

超精密加工による**SWIMS-IFU**用 スリットミラーアレイの製作

東京大学天文学専攻 修士2年

河野志洋

山形豊(理化学研究所), 森田晋也(東京電機大学),
尾崎忍夫, 都築俊宏(国立天文台), 本原顕太郎, 高橋英則,
小西真広, 加藤夏子, 寺尾恭範, 櫛引洸佑(東京大学)

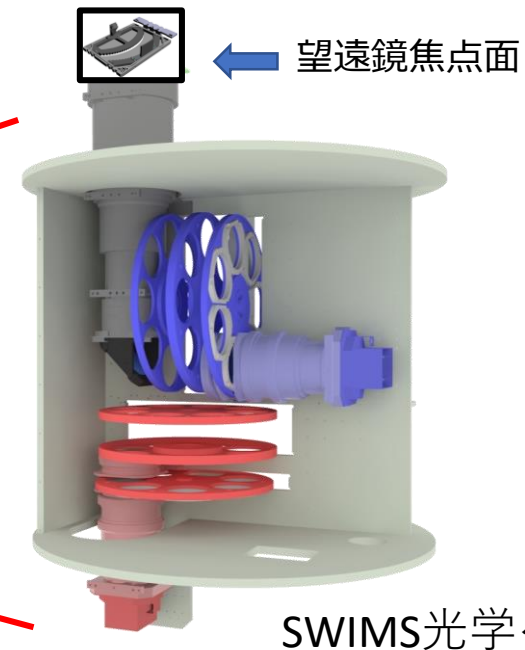
SWIMS

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

- TAO6.5m望遠鏡第1期装置
- 近赤外線領域の観測を行う
 - 撮像モード、多天体分光モード+面分光モード

⇒SWIMS-IFUの開発

2m



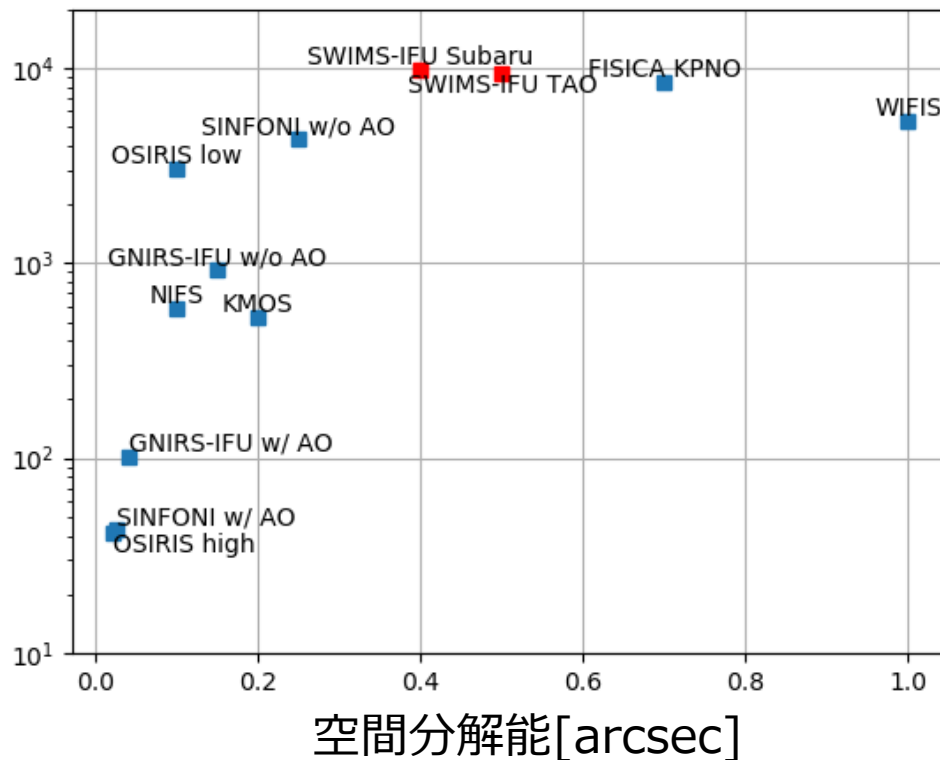
SWIMS-IFU (Integral Field Unit)

- イメージスライサー方式の面分光モジュール
- 近赤外線面分光装置における観測効率(視野×口径²)が最大

SWIMS-IFUの仕様値(TAO搭載時)

