

# 理研における サイエンスのための超精密加工

理化学研究所 光量子工学研究センター

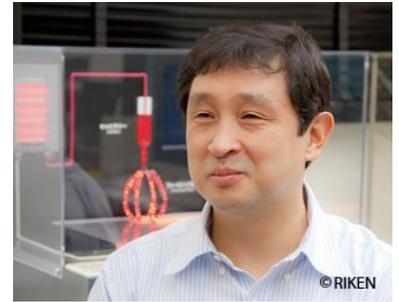
先端光学素子開発チーム

○細島拓也 山形豊

※著作権保護のため、一部の図を  
黒塗りにしています

# 先端光学素子開発チームの紹介

- **超精密／微細加工技術の開発**
- 先端的科学機器の開発
- 理研内外の**基礎科学研究をサポート**(共同研究)
- 産業界や社会の役に立つ技術を開発



山形 豊 チームリーダー

## 多分野の専門家を集めた研究開発

城田 幸一郎 (光物性)

田島 右副 (有機化学)

滝澤 慶之 (宇宙線天文学・EUSO)

海老塚 昇 (天文・分光)

青木 弘良 (生物学)

細畠 拓也 (中性子光学・超精密加工)

江川 悟 (X線光学・超精密加工)

河合 利秀 (機械加工技師)

竹田 真宏 (機械加工技師)

佐藤 祐子 (秘書)

# 講演の目的

先端光学素子開発チーム@理研における  
超精密加工技術の実例を紹介

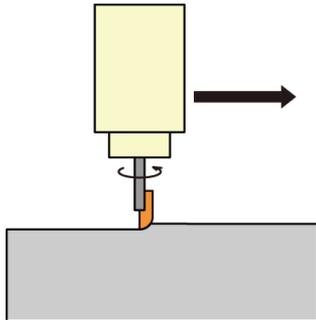


天文観測装置分野の皆様が  
特殊な光学素子を検討する上での参考にしていただく

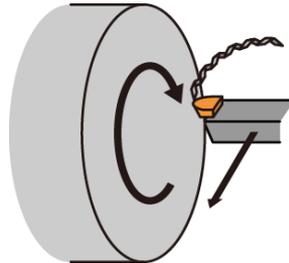
# 得意分野

## ダイヤモンド切削加工

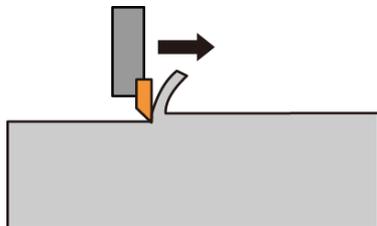
ミーリング



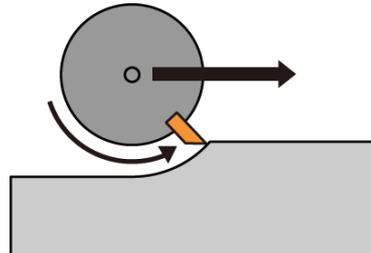
旋削



シェーパー

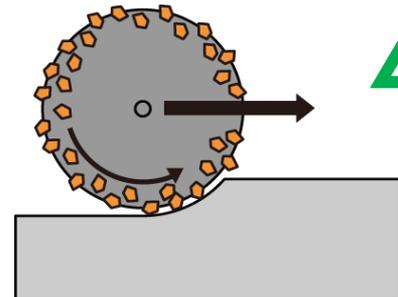


フライカット

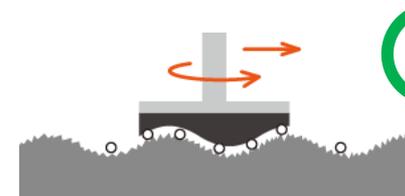


## 砥粒加工

研削(固定砥粒加工)



研磨(遊離砥粒加工)

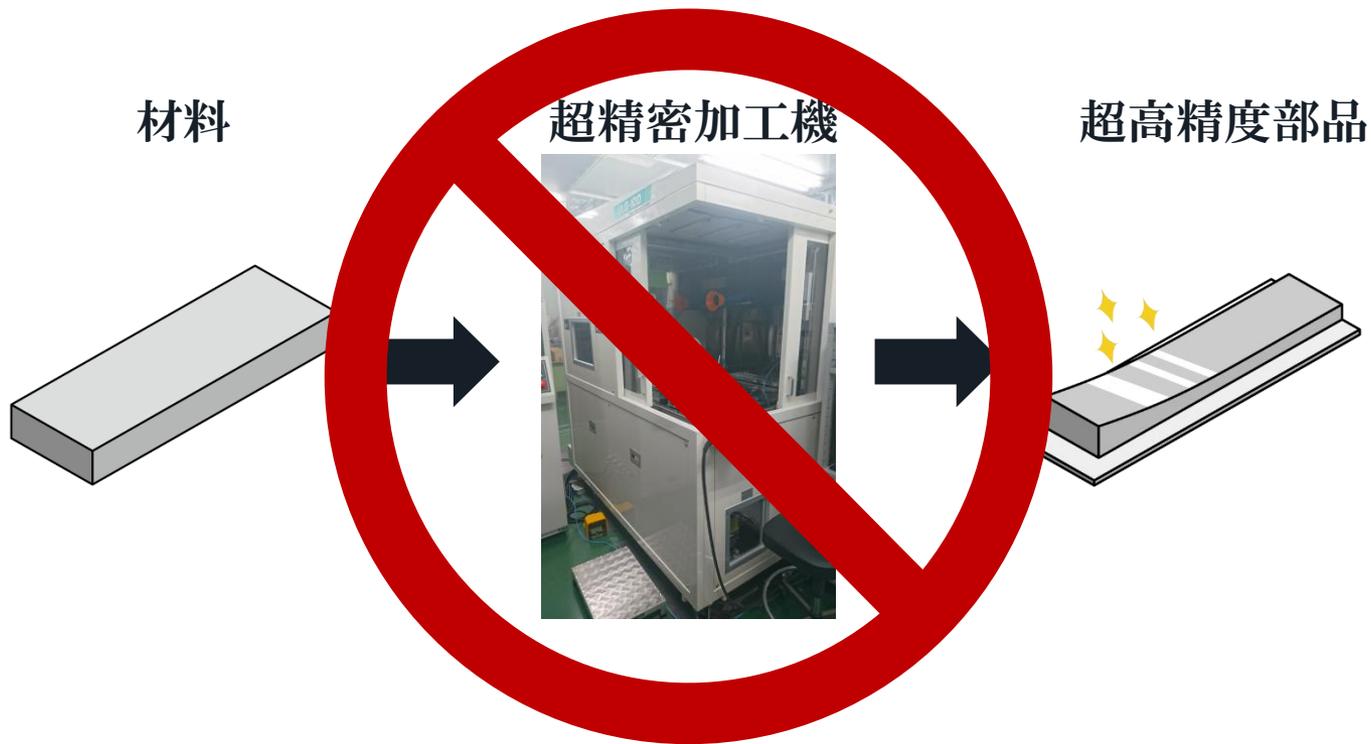


レンズ金型の磨きレス加工に関する長年の研究



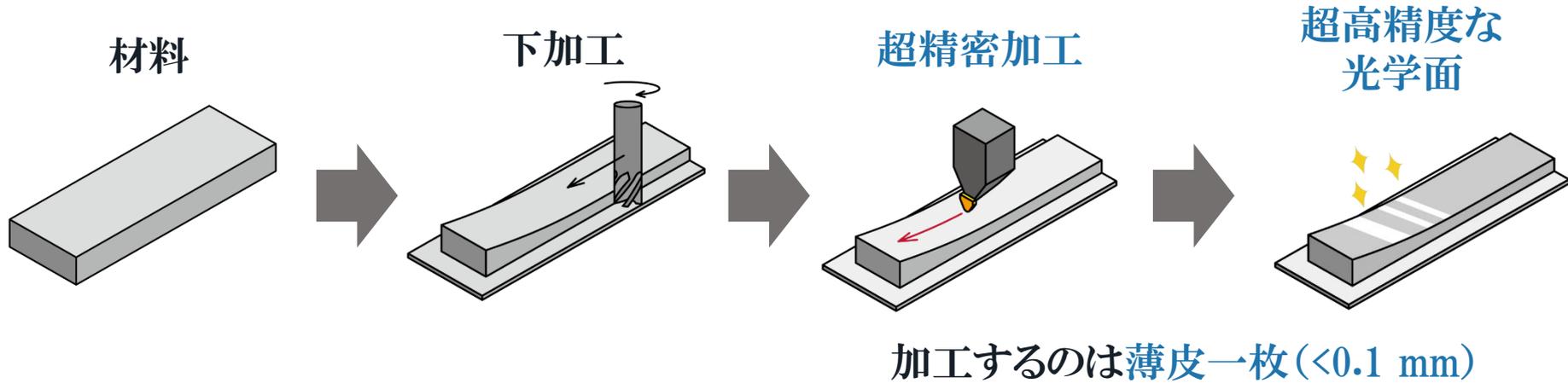
特に超精密切削加工については、最先端の技術を提供できる

# 超精密切削加工に対する よくある誤解



- 超精密加工機は、マシニングセンターの単なる高精度版ではない
- 能率よりも精度に重点をおいたコンセプトで設計されている
- 超精密加工機単体ではものづくりは完結しない

# 超精密加工の実際



ほぼ完成している部品の**特定の面**に

超高精度曲面  
微細パターン

を加工して**光学的機能**を与える

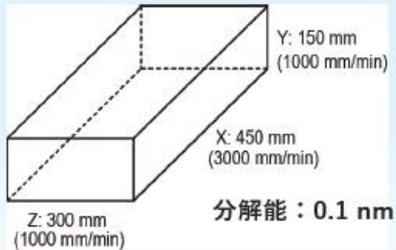
**機能創成**のための仕上げプロセス

# 保有設備 (超精密加工機)

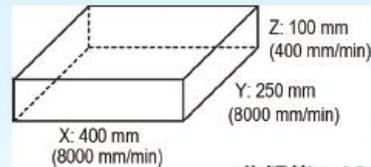
5 軸 + 2 スピンドル  
超精密加工装置  
(東芝機械 ULG-100D(5A))



