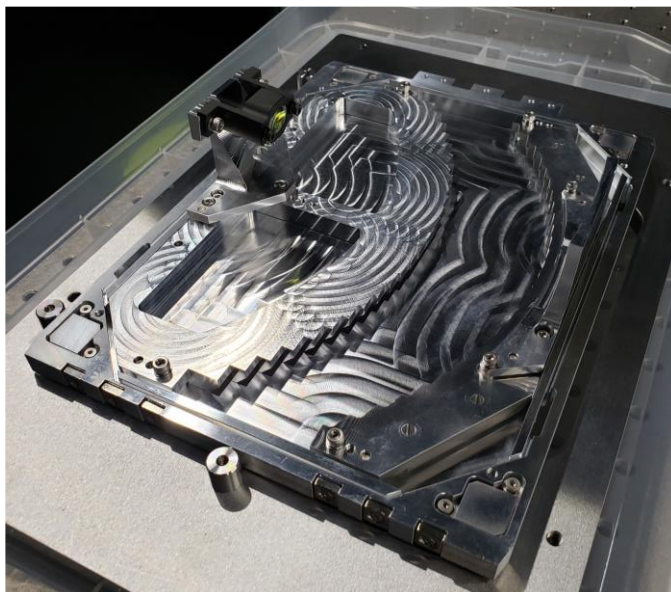
項目	精度	備考
ベースプレートの面出し加工	高さは $<3\mu\text{m}$ 平面度 $1-2\mu\text{m}$	ベースプレートを取り付ける面の平面度の影響
瞳ミラーアレイ&スリットミラーアレイの取り付け面加工	面と鏡面間の位置精度が加工機の精度で保証される \sim 数 μm	-
超精密加工で厚みを調整したシム	$\sim 1\mu\text{m}$ の精度で厚み調整可能	-



SWIMS-IFU 組み上げ調整

超精密加工を使用

項目	精度	備考
ベースプレートの面出し加工	高さは $<3\mu\text{m}$ 平面度 $1-2\mu\text{m}$	ベースプレートを取り付ける面の平面度の影響
瞳ミラーアレイ&スリットミラーアレイの取り付け面加工	面と鏡面間の位置精度が加工機の精度で保証される \sim 数 μm	-
超精密加工で厚みを調整したシム	$\sim 1\mu\text{m}$ の精度で厚み調整可能	-

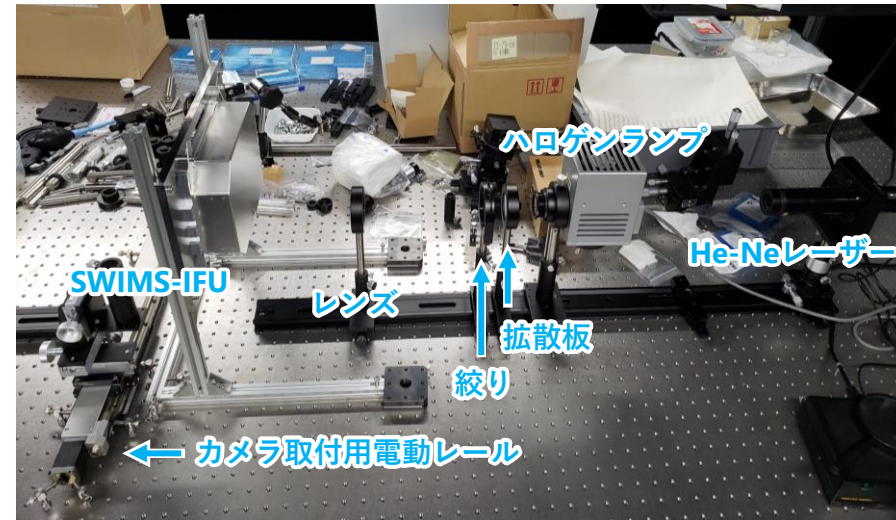


SWIMS-IFU 光学試験

光源 (可視光)

