

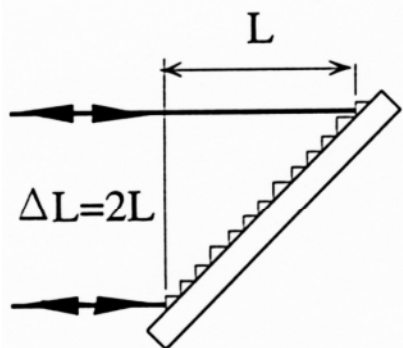
最新の超精密加工装置による 光学素子の製作

理化学研究所 光量子工学研究領域
先端光学素子開発チーム
チームリーダー 山形 豊

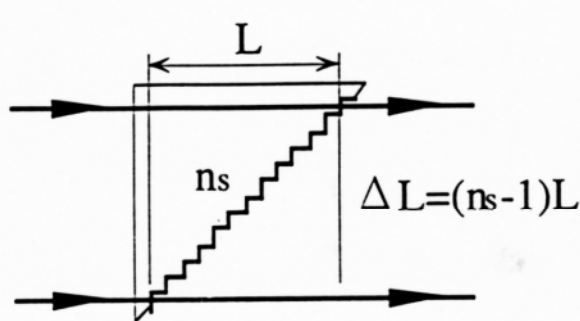
講演の概要

1. 回折格子の加工手法
2. 超精密加工装置の歴史・超精密加工装置の要素
3. 回折格子加工による超精密加工装置の精度評価
4. 曲線・曲面上への回折格子加工事例
5. Geイマージョングレーティングの加工
6. まとめと今後の展望

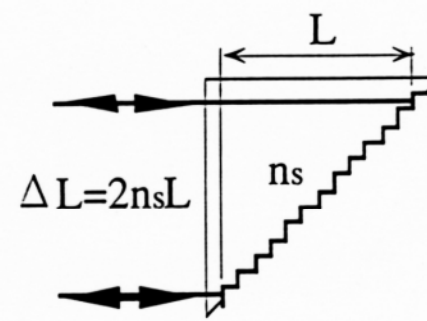
- イメージングレーティングとは...
 - = 光路中を透明媒質で満たされた反射型回折格子
 - イメージングレーティングの角度分散
 - = 媒質の屈折率に比例
 - (ゲルマニウムの屈折率) = 4 ($\lambda=1.6\sim 20\mu\text{m}$)
- 通常の回折格子の1/4のサイズで同一の分解能を得ることができる。



