

インバー合金IC-DXの観測機器への応用

Application of Invar Alloy IC-DX to Astronomical Instruments



高橋 英則（東京大学・天文学教育研究センター）

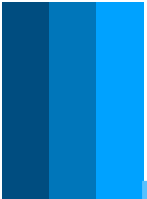
田中 竜（ハワイ観測所／RCUH）

小奈 浩太郎、坂口 直輝（新報国マテリアル）

HIDENORI TAKAHASHI (IoA / UTokyo)

ICHI TANAKA (NAOJ Hawaii / RCUH)

KOTARO ONA, NAOKI SAKAGUCHI (Shinhokoku Material Corp.)



Contents

- インバー合金：IC-DXとは？
 - 物理特性評価
 - ：冷却時組織変化の有無
 - IC-DXの天文観測装置への応用
 - ：多天体分光マスクの場合
 - まとめ
-
- What is Invar Alloy : IC-DX?
 - Evaluation of Physical Property
 - Application of IC-DX to astronomical instruments
 - Summary

インバー合金とは？

What is Invar Alloy?

インバー合金 = 低熱膨張合金

Invar Alloy = Low thermal expansion alloys

合金名	主成分	熱膨張 ($\times 10^{-6}/K$)	一般的用途
Invar (36Invar)	36%Ni-Fe	≤ 2.0	成型金型
Super Invar	32%Ni-5%Co-Fe	≤ 1.0	露光装置
Zero Invar	32%Ni-5%Co-Fe (高純度)	0	露光装置
Ductile Invar	High C-36%Ni	2.0	工作機械
Stainless Invar	Fe-52%Co-11%Cr	0 (再現できていない)	なし

インバー合金の課題

Technical Issues for Invar Alloy

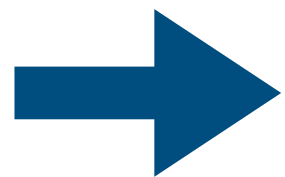
- 課題
- 1 低温安定性 低温域でのマルテンサイト変態
 - 2 経年変化 長期間による寸法変化
 - 3 低ヤング率 鉄鋼材料の6～7割程度
 - 4 耐食性 ステンレス鋼には及ばない

Stability at low temperatures
→ Martensitic transformation

Aging
→ Dimensional change

Low Young's Modulus
→ 60-70% of steel materials

Corrosion resistance
→ Lower than stainless steel



インバー合金**IC-DX**の開発

Development of Invar Alloy : **IC-DX**

IC-DXとは？

What is the IC-DX ?

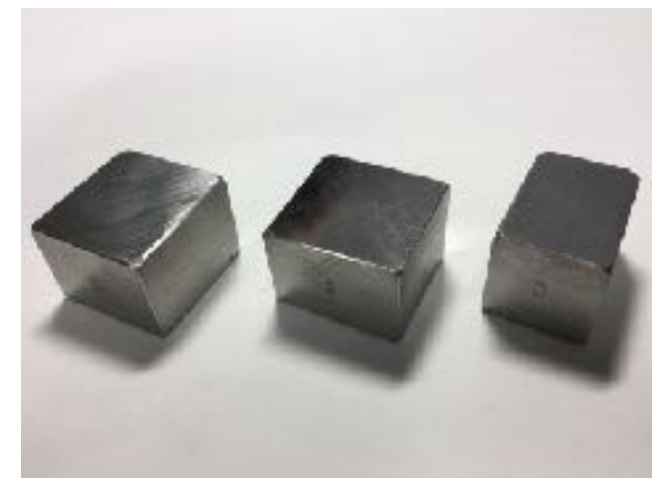
- Fe-Co-**Cr**系インバー合金

(cf : Super Invar, Zero Invar : Fe-**Ni**-Co系インバー合金)

- Cr含有により、他のインバー材より**耐食性**に優れる
- 極低温域でもほぼ**ゼロ熱膨張**
- 極低温(4K)でも**マルテンサイト組織化しない**安定性
- 熱処理が炉冷であるため、**残留応力が少ない**
- 極低炭素により**低経年変化**を実現



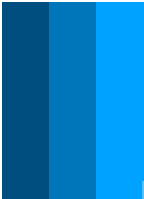
- Fe-Co-**Cr** Invar alloys (cf: Super Invar, Zero Invar : Fe-Ni-Co Invar alloys)
- Superior **corrosion resistance** to other invar materials because of Cr content
- Almost **zero thermal expansion** at cryogenic temperatures
- Stable **without martensitic structure** even at cryogenic temperatures (4K)
- **Low residual stress** because of furnace cooling during heat treatment
- Low carbon content realizes **low aging**



新報国マテリアルのインバー合金ラインナップ

The lineup of Invar Alloy products by Shinhokoku Material

特徴	鋼種名	熱膨張 ($\times 10^{-6}/K$)	ヤング率 (GPa)	使用可能 温度域($^{\circ}C$)	主な用途
Invar	IC-36	<2.0	120	≥ -196	—
Super Invar	IC-36S	<1.0	120	≥ -30	半導体露光装置
快削性	IC-36FS	<1.0	120	≥ -30	半導体露光装置
Stainless Invar	SLE-2	5.0	170	—	研磨定盤
高剛性※	IC-EX1	1.5	145	—	液晶露光装置
耐極寒用	IC-LTX	<0.1	130	≥ -100	宇宙関係
ゼロ膨張※	IC-ZX	0	130	≥ -20	半導体露光装置
究極	IC-DX	<0.3	160	≥ -253	TMT



物理特性評価項目

Items of Evaluation of physical property

- 冷却試験（組織変化）
- 極低温熱膨張率測定
- 経年劣化試験（寸法測定）
- ヤング率測定
- 耐食性試験
- 残留応力
- etc...

- Cooling Test (Microstructural Change)
- Cryogenic thermal expansion measurement
- Aging test (dimensional measurement)
- Young's modulus measurement
- Corrosion resistance test
- Residual stress
- etc...

冷却（He浸漬）試験：組織変化

LHe Dipping test

Fe-Ni(-Co)系インバー合金常温ではオーステナイト単相組織

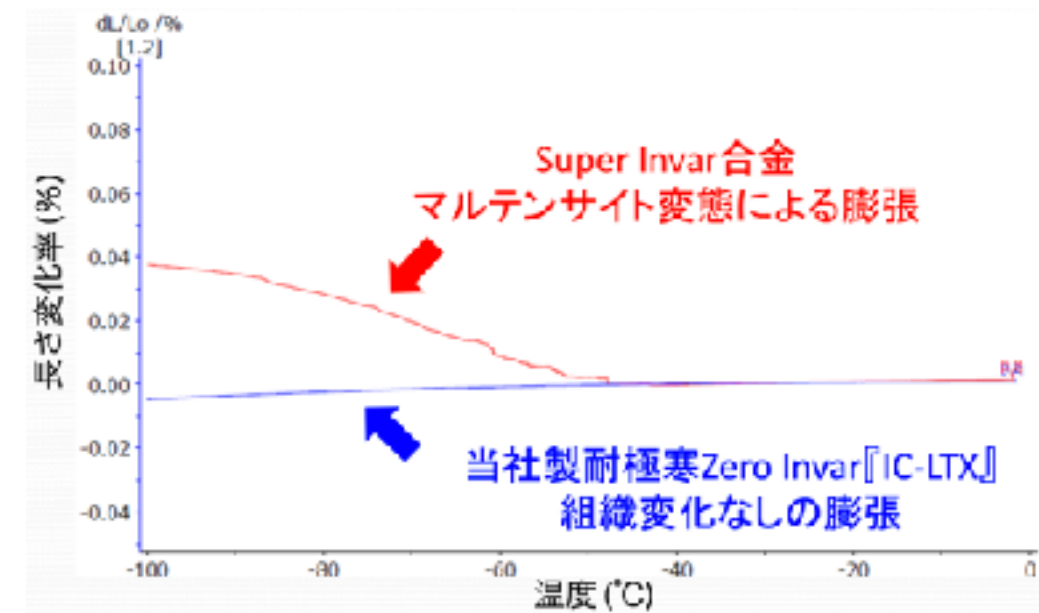
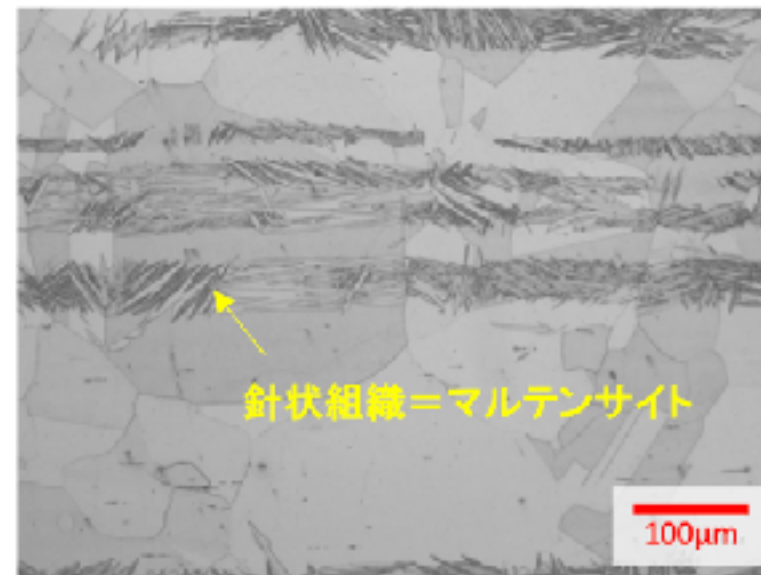
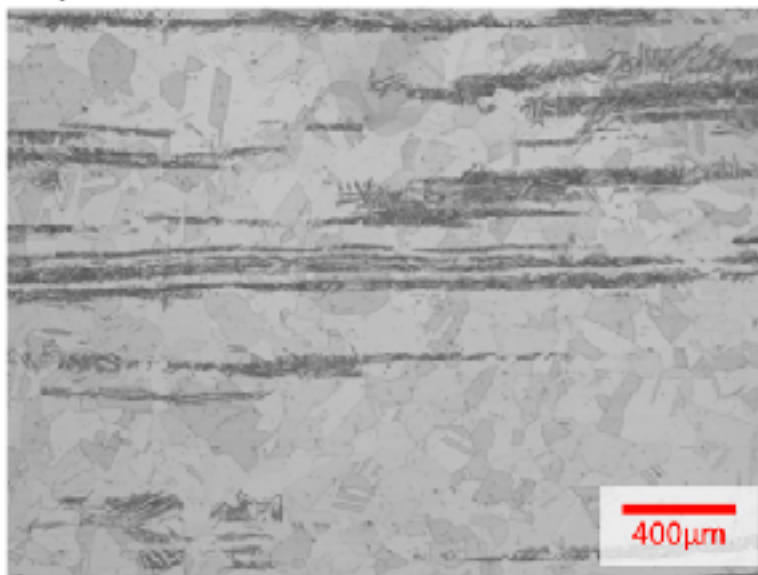
→ 低温下で**マルテンサイト変態**が起こる

