

# 低温装置における 鏡材選定の重要性とその評価

---

北川祐太郎 (東京大学 天文学教育研究センター)

<Collaborator>

山形豊、森田晋也 (理化学研究所 先端光学素子開発チーム)

尾崎忍夫(国立天文台 TMT推進室)、SWIMSチーム (東大天文セ)

# 本日のお話すること

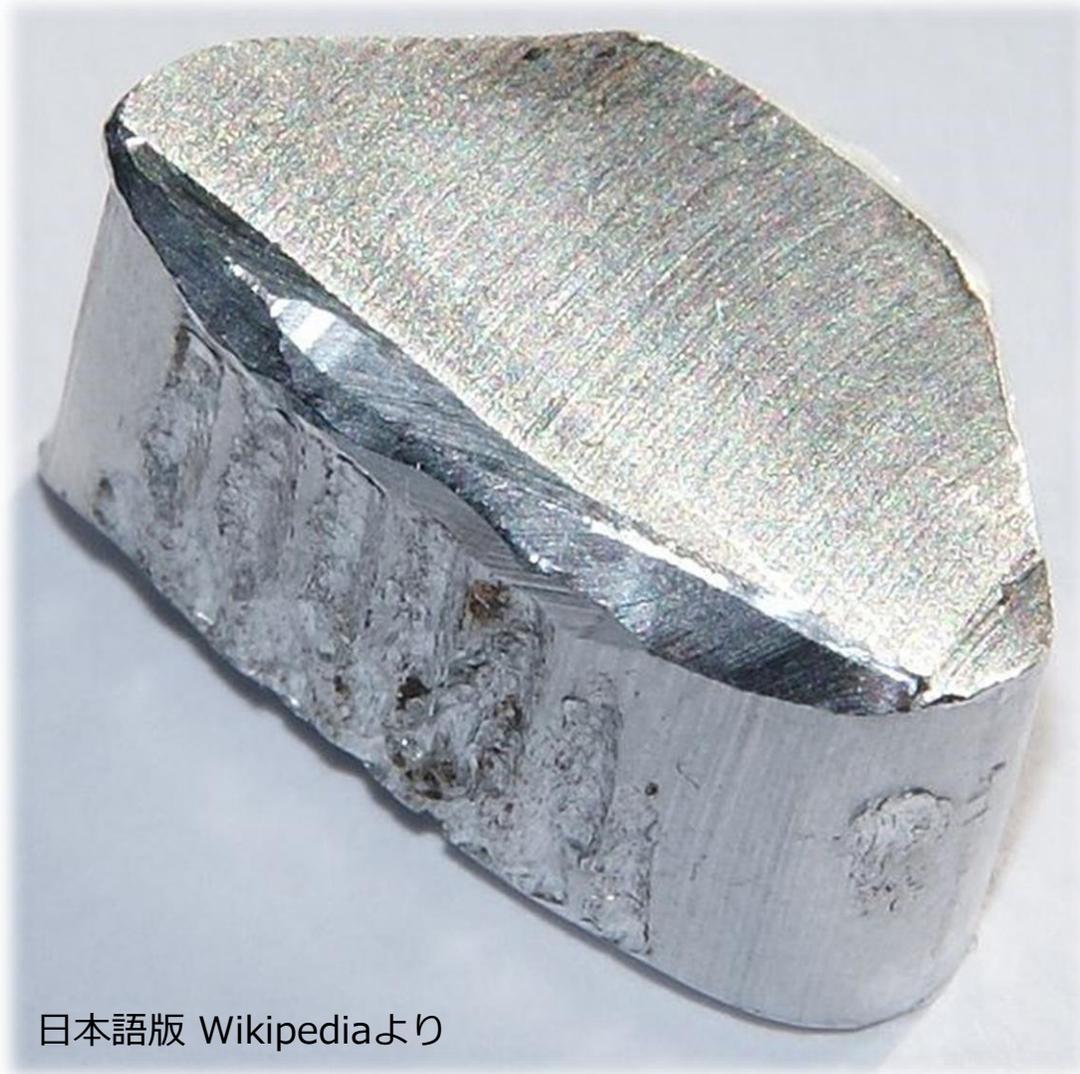
- (1) 赤外装置で用いられる鏡材
- (2) 超精密切削加工の必要性
- (3) 低温での鏡面形状測定

## 本研究の目的

冷却環境下で使用される光学素子において、最適な鏡材を見出す

注) 本講演では「鏡材」として、特にアルミニウム合金を取り上げる

# (1) 赤外装置で用いられる金属鏡材の例



日本語版 Wikipediaより

## ✓ アルミニウム (合金)

– 非鉄金属において代表的な金属材料

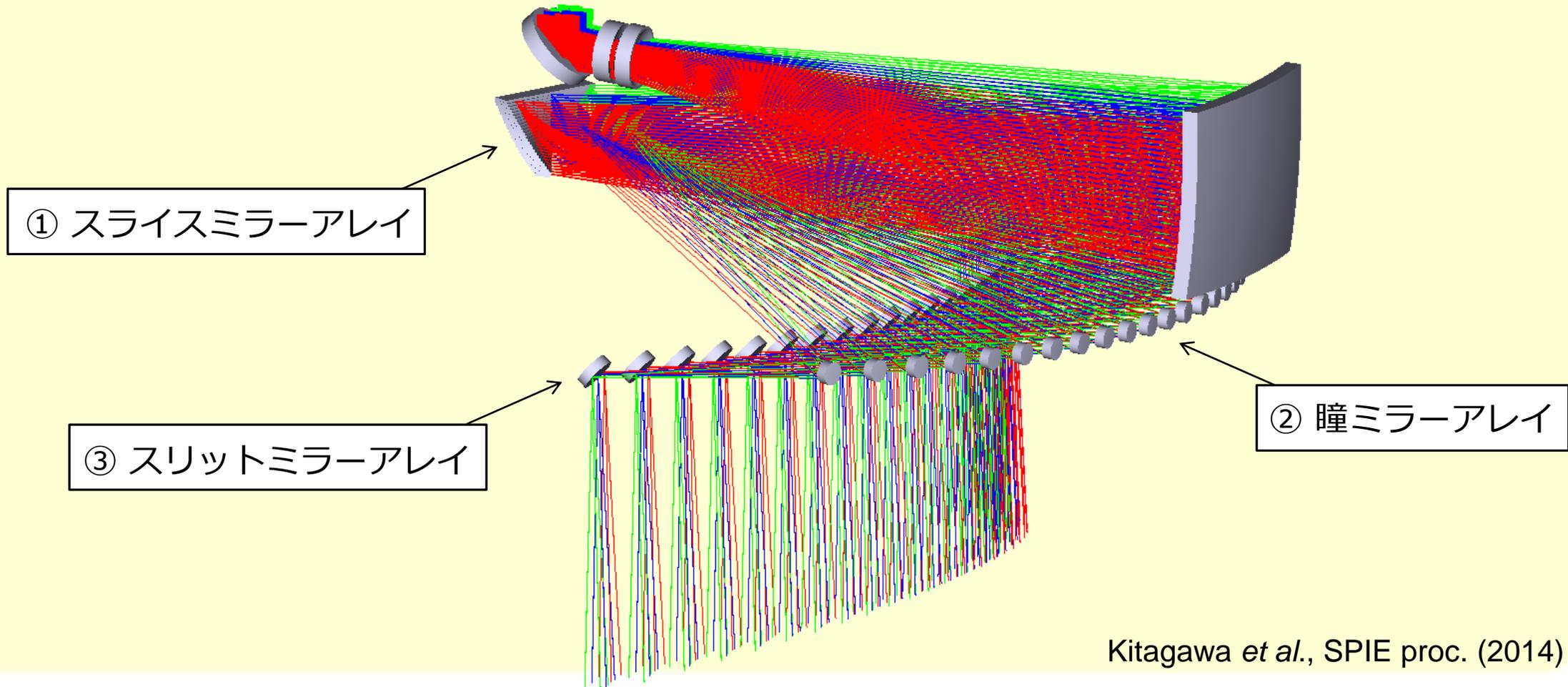
### 赤外装置における利点

- 1) 軽い ( $\sim 2.7 \text{ g/cm}^3$ )
- 2) 加工性が良い
- 3) 熱伝導性よし
- 4) 比強度高し
- 5) 真空特性よし