(a) Reflection grating

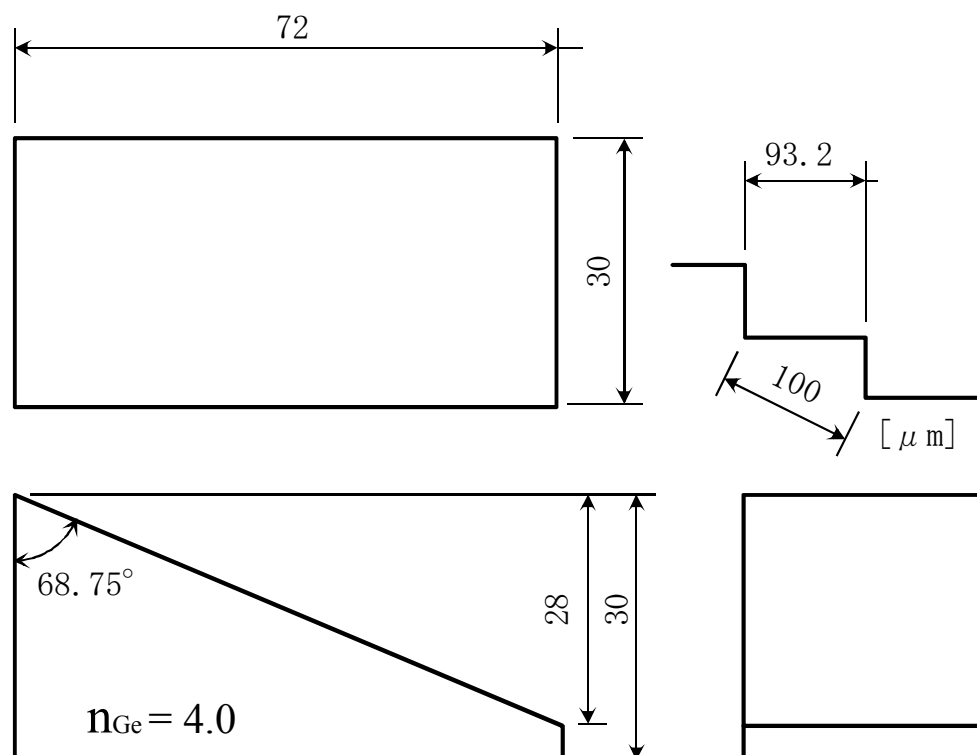


(b) Crism



(c) Immersion grating

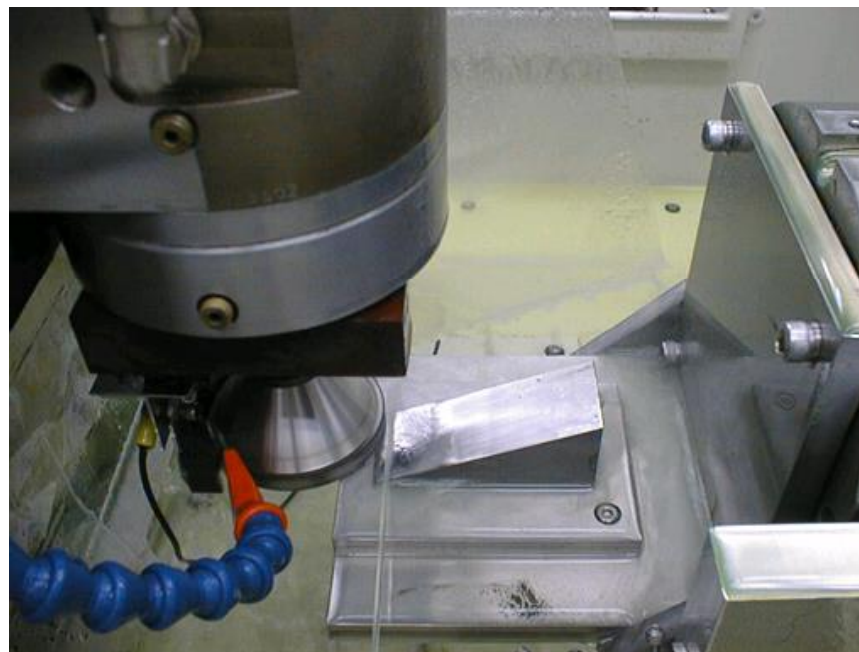
ゲルマニウムイメージングレーティング形状



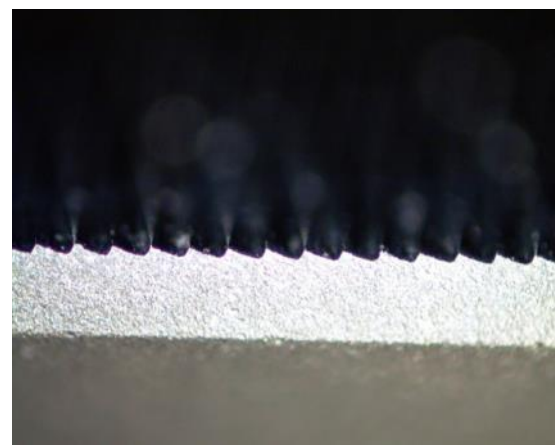
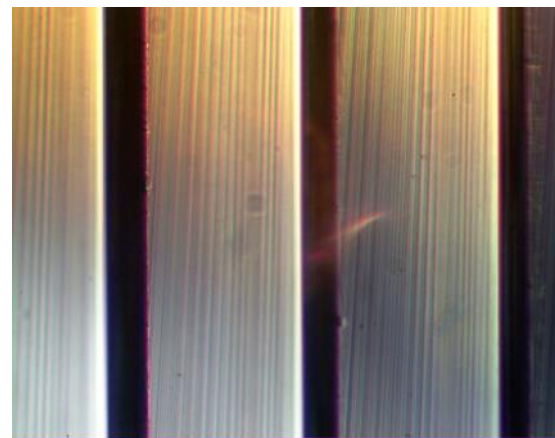
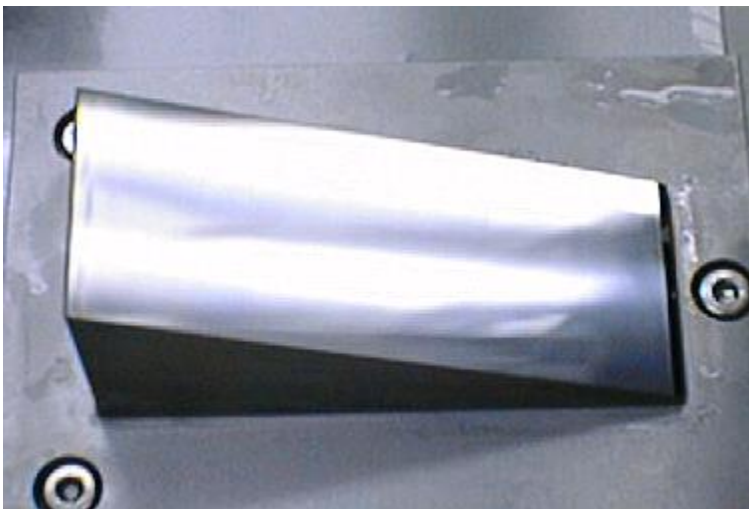
加工条件

ワーク	ゲルマニウム単結晶 (30×30×72mm)
加工装置	超精密 5 軸 CNC 加工機 ULG-100CH3(東芝機械(株))
砥石	鋳鉄ボンドダイヤモンド砥石 (富士ダイス(株)) (SD4000N100M: 60 φ × 5W × 5x × 6H) (SD20000N100M: 60 φ × 5W × 5x × 6H)
電解ドレッシング グ条件	ELID 電源 ED-1503T(富士ダイス(株)) 電圧 $V_p = 60V$, 最大電流 $I_p = 5A$ パルス間隔 $\tau_{on} = 5\mu s$ パルス波形 矩形波
加工条件 (#20000 のとき)	砥石回転数 5000rpm 送り速度 600mm/min (X 方向) 切込量 $1\mu m$ /回

加工の様子



加工されたゲルマニウムイメージングレーティング



■ 格子形状の測定

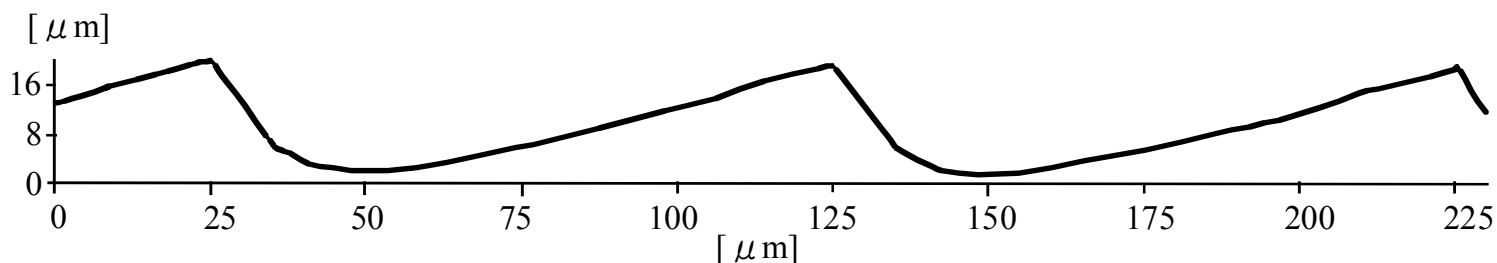
非接触三次元形状測定装置 NH-3(三鷹光器(株))