→ マルテンサイト変態すると**低熱膨張性が消失**

Fe-Ni(-Co) Invar alloys have a single phase austenite structure at room temperature

→ **Martensitic transformation** occurs at low temperatures

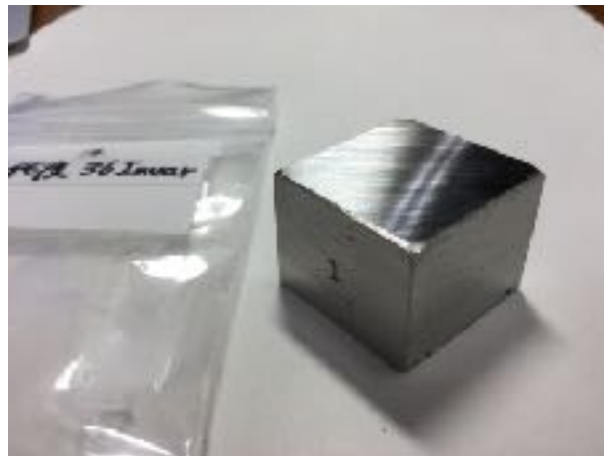
→ **Loss of low thermal expansion**



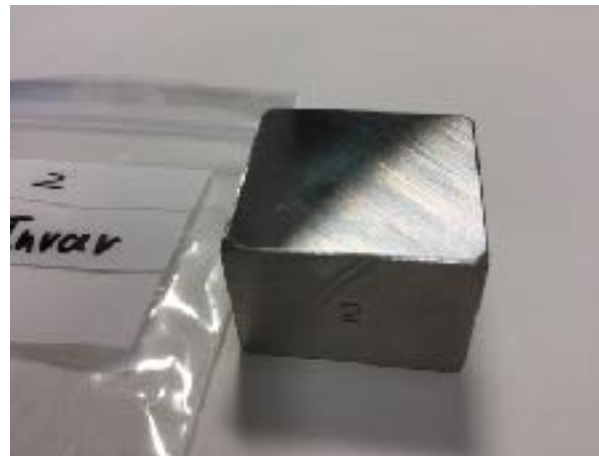
冷却（He浸漬）試験：組織変化

LHe Dipping test

Invar thermal test into LHe



高純度 36 Invar



36 Invar



IC-DX

冷却前

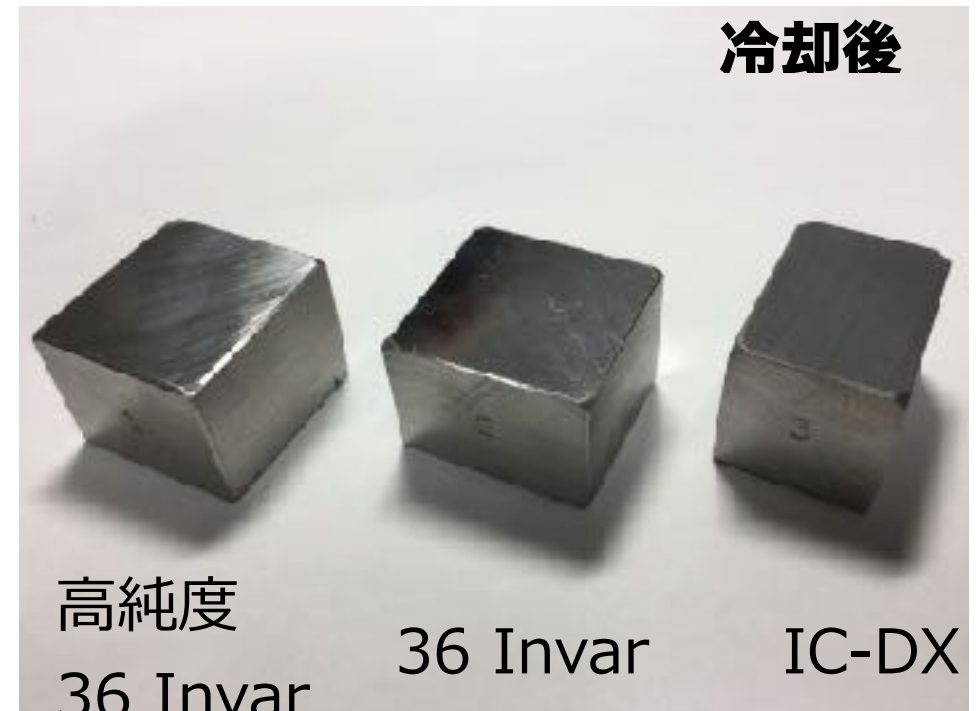
30分



保持方法

LHeタンクへ

冷却後



高純度

36 Invar

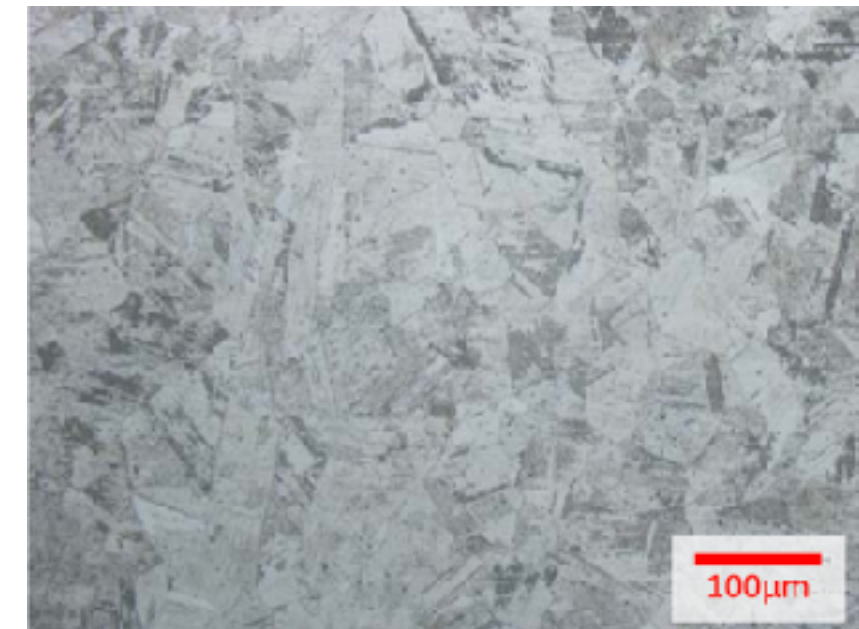
36 Invar

IC-DX

冷却（He浸漬）試験：組織変化

LHe Dipping test

常温（ambient） → 77K（LN2） → 4K（LHe）



4Kの温度下でもマルテンサイト変態はしない→マルテンサイト変態による膨張や合金自体のインバー特性の消失はない

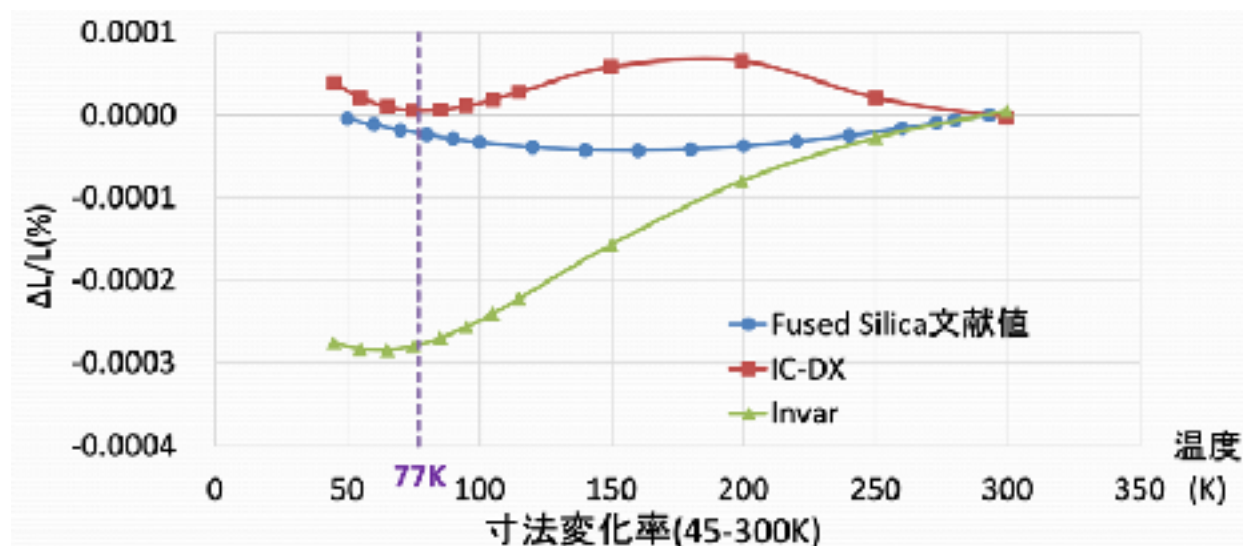
No Martensitic transformation → Non-disapper of physical properties

参考

IC-DXは極低温域でもInvar合金より寸法変化が小さい

→熱膨張が小さい

（但し、45Kまでのデータのみ）



	IC-DX	Invar	Fused Silica
77K長さ変化率(%)	0.00001	-0.00028	-0.00002
ΔFused Silica (77K)	0.00003	-0.00026	-

IC-DXの天文観測装置への応用

Application of Invar Alloy IC-DX to Astronomical Instruments

- ゼロ膨張、非マルテンサイト組織化 → 極低温での利用（赤外線観測装置）
 - 高ヤング率 → 光学素子治具
 - 極低温組織安定性 → 冷却装置、衛星部品
 - 低残留応力、低経年変化、耐食性 → 長期間の安定利用
-
- zero thermal expansion & non-martensitic structure → Usage at cryogenic temp. (For IR instrument)
 - High Young's Modules → Optics
 - Structural Stability at low temperature → Cryogenics, Satellite
 - Low residual stress, low aging, corrosion resistance → Stability for long term