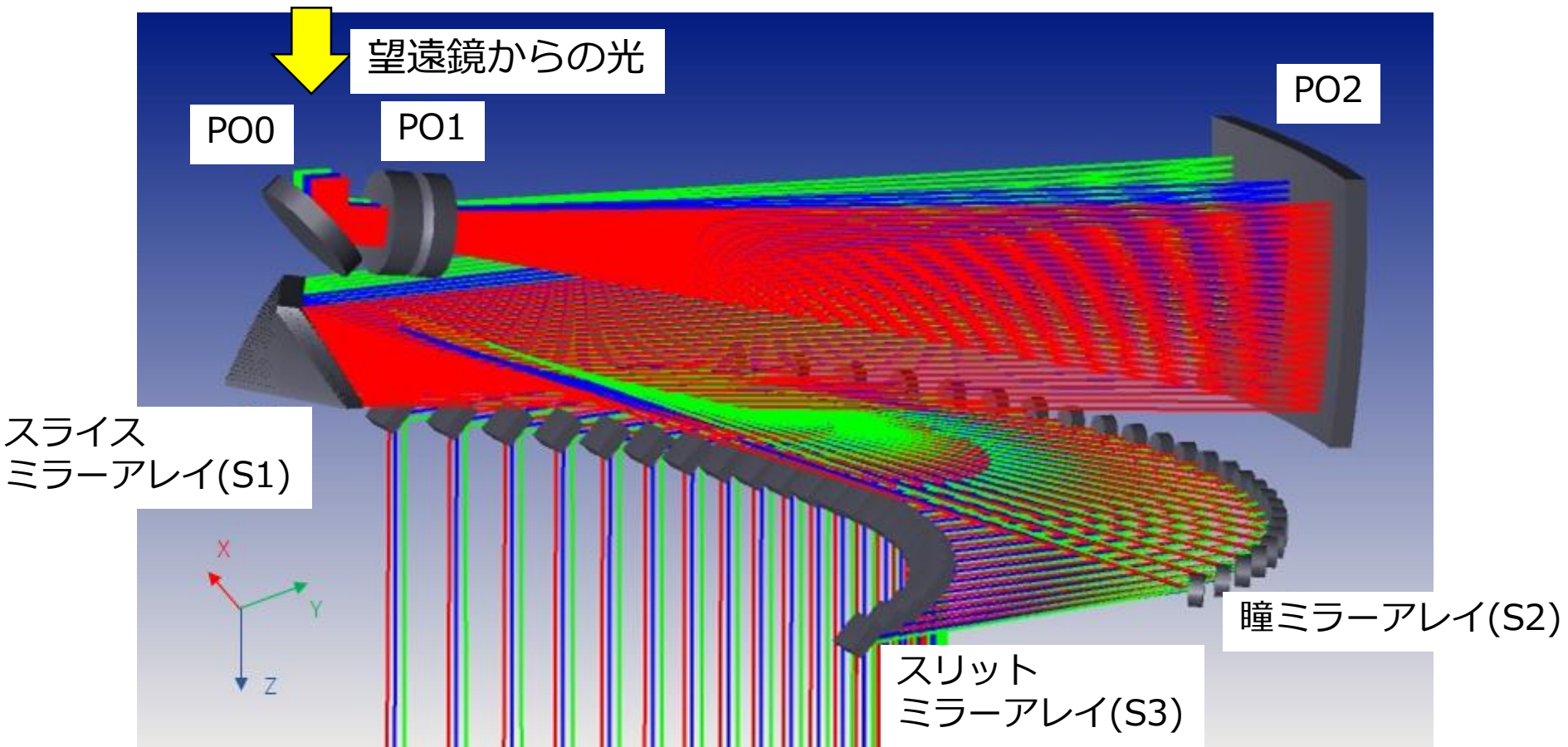
波長域	0.9-1.4 μ m(Blue) & 1.4-2.5 μ m(Red)
波長分解能	900-1400(Blue) & 700-1200(Red)
視野	17.2" × 12.8"
チャンネル数 (分割数)	0.5" × 26

観測効率

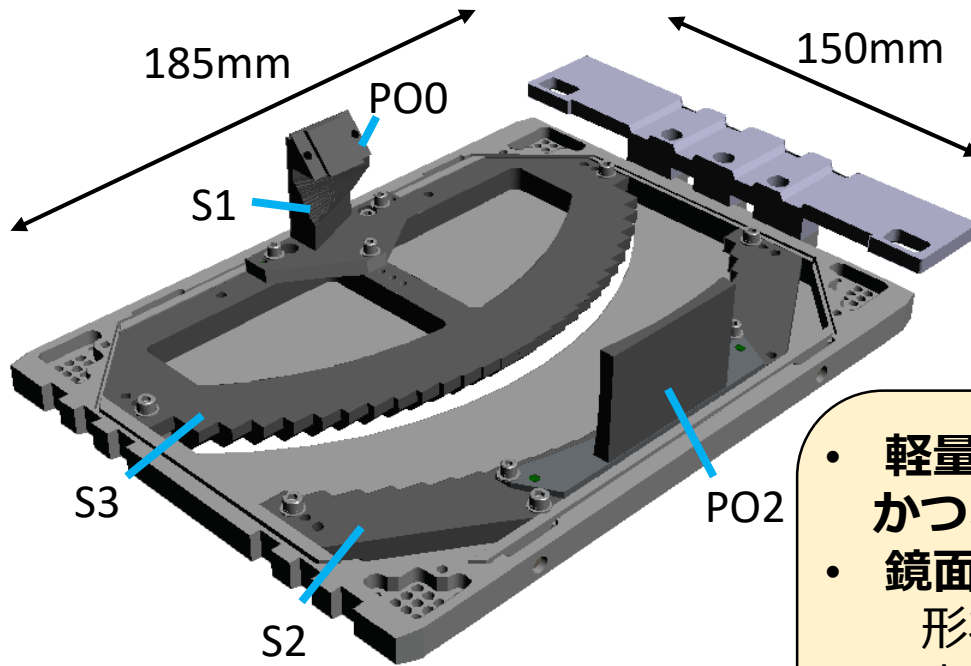


⇒近傍銀河の観測や
サーベイ観測に威力を発揮する

光学系



ミラー製作上の課題



- 軽量(<900g)
かつ、コンパクト(185mmx150mm)
- 鏡面に対する要求表面精度
形状誤差：<100nm P-V
表面粗さ：<10nm RMS
- ミラーアレイの鏡面間において
相対位置関係に高い精度が必要(~10 μ m)
⇒一体加工が必要