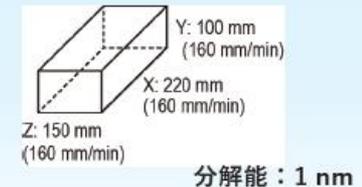
ストローク  
速度  
分解能



5 軸超精密加工装置  
(ナガセインテグレックス  
NPIC-M200)



4 軸超精密加工装置  
(東芝機械 ULG-100A(H3))



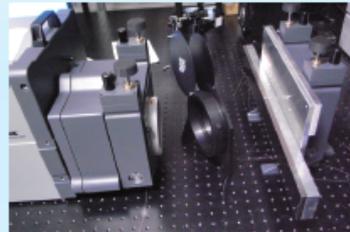
# 保有設備(形状測定装置)

非球面形状測定装置  
(Panasonic UA3P)



測定範囲：200 x 200 mm  
測定分解能：1 nm  
絶対精度：50nm

レーザ干渉計  
(Zygo Verifier QPZ)



計測サイズ： $\phi$ 100 mm  
測定分解能： $\sim 0.1$  nm  
絶対精度： $\sim \lambda/20$

高精度3次元測定機  
(ミットヨ Legex)



測定範囲：700 x 700 x 450 mm  
計測分解能：10 nm  
精度： $\sim 300$  nm

大型3次元測定機  
(ミットヨ Apex-1230)



1200 x 3000 x 1000 mm  
測定分解能  $0.1 \mu\text{m}$   
測定精度  $10 \mu\text{m} / 1000 \text{mm}$

非接触微細形状測定装置  
(三鷹光器 PFU-3)



計測範囲：60 x 60 x 20 mm  
分解能：XY:0.1  $\mu\text{m}$ , Z:1 nm

白色光干渉式形状計測装置  
(Zygo NewView 7200)



計測範囲：0.7 mm(x10), 140  $\mu\text{m}$ (x50)  
計測分解能：1Å (Z方向)

# 事例紹介 (プレビュー)

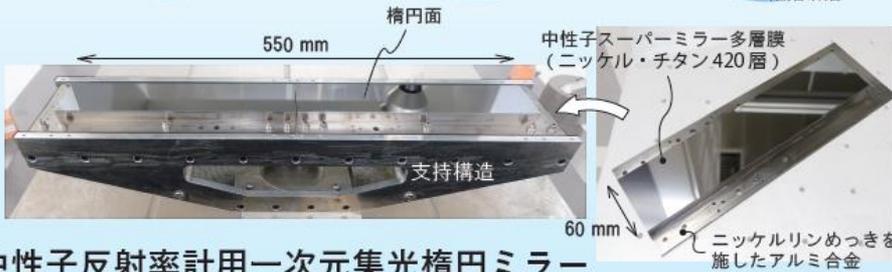
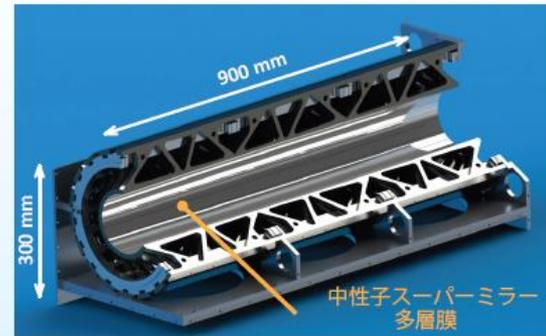
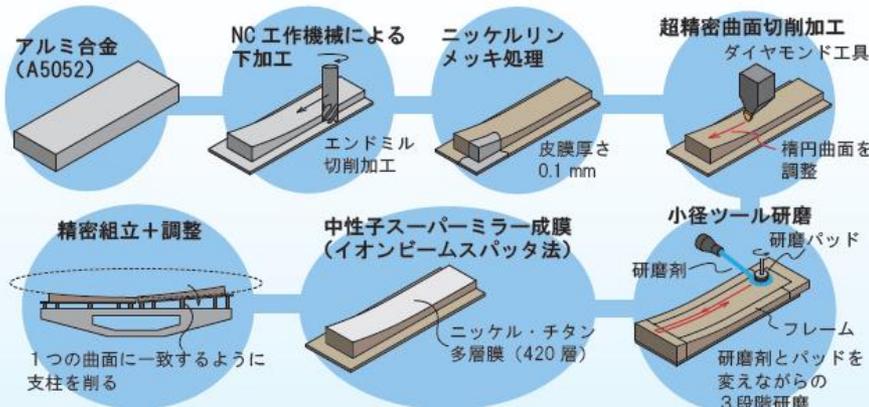
# 事例紹介①

## 金属基材を用いた中性子集光ミラー

中性子共鳴スピネコー分光器用

全周型回転楕円ミラー

[T. Hosobata et al., *JPS Conf. Proc.* 22, 011010(2018)]



中性子反射率計用一次元集光楕円ミラー

T. Hosobata et al., *Optics Express* 27(19), pp. 26807-20 (2019)] ミラーセグメント

光学素子金型の超精密切削技術と研磨技術を応用して、物質構造解析用の低速中性子ビームを集束させる「中性子集光ミラー」の開発を行っています。すでに実用段階に入っており、中性子利用装置の高効率化・多機能化に貢献しています。

共同研究者：京大複合研 日野正裕准教授、高エネ研 山田悟史助教 ほか  
加工担当：細島 拓也、竹田 真宏

# 事例紹介②

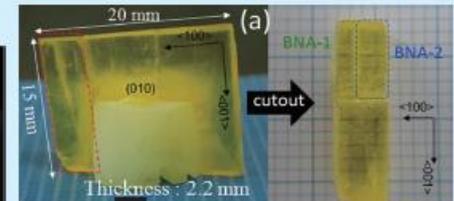
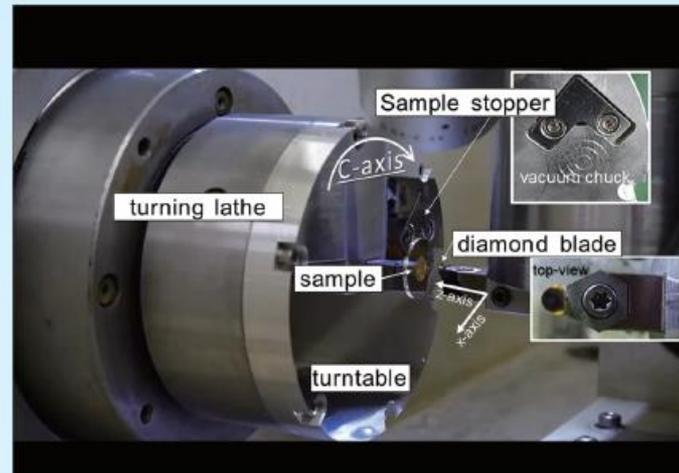
## 難加工材料の超精密加工

有機非線形光学結晶 (BNA: N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline) の薄片化

共同研究先：理研 テラヘルツ光源研究チーム

[T. Notake et al., *Scientific Reports* 9, 14853 (2019) ]

非常に脆く加工しにくい有機非線形光学結晶を 2 nm(Ra) の粗さで 0.1 mm まで薄く加工できる超精密加工法を開発し、テラヘルツ光源研究チームによるメーカーフリンジ法を用いた BNA 結晶の非線形光学定数の全成分同定に貢献しました。