## (2-1) 超精密切削加工の必要性

✓ 近年、複雑形状をもつミラーアレイの需要が高まっている

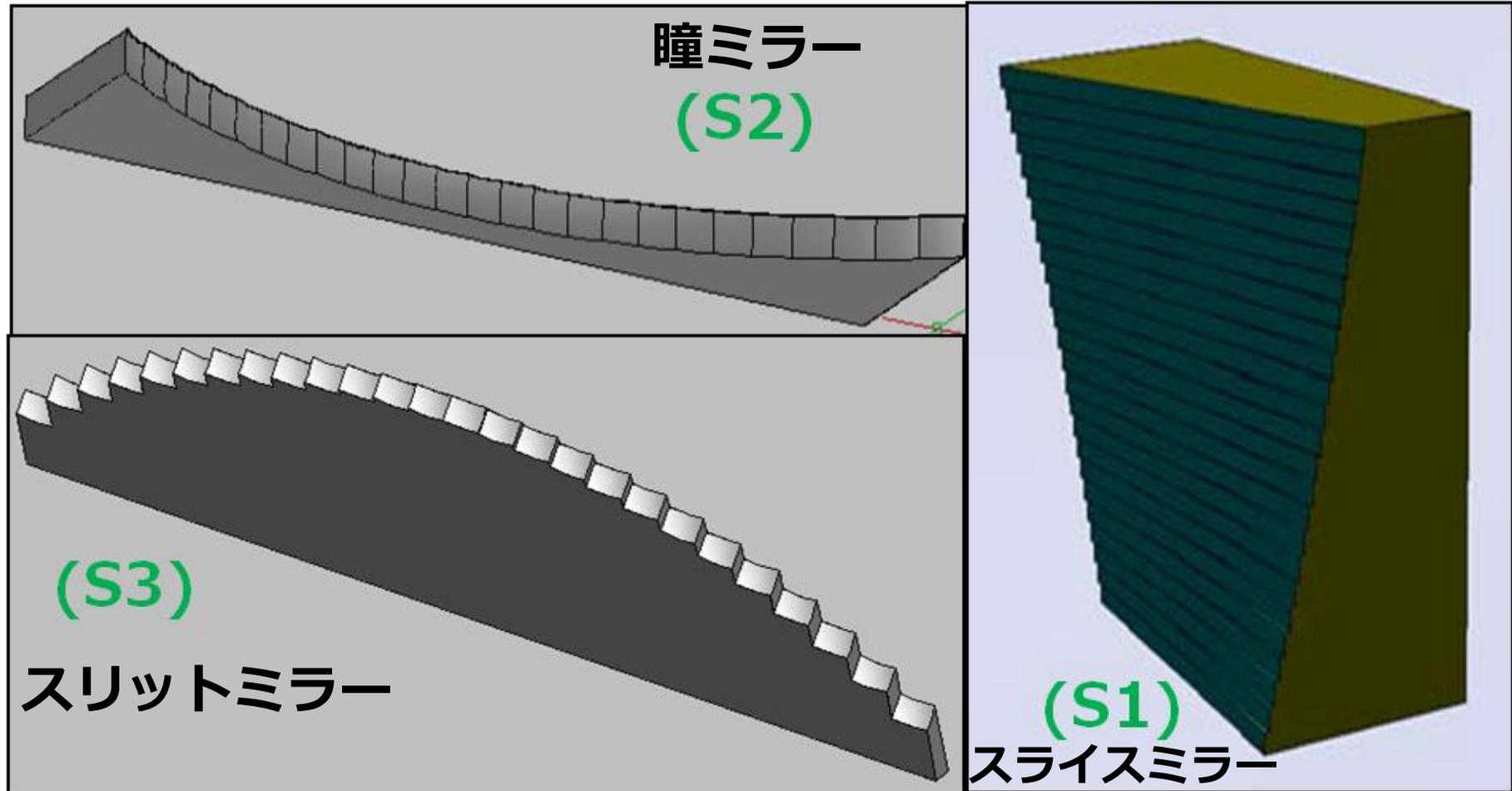
<イメージスライサー型面分光ユニット SWIMS-IFU>



Kitagawa *et al.*, SPIE proc. (2014)

## (2-1) 超精密切削加工の必要性

- ✓ 近年、複雑形状をもつミラーアレイの需要が高まっている



## (2-2) ミラーアレイ製作の問題点

- ✓ 作るだけなら、(おそらく) 難しくはない  
しかし…

天体観測では光子を少しでも多く集めたい ⇔ 表面精度に要求値が存在

加工可能性と表面精度の両立が課題

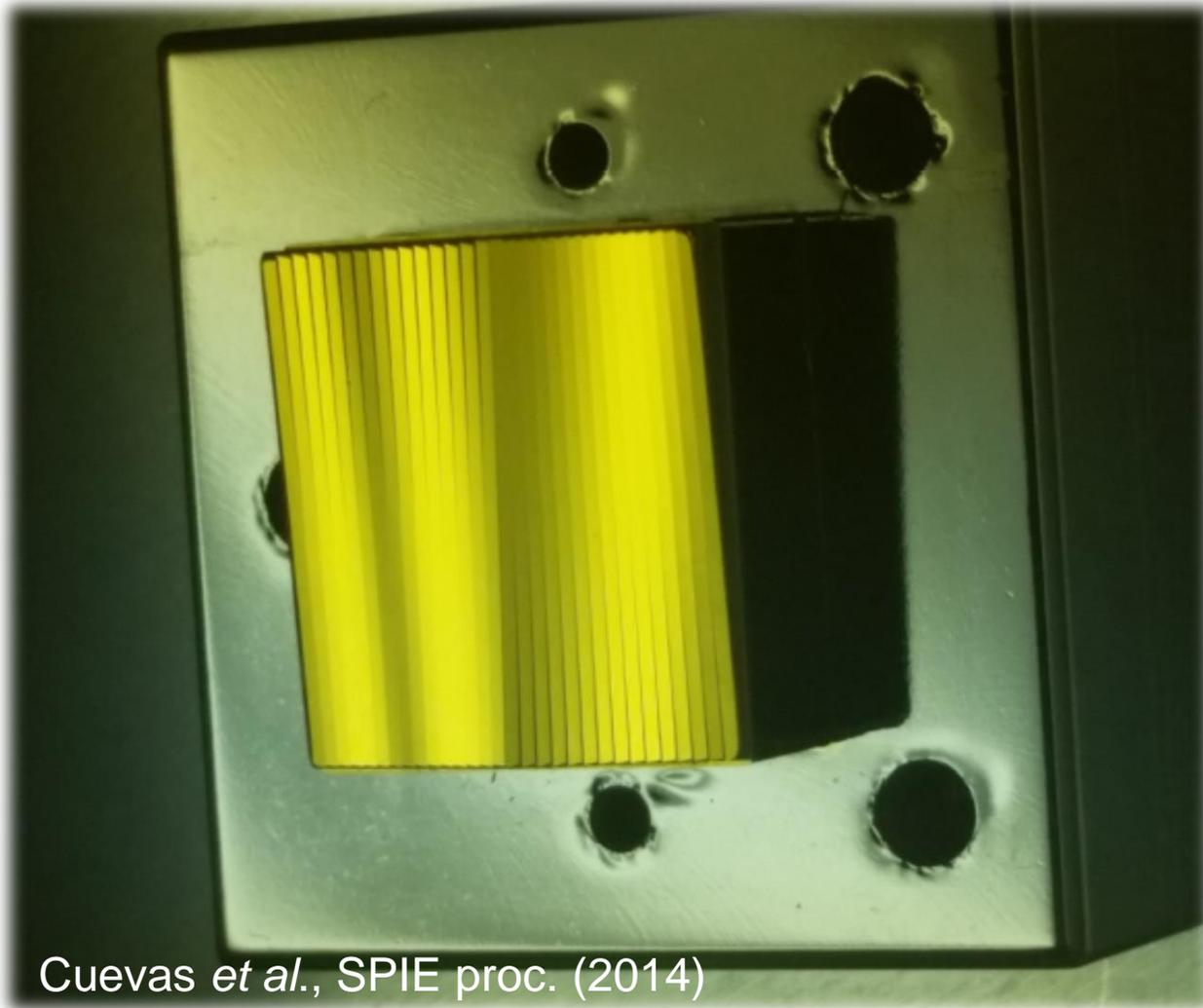
### 研磨加工 (主に硝材)