1. ハロゲンランプ+拡散版+絞り+レンズ
=すばる望遠鏡を模したF12.2の光
2. He-Neレーザー(633nm)+エクスペンダー
=光軸に平行な光束

→ PO1レンズを位置調整したのみで
要求精度を達成

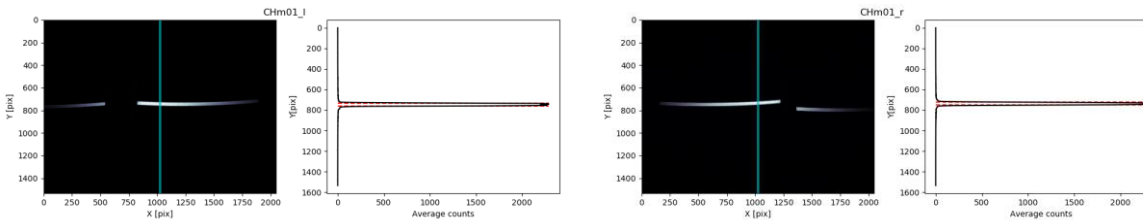
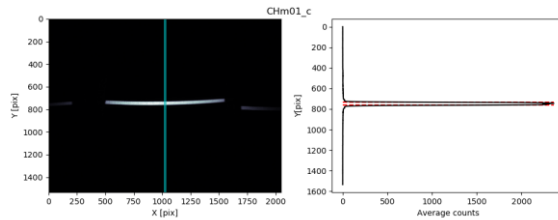
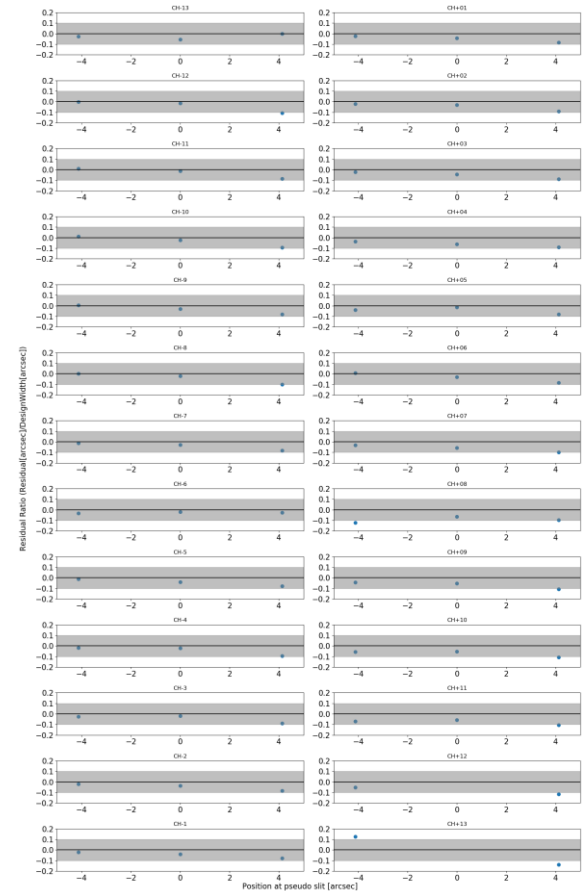


	内容	必要精度	結果
疑似スリット撮像	26CH分の疑似スリット像を取得し、その幅を確認	0.04" =設計値0.4"の10%	< 10% → OK
瞳像撮像	瞳ミラー上に結像する瞳像を取得し、想定外のケラレがないか確認	定性的な評価	想定通り → OK
スライスミラーアレイ撮像	スリットミラー側から光を入れ、PO0側から見えるスライスミラーアレイ像に想定外のケラレがないか確認	定性的な評価	想定通り → OK
射出光線方向確認	SWIMS-IFUから射出される光の方向が設計からどれだけずれているか確認	4mm/1m → ケラレ悪化~3%	~2.3mm/1mのずれ → ケラレ悪化は≦2% → OK

疑似スリット撮像

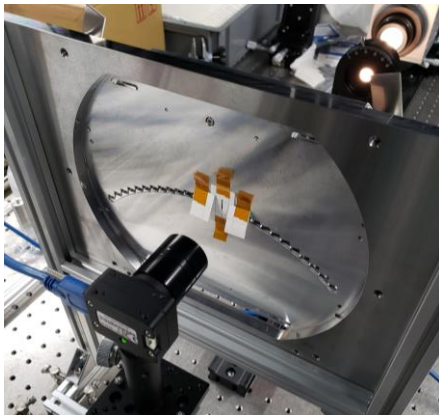
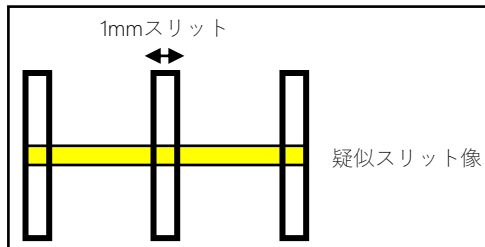
- 疑似スリット像の中心&両端付近で幅を測定
 - 設計からの残差を評価: $(w_{\text{measured}} - w_{\text{design}})/w_{\text{design}}$
- 要求精度 < 10%