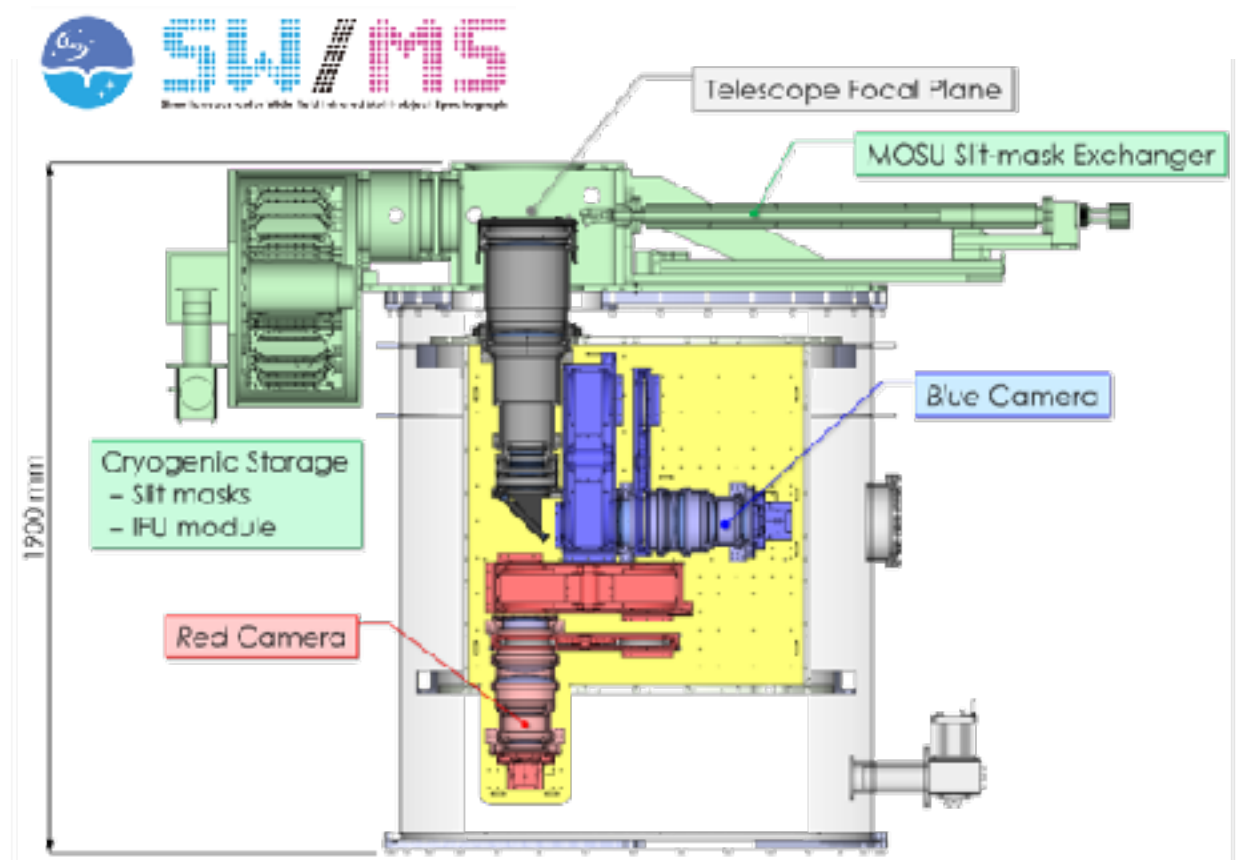
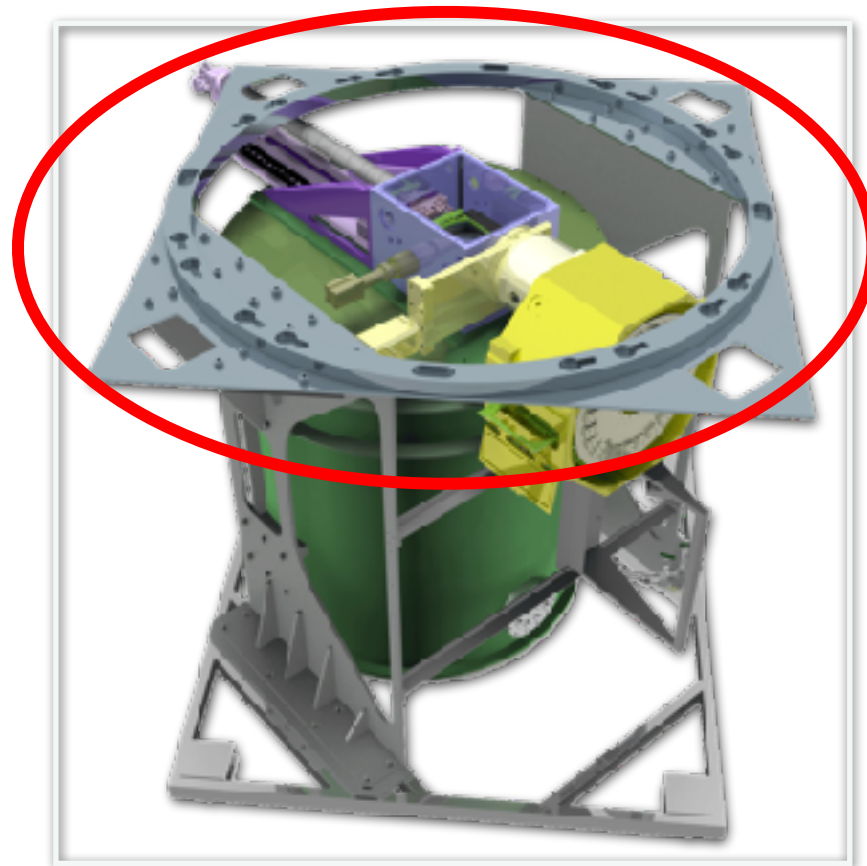
- **多天体分光マスクシートへの応用**
（赤外線観測装置） → スリット位置が加工時（常温）と運用時（低温）で不変
 - **冷却光学素子への応用** → 光学パラメータが不変
-
- **Mask sheet of multi object spectroscopy** → Non displacement of slit position between ambient and low temp.
 - **Cryogenic optics** → constant of optical parameters between ambient and low temp.

多天体分光マスクシートへの応用

Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

近赤外線広視野多天体分光カメラ：SWIMS

- **SWIMS** : Simultaneous-color **W**ide-field **I**nfrared **M**ulti-object **S**pectrograph
- TAOの初期観測装置として開発
- 2018年(S18A) から2023年 (S22B) までハワイ観測所すばる望遠鏡のPI装置として観測運用
- 広視野 (～φ9分角)
- 近赤外線 of 2つの波長域 (0.9～1.4 / 1.4～2.5μm) を同時観測
- 撮像 or **多天体分光**