エポキシ樹脂に包埋  
& ダイヤモンド旋削



共同研究：理研 テラヘルツ光源研究チーム 野竹孝志 研究員、南出 泰垂 TL ほか  
加工担当：竹田 真宏、細畠 拓也

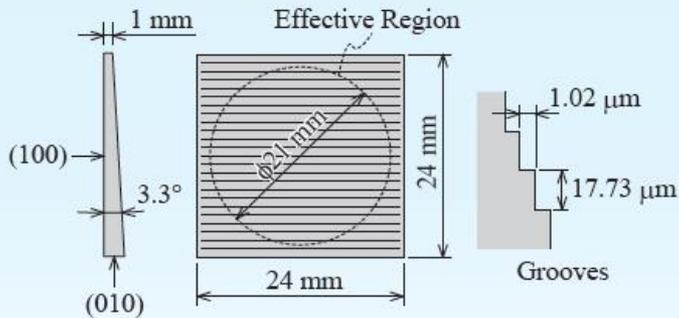
# 事例紹介③

## 回折型光学素子の開発

中間赤外線分光撮像装置 MIMIZUKU 用

ゲルマニウムグリズム

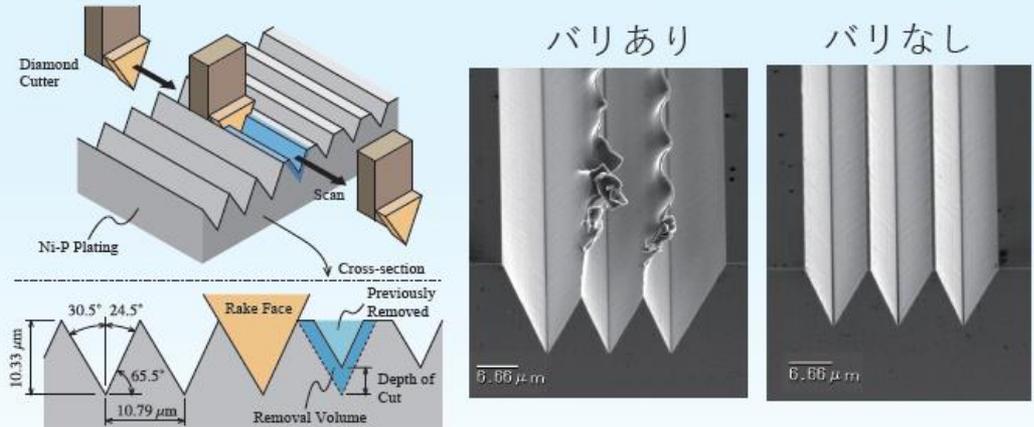
共同研究先：東大アタカマ天文台プロジェクト



共同研究：東大 上塚 貴史 助教  
 回折格子設計：海老塚 昇  
 加工担当：細畠 拓也

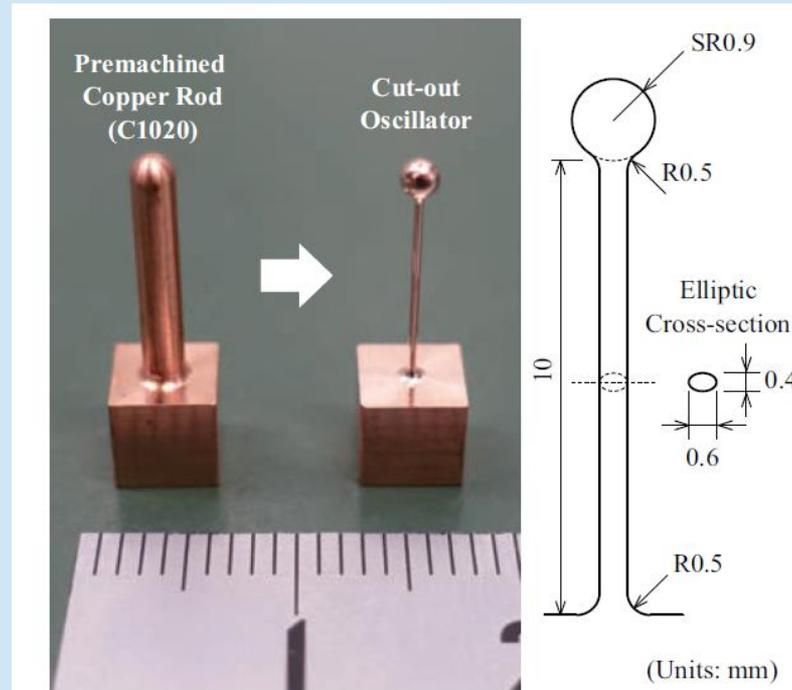
近赤外観測装置 MOIRCS@すばる望遠鏡向け

回折格子用レプリカ金型の鋭角深溝加工



天文観測装置用の様々な分散光学素子の開発を行っています。特にゲルマニウム・シリコン等の脆性材料への微細溝加工や、バリや倒れの生じやすい鋭角深溝加工の技術開発に取り組んでいます。

## 微小重力観測実験用振動子

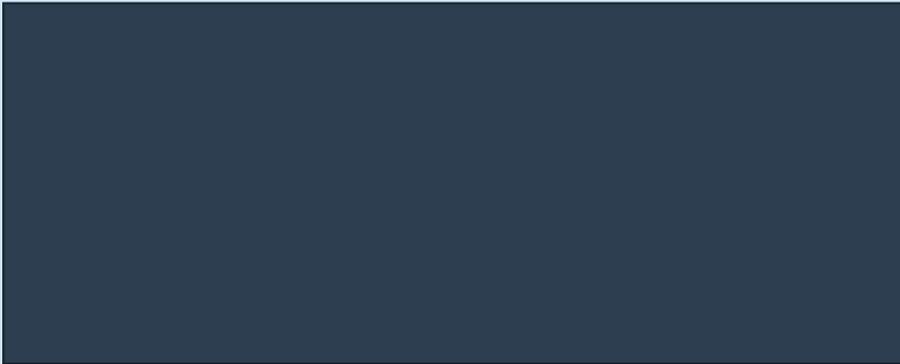


共同研究者：東北大 松本伸之 助教 ほか  
加工担当：細島 拓也

# 事例紹介⑤

## モノシックな多チャンネル光学素子

SWIMS-IFU のための光学素子群  
(レンズは除く)

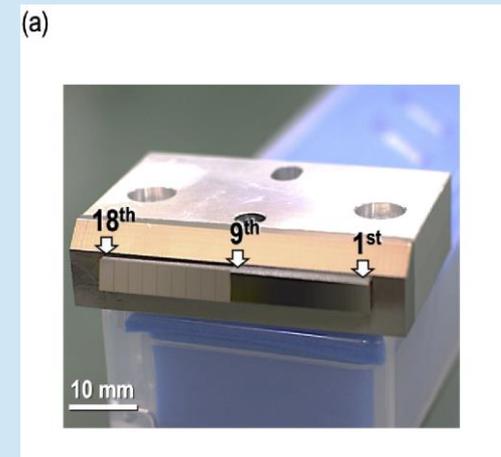


共同研究者:

東京大学アタカマ天文台 (TAO) 計画  
SWIMS-IFUチームの皆様

加工担当: 東京大学 櫛引 洸佑氏  
河野 志洋氏  
北川 祐太郎氏

超高速撮影法STAMPのためのスライスマラー



Takao Saiki et. al, Opt. Express 28, 31914-31922 (2020)

共同研究者: 東京大学 中川桂一講師ほか  
加工担当: 東京大学 佐伯 峻生氏

# 事例紹介⑥

材料開発: 田島 右副、(株)T&K TOKA  
加工担当: 竹田 真宏、細島 拓也

裏面  
(軽量化リブ構造)

Φ100 mm



表面  
(放物面ミラー)

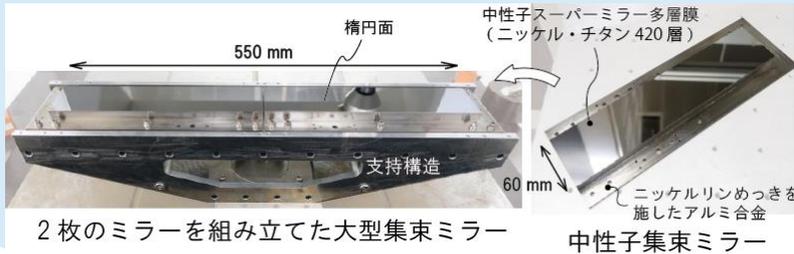


## 短繊維CFRP

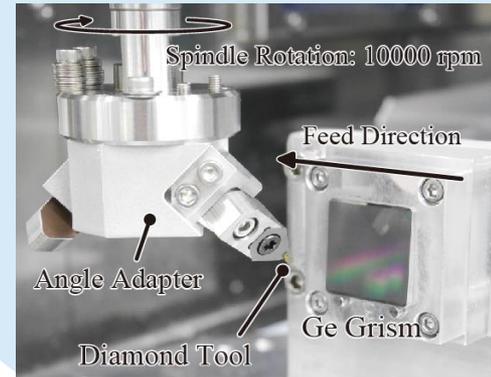
- 短く切断したミルドカーボンファイバーをエポキシに分散させた特殊複合材料
- 剛性・強度はアルミと同等、比重はアルミの半分、熱膨張係数はほぼゼロ
- 型に流し込んで硬化させることにより、複雑形状に成形可能

# 以下、詳細説明(4項目)

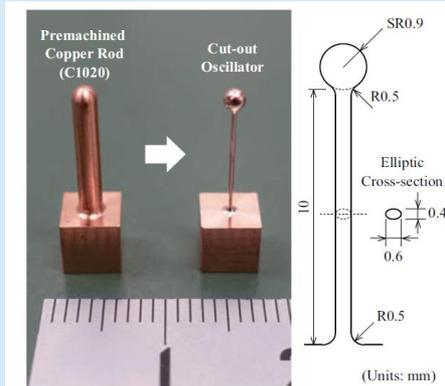
## 中性子集光ミラー



## ゲルマニウム・グリズム



## 微小振動子の削り出し



## 短繊維CFRPミラー

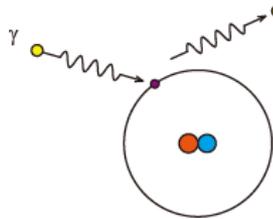


# 中性子集光ミラー

- 中性子はユニークな物質構造解析プローブ
- 「冷中性子」を試料に導く「中性子スーパーミラー」
- 理研の独自技術  
「金型用ニッケルリンメッキを用いたオール金属製中性子ミラー」
- 製造プロセスの確立と中性子ビームラインでの実用化に成功

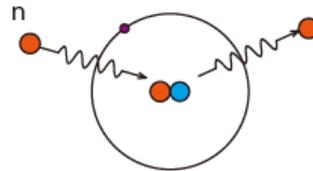
# 物質構造解析用プローブとしての 中性子

Photons (X-rays)



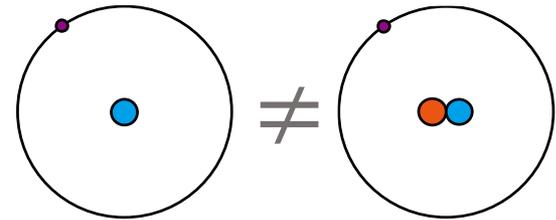
Scattered by **Electrons**

Neutrons



**Nuclei**

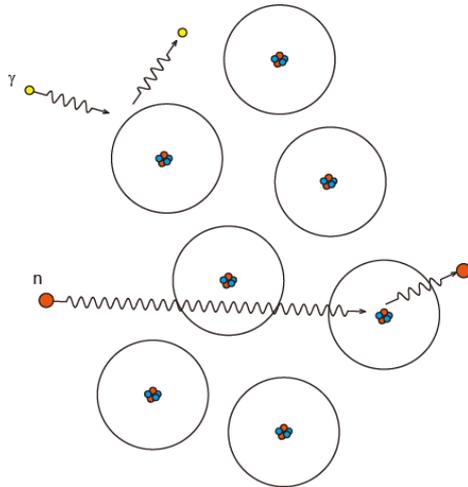
Isotopic Labeling



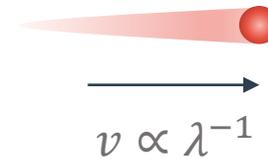
Hydrogen

Deuterium

Deep Penetration into Materials



Time-of-flight  
Spectroscopy



$$v \propto \lambda^{-1}$$

Inspection of  
Magnetic Properties

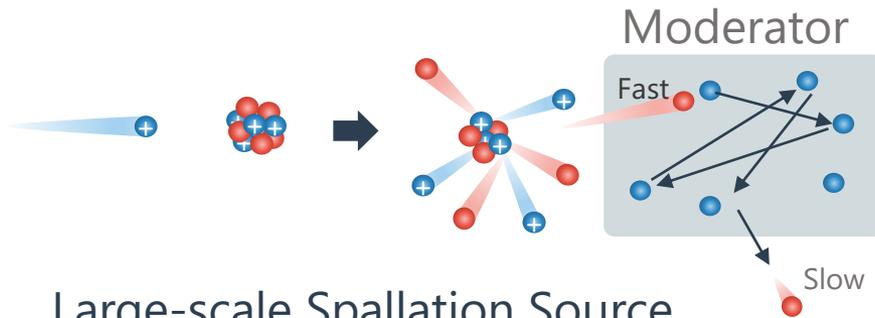


Charge = 0  
Spin = 1/2

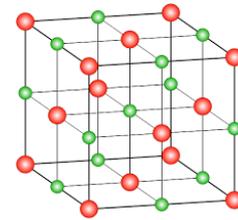
**X線と相補的な役割を果たす  
ユニークなプローブ**

# 「冷」中性子

	Energy	Speed	De Broglie Wavelength
Fast Neutrons	< 20 MeV	< 14000 km/s	> $2.8 \times 10^{-5}$ nm
<b>Cold Neutrons</b>	< 25 meV	< 2 km/s	> 0.18 nm