- 残差は10%以内 → OK
- 右側が細い
→ スライスミラーの段差のケラレと定性的に一致

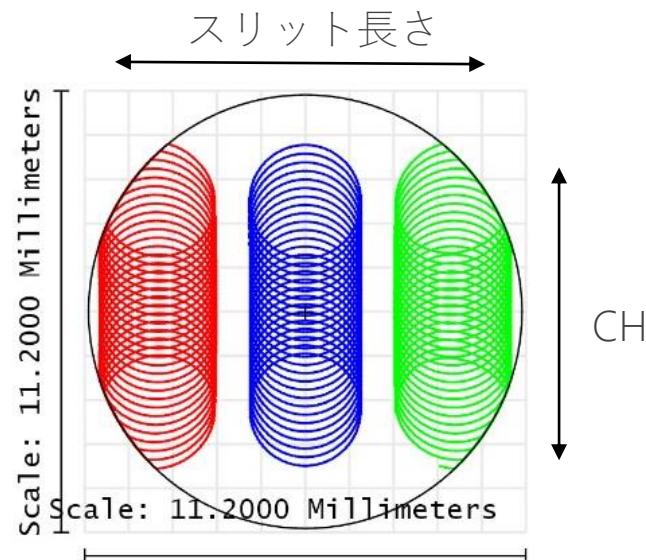


瞳像撮像

- 疑似スリットに垂直に1mmスリットを当てて、瞳ミラー上の瞳像を測定
- PO1レンズが小さいことによる想定されたケラレのみ → OK



PO1-2でのfootprint



CH+13

CH+6

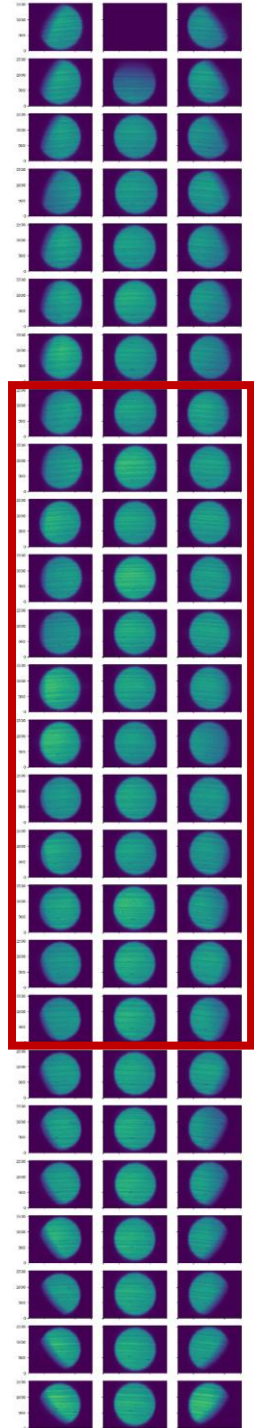
CH+1

CH-1

CH-6

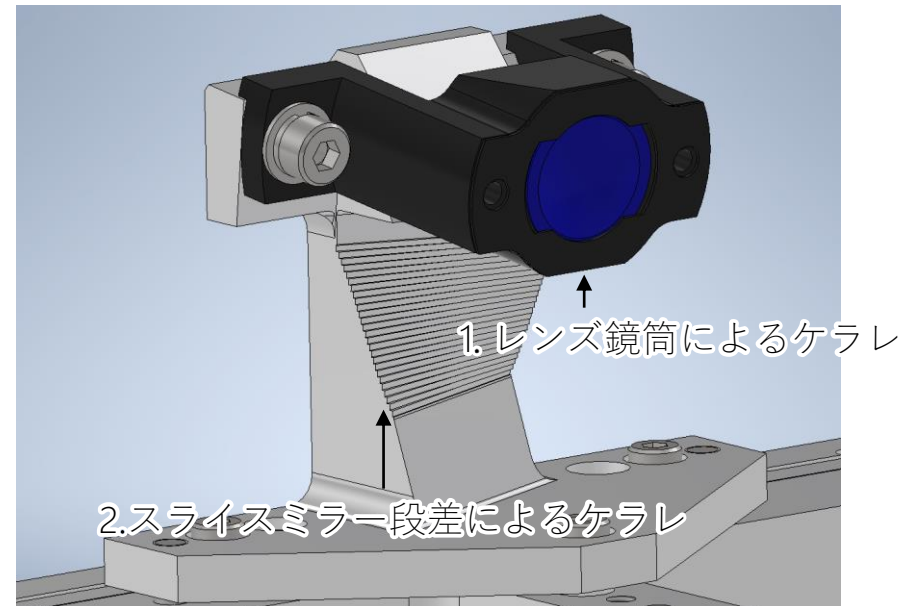
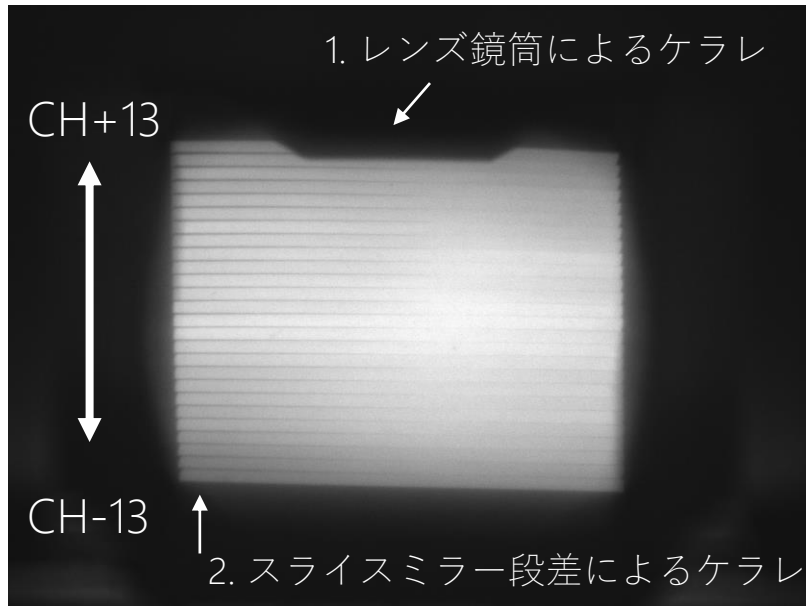