- 長所  
表面粗さが小さい  
確立された手法
- 短所  
熱設計の複雑さ  
複雑形状・非球面加工の困難

### 切削加工 (主に金属材料)

- 長所  
支持構造と同じ母材を選べる  
非球面加工が容易
- 短所  
表面粗さ、形状誤差が  
(研磨加工と)大きい

## (2-3) 超精密切削加工による IFU ミラーアレイ製作



### ✓ FRIDA/GTC の例

- 0.4mm x 13.2 mm /slice (スライス数 30)
- 形状：シリンドリカル (凹面)
- 平均表面粗さ  $R_a = 4.5 \text{ nm}$

現在の超精密加工機を用いれば、  
赤外域で要求される表面粗さ、形状精度は達成可能

Cuevas *et al.*, SPIE proc. (2014)

# (3-1) 超精密切削加工に用いる母材

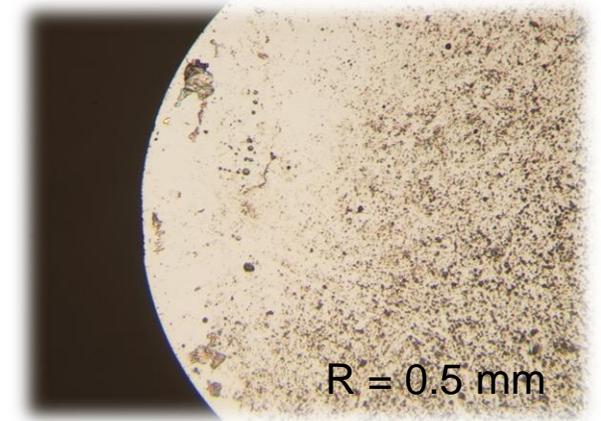
## ✓ 超精密切削加工

- ・ダイヤモンド工具の形状を母材に精確に転写する  
——→ 母材に何を选ぶかは重要なパラメータ

- ・アルミ合金の場合

副成分の種類によって、切削性が異なってくる

合金名	A2024	A5052	A6061	A7075
組成	Al-Cu	Al-Mg	Al-Mg-Si	Al-Zn-Mg



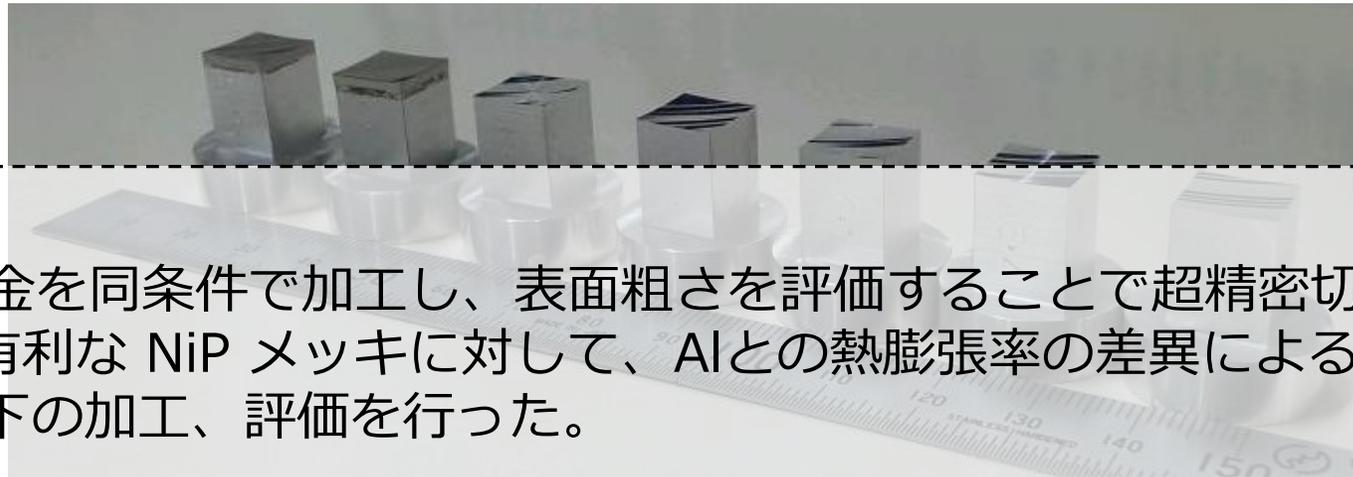
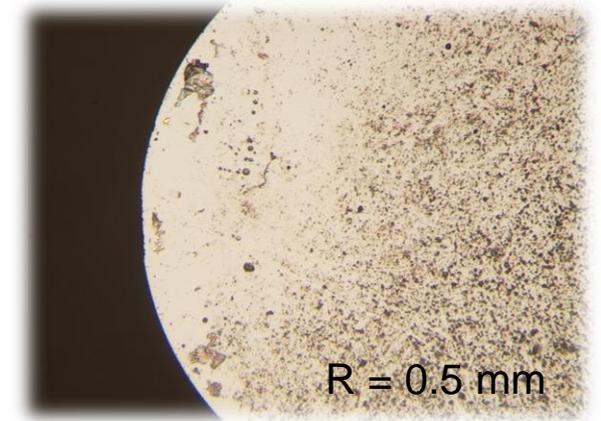
# (3-1) 超精密切削加工に用いる母材