ーダイヤモンド砥石の摩耗により先端が丸まっている

ー格子面が理想形状に比べて傾いている

→ 2 μm 帯用の回折格子を加工するためには、砥石の摩耗を低減する必要がある。

→ 10 μm 帯用の回折格子であれば、実用的なImmersion Gratingの加工が可能



■ 表面粗さの測定

表面粗さ測定器 サーフテスト701(ミットヨ(株))

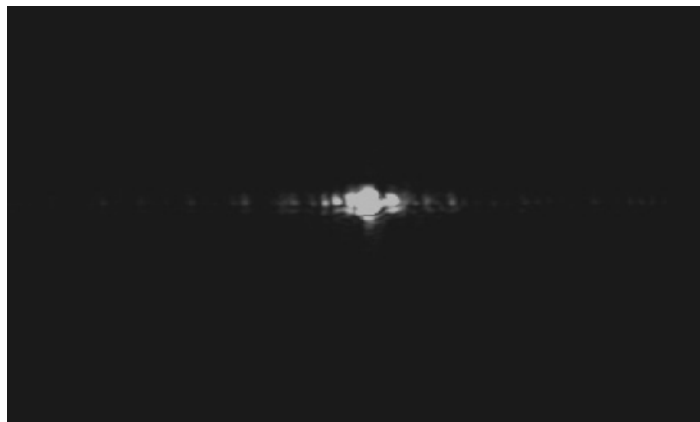
ーrms表面粗さ(回折効率に比例)・・・30.7nmRq

→ 2 μm 帯用の回折格子としては、散乱が大きすぎる。

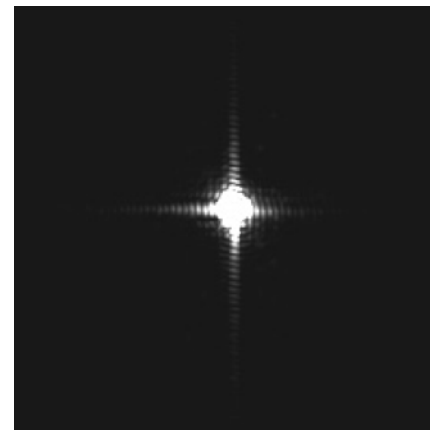
→ 10 μm 帯においては、2.4%の散乱

光学特性評価結果

Far field image

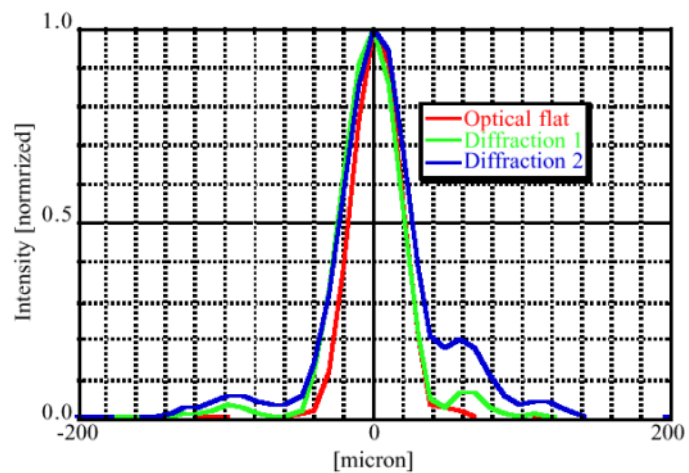


加工されたGIG

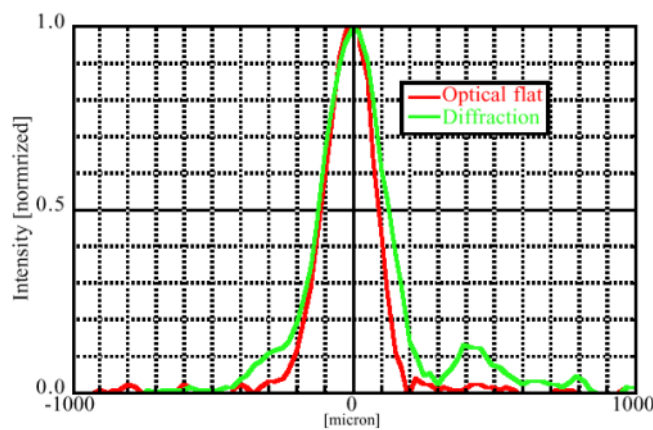


オプティカルフラット

強度分布



633nm



3.9 μ m

1. 天体観測用の中間赤外線高分散分光器の分散素子としてゲルマニウム Immersion Gratingを、ELID研削を用いたマイクロ研削加工により試作し、各種評価を行った。
2. 試作したImmersion Gratingは $2.2\mu\text{m}$ 帯で使用するためには、格子形状、表面粗さともに改善が必要。
3. 現状の加工方法によれば、 $10\mu\text{m}$ 帯用のImmersion Gratingであれば、製作は可能である。
4. 砥石の改質(砥粒粒度、集中度、ボンド材)や加工方法の改善により、表面粗さ・格子形状とも向上が見込まれる。

回折格子の加工

機械刻線式(ルーリングエンジン)

- 金などの軟質金属上に、バニシングと呼ばれる手法で刻線を行う方法。(塑性加工)
- 40年以上前からレーザー測長器と高精度機械送り機構の組み合わせにより実現されている。
- ブレーズ化された回折格子の製作が可能
- 迷光(表面粗さなどのランダムな形状誤差による散乱光)はやや大きい
- 限定された曲線加工が可能