多天体分光マスクシートへの応用

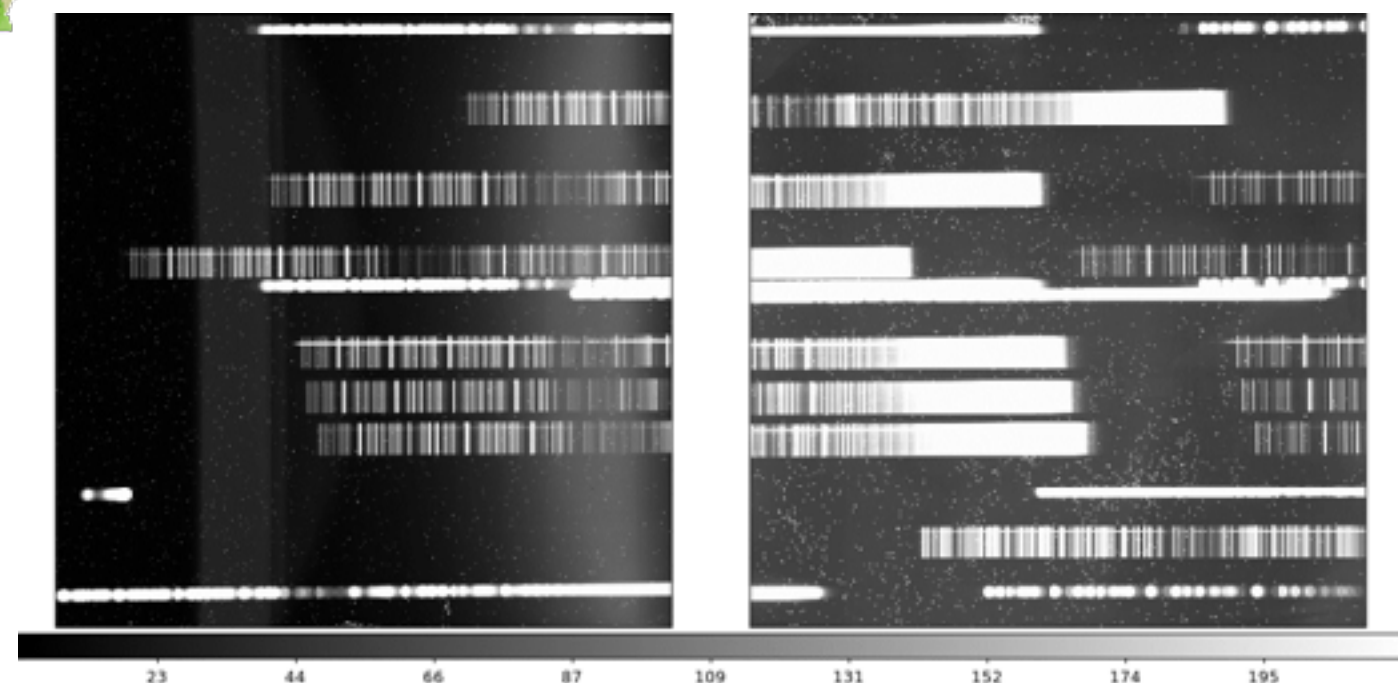
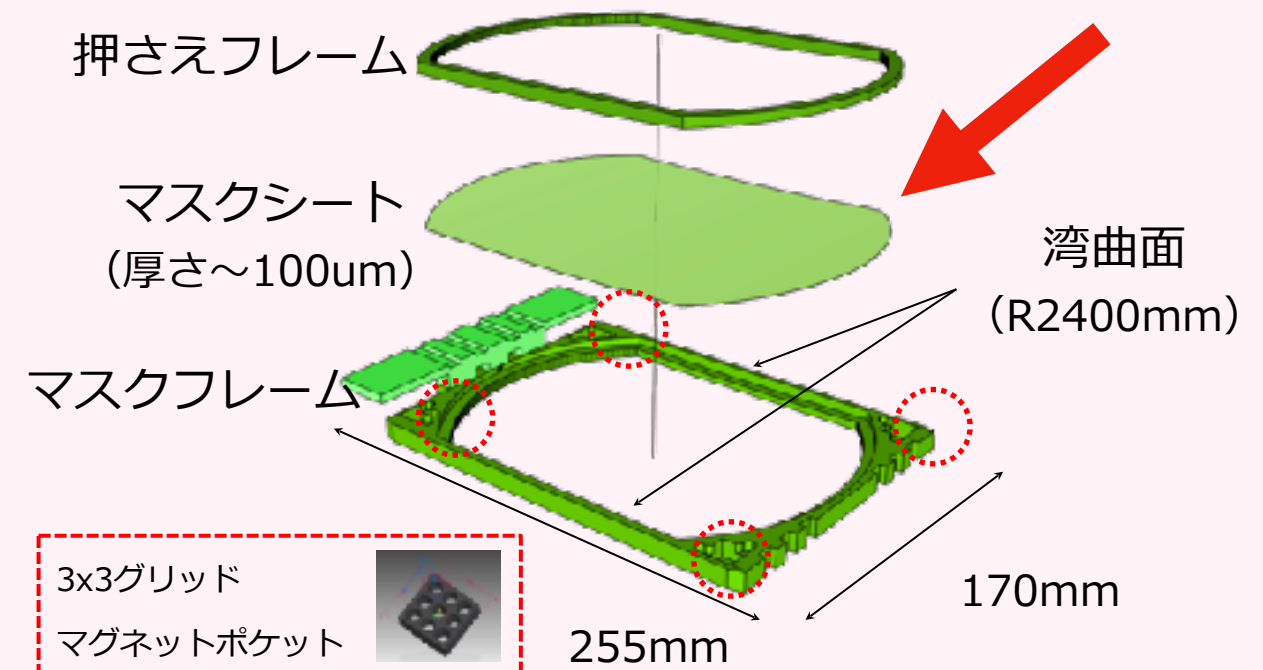
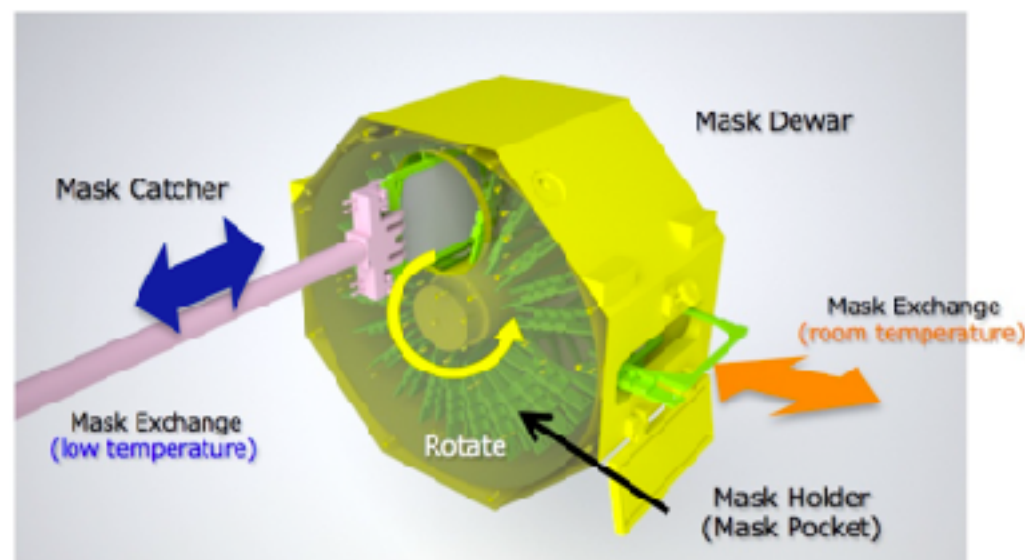
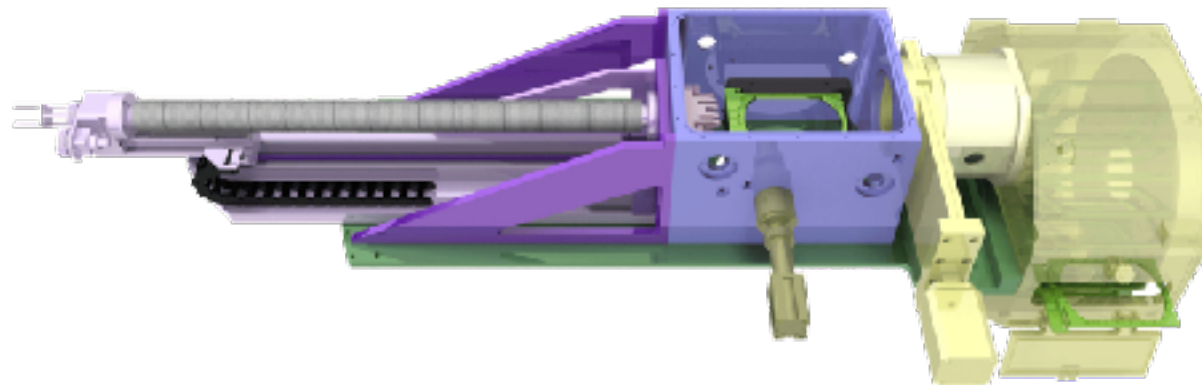
Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

多天体分光ユニット

- 各マスクシートに20-30スリット
- カルーセルに15枚のマスクシートをストア可能
- マスク交換時のサーマルサイクル～3日間

Multi-Object Spectroscopy Unit

- 20-30 slit (objects) / sheet
- ~15 sheets in mask dewar
- Thermal cycle ~ 3 days

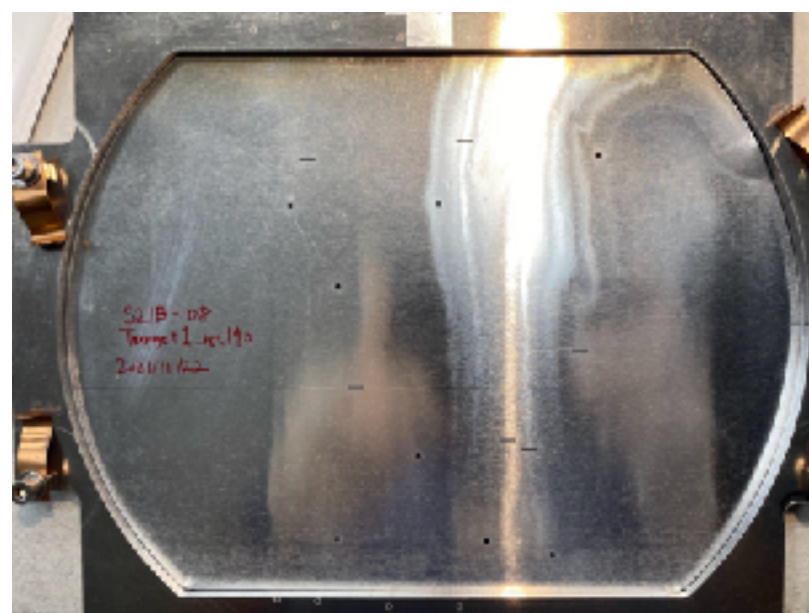
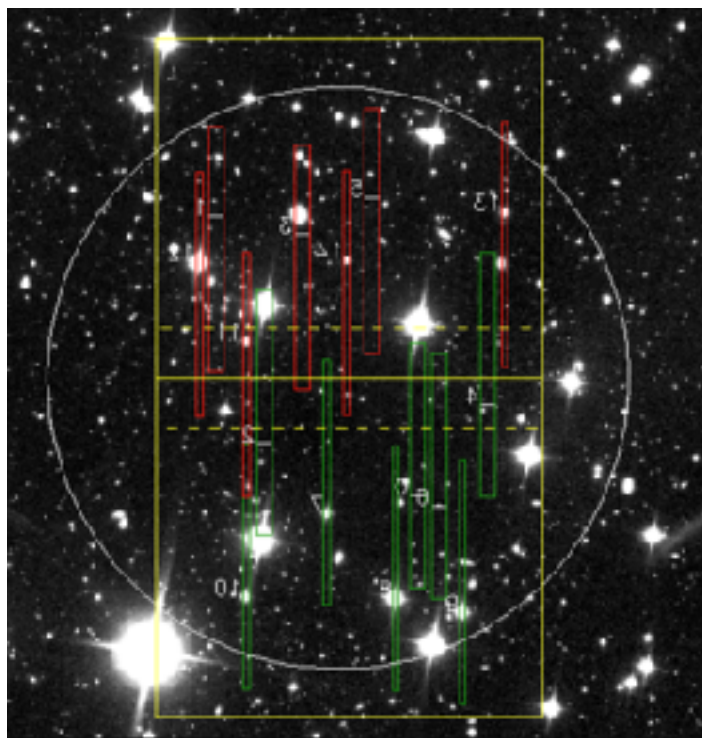


多天体分光マスクシートへの応用

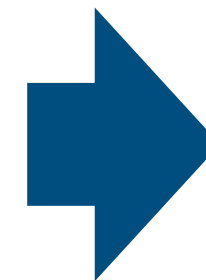
Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

現在のマスクシートの問題点

- マスクシート上のスリット配置は撮像モードでの天体位置を基に加工
- 加工時（常温）と運用時（低温）ではマスクシートの温度が異なる
→ 低温時のスリットの（相対）位置が変化する
- 温度の違いによる変化量を想定してスリット加工を行うが、想定した温度になっているか？
 - Slit positions on the mask sheet is processed based on imaging observation.
 - Temperature of the mask sheet differs between processing and operation
→ The (relative) position of the slit changes at low temperatures
 - Slit processing is performed assuming temperature differences.
→ How is real temperature?