## ✓ 超精密切削加工

- ・ダイヤモンド工具の形状を母材に精確に転写する  
——→ 母材に何を选ぶかは重要なパラメータ

- ・アルミ合金の場合

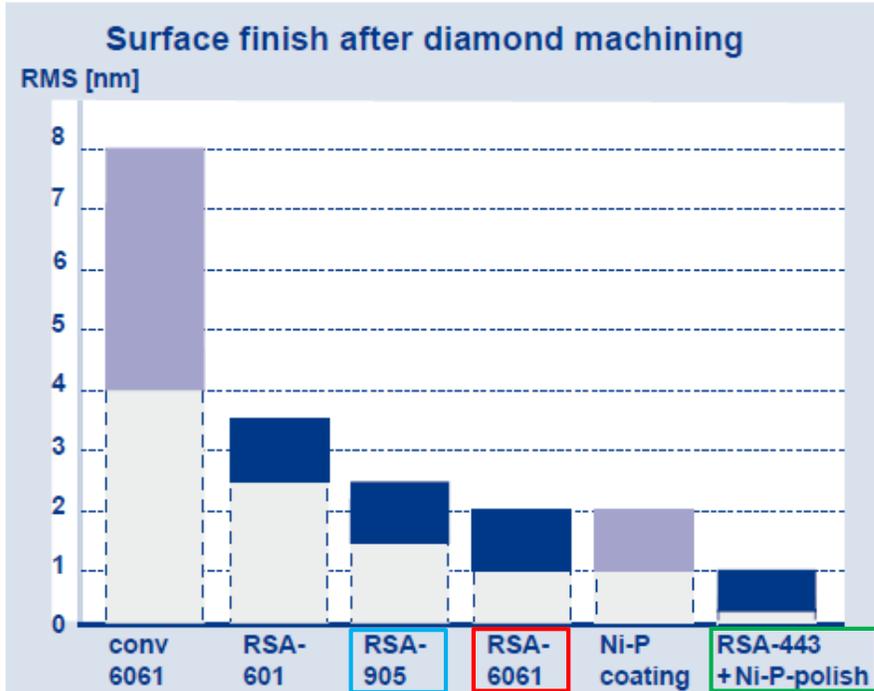
副成分の種類によって、切削性が異なってくる



本研究では、

- [1] 各種 Al合金を同条件で加工し、表面粗さを評価することで超精密切削加工に最適な母材の探索
- [2] 切削性で有利な NiP メッキに対して、Alとの熱膨張率の差異によるが低温での形状歪みの評価を目的として以下の加工、評価を行った。

# (3-2) 光学素子用途に最適化されたアルミニウム合金



✓ RSP社製 光学素子向けシリーズ

- **RSA-6061** : 急冷処理による粒形の極小化
- **RSA-443** : NiPに熱膨張率を合致
- **RSA-905** : 単体で直接研磨が可能 (試験段階)

Alloy	Condition	Typical composition
<b>RSA-6061</b>	T6	Al Si0,6 Cu0,3 Mg1,0 (AA6061)
<b>RSA-443</b>	AE	Al Si40
<b>RSA-905</b>	AE	Al Fe2,5 Ni5 Cu2,5 Mn1 Mo0,8 Zr0,8
AA-6061 (Conv.)	T6	Al Si0,6 Cu0,3 Mg1 (AA6061)

Physical properties					Mechanical properties			
Density	Thermal Expansion	Stiffness	Specific Stiffness	Thermal Conductivity	Ultimate Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Hardness
$\rho$ [gr/cm <sup>3</sup> ]	$\alpha$ [10 <sup>-5</sup> /K]	E-mod [Gpa]	[Gpa/ (g/cc)]	k [W/m.K]	UTS [Mpa]	YS [Mpa]	e [%]	[HB]
2,70	23,0	70	26	160	330	300	14	110
2,54	13,5	102	40	135	240	150	1,5	105
2,95	19,0	90	31	115	600	475	7	180
2,70	23,0	70	26	160	310	275	10	100

<http://www.rsp-technology.com/brochures.html> より一部抜粋

## (3-3) アルミ合金 + NiPメッキ

### 利点

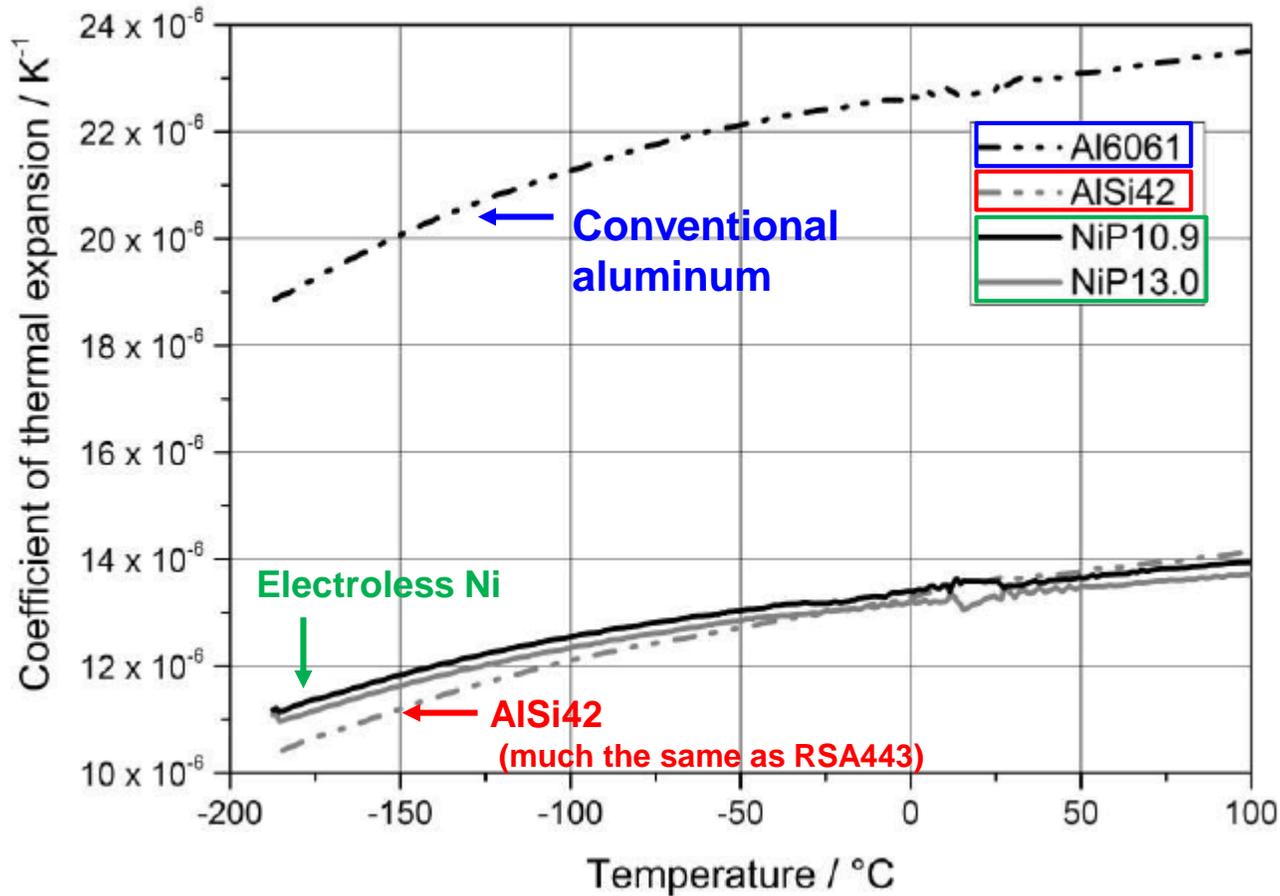
- ・ 仕上がり表面粗さの向上 (最終仕上げに研磨も可能)
- ・ 保管性が良い (耐摩耗性、耐食性)