ホログラフィックグレーティング

- 光の干渉を用いたフォトリソグラフィ(写真露光)により格子を生成
- ピッチ精度が非常に高い(特に、周期的誤差が少ない)
- イオンエッチングによりブレーズ形状を生成することも可能(角度は制約あり)
- 迷光のレベルを非常に低くできる

イオンビーム加工

- イオンビームの滞留時間を制御することにより格子を加工
- 微細な格子を高精度に加工可能
- 加工速度が遅い

フォトリソグラフィ

- 半導体製造に用いられるフォトリソグラフィ+エッチングにより格子を生成
- 精度は高いが、階段状の構造となる

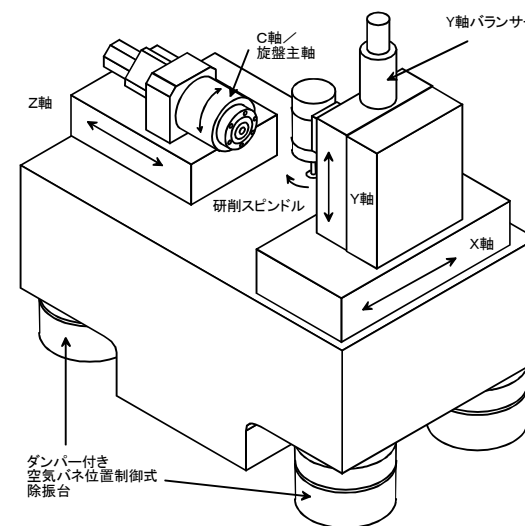
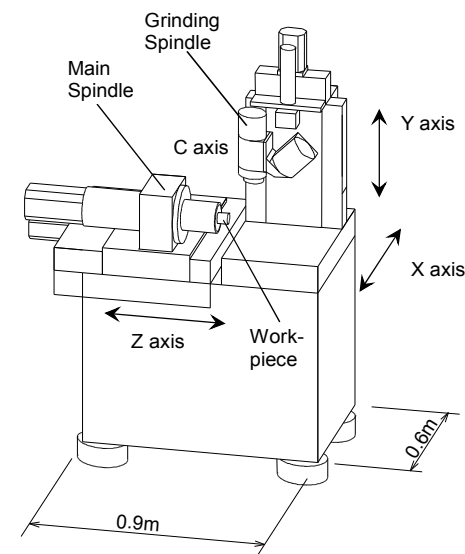
超精密切削(研削)

- 自由な曲線、ブレーズ形状、曲面形状の加工が可能
- 迷光、ピッチ精度の向上が課題

回折格子による 超精密加工装置の精度評価

使用した超精密加工装置の仕様

装置	ULG-100A	ULG-100D(SH3)	ULG-100DH3
製造年	1994年	2003年	2004年
X軸	ボールネジ V-Vローラー	リニアモーター V-Vローラー	リニアモーター V-Vローラー
Y軸	ボールネジ V-V対向	ボールネジ V-Vエアバックアップ	リニアモーター V-Vエアバックアップ
Z軸	ボールネジ V-Vローラー	リニアモーター V-Vローラー	リニアモーター V-Vローラー
主軸	自成絞り 空気軸受け	多孔質絞り 空気軸受け	多孔質絞り 空気軸受け
制御装置	FANUC 15MB	FANUC 15i	FANUC 15i
防振装置	積層ゴム	エアバネ+位置制御	エアバネ+位置制御



ULG-100CH3: Y軸構造を改善(1998)

ULG-100D5A: 大型、5軸(2006)

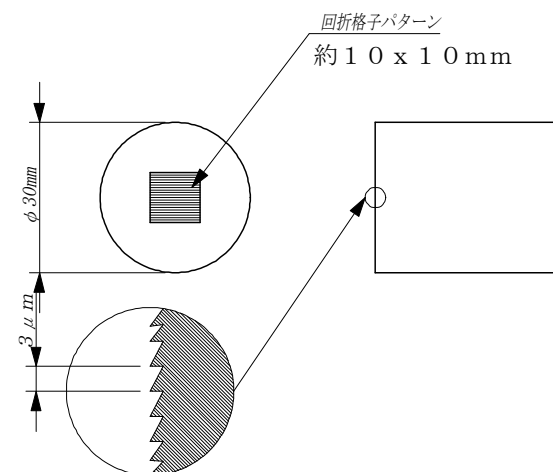
回折格子加工試験

– 加工条件

- 被加工物: 無電解Ni-Pメッキ、工具: 単結晶ダイヤモンドバイト(剣先84度)、送り速度: 25mm/min、加工ピッチ3 μ m、切り込み5 μ m、加工面積10x10mm、約3300本