Cf: $\Delta \sim 500\mu\text{m}$ (/100mm, 300→100K)



**熱収縮がなければ
解決する（はず）**

No thermal expansion,
No problem

多天体分光マスクシートへの応用

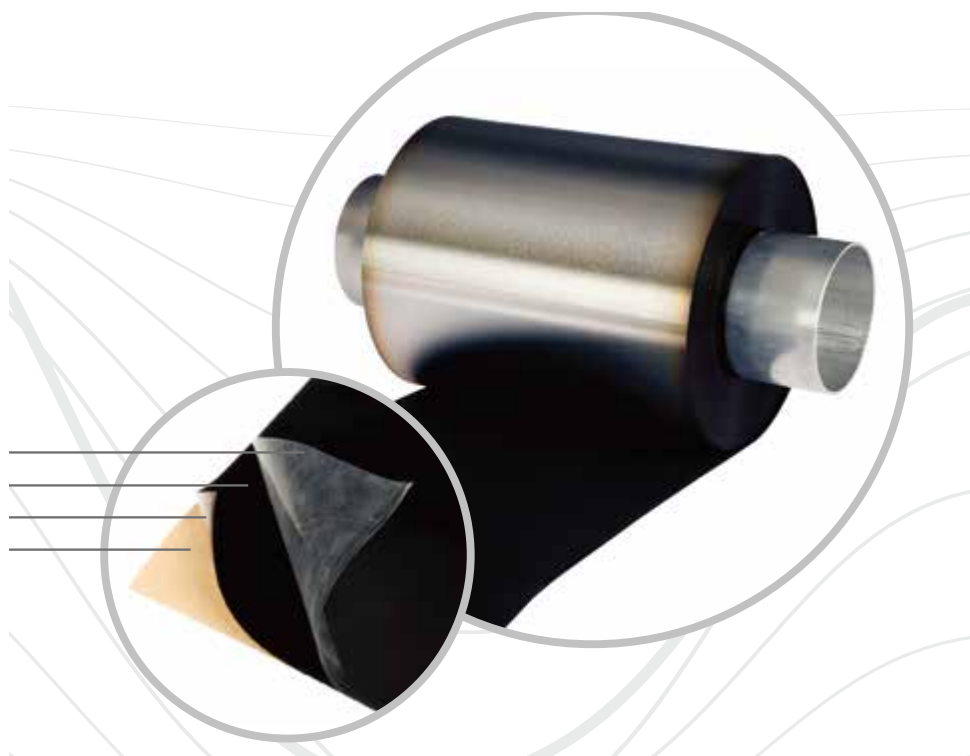
Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

検討事項 (issues)

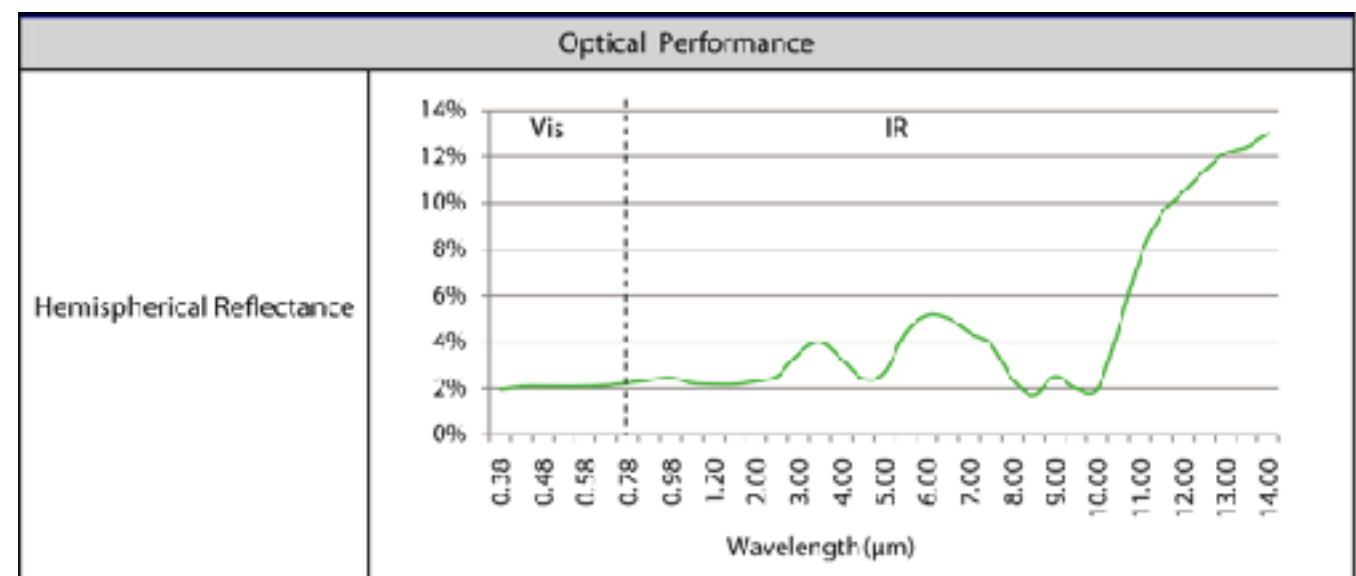
- シート形状への加工：大きさ・厚さ (size, thickness) → クリア (clear)
- 黒色塗装 (coating for anti-reflection) → クリア (clear)
- スリット加工 (レーザーカット) (laser cutting) → 本講演 (this talk)
- 冷えるか? (cooling) → 今後 (in the future)

Acktar VIS and IR Light Absorbing Foil

Spectral Black™ and Spectral Black HP™



- 可視～10μmまで反射率2-5%
- すばる望遠鏡MOIRCSでも使われている
(シートはアルミ)

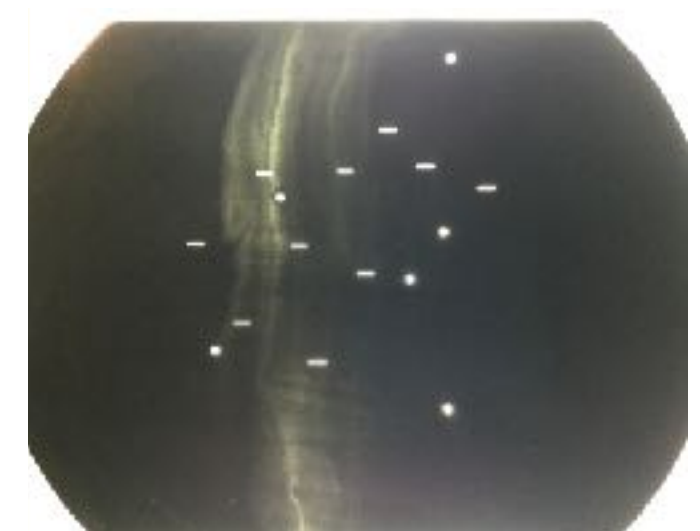
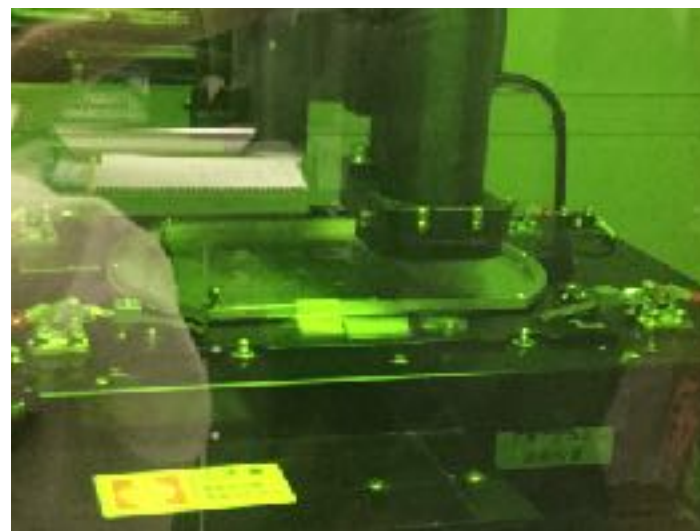


多天体分光マスクシートへの応用

Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

レーザーカット (laser cutting)

- **レーザーカットの課題** (technical issues of laser cutting)
 - : 加工できるか? (fabricating?)
 - : 加工パラメータは? (parameters?)
 - : 蓄熱による変形は? (thermal heating?)
 - : スリット穴や丸穴の断面 (キレ) は? (cross-sectional sharpness?)
- **加工機**
 - : スリット作成用レーザー加工装置@国立天文台ハワイ観測所
 - : XYステージ、制御系 = アルプスエンジニアリング
 - : レーザー部 = イエナオプティクス (独)
 - : MOIRCS, FOCAS, SWIMSのマスクカットの実績あり (0.1mm厚アルミシート)

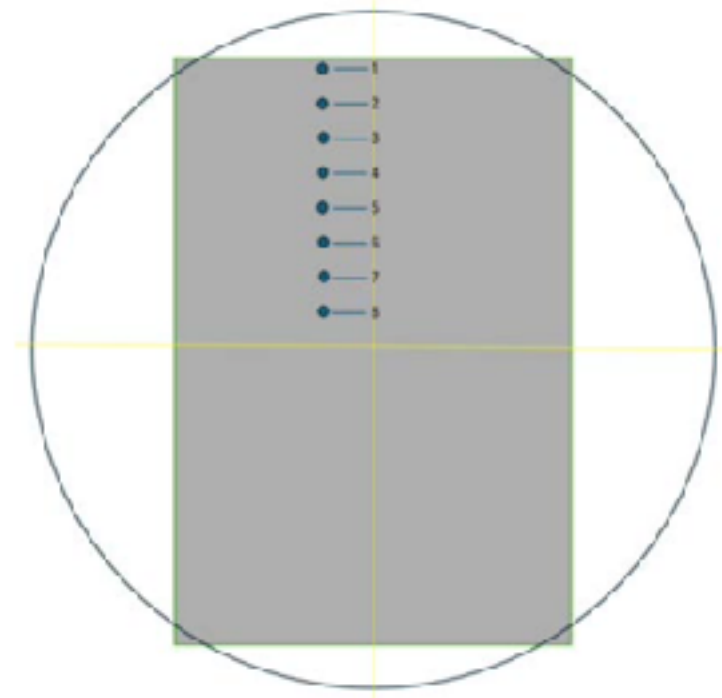


多天体分光マスクシートへの応用

Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

レーザーカット (laser cutting)

- サンプル (sample)
 - : IC-DX $t=0.05\text{mm}$, 0.1mm
 - : Acktar黒色塗装あり (with Acktar coating)
- 加工パラメータ (parameters)
 - : 電圧 (voltage) = $3\sim 5.2\text{ V}$
 - : レーザー周波数 (freq.) = 2kHz (固定)
 - : 速度 (speed) = $15\sim 30\text{mm/sec}$
 - : 照射回数 (repetition) = $8\sim 20\text{回}$