### 問題点

- ・ 赤外装置では光学系全体を真空冷却下に置く必要がある
- 低温では母材とメッキとの熱膨張係数の差異による形状変化の懸念

# (3-4) 異種金属間の接合 (バイメタル効果)

＜熱膨張係数の温度依存性＞



✓ 線熱膨張係数 [10<sup>-6</sup> /K]は、

- アルミニウム合金 : ~23
- (無電解) NiP : ~13

\* いずれも常温 (293 K) の値

conventional なアルミニウム合金では熱膨張係数の差異が大きく、低温での形状歪みが予想される

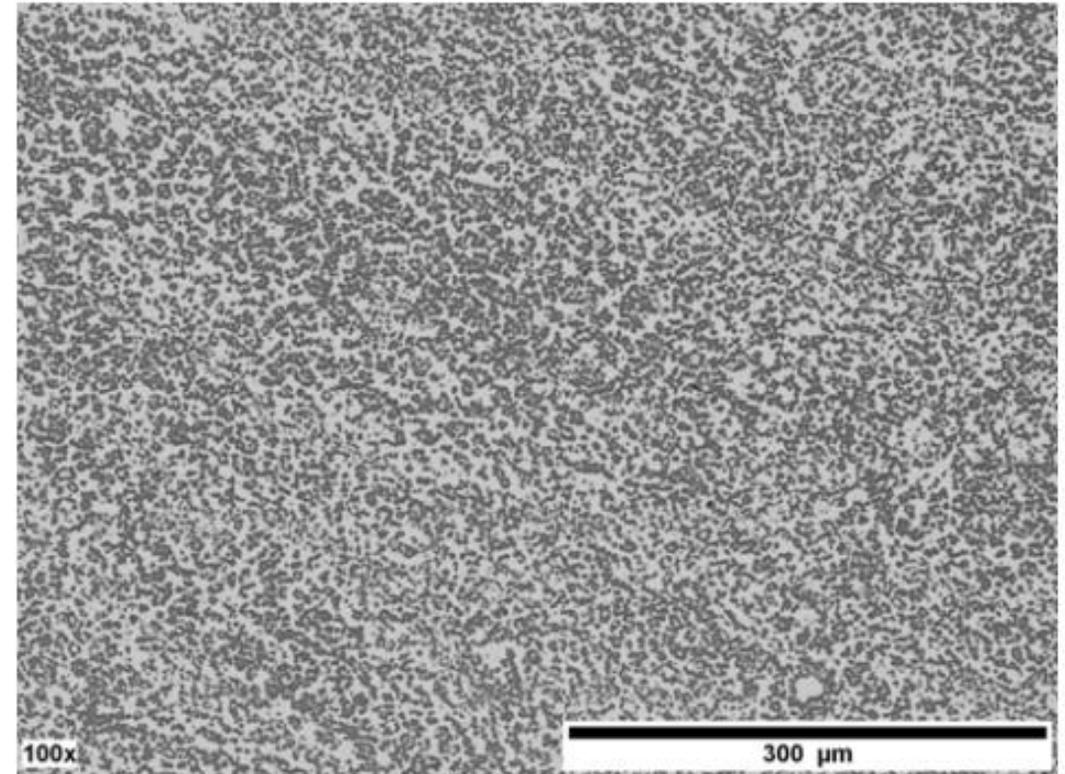
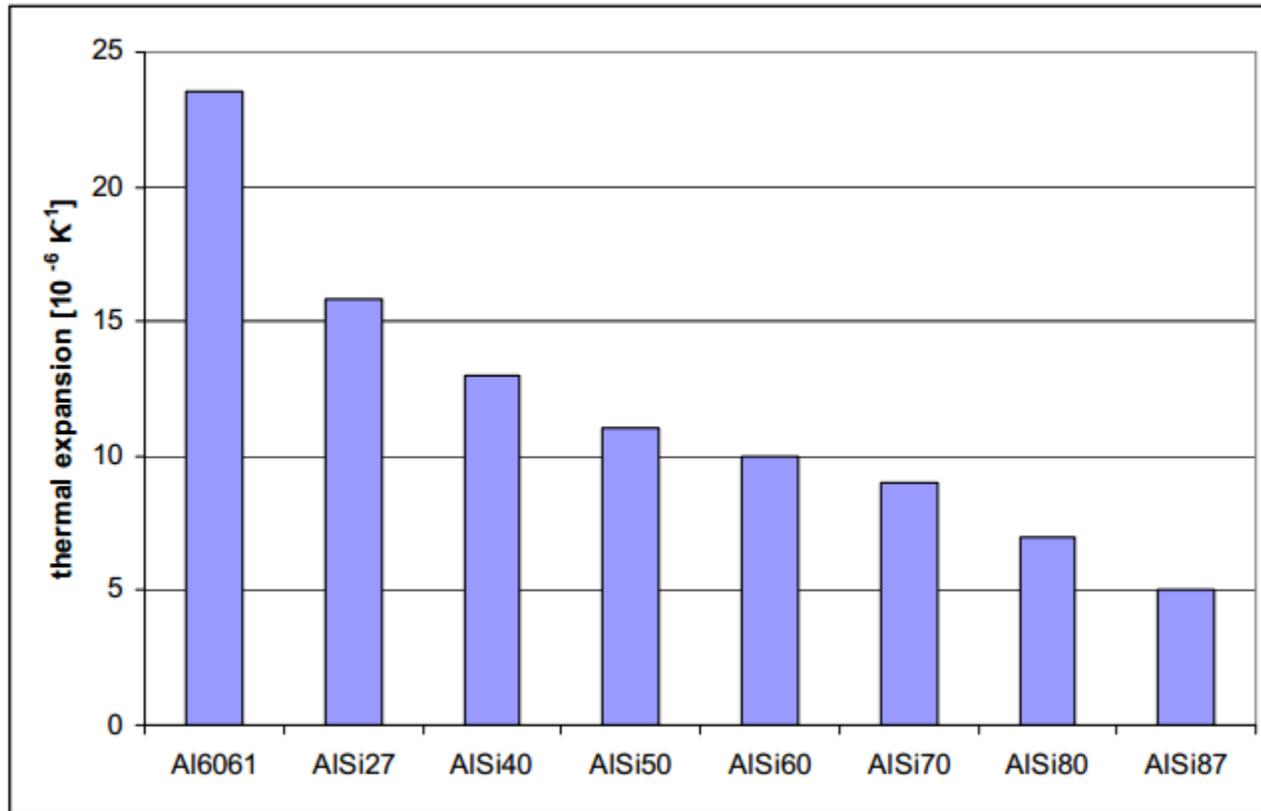
Kinast *et al.*, SPIE proc. (2014)