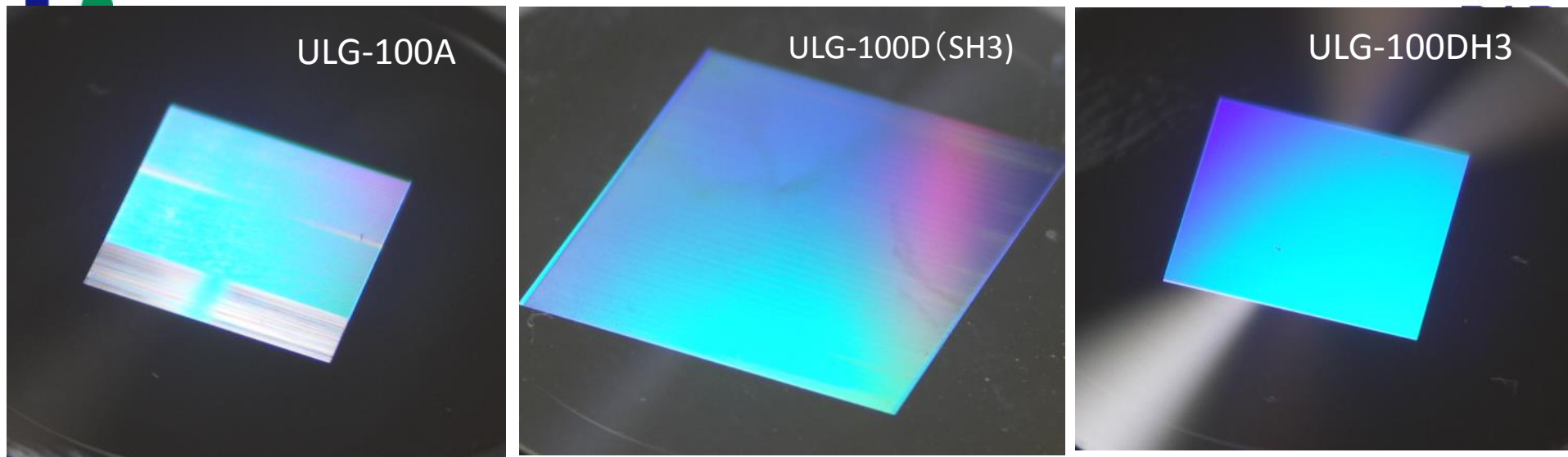
– 試験項目

- 断面形状(全体)、回折パターン検証(定性的、定量的)

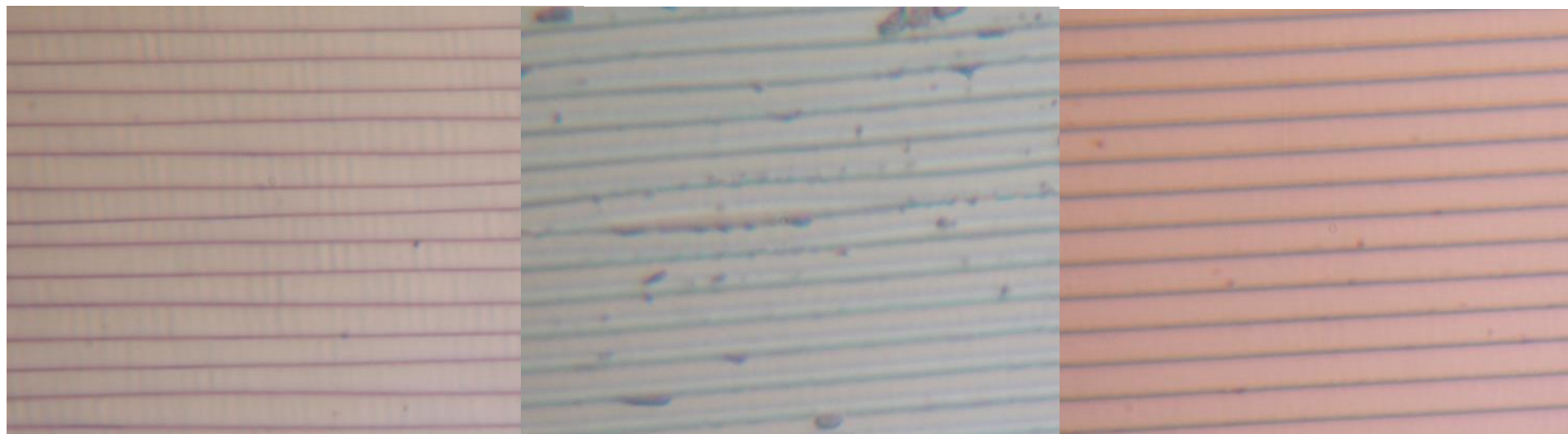




加工した回折格子の外観イメージ



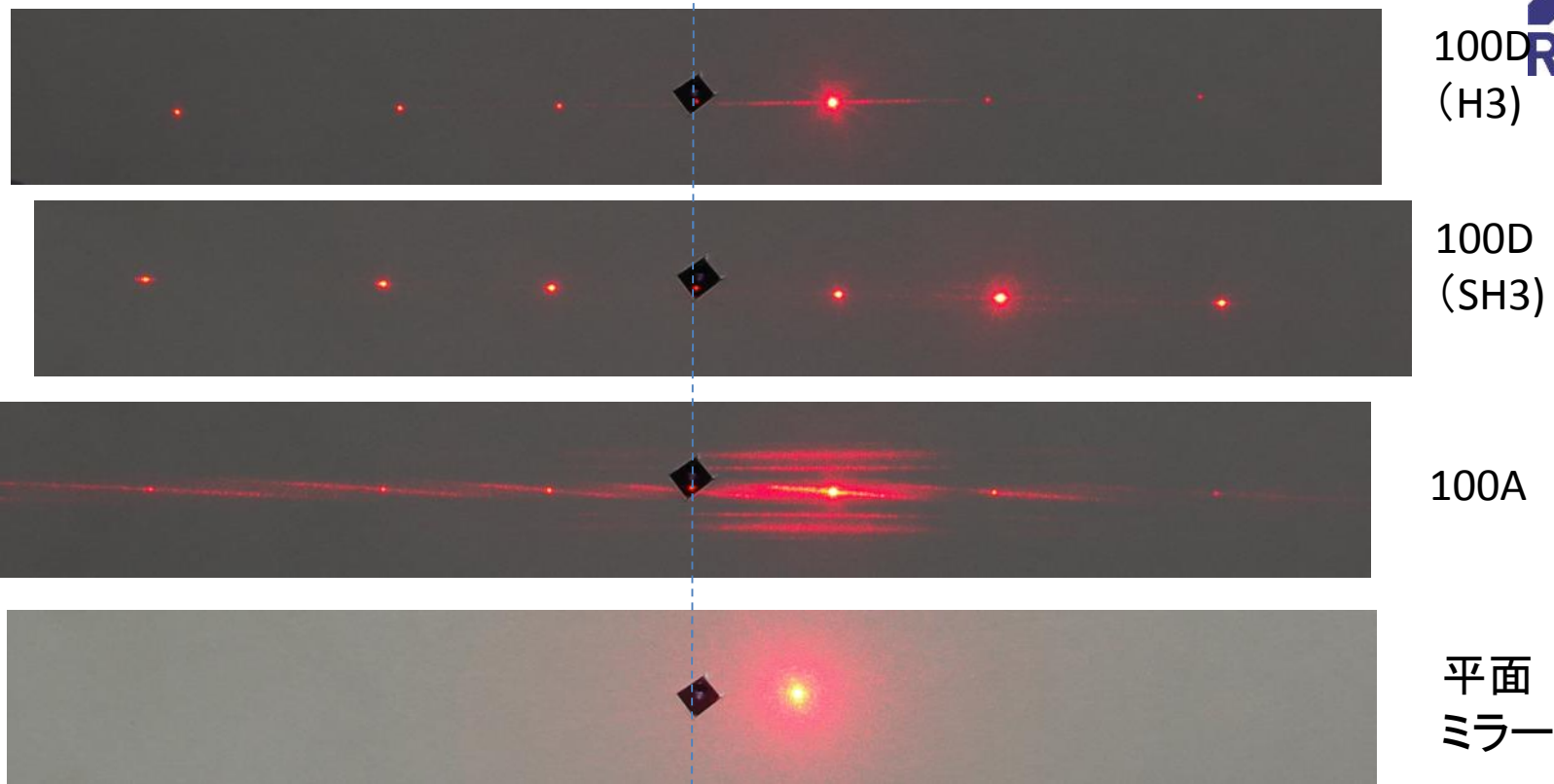
回折格子外観(デジタルカメラによる写真)