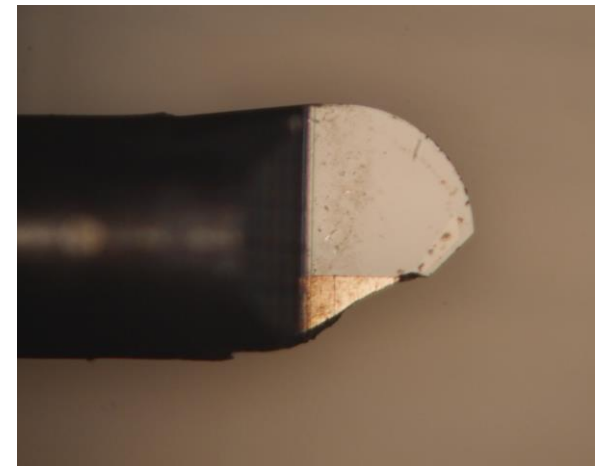
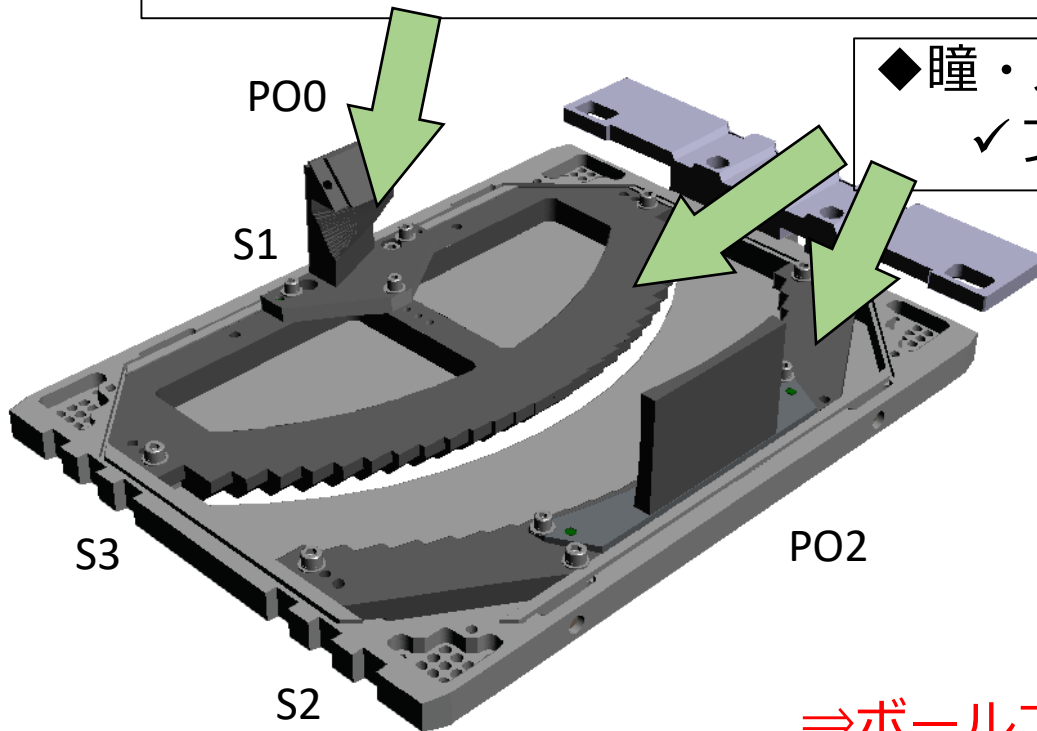
超精密切削加工での実現を試みている

超精密加工による鏡面加工

◆スライスミラーアレイ(S1)

- フラットエンドミルによる超精密切削加工
- 製作可能性が実証済み (Kitagawa PhD thesis, 2017)

◆瞳・スリットミラーアレイ(S2, S3) ✓フラットエンドミルでは加工不可



⇒ボールエンドミルによる製作を試みる
✓様々な工具姿勢で柔軟な加工が可能

特殊アルミ合金RSA6061

これまでの鏡面母材

一般的なアルミ合金

- ✓ 柔らかく、析出物が多いため光学面が得られにくい

Ni-Pメッキ

- ✓ 硬く、結晶が細かいため精度の高い鏡面が得られる
- ✓ 冷却環境下で鏡面が歪む

⇒これらのデメリットを解決する母材を検討

特殊アルミ合金RSA6061

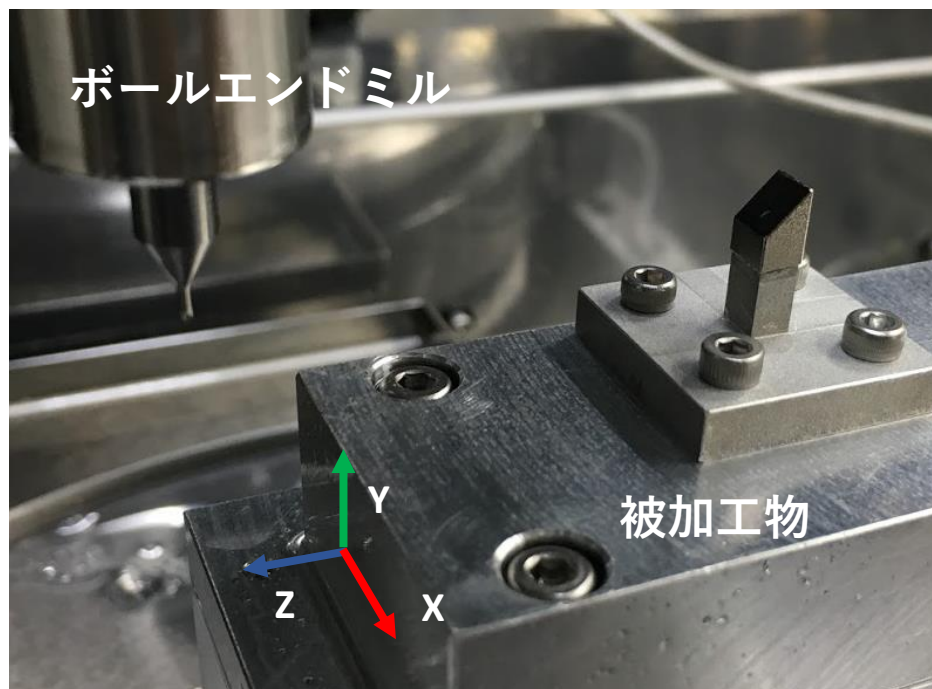
- ✓ アルミ合金A6061と同じ組成
- ✓ 急冷製法により、細かな結晶粒を実現
- ✓ 鏡面母材として用いることができる