# (3-4) 異種金属間の接合 (バイメタル効果)

✓ アルミの熱膨張係数を、Si含有量でコントロールする

＜ Si含有量の違いによる熱膨張係数の変化 ＞

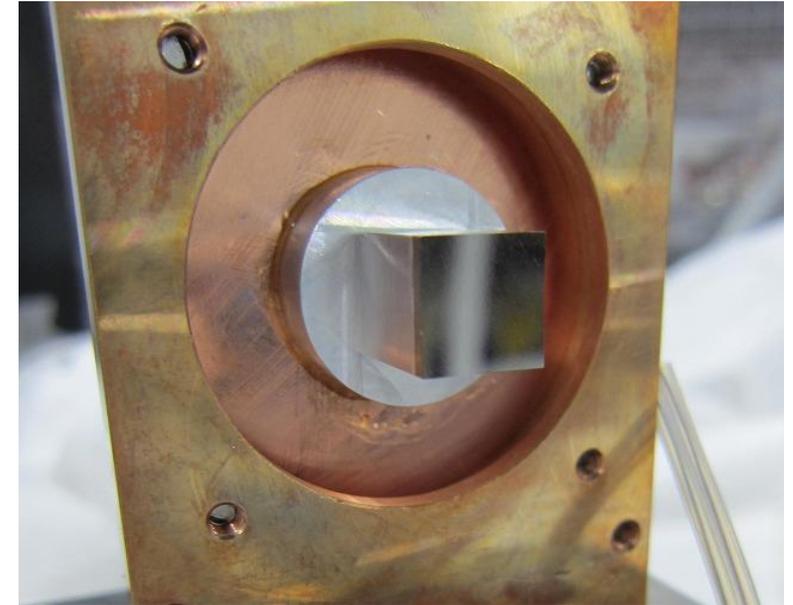
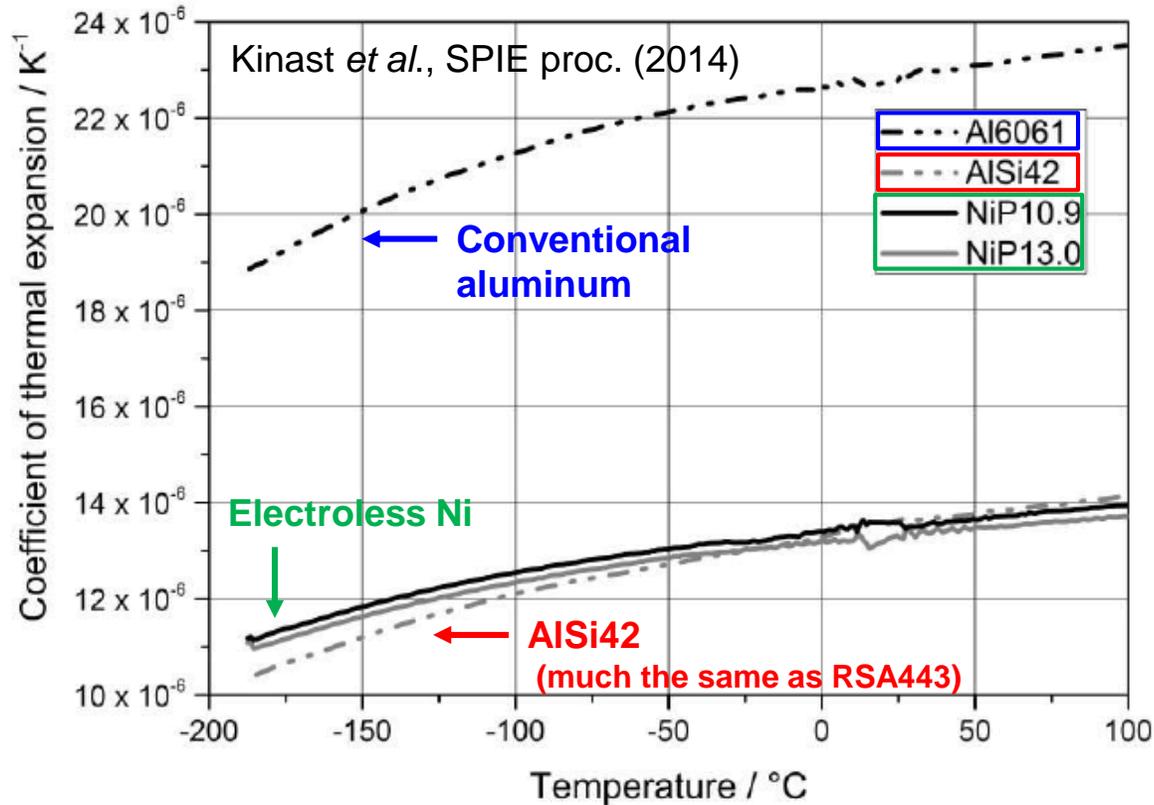
＜ AISi40の断面顕微鏡図 (x 100) ＞



Rohloff et al., SPIE pric. (2010)

# (3-5) 低温下における鏡面形状評価

＜熱膨張係数の温度依存性＞

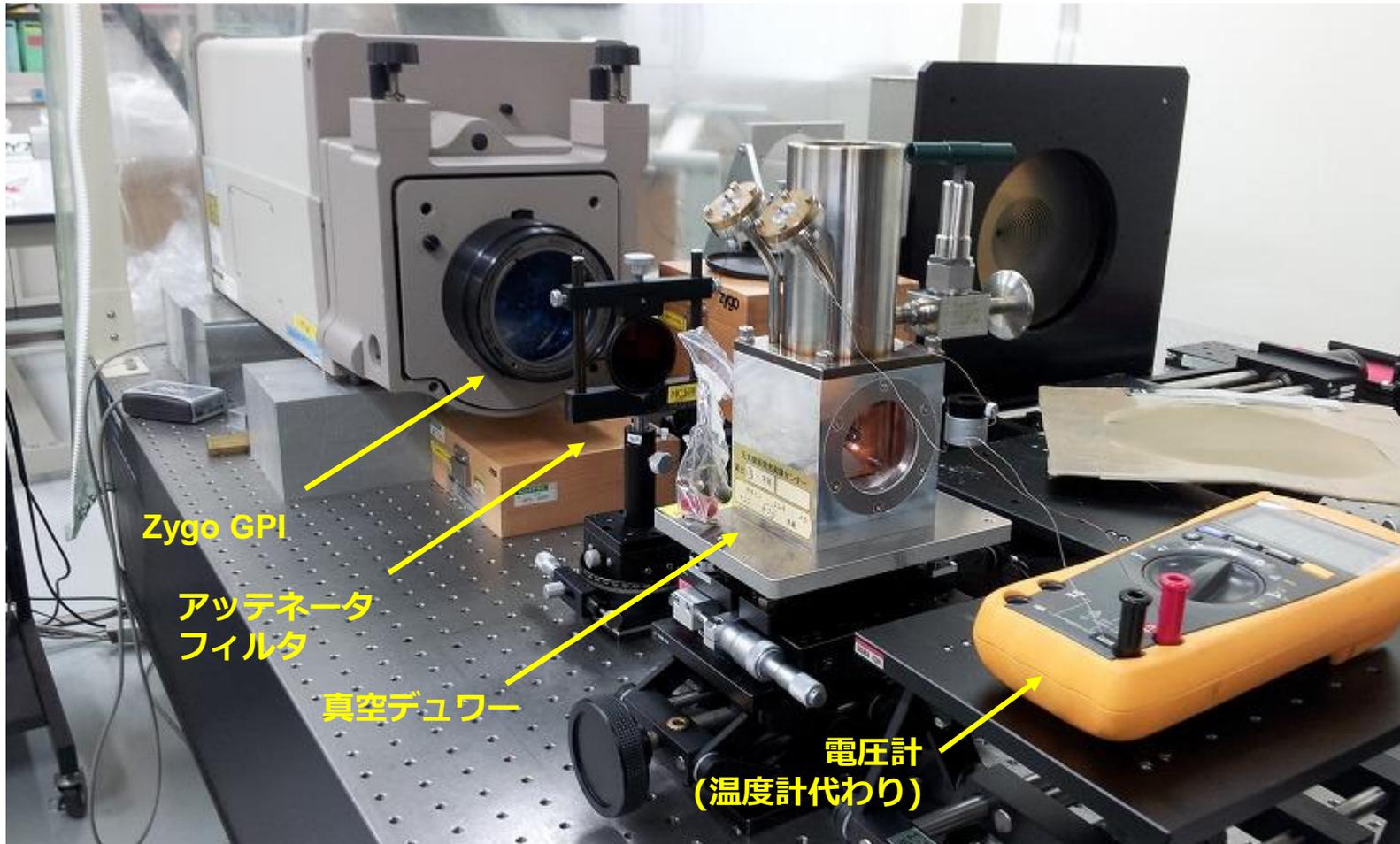


理研所有のULG-300で超精密切削加工  
・ 10 x 10 mm (SR = 70 mm)