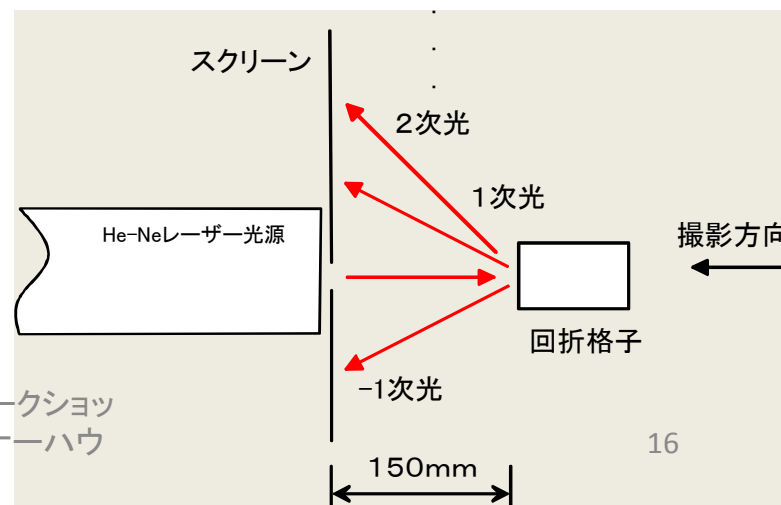
回折格子拡大写真(1000倍微分干渉顕微鏡)