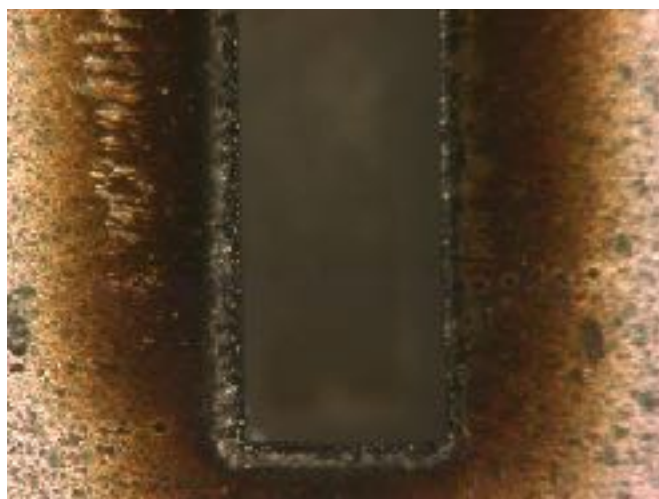


- カットはホール1つスリット1つのペアをパラメータを変えながらカットしていき、切れ味などを評価。
- スリットは幅 0.4mm 長さ 1cm 、ホールは直径 0.8mm 。MOIRCSでよく使われる数字。
 - Change cutting parameters for each slit / hole → Evaluate cross-sectional sharpness
 - slit width = 0.4mm , slit length = 1cm , hole diameter = 0.8mm (typical values for MOIRCS)

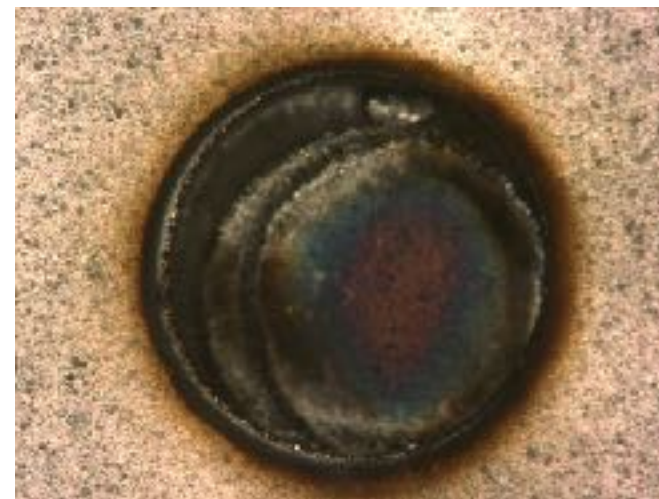
多天体分光マスクシートへの応用

Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

結果 (result : $t=0.05\text{mm}$)



- 加工パラメータ (parameters)
 - : 電圧 (voltage) = 4.7 V
 - : レーザー周波数 (freq.) = 2kHz (固定)
 - : 速度 (speed) = 15mm/sec
 - : 照射回数 (repetition) = 8回

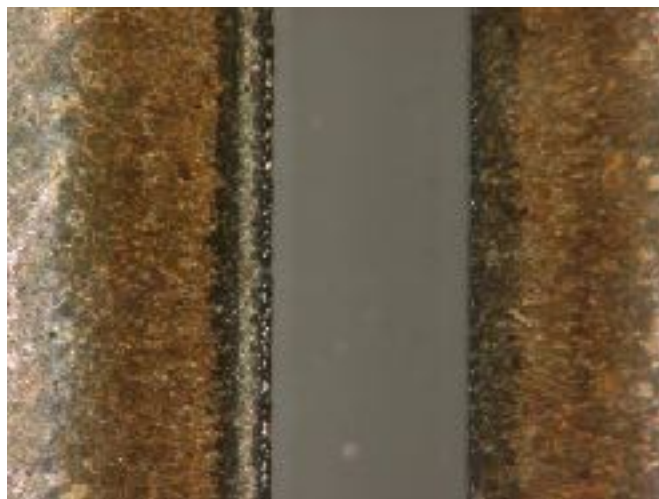


- ややデブリが見られるものの、上記パラメータでの加工が一番良さそう。
- これを基に0.1mm厚のカットを行う。
- Cutting success (even with debris)
- Cut 0.1mm sheet based on this parameters

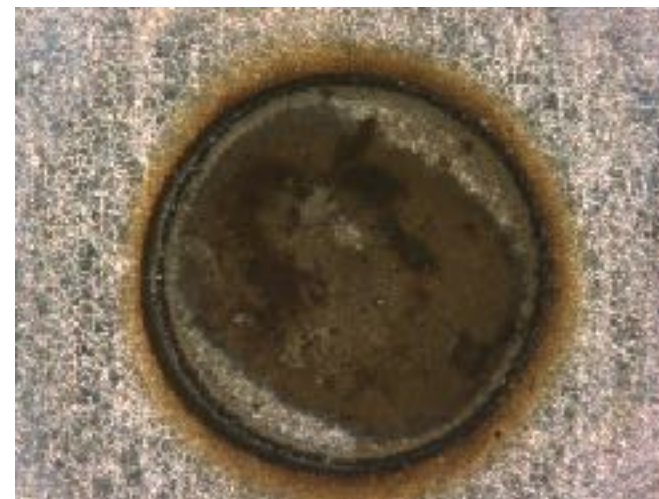
多天体分光マスクシートへの応用

Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

結果 (result : $t=0.1\text{mm}$)



- 加工パラメータの一例 (parameters)
 - : 電圧 (voltage) = 4.2 V
 - : レーザー周波数 (freq.) = 2kHz (固定)
 - : 速度 (speed) = 11mm/sec
 - : 照射回数 (repetition) = 10回



- 0.05mmと同様のパラメータでは切れない。
 - 最適パラメータの組み合わせを探したが有効な値は見つからず。
 - 切断の際の熱が溶接効果として働き、デブリとして残る。**
- It does not cut with the same parameters as 0.05mm.
 - No best combination of parameters.
 - Heat during cutting acts as a welding effect and remains as debris.

多天体分光マスクシートへの応用

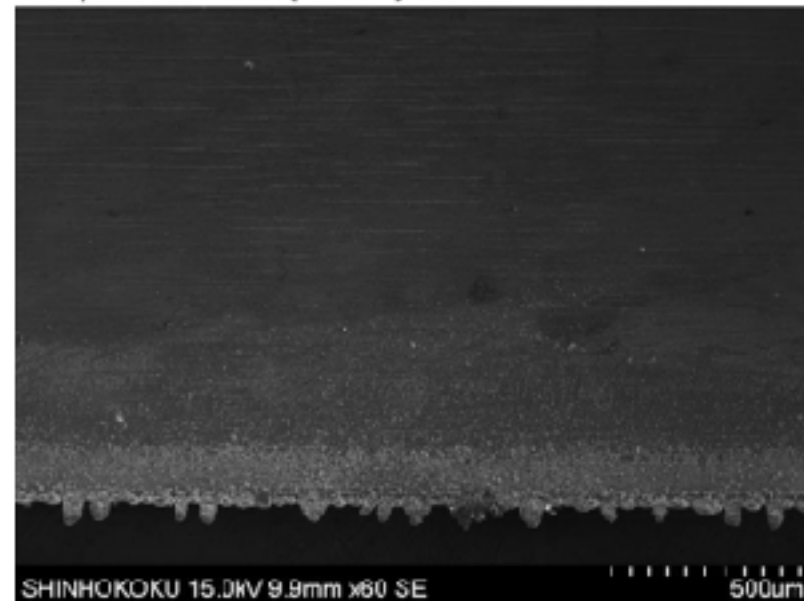
Application for Mask sheet of
Multi-object spectroscopy

参考：レーザー加工時のEDX分析

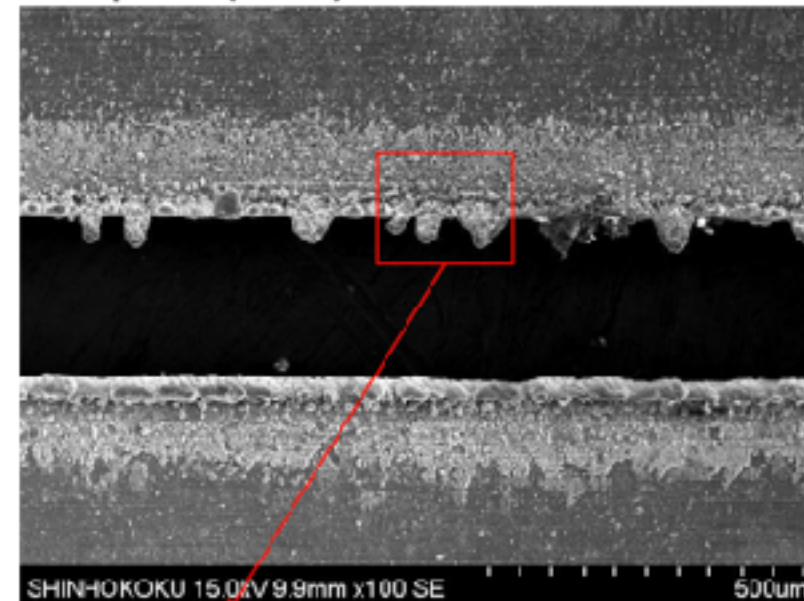
EDX analysis

SLE-2：0.1mm箔+ファインブラック処理(ブラザー工業株式会社)

250 μ m穴近傍(SE像)