⇒RSA6061での製作を試みる

ボールエンドミルによる鏡面加工

これまでに行った加工

- 鏡面加工の実証試験



形状：平面・球面・楕円面鏡
母材：Ni-Pメッキ、RSA6061

仕上がり面の表面精度

	Ni-Pメッキ	RSA6061
形状(P-V)	~40nm	~45nm
粗さ(RMS)	~7nm	~7.5nm

要求形状誤差：100nm P-V

要求表面粗さ：10nm RMS

⇒ボールエンドミル、RSA6061で加工可能であることを実証した。

スリットミラーアレイ加工試験

目的1：加工条件検証

すべてのミラーを同一の加工条件で加工することは困難
様々な加工条件における表面精度を確認

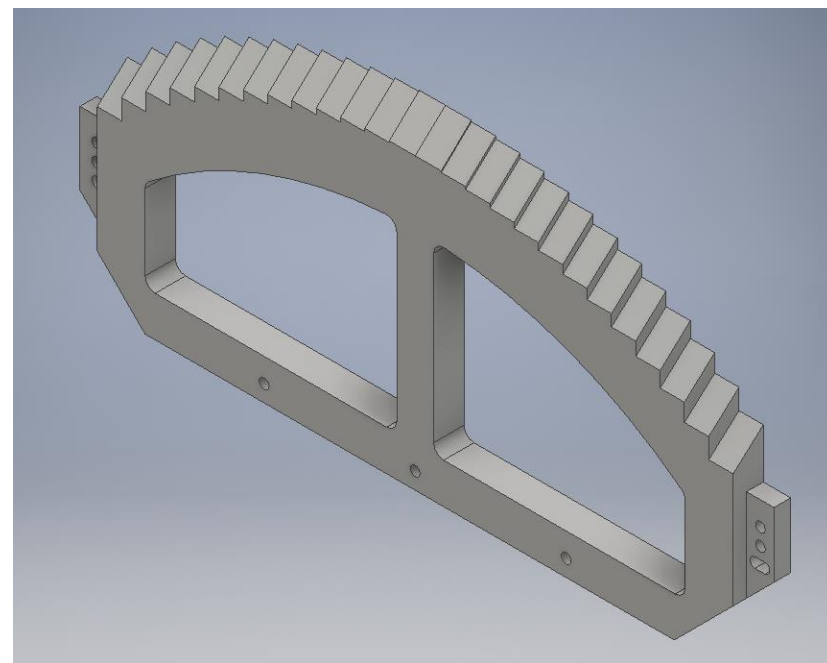
⇒最適な加工条件を決定する

目的2：一体加工の実証試験

一体加工のメリット

- 相対位置が機械精度で決定される

⇒ミラー間の相対位置精度の評価



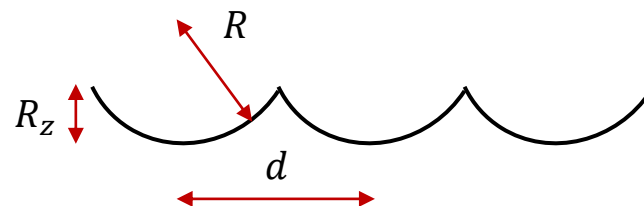
表面粗さに影響する加工条件

◆加工ピッチ(d)

- ・ 切削による理論的なP-V値

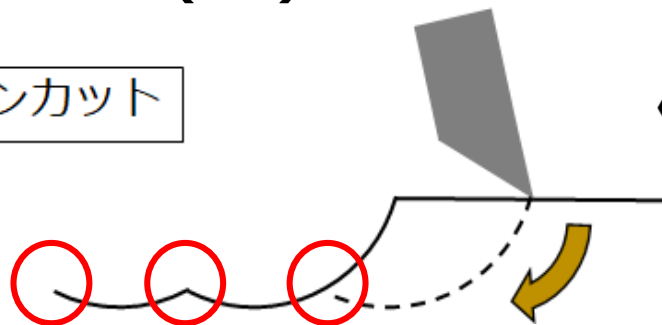
$$R_z = \frac{d^2}{8R}$$

⇒表面粗さが2乗に比例する



◆ダウンカット(DC)・アップカット(UC)

ダウンカット



バリが残る

◆加工ピッチ(d)

バリが除去される

- ・ 切削による理論的なP-V値

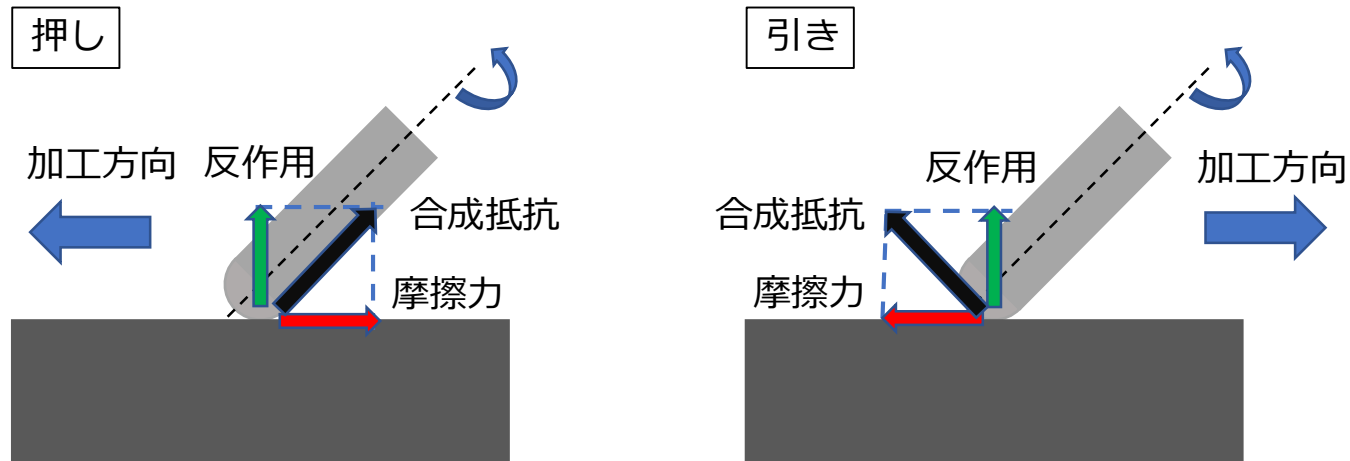
$$R_z = \frac{d^2}{8R}$$

⇒表面粗さが1乗に比例する

⇒アップカットは良好な表面粗さが得られやすい

形状誤差に影響する加工条件

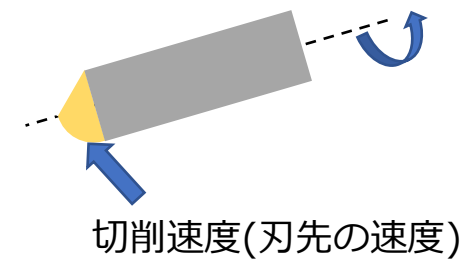
◆加工方向(押し引き)



⇒引きでは工具が振動し得る

◆切削速度(回転速度)