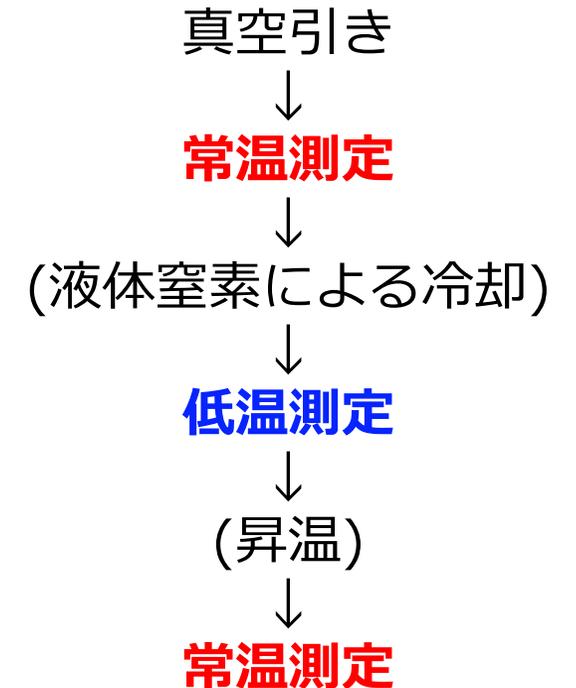
[1] A5052 と [2] RSA443 (AlSi40) にそれぞれ NiPメッキ (厚さ 100 μm) を施し評価

# (3-5) 実験セットアップ

✓ ~ 80K で鏡面形状を測定できるセットアップを構築 (国立天文台ATC 所有のZygo干渉計を使用)