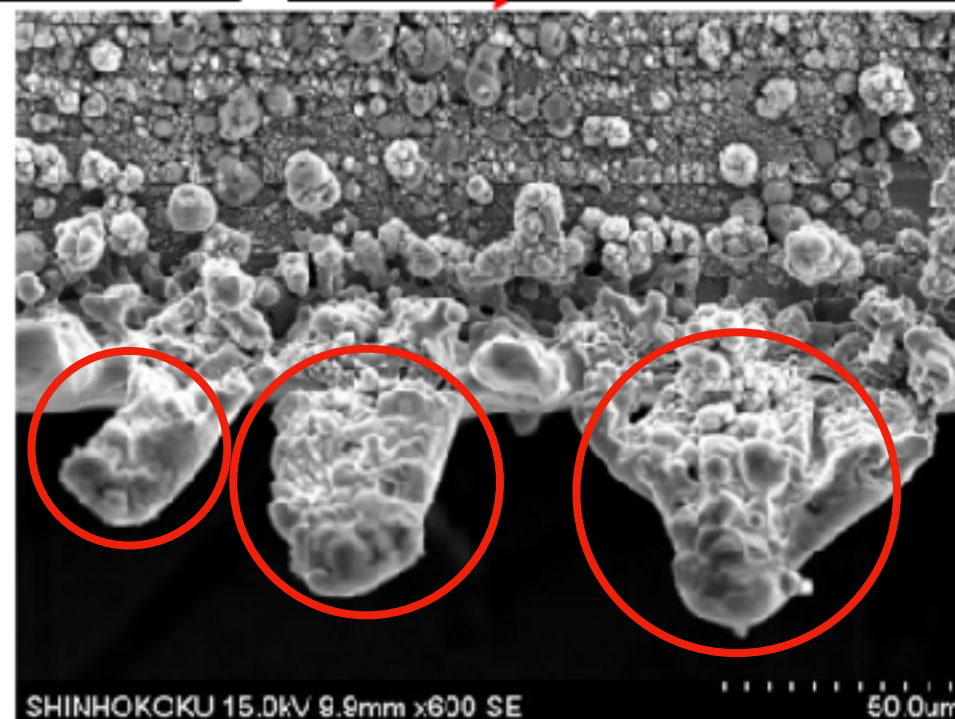
250 μ m穴(SE像)



付着物拡大

EDX分析の結果、O（酸素）が多く含まれており、一度溶解した母材が酸化し、再凝固・成長したと思われる。

- EDX analysis showed a high content of O (oxygen).
- Once-melted base material was oxidized and re-solidified/grown.

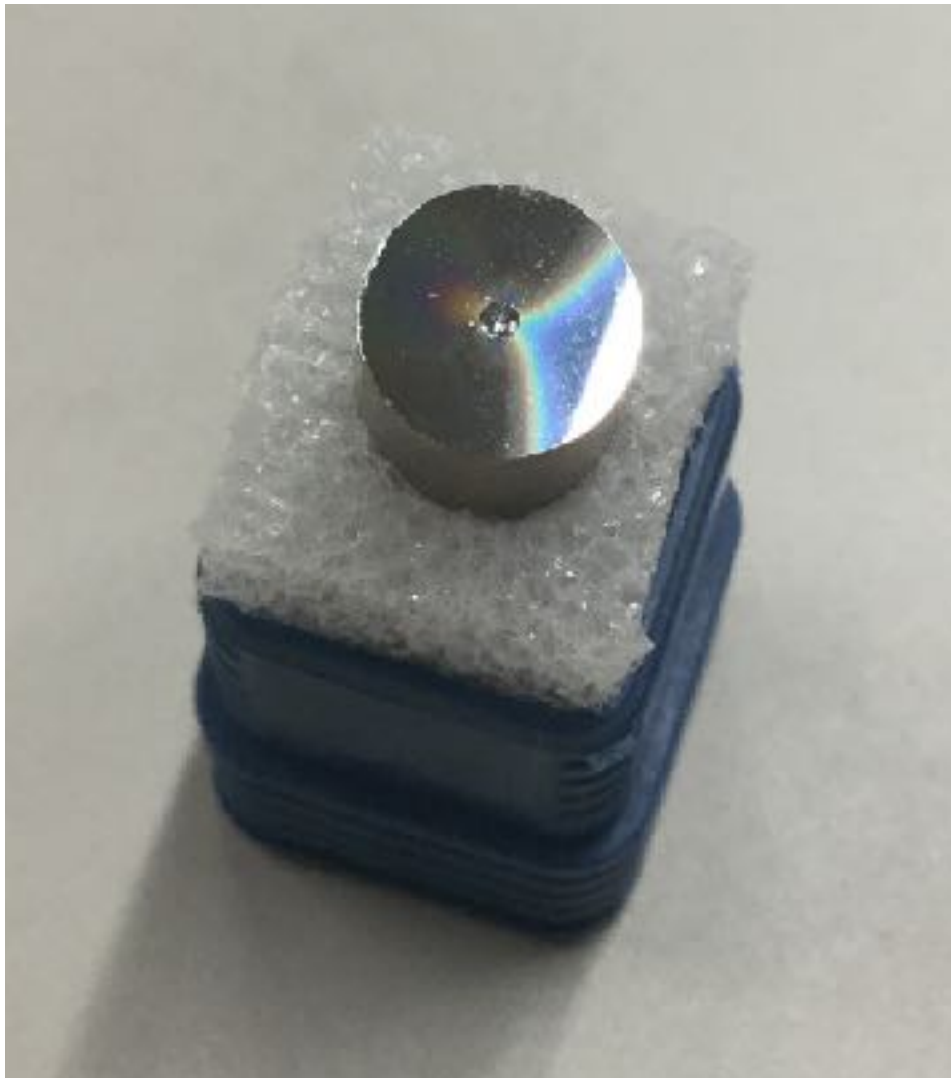


光学素子への応用

Application for Optics

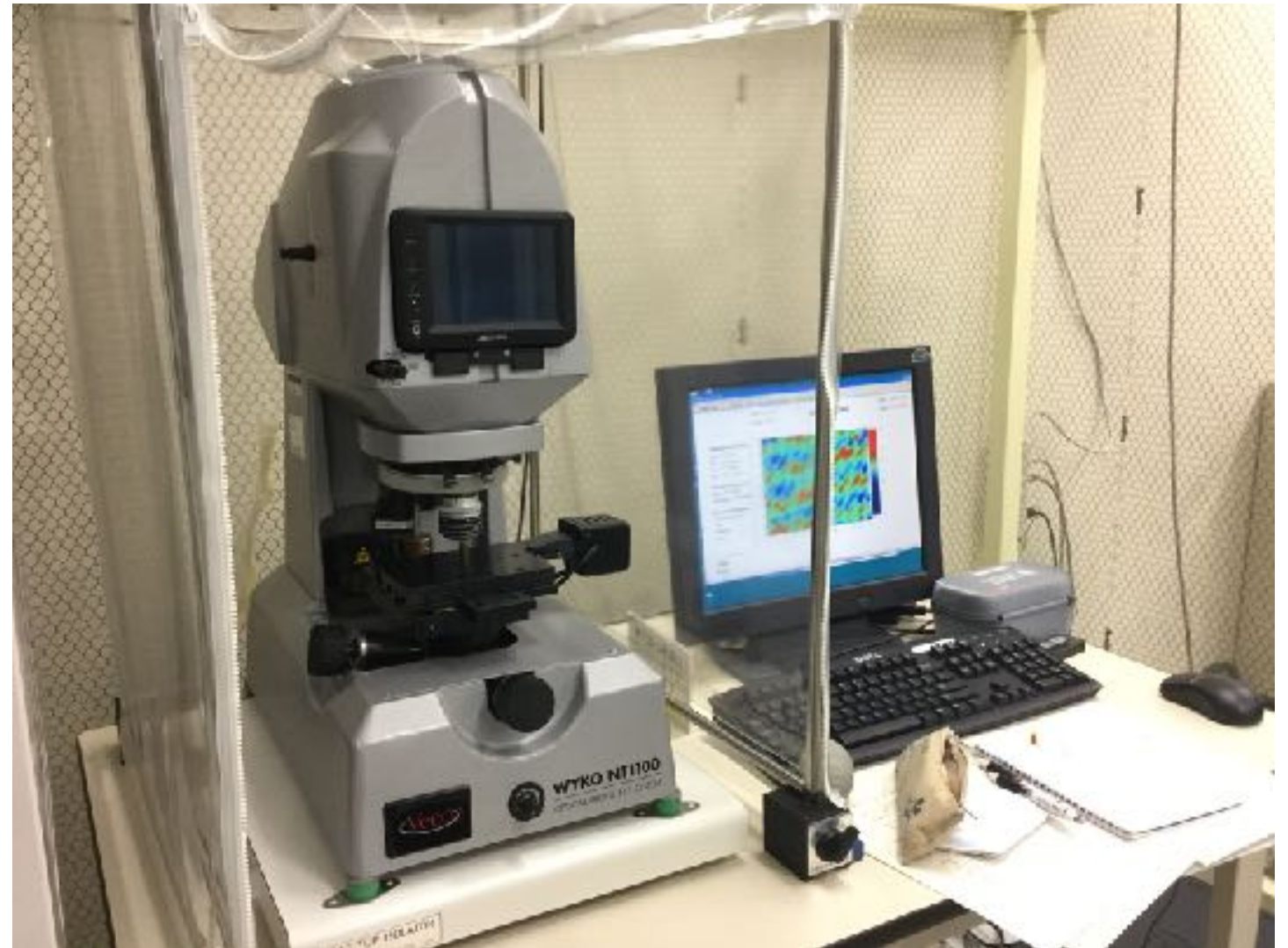
IC-DXの超精密加工

Ultra-precision machining



名古屋大学理学部装置開発室で超精密加工

Ultra-precision machining at Nagoya Univ.