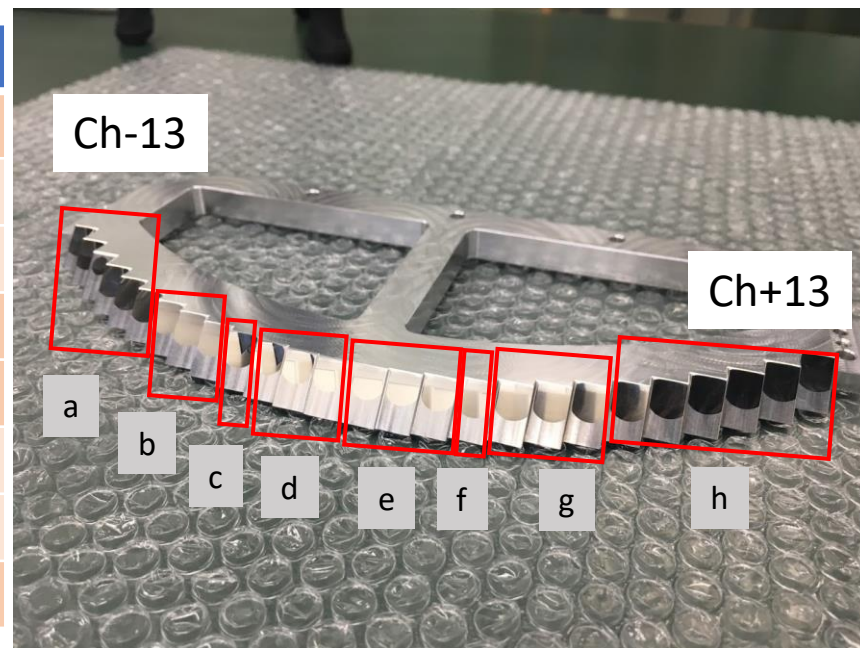
- 抵抗の大きさは切削速度に反比例
⇒遅い刃先では工具への負荷が大きい



スリットミラーアレイ加工試験

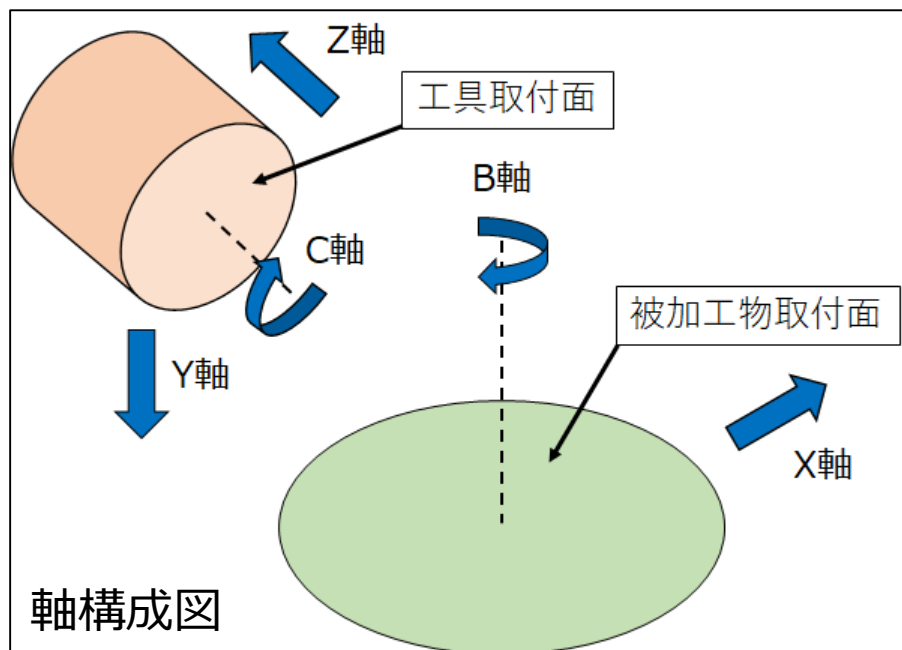
	UC/DC	切削速度	加工方向
a	アップカット	740mm/sec	引き
b	アップカット	740mm/sec	押し
c	アップカット	440mm/sec	押し
d	アップカット	440mm/sec	引き
e	ダウンカット	440mm/sec	引き
f	ダウンカット	440mm/sec	押し
g	ダウンカット	740mm/sec	押し
h	ダウンカット	740mm/sec	引き

加工ピッチ：10 μ m、母材：A6061



ULG-100D(5A)

理化学研究所所有の5軸超精密加工機



	ストローク	最小単位	繰り返し精度
X軸	450mm	0.1nm	± 50nm
Y軸	150mm	0.1nm	± 50nm
Z軸	300mm	0.1nm	± 50nm
B軸	± 100deg	0.036"	± 2"
C軸	無限	0.036"	± 5"