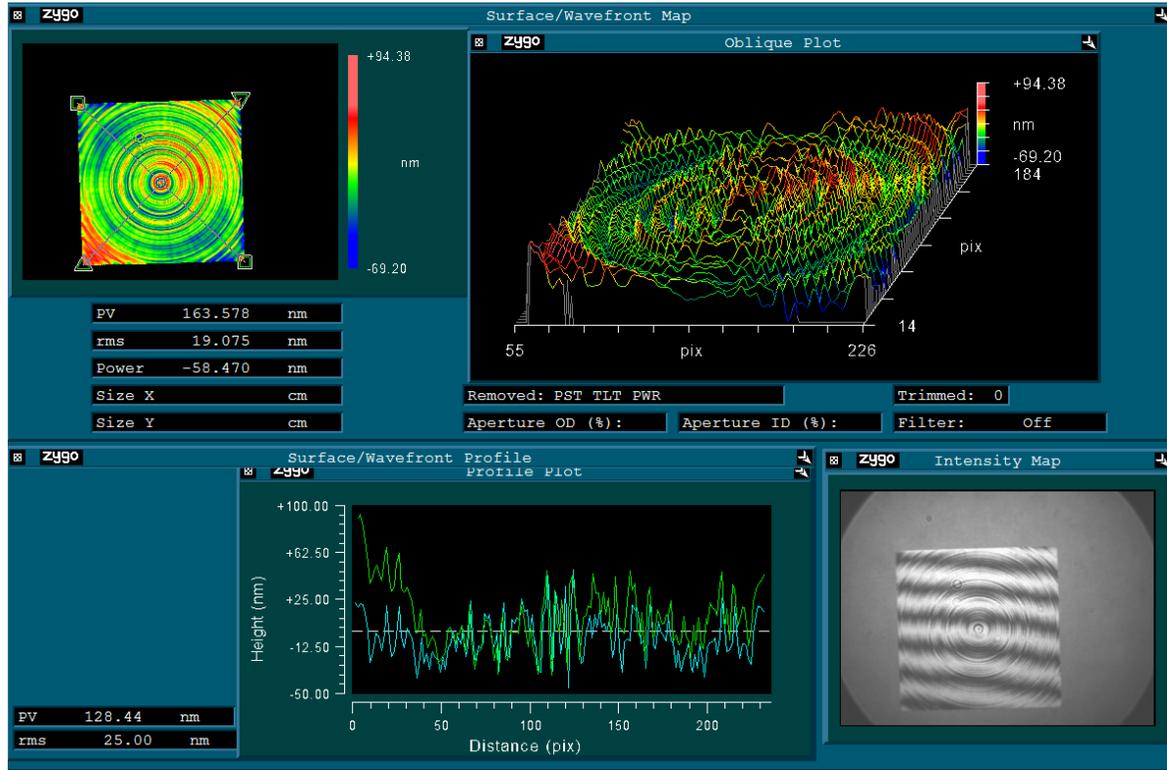


## <測定手順>

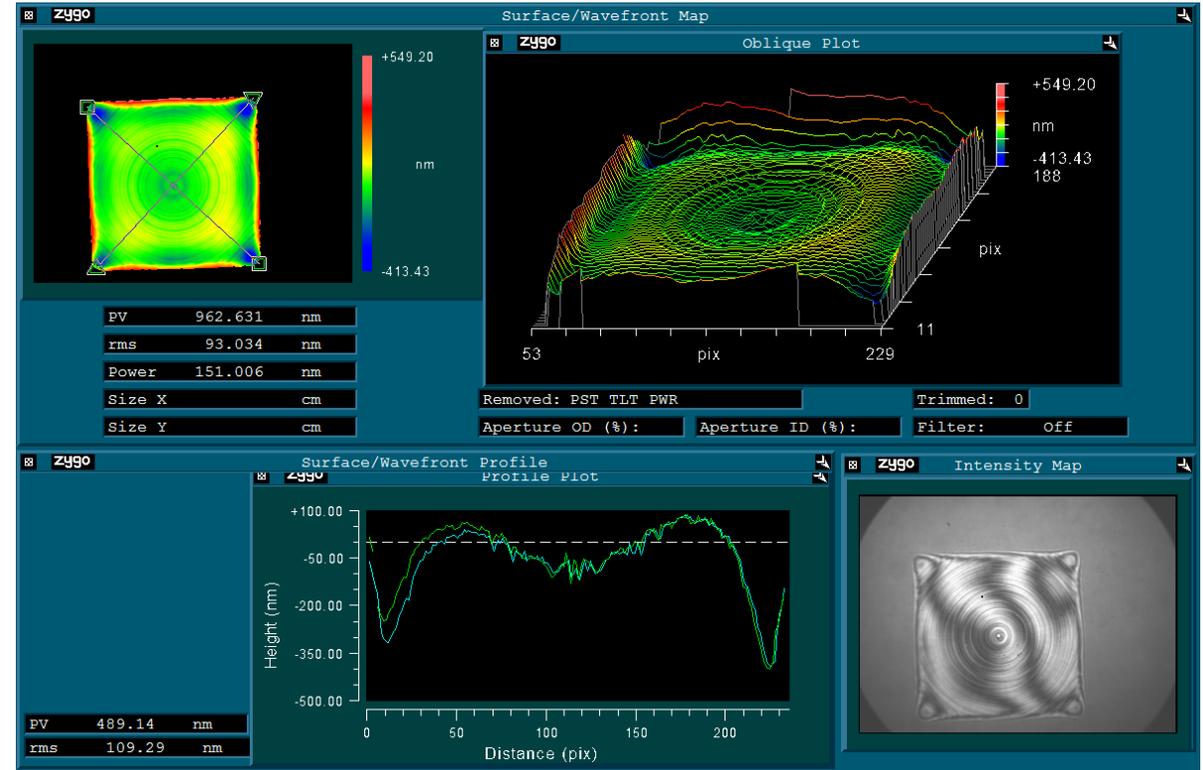


# [1] A5052 + NiP

<300 K>

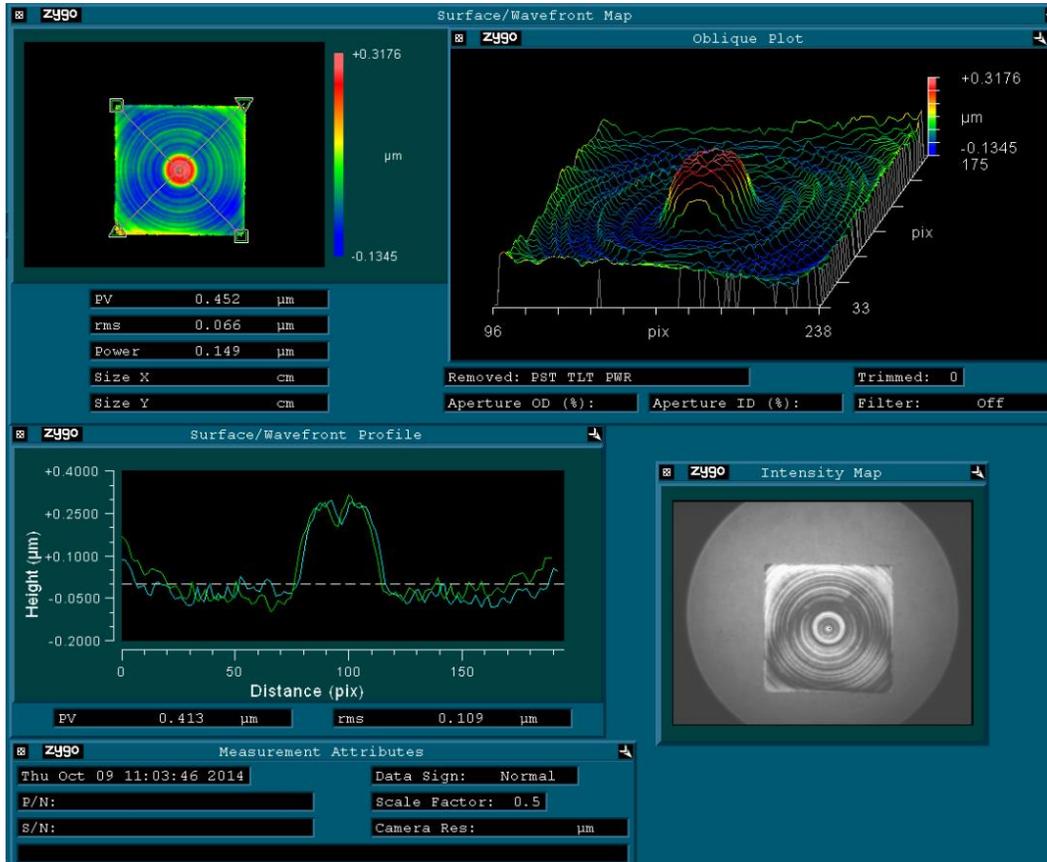


<80 K>

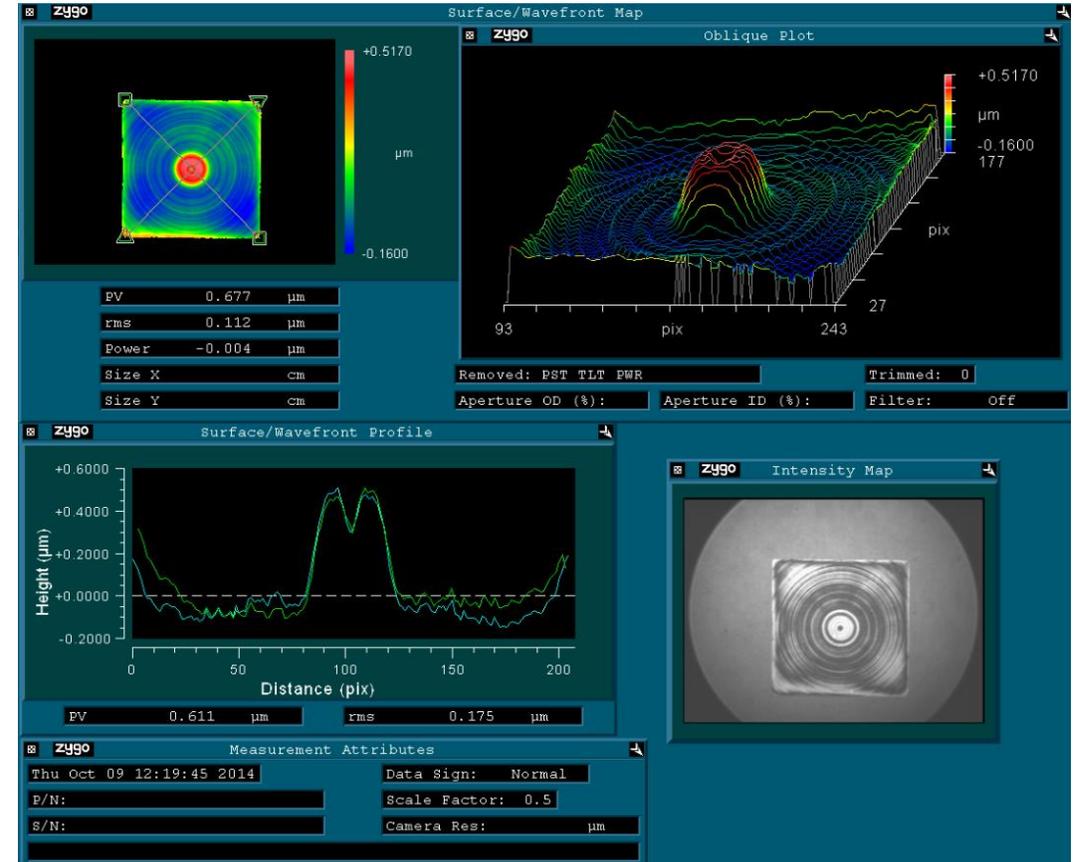


# [2] RSA443 + NiP

<300 K>



<80 K>



# (本講演のまとめ)

## ✓ 赤外装置に最適なアルミニウム合金の探索

- 1) 各種 AI の超精密切削加工による切削性の評価 (ポスターに記載)
- 2) 冷却下使用を想定した形状歪み評価

## ✓ 金属ミラー製作では以下の2つの方向性が考えられる

- I) 母材のみ : 到達できる表面粗さに課題が残っているが、低温使用での歪みは無し
- II) 母材+メッキ : 表面粗さは < 5 nm RMS が可能。低温での形状歪みがあるが、回避可能

### • 実験の結果、最適な鏡材として以下の候補を得た

- I) 母材のみ : → RSA6061
- II) 母材+メッキ : → RSA443

謝辞：本研究は国立天文台 TMT戦略基礎開発研究経費、特別研究員奨励費の支援を受けて行われました。