ATC/Opt Shop WYKO NT1100で測定

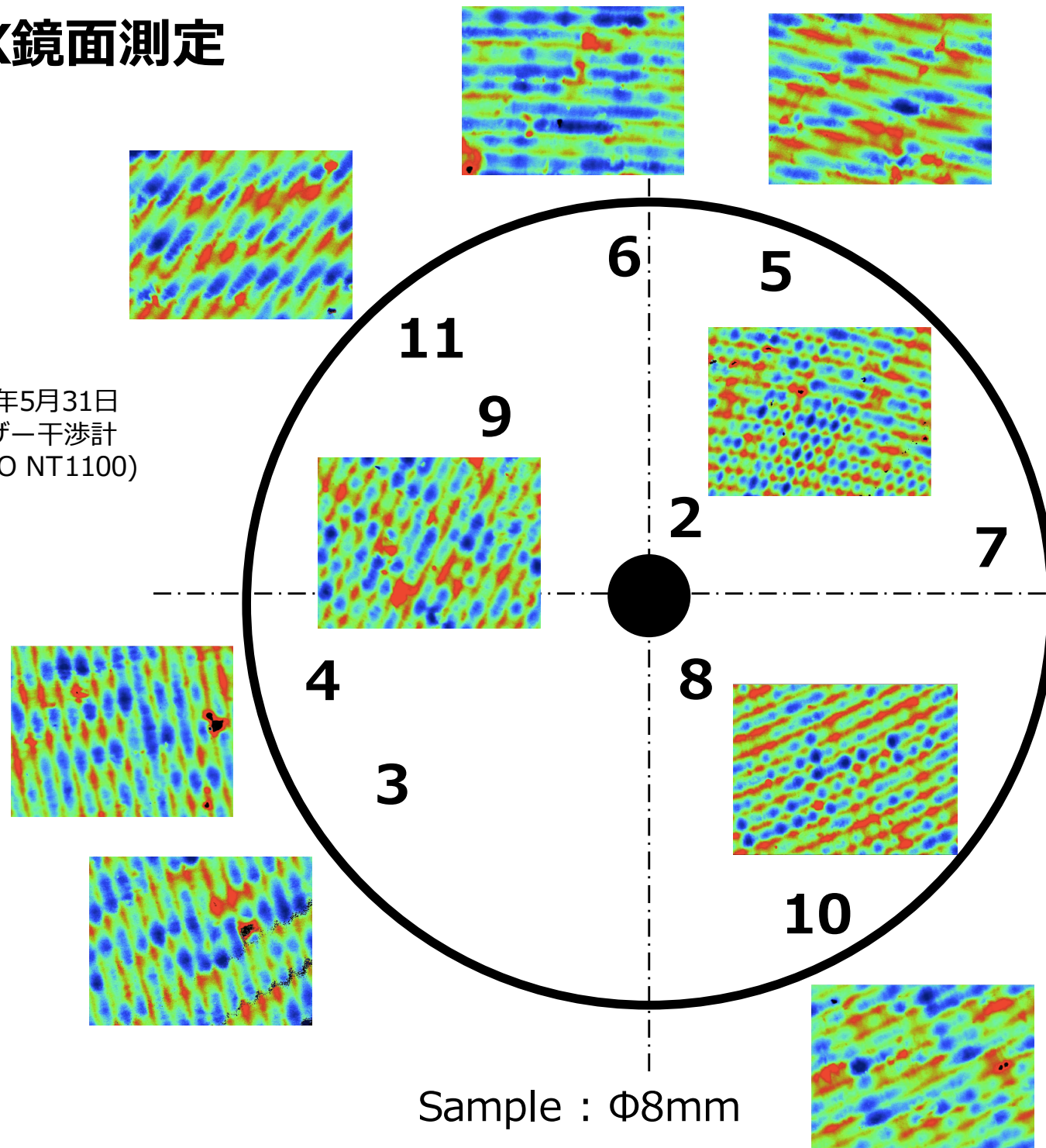
Measurement with WYKO NT1100 at ATC/Opt shop

IC-DXの超精密加工

Ultra-precision machining

IC-DX鏡面測定

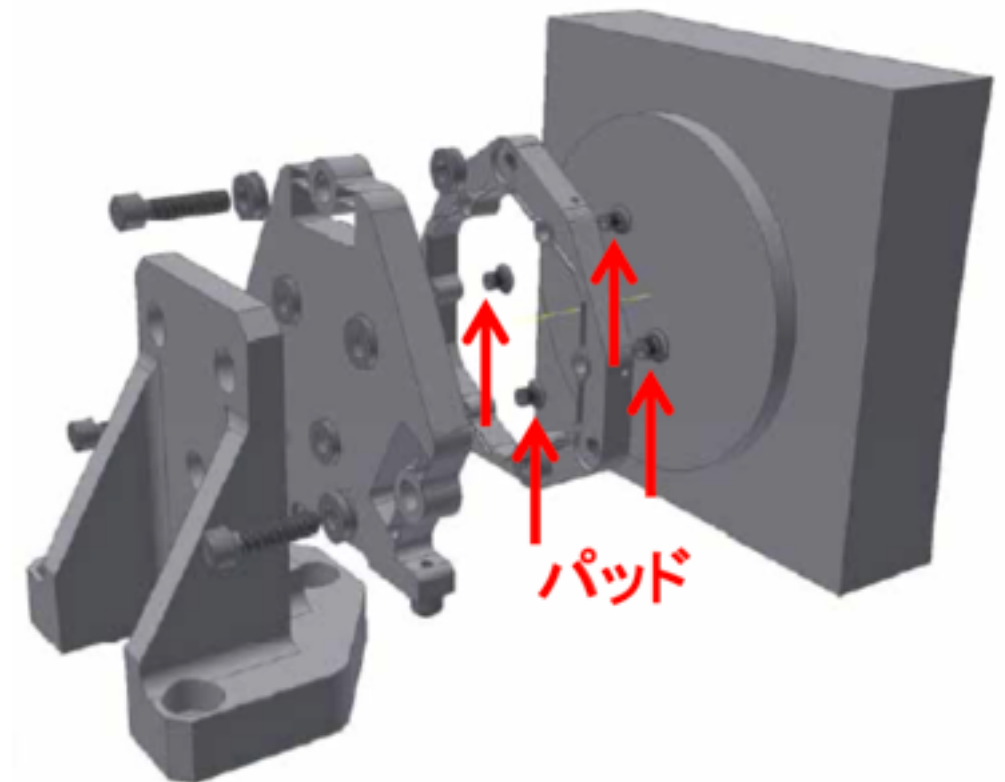
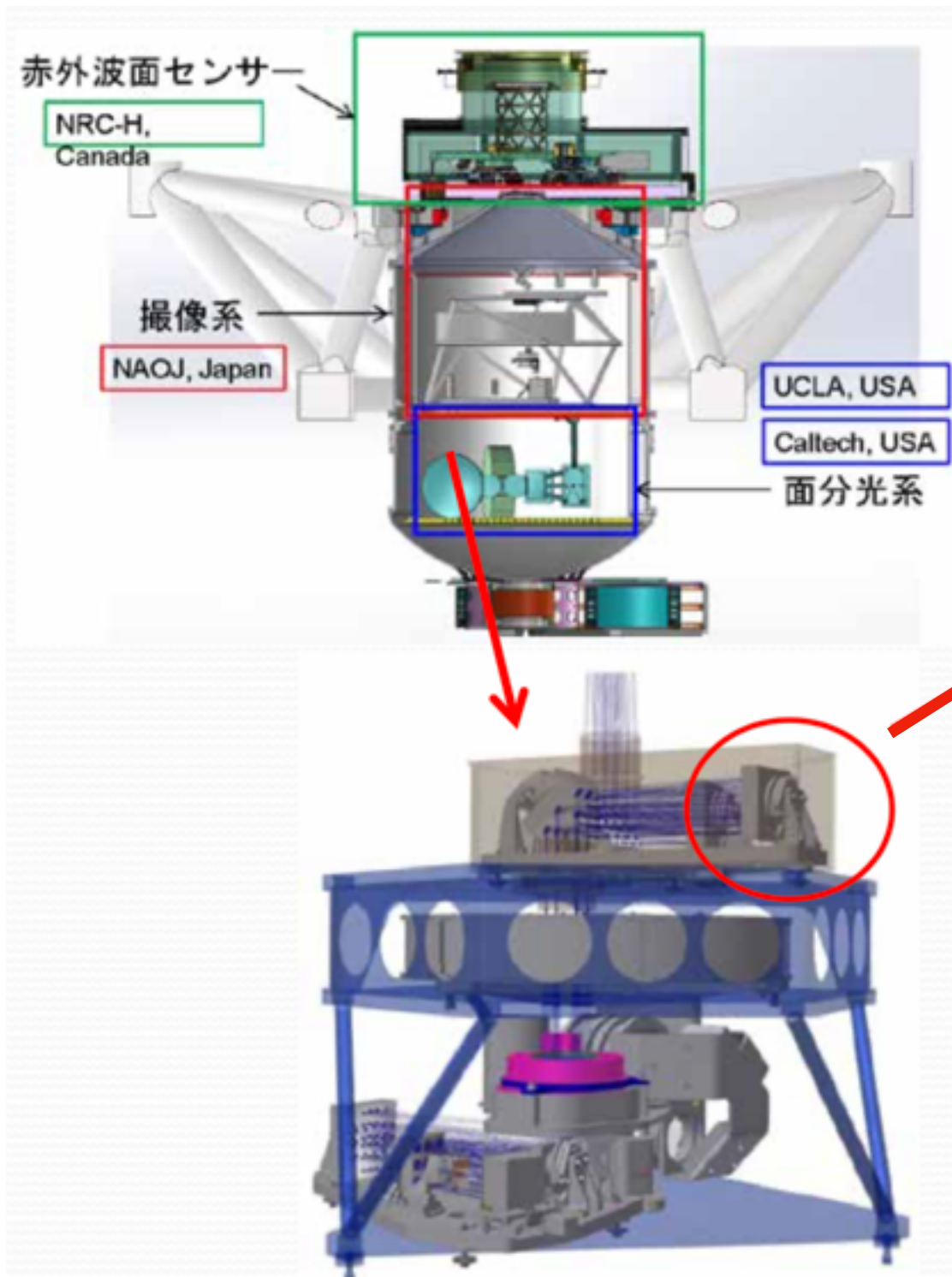
測定日 : 2019年5月31日
測定器 : レーザー干渉計
(WYKO NT1100)



- 面精度としてはそこそこ？
- 加工の際、刃物の摩耗が大きい…
→ 大きな素子の加工は難しそう。
- Surface accuracy may be good ss a mirror
- High wear of tools during machining.
→ difficult for large elements...

#2	: Ra=6.7nm
#3	: Ra=7.3nm
#4	: Ra=7.1nm
#5	: Ra=8.1nm
#6	: Ra=8.2nm
#7	: Ra=6.9nm
#8	: Ra=6.2nm
#9	: Ra=7.4nm
#10	: Ra=9.1nm
#11	: Ra=8.7nm

TMT/IRISの試験部品



Fused Silicaの非球面鏡（200x200mm）
を接着するパッド

- Fe-Co-Cr系インバー合金である**IC-DX**の特性評価試験の実施
 - 極低温(4K)でもマルテンサイト組織化しない安定性を確認
 - 観測機器へのアプリケーションを検討
 - 低温で用いられる多天体分光マスクシートへの応用
 - 0.05mm厚シートの場合、レーザーカッティングが可能
 - 冷却時の温度、温度分布の測定
 - 極低温部品へのさらなる応用・要求は？
-
- Development & evaluation of Invar Ally : **IC-DX**
 - Confirm stability (non-martensite transformation) at cryogenic temperature
 - Application for astronomical instruments
 - Mask sheet for Multi-Object spectroscopy
 - Success cutting for 0.05mm thickness
 - Measurement of temperature and thermal distribution around sheet at low temp.
 - Other application ??