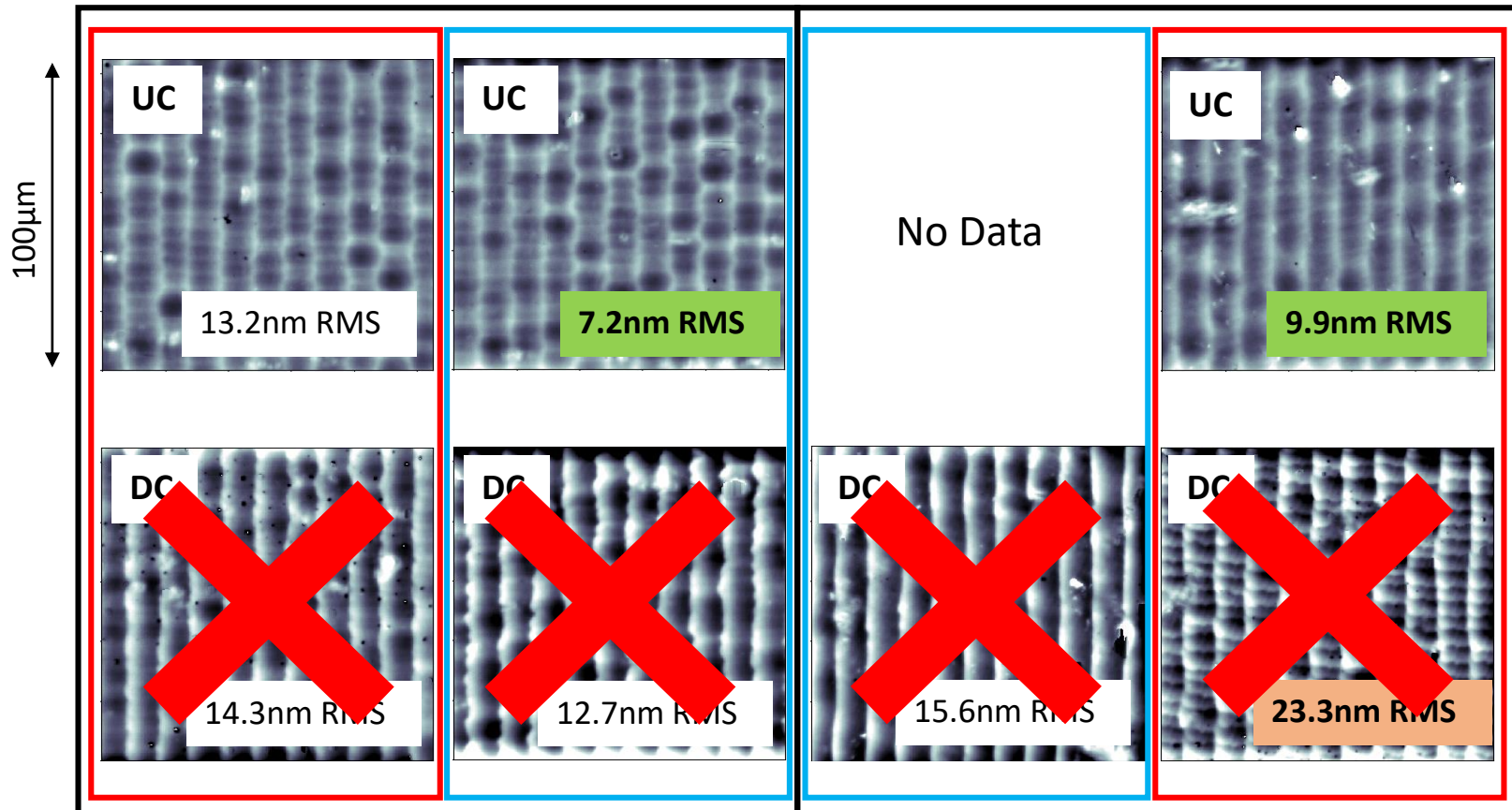
表面粗さ

表面粗さ測定(Zygo NewView7200)

加工方向：押し
加工方向：引き

同時2軸, 440mm/sec

同時3軸, 740mm/sec



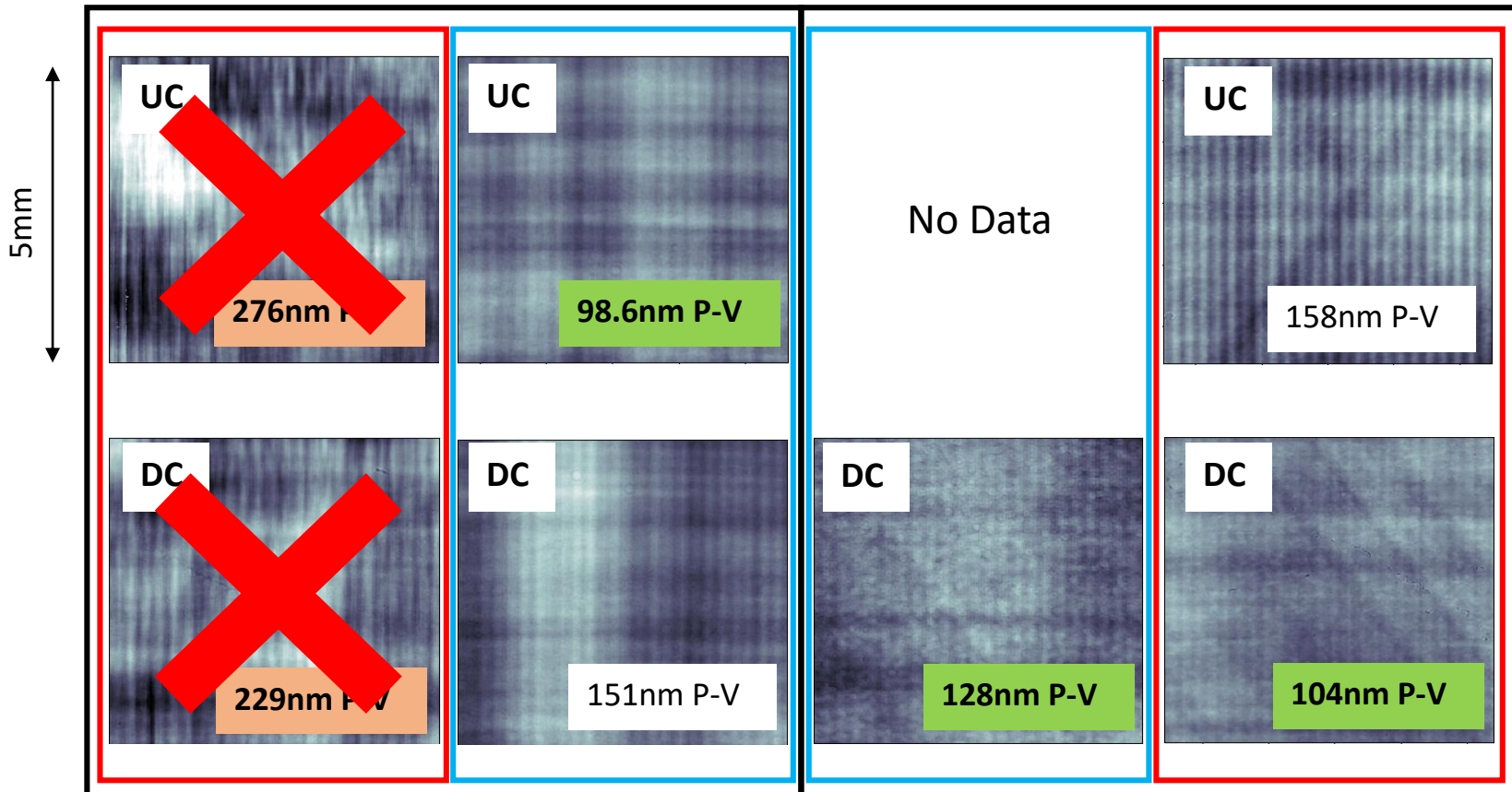
形状誤差

形状測定(Zygo Verifire)