Large-scale Spallation Source  
J-PARC/MLF @ Tokai



$\lambda \sim$  Lattice Spacing  
Useful for Material Analysis!

Compact Source  
RANS @ RIKEN



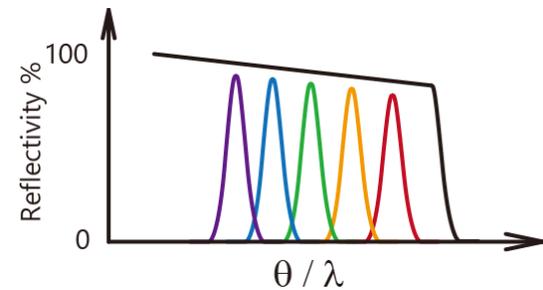
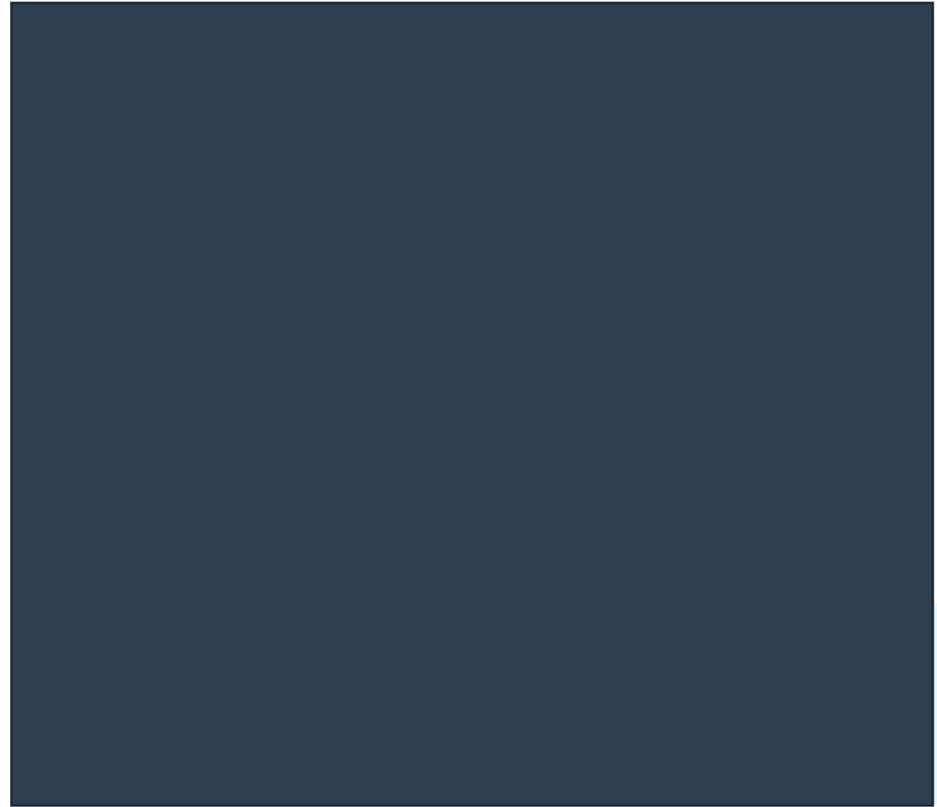
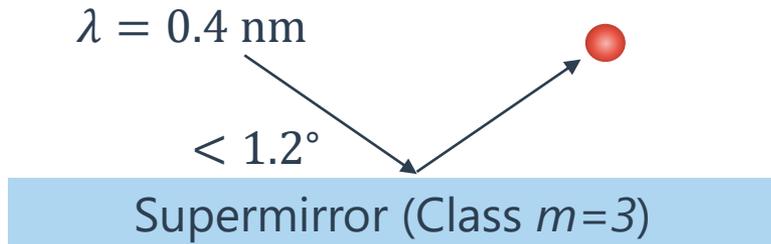
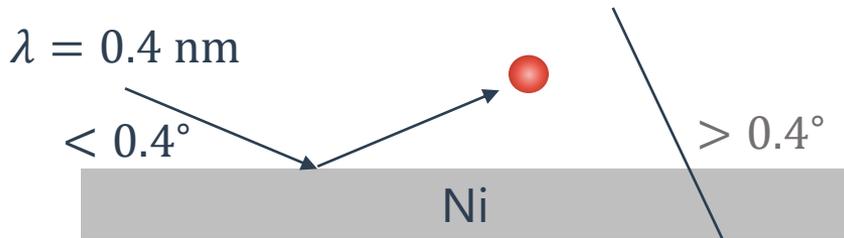
Cold Moderator Coming Soon!