@Subaru

CH-13



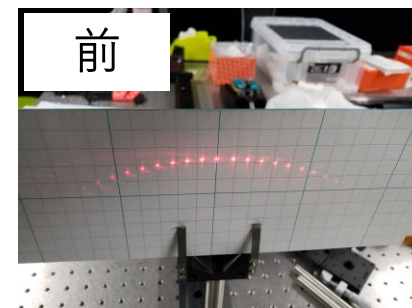
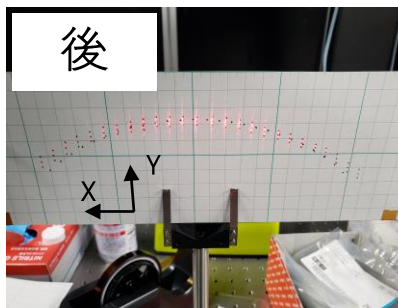
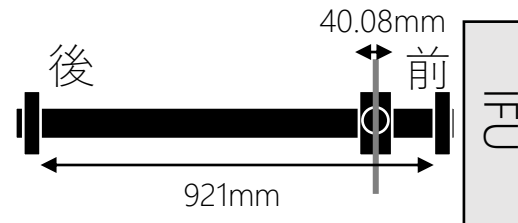
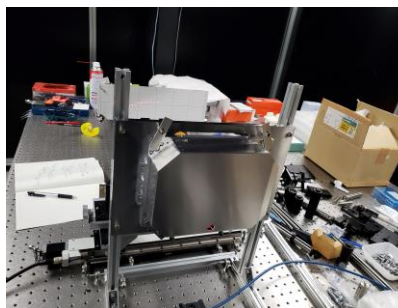
スライスミラーアレイ撮像

1. PO1レンズ鏡筒によるケラレが見える → CH+12, +13
2. スライスミラーの段差によるケラレが見える
 - 左側でスライスミラー間の影が広く見える → スライスミラーの段差が下にある側
 - 大きい部分ではスライス幅の~23%の幅