加工方向：押し
加工方向：引き

同時2軸, 440mm/sec

同時3軸, 740mm/sec



最適な加工条件

◆表面粗さ

- **アップカット**によって良好な表面粗さが得られる

◆形状誤差

- **押し加工**によって小さな形状誤差が得られる
- **速い切削速度**であれば引き加工でも要求精度を満たす

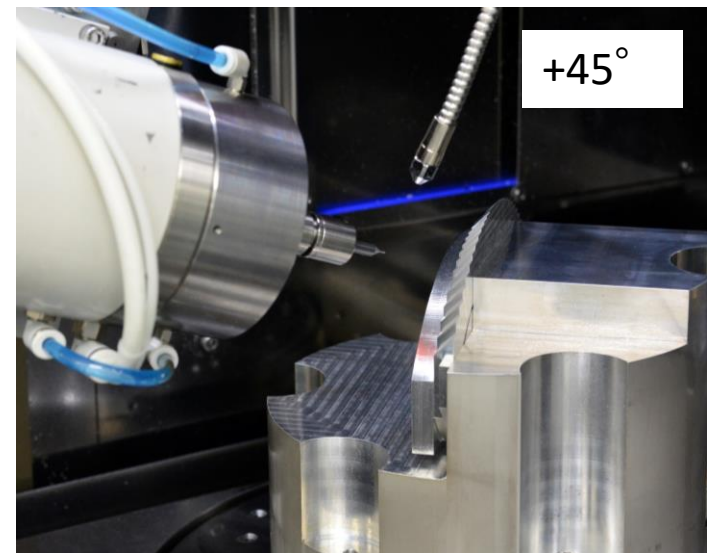
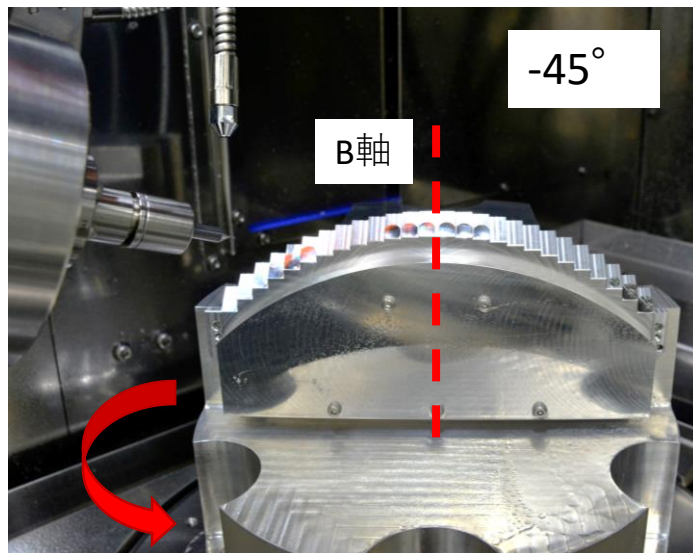
これらを踏まえた加工条件の設定により
すべての鏡面で要求精度を満たすことが可能

ミラー間の相対位置

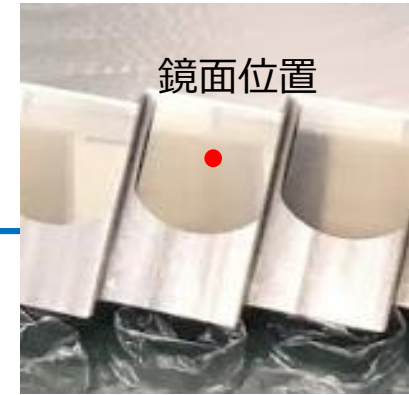
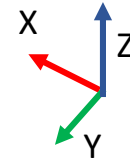
- 加工機のストローク不足により、B軸を回転させる必要がある