# 「中性子光学」の最重要コンポーネント 中性子スーパーミラー

- 発生原理的に、中性子ビームには**全く指向性が無い**
- 線源から試料(検出器)まで導く反射光学素子 = **中性子スーパーミラー**

# 中性子スーパーミラー多層膜

中性子は微小な角度でしか  
反射できない

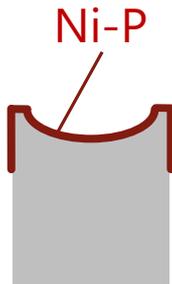


# 理研の金属基板

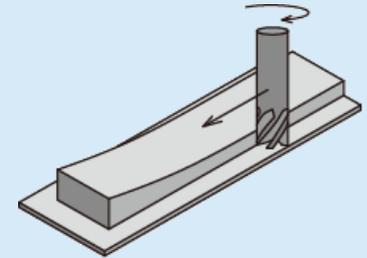
## 無電解ニッケルリンメッキ

リン含有率	構造
1 - 4 %	多結晶
5 - 8 %	中間的
9 - 12 %	アモルファス

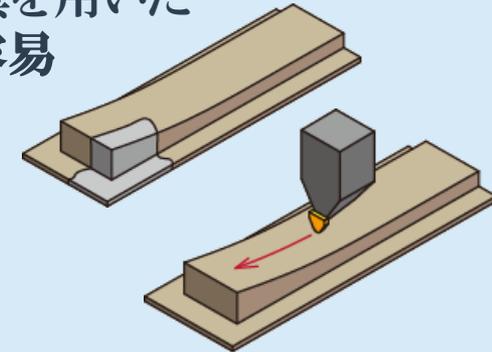
レンズ金型のコーティングとして  
広く用いられている



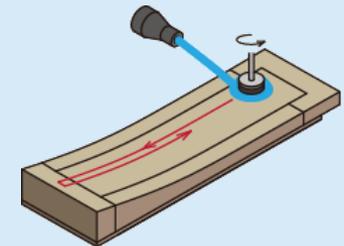
高速な下加工



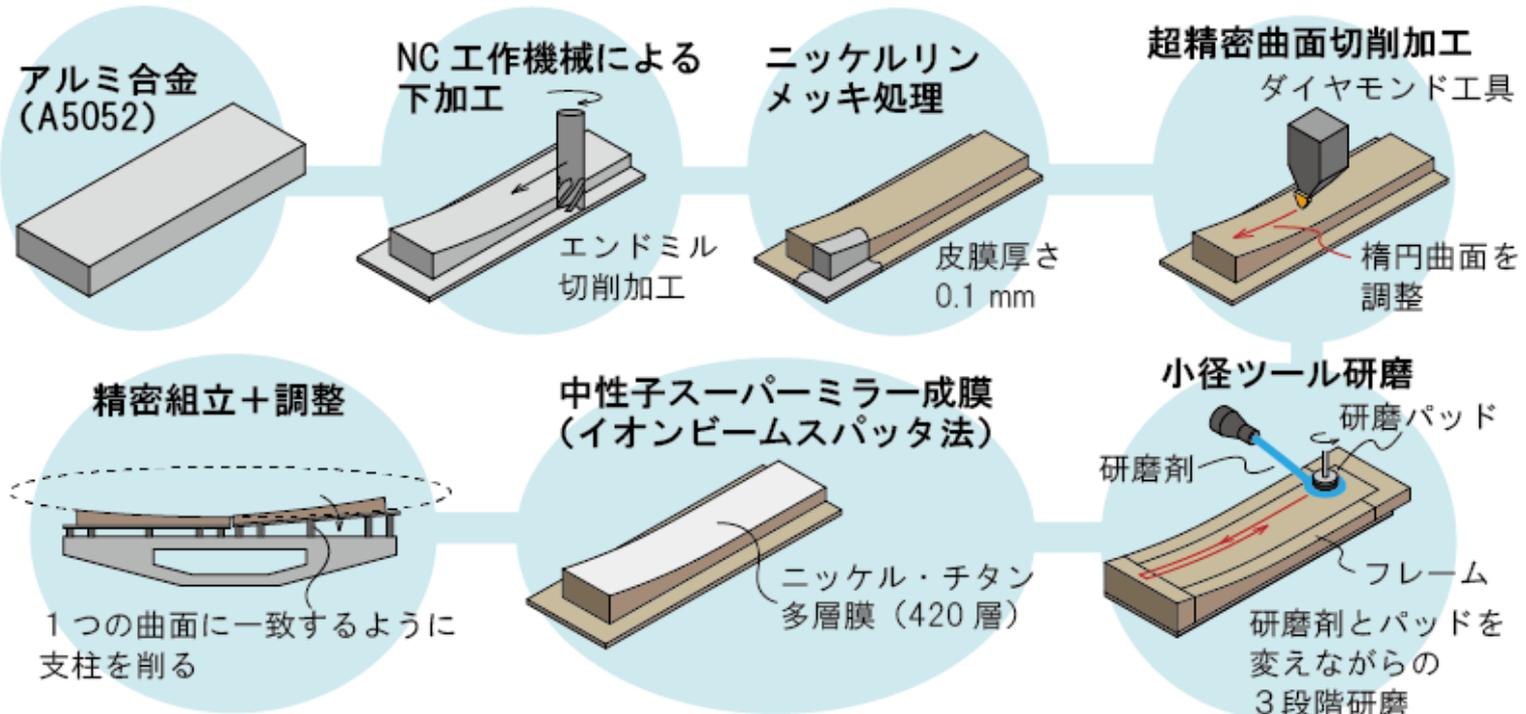
ダイヤモンド工具を用いた  
超精密加工が容易



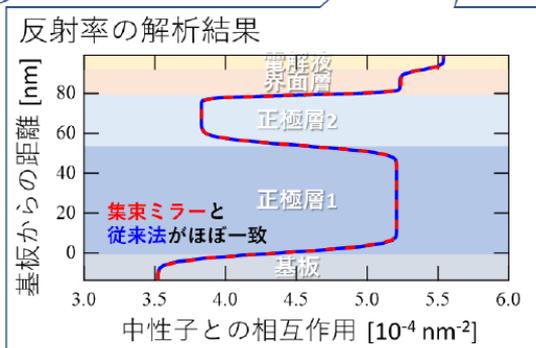
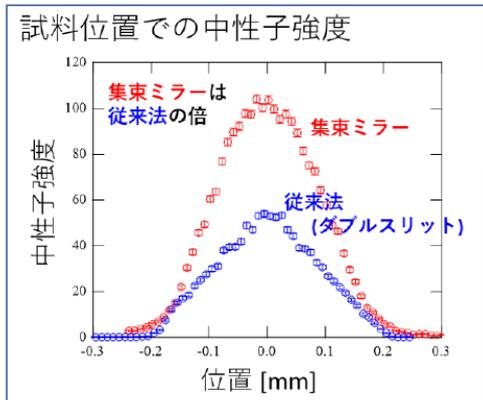
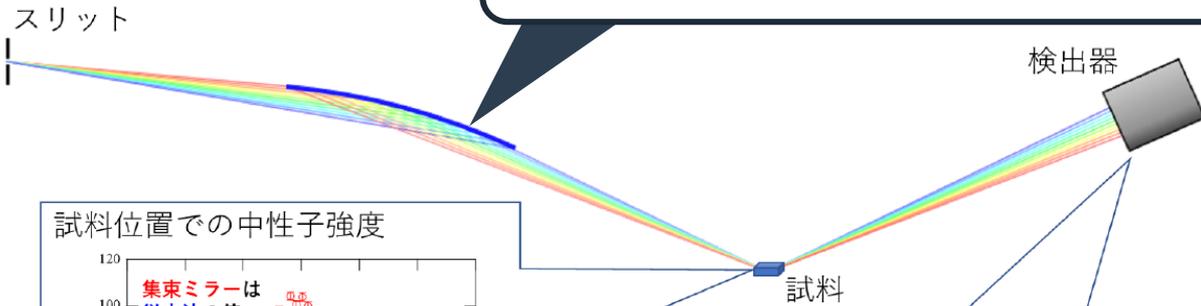
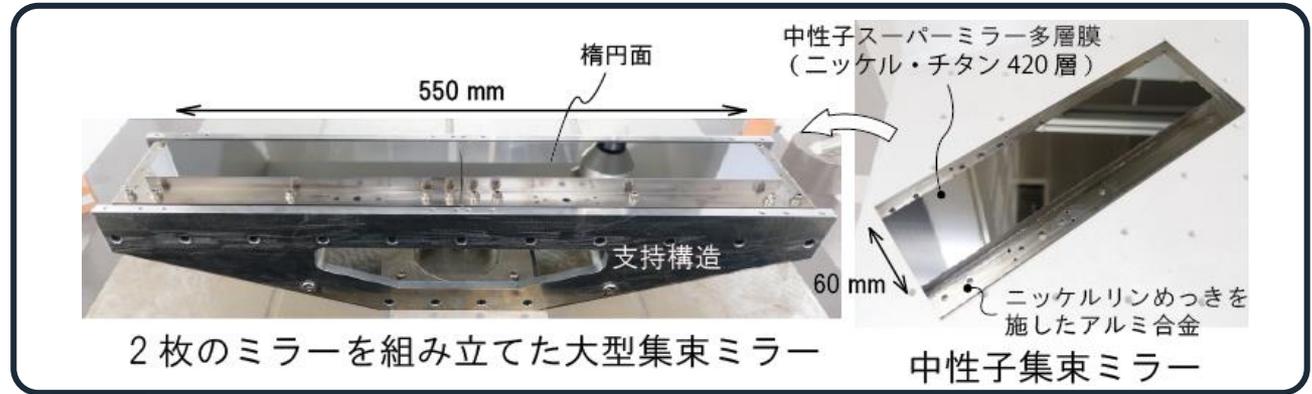
研磨によりサブナノメートル粗さが  
達成可能



# 製造プロセス



# 実用化した中性子集光ミラー



- 中性子反射率計 SOFIA@J-PARC/MLFにて実用化(恒久的に設置)
- 中性子強度を倍加し、電池材料などの測定効率化に貢献

プレスリリース

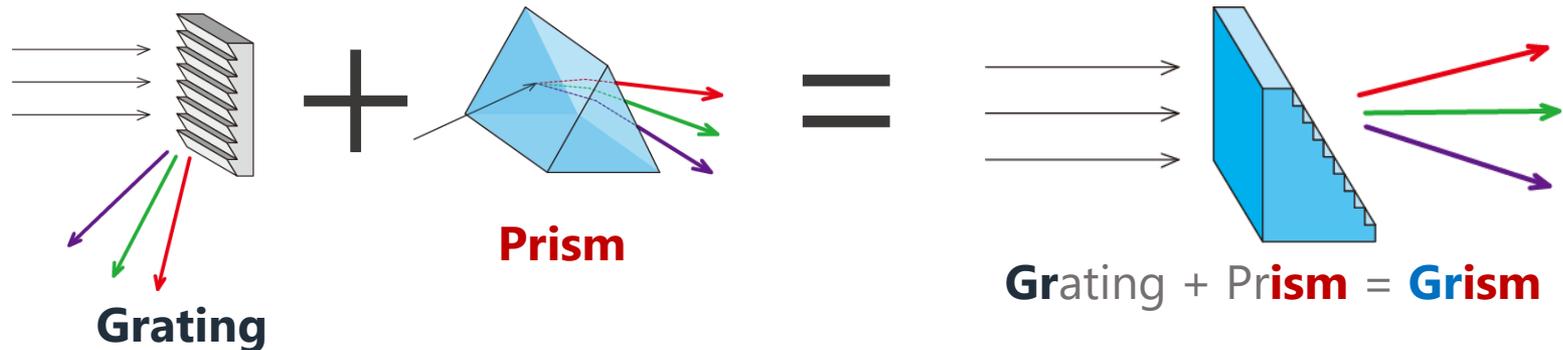
「超精密中性子集束ミラーによる電極界面のナノ構造解析技術の実用化」 2020年10月27日

「超精密な金属製中性子集束ミラー」 2019年9月19日

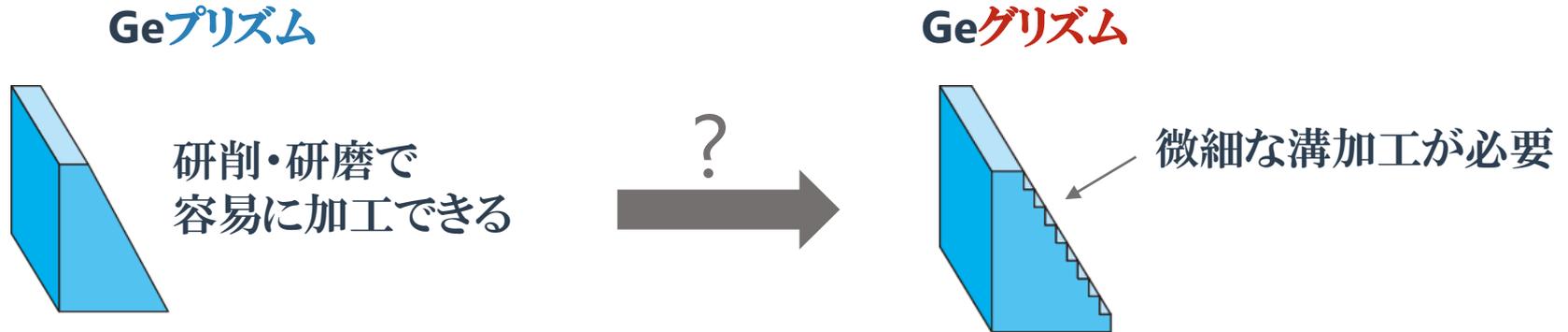
# ゲルマニウム・グリズム

- ・シリコンやゲルマニウムの「延性モード」切削
- ・なぜ「研削」では駄目なのか
- ・グリズム加工用特殊工具の設計

T. Hosobata et al., "Fabrication of Germanium Grism for Infrared Spectroscopy by Diamond Fly Cutting", in Proc. 8th Int. Conf. of Asian Society for Prec. Eng. and Nanotech. (ASPEN2019), Nov. 12-15, 2019, Matsue, Japan

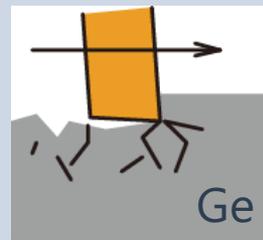


# ゲルマニウムの延性モード切削



溝加工のソリューション:  
ダイヤモンド工具を用いた  
延性モード加工

脆性モード



延性モード



- 極小な切り込み深さ (< 100 nm)
- 負のすくい角 (局所的圧縮応力による結晶構造変化)

## 詳細な先行研究

- Yan, J. et al., "Experimental study on the ultraprecision ductile machinability of single-crystal germanium," *JSME Int. J. Ser. C*, Vol. 47, No.1, pp. 29-36, 2004.