第3回可視赤外線観測装置子午線
2013年11月17日 @ 京都大学
ス

回折パターンと比較



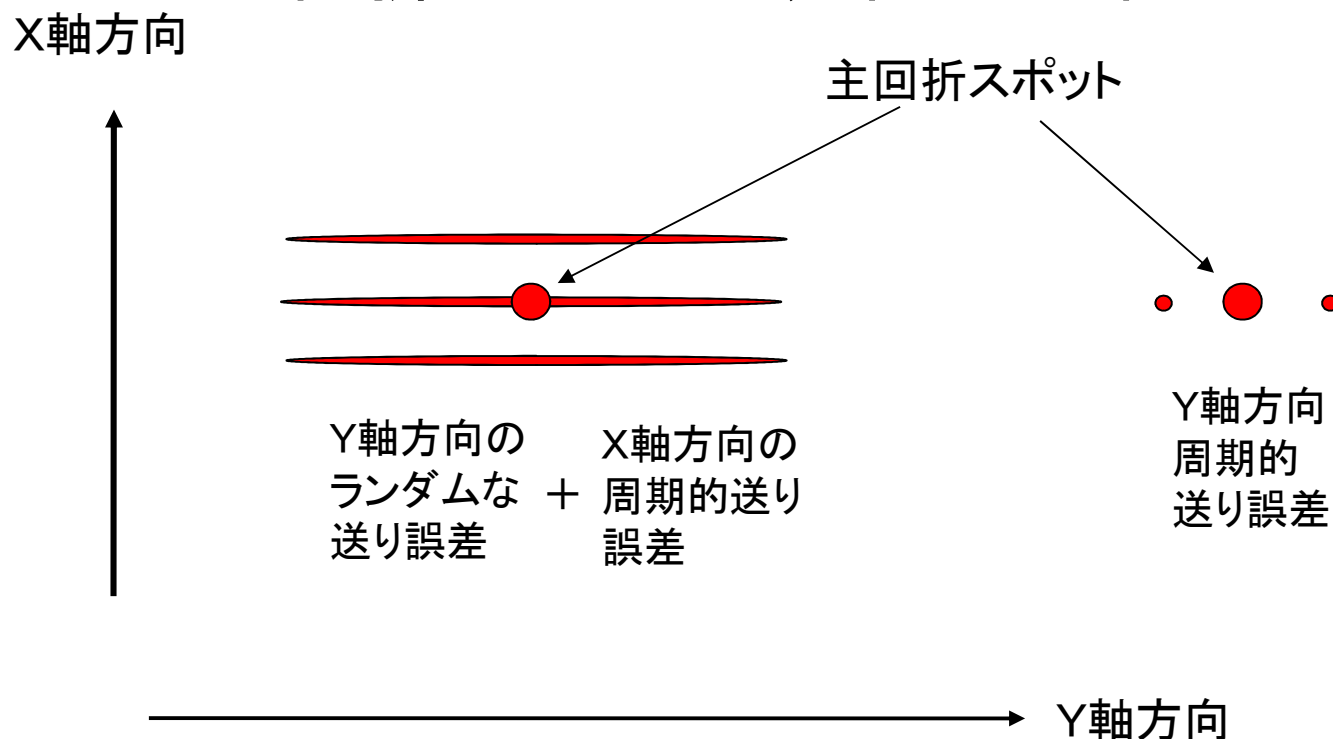
レーザー射出口



He-Neレーザー(波長632.8nm)を照射し回折パターンを撮影

第3回可視赤外線観測装置子ワークショップ 2013Dec17 @ 京都大学セミナーハウス

回折パターン^oの定性的意味



回折パターン^oの形から回折格子の加工誤差要因が推測できる

100Aは、X軸方向に主に周期的誤差が、Y軸方向にランダム、周期的双方の誤差が含まれていると予測される



より定量的な解析が必要

第4回 回折格子の加工誤差要因の解析
2013Dec17 @ 京都大学セミナーハウ

回折格子による回折パターンの計算

- 回折光の強度はFraunhofer積分により求められる

$$u(l-l_0) = C \sum_{m=-N/2}^{N/2} \exp\left\{j \frac{2\pi}{\lambda} m(l-l_0)d\right\} \int_{-d/2}^{d/2} \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda \cos \varepsilon} \{\sin(\theta + \varepsilon) - \sin(i - \varepsilon)\} \right] d\xi$$

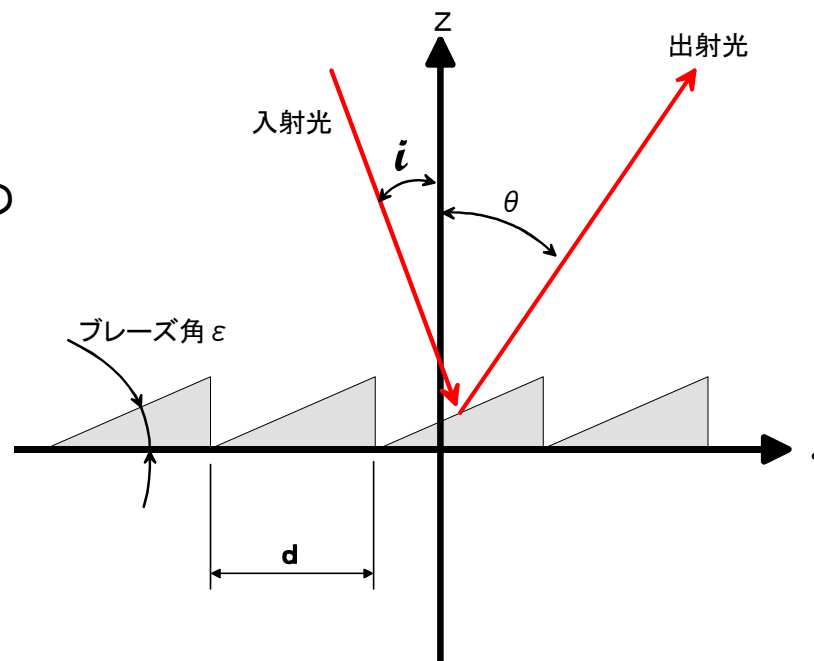
ただし、C: 定数、j: 虚数単位、λ: 波長、N: 格子本数、l、l₀: 入射光、出射光の方向余弦、d: 格子ピッチ、ε: ブレーズ角

回折光強度: $I = |u(l-l_0)|^2$

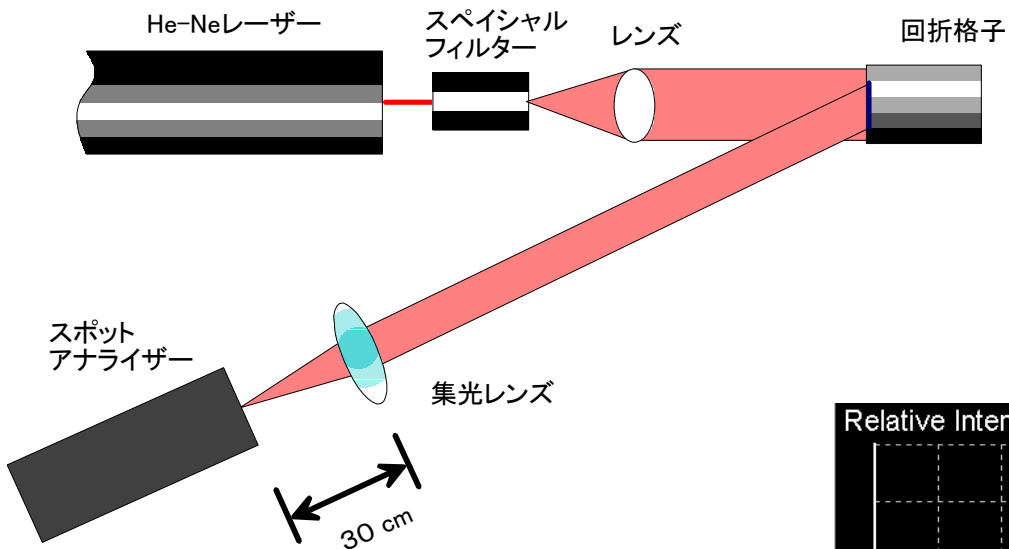
- 周期的ピッチ誤差の影響を計算するために、 d に誤差成分を加算した d_N を用いて計算を行う