⇒回転によって相対位置誤差が生じ得る

回転角	チャンネル
+45°	Ch-13~-5
0°	Ch-4~+4
-45°	Ch+5~+13

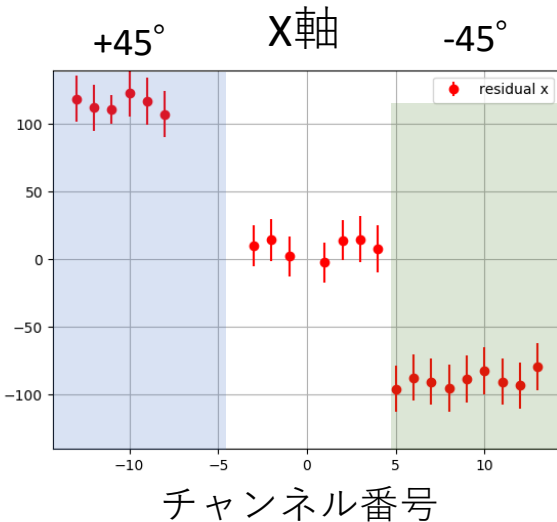


相対位置誤差

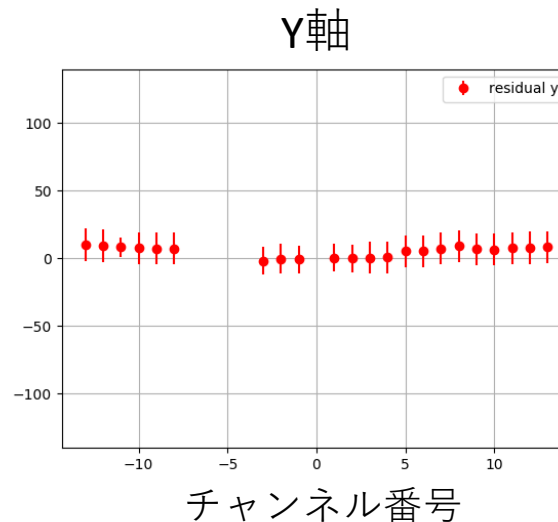


- 3次元測定器で鏡面の位置を測定

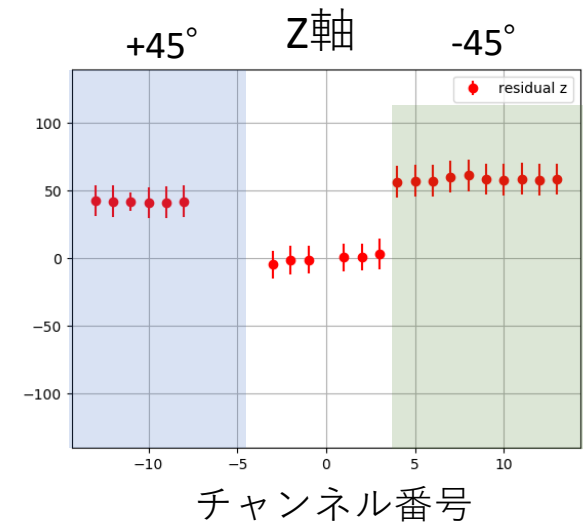
設計値からのずれ



➤ ±100μmのずれ

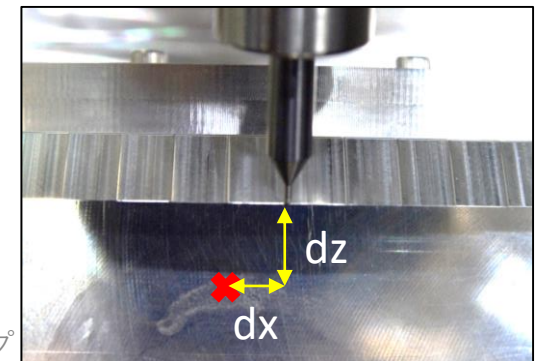


➤ 誤差の範囲でずれなし



➤ +50μmのずれ

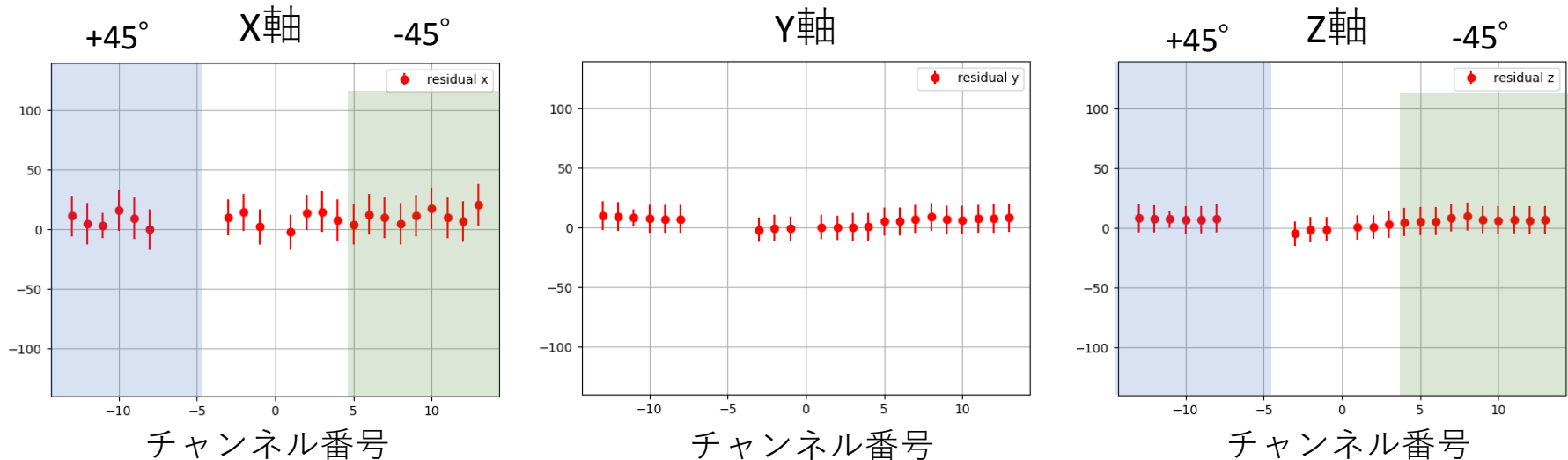
B軸の回転角ごとに鏡面位置がシフト
⇒ミラーアレイが回転軸に対してずれている



期待される相対位置精度

- シフトを説明する回転モデルを構築
⇒ $dx=12\mu\text{m}$, $dz=147\mu\text{m}$

設計値からのずれ



回転軸に対するずれが無ければ、

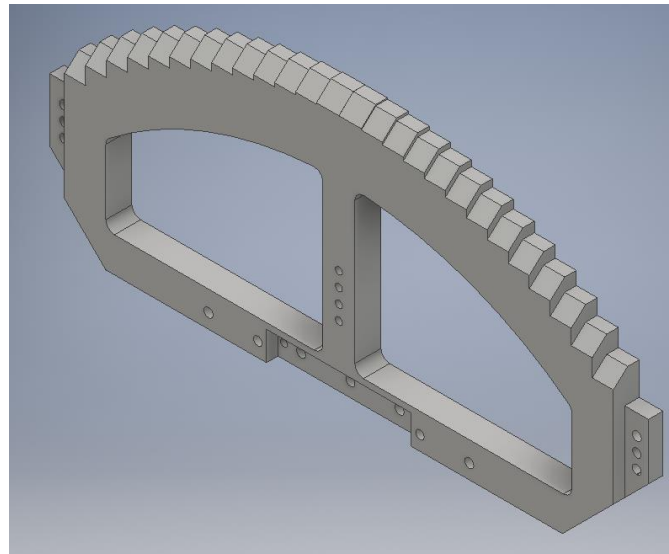
加工機の精度として $\pm 6\mu\text{m}$ 程度の相対誤差

✓アライメント精度を向上させることで十分な相対位置精度が達成可能

今後の開発計画

2019年2月～3月

- スリットミラーアレイの本加工



2019年4月～

- 本加工
 - ✓ 瞳ミラーアレイ+PO2ミラー
 - ✓ スライスミラーアレイ
- 支持構造、レンズユニット等の作製
⇒ 組み上げ・試験へ

まとめ

SWIMS-IFU用スリットミラーアレイの製作可能性を実証した。

- ボールエンドミルによるスリットミラーアレイ実証試験
 - ✓ 表面精度に影響を及ぼす加工条件の検証
 - 表面粗さ：アップカット
 - 形状誤差：工具への加工負荷
 - ✓ 一体加工の実証
 - 軸ズレにより相対位置がずれた
 - アライメントの改善により十分な精度が見込める