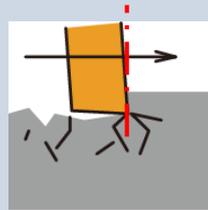
## 赤外線光学素子の成功例

- **Fresnel Lens:** Yan, J. et al., *J. Micromech. Microeng.* (2005)
- **Grism:** Kuzmenko, P. J. et al., *Proc. SPIE* (2012)
- **Various Gratings for IR:** Sukegawa, T. et al. (Canon Inc.), *Proc. SPIE* (2018)

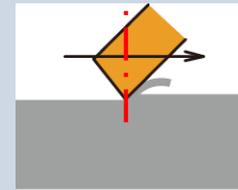
# 工具への要請

負のすくい角  
+ シャープエッジ

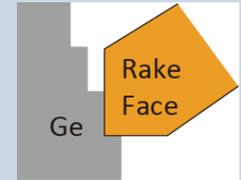
正のすくい角



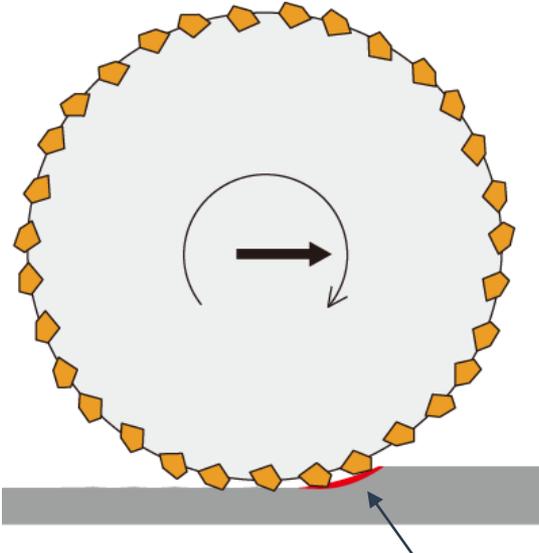
負のすくい角



シャープなエッジ

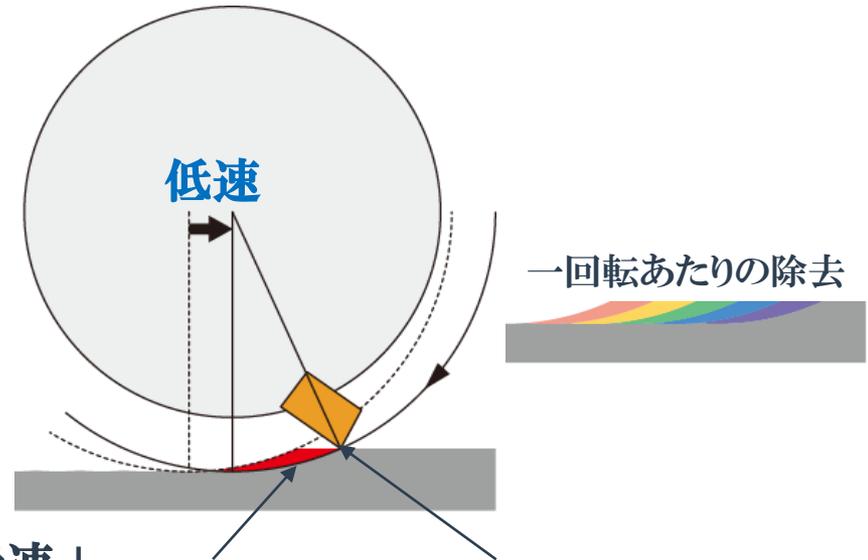


研削 = 超多刃工具



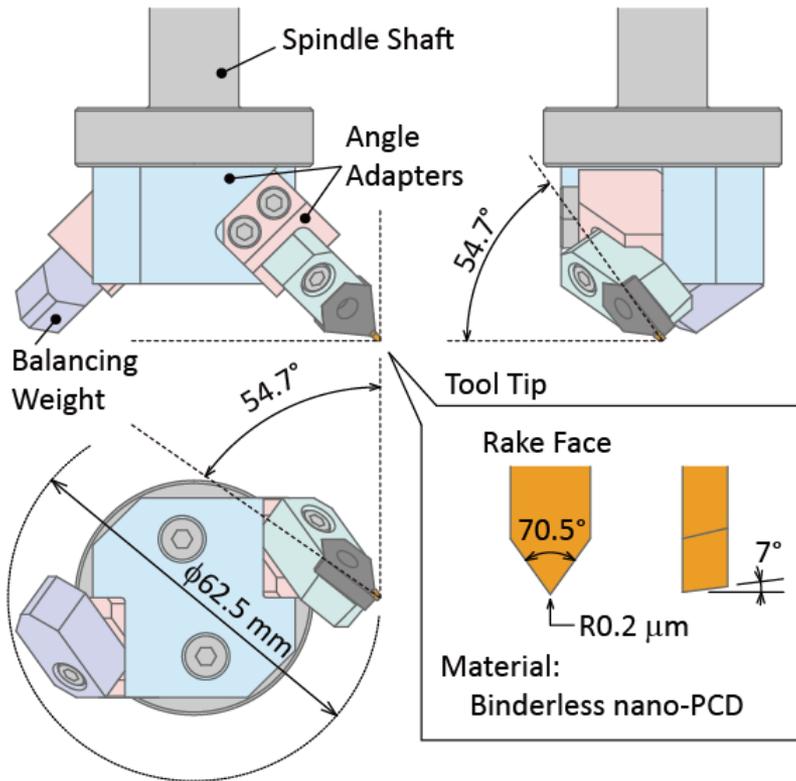
- 砥粒一粒あたりの除去深さは極小
- ほぼ全ての砥粒は負のすくい角
- シャープなエッジは得られない

フライカット = 単刃工具



- 低速 + 微小切り込み深さ = 除去量は極小
- 負のすくい角となるように設計する

# 負のすくい角を実現する工具設計



5-Axis Ultraprecision Machine (ULG-100D, Toshiba Machine)

Coolant (Oil Mist) Nozzle

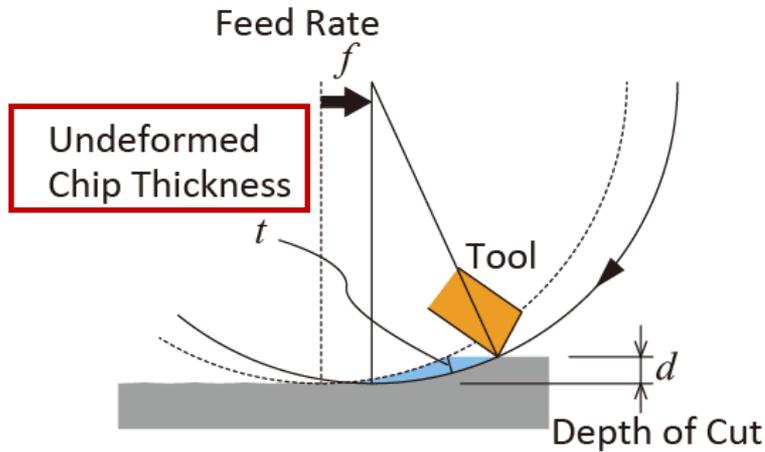
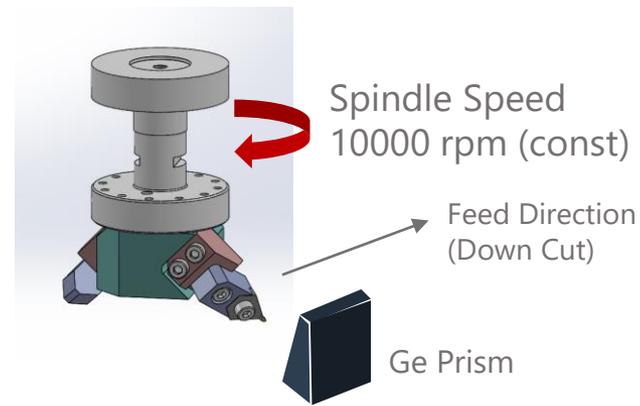


Air Spindle

the Tool

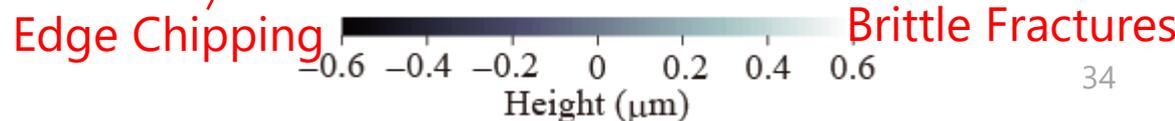
Ge Prism

# テスト加工結果



Measured with White Light Scanning Interferometer  
(NewView7200, Zygo)

		Feed Rate	
		20 $\mu\text{m}/\text{rev}$	100 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Depth of Cut	40 nm	<b>A</b> $t = 25 \text{ nm}$ 	<b>B</b> $t = 40 \text{ nm}$ 
	200 nm	<b>C</b> $t = 66 \text{ nm}$ 	<b>D</b> $t = 198 \text{ nm}$ 