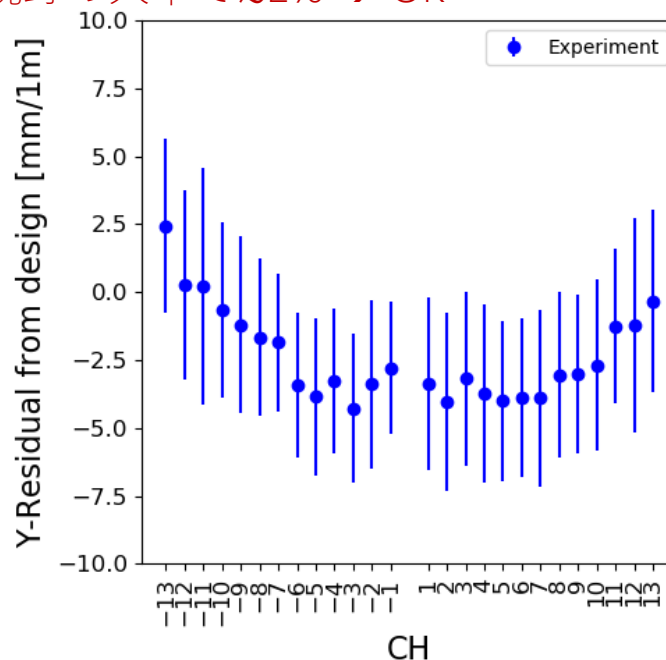
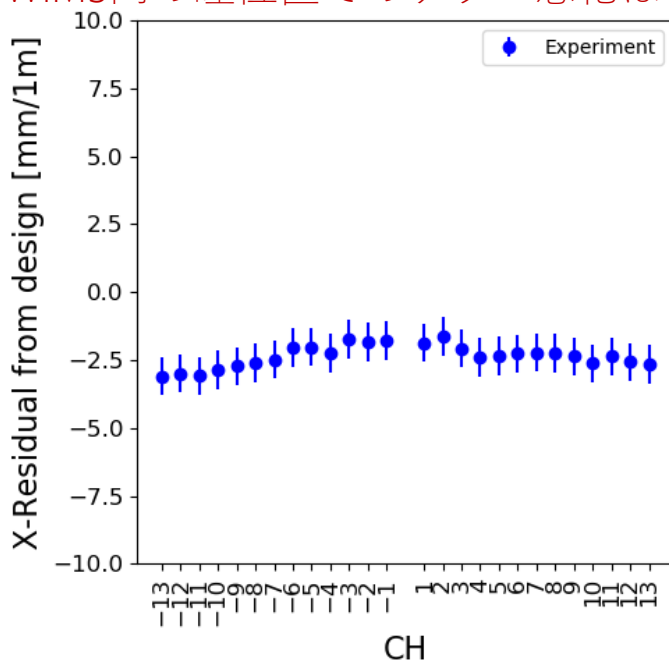


射出光線方向

- レールに沿った基線長1mに対してスリット長さ方向(X)、分散方向(Y)にどれだけ光線が動くか
 - 設計値と比較
 - 要求精度 4mm/1m



- X, Y方向ともに平均で-2.3mm/1mのずれ
 - SWIMS内の瞳位置でのケラレ悪化は視野の大半で $\leq 2\%$ → OK



SWIMS-IFU 今後の計画

SWIMS-IFUの光学素子開発と組み上げ調整は完了

→ 最終測定やハワイ輸送の準備を進める

- 試験項目は詳細検討中
 - SWIMS内でのロボットアームでの取り扱い試験
 - キャリブレーションデータ取得(フラット、Tr-Arランプ)

	2021年12月	2022年1月	2月	3月
SWIMS-IFU	<ul style="list-style-type: none">● 接触式 3次元測定	<ul style="list-style-type: none">● X線CT測定● 真空ベーキング	<ul style="list-style-type: none">● ハワイ輸送	<ul style="list-style-type: none">● SWIMSへの インストール● 各種試験
SWIMS		<ul style="list-style-type: none">● 21B共同利用 (1/6~31)	<ul style="list-style-type: none">● 22A共同利用 (2/3~2/12)	<ul style="list-style-type: none">● 3/27 Engineering● 22A共同利用 (3/27~4/17)

Summary

- SWIMS-IFUは既存の近赤外線面分光装置の中で**最大視野16".6x12".8を持つイメージライサ方式の面分光ユニット**である。
0.9-2.5umを一度分光できるSWIMSに面分光モードを追加し、空間的に広がった天体をより効率的に観測することができる。
- 装置内での収納や取り扱いのため、全体が**コンパクト(<220 x 170 x 60mm³)で数mmサイズのミラーが複雑に並んだ光学系**とする必要がある。
この光学系を高いアライメント精度を保ちながら作業負担を軽減し製作するため、**超精密切削加工による一体加工で光学素子開発**を進めてきた。
- SWIMS-IFUの**光学素子は2021年9月までにすべてが完成**した。
特にPO0+スライスミラーアレイは様々な角度を持った二種類のミラーを一体で加工し、その公差も厳しいものであったが、加工手法を確立し、ほぼ精度内で製作することができた。
- 組み上げはPO1レンズを位置調整したのみで、**光学試験で要求を満たす結果**となった。
今後は**SWIMSへのインストール作業を3月に行う予定**である。