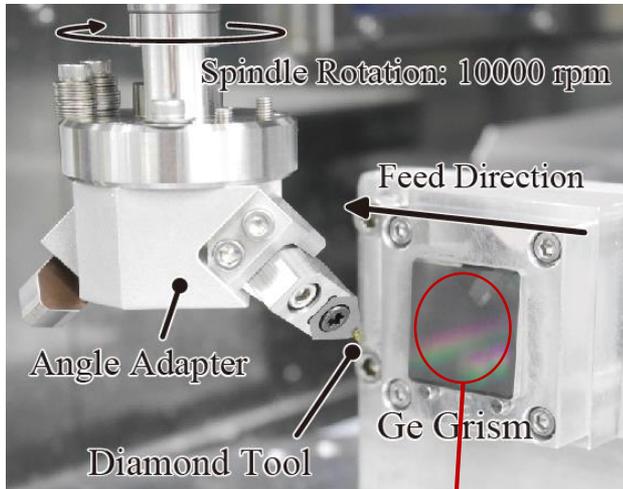


移動速度が遅く、  
切り込みが浅いほど  
カケが少ない  
(当然の結果)



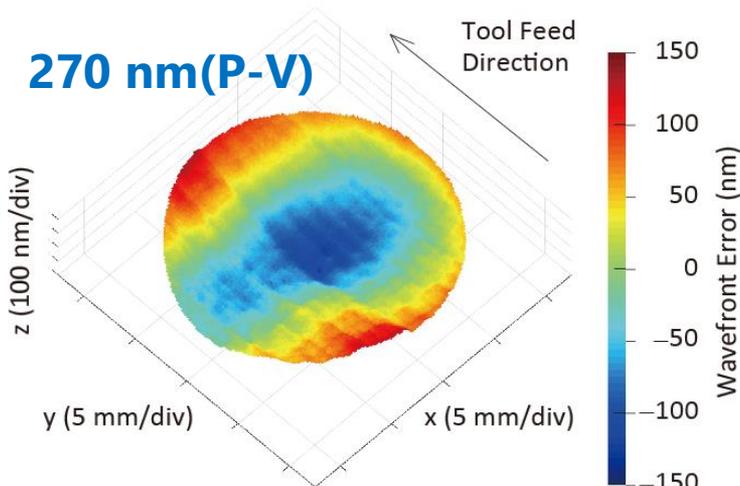
マシンタイムの制約により  
条件Cを選択

# MIMIZUKU用グリズムの加工結果



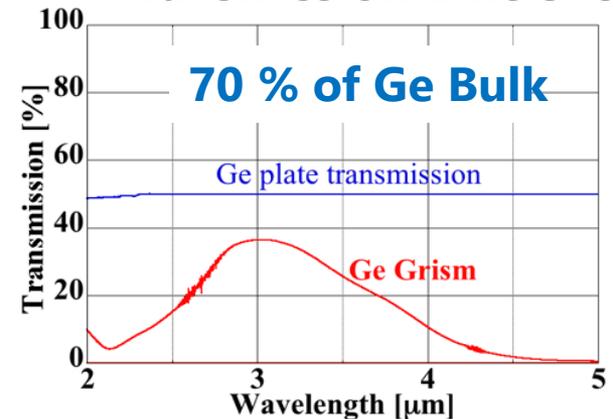
Feed Rate	20 $\mu\text{m}/\text{rev}$ (200 mm/min)
Depth of Cut (per Round)	200 nm
Undeformed Chip Thickness	<b>66 nm</b>
Number of Grooves	<b>1240</b>
Number of Rounds	25 rounds
Total Depth	5 $\mu\text{m}$ (including warm up)
Total Machining Time	<b>7 days and 30 min.</b>

## Zero-order Wavefront Error



Measured with Laser Interferometer (GPI, Zygo)

## Transmission Efficiency

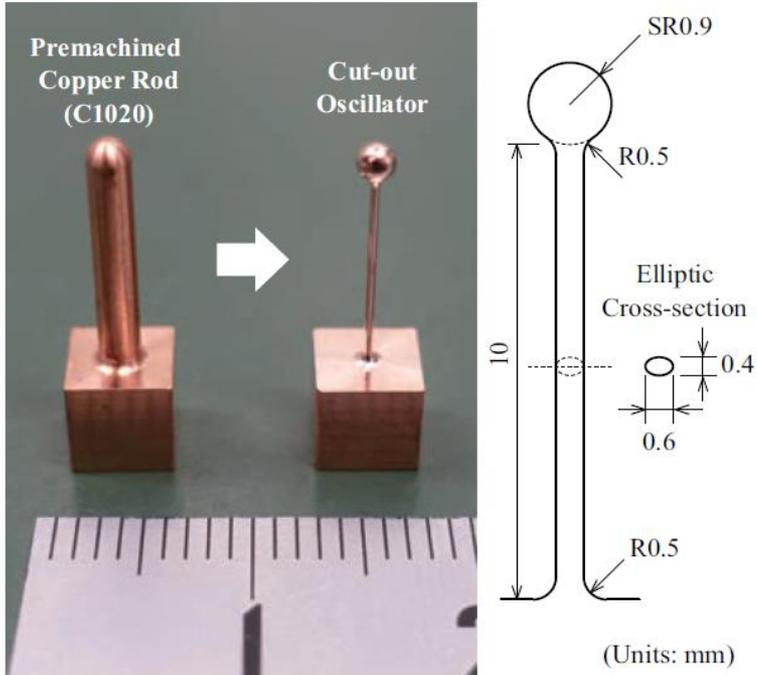


Measured with Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR 410, JASCO)

# 微小振動子の削り出し加工

- 不可能に見える加工形状に挑む
- 低剛性片持ち梁の逐次的旋削加工
- CAMに頼らないツールパスの最適化

# 微小振重力観測実験用振動子



用途：微小重力の観測実験において、  
細線で懸架されたmgスケールの  
ミラーを用いた光共振器に対する振動的な  
重力源として用いる

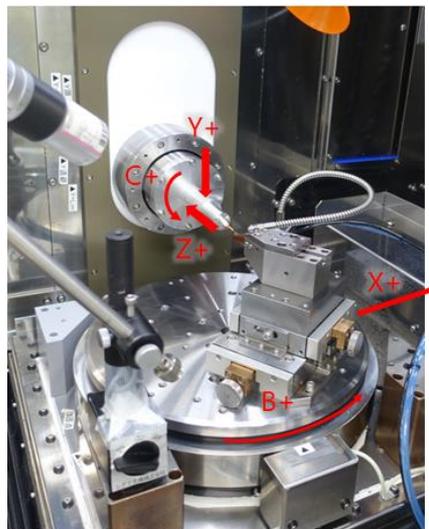
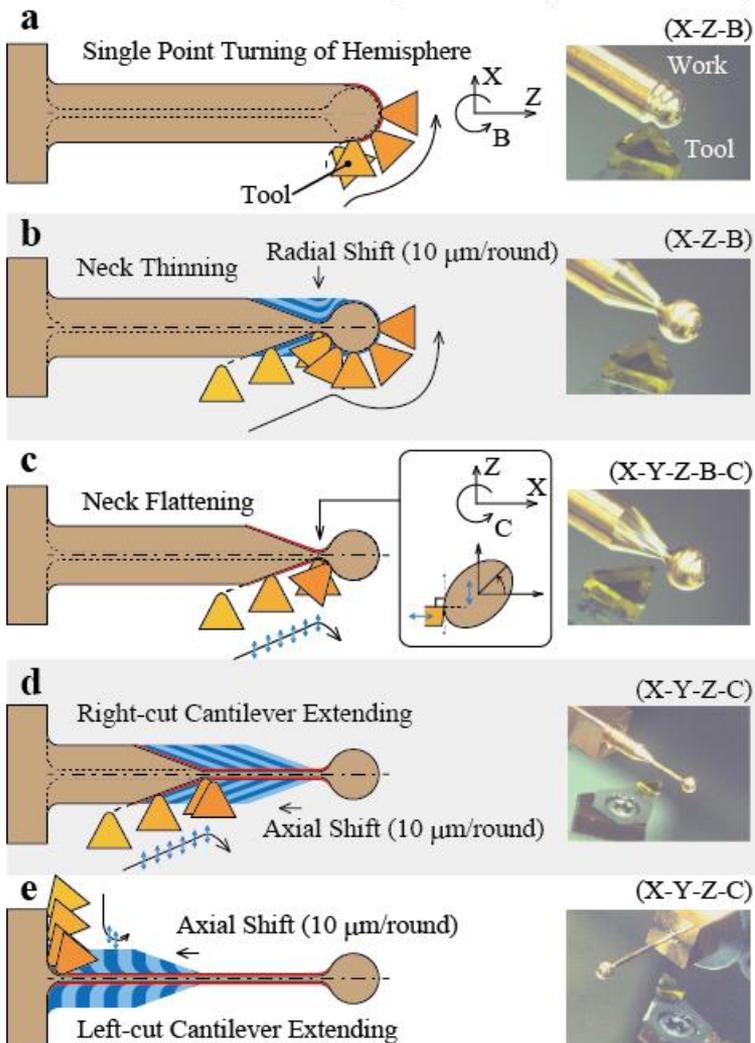
細い楕円柱の先端に球(重り)が付いた、  
極めて加工が難しい構造

材料の均質性が本質的に重要であるため、  
バルクからの削り出し(接合不可)

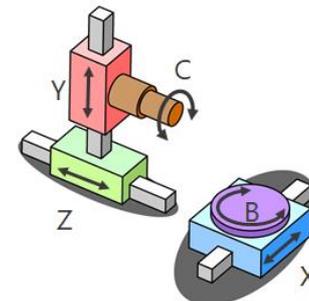
細島 拓也, 松本 伸之, Cataño-Lopez Seth, 山形 豊,  
「超精密5軸同時制御旋削による微小振動子の削り出し加工」, 2019年度 精密工会春季大会

# 5軸同時制御による逐次的加工

(Simultaneously Controlled Axes)



5-Axis Ultraprecision Machine:  
ULG-100D(5A), Toshiba Machine Co., Ltd.



Resolution: XYZ 0.1 nm  
BC 0.00001°

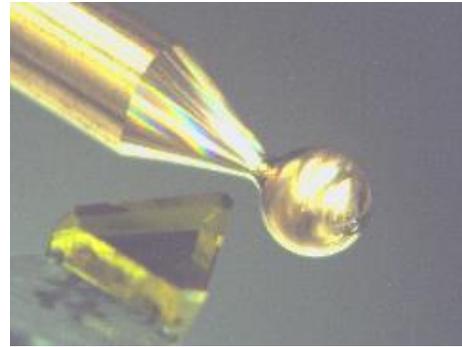
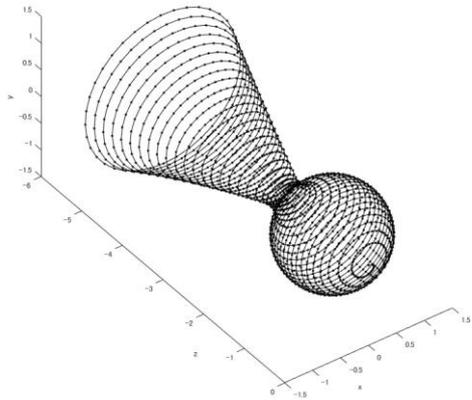


Diamond Tool  
Oil Mist Nozzle

先端から逐次的に仕上げていく

細く弱くなった部分と、未加工で太い部分の境界のみを加工する

# CAMソフトを使わない ツールパスの最適化



- 同じ形状を加工するための「工具の軌跡」は無数に存在
- 当チームでは、被加工物の途中過程での剛性、加工機のダイナミクス、工具の干渉などを考慮して自由に軌跡をデザインできます
- 「こんなカタチがあれば良いが、多分無理だろう」と思ったらぜひご相談下さい

# 短繊維CFRPミラー

剛性・強度はアルミ相当、  
重さは半分、  
線膨張係数は極めて低く、  
注型で任意形状に成形できる樹脂で  
超軽量ミラーの実現を目指す

# ミルドファイバーCFRPミラー

炭素繊維のミルドファイバーを分散させた、注型可能なエポキシ樹脂を(株)T&K TOKAと開発（理研 田島右副氏）

強度はアルミ相当、重さは半分、線膨張係数は極めて低く、任意形状に対応できる

宇宙用途光学素子の軽量化に貢献できないか？



- 超精密加工技術を駆使した特殊製法を考案（特許出願中）
- ニッケルリンめっきとミルドファイバーCFRPを組み合わせた**精密凹面鏡の試作に成功**

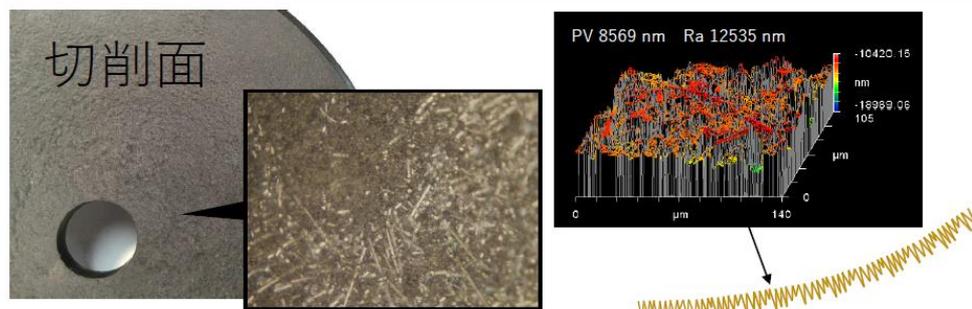
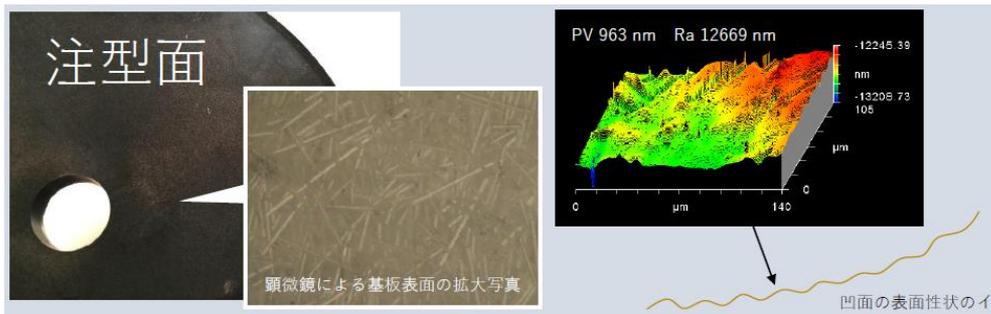
裏面  
(軽量化リブ構造)



表面  
(放物面ミラー)

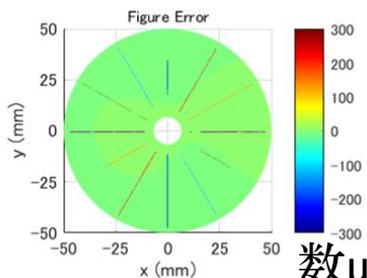
# ミラー化の課題

CFRPを直接加工しても鏡面にならない



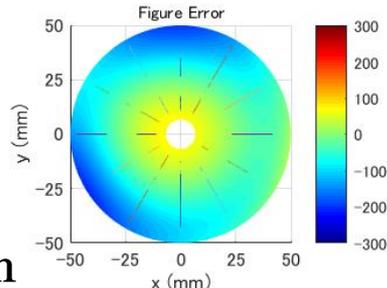
注型精度では光学的精度が達成できない

マスター金型



数 $\mu\text{m}$  数百 $\mu\text{m}$

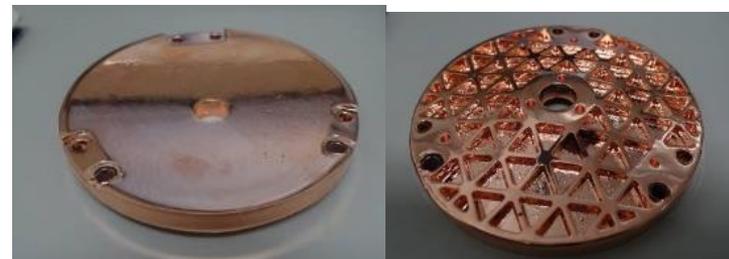
注型品



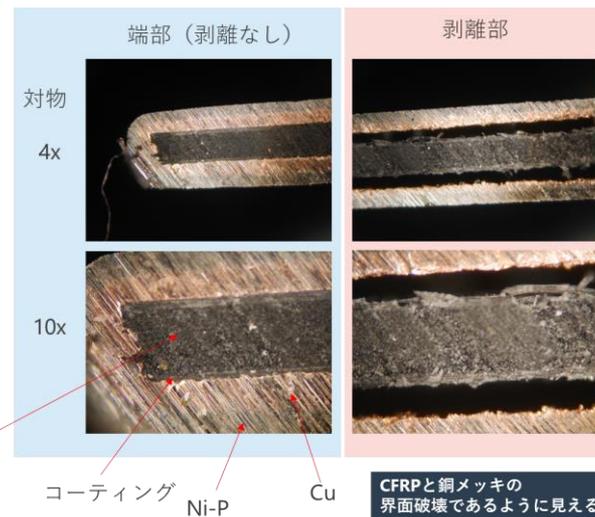
直接ニッケルメッキ処理できない



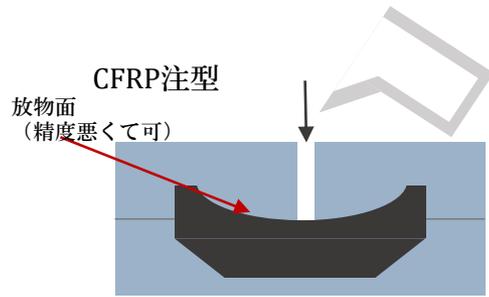
下地として銅メッキすると重すぎる



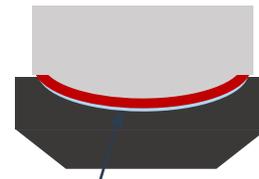
さらに、界面が弱く剥がれやすい



# ソリューション

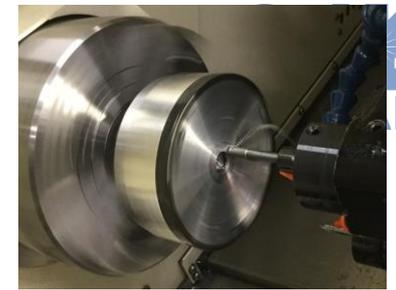


接着



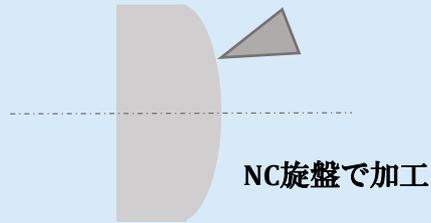
注型と同じ素材で貼り合わせ、  
形状のつじつまをあわせる

余分なアルミを削り取る

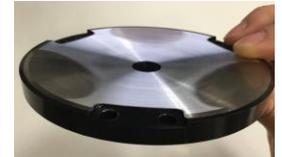


アルミ部品の表面を放物面に削る

ニッケルめっき処理



鏡面仕上げ



超精密加工



研磨



Φ100mm  
放物面鏡の試作に成功！  
(Φ200mmに挑戦中)

CFRPの複雑構造・剛性

+

ニッケルリンメッキの形状精度と表面粗さ  
→それぞれの材料の利点を生かした複合化

# 最後に

- 先端光学素子開発チーム@理研では、超精密加工技術の提供を通じて、様々な分野のサイエンスに貢献することを目指しています。
- 特に装置ごとに特殊な光学素子が要求される天文観測装置の分野には、積極的に関わっていきたいと考えています。
- 興味のあるテーマがありましたら気軽にご連絡下さい。  
装置を使用して自分で加工したい方には、トレーニングの対応もできます。

チームリーダー: 山形 豊 (yamagata@riken.jp)

加工担当: 細島 拓也 (takuya.hosobata@riken.jp)