$$\xi_N = Nd_0 + A \sin\left(2\pi \frac{d_0 N}{\lambda_m}\right)$$

$$d_N = \xi_{N+1} - \xi_N$$

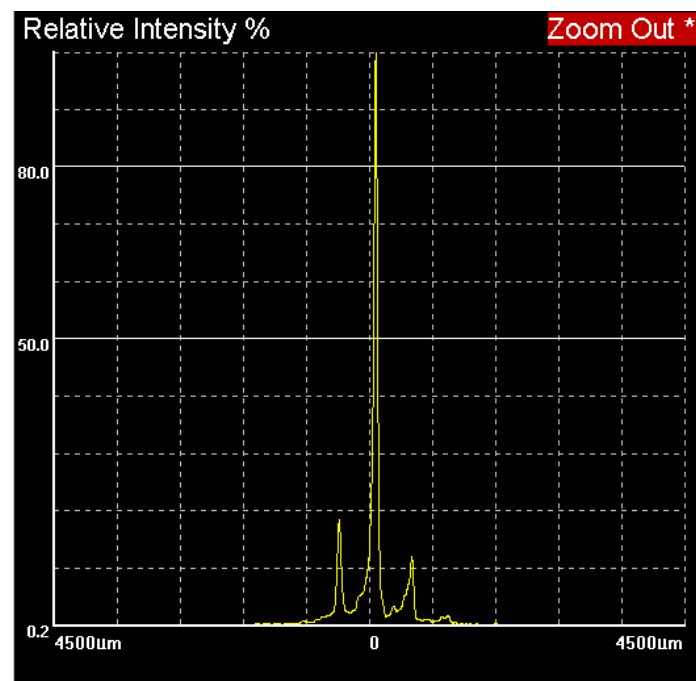


スポットアナライザーによる詳細分析



ビーム直径約10mm
での回折光を測定

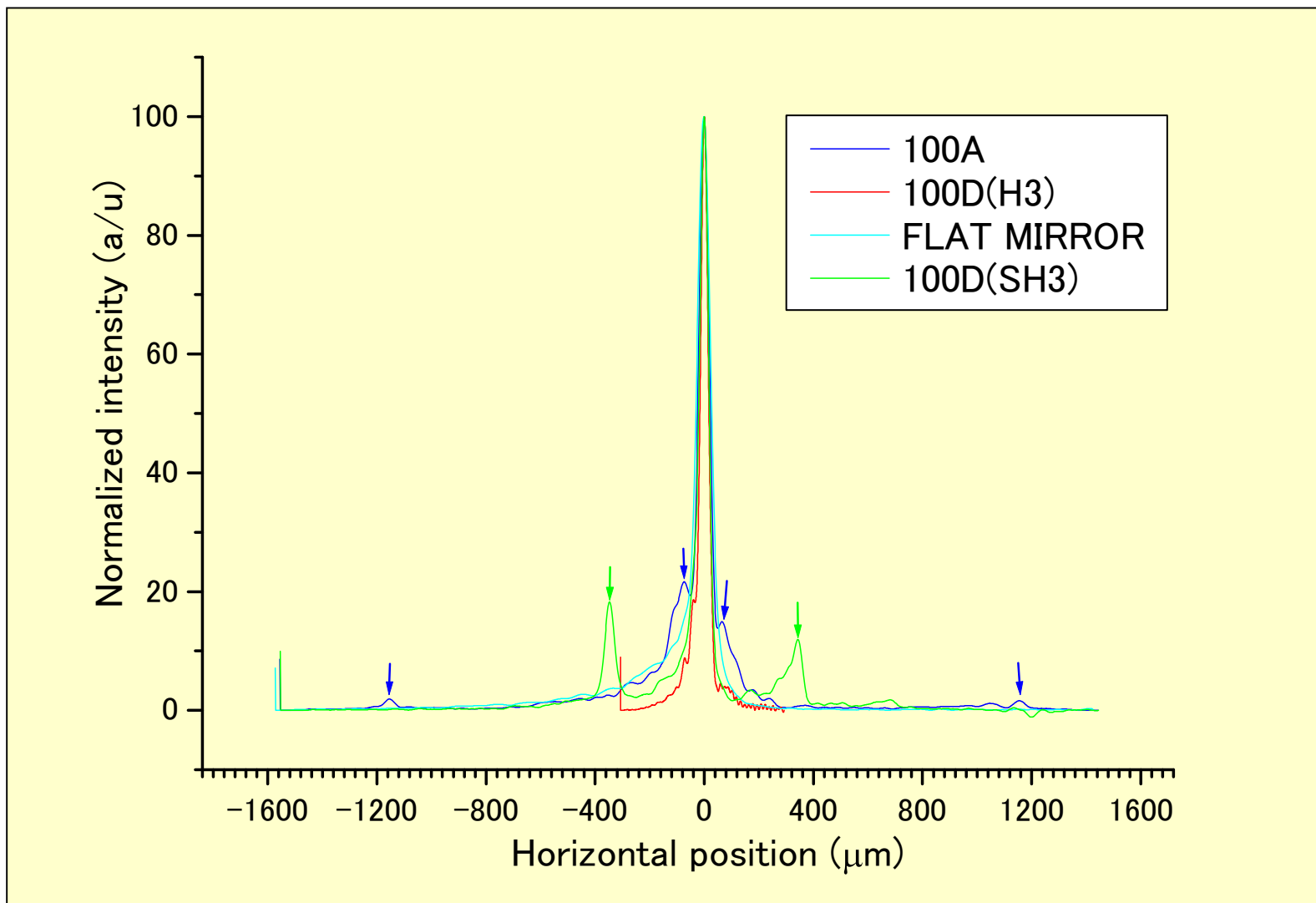
回折ピークとの強度比、分散角度を定量的に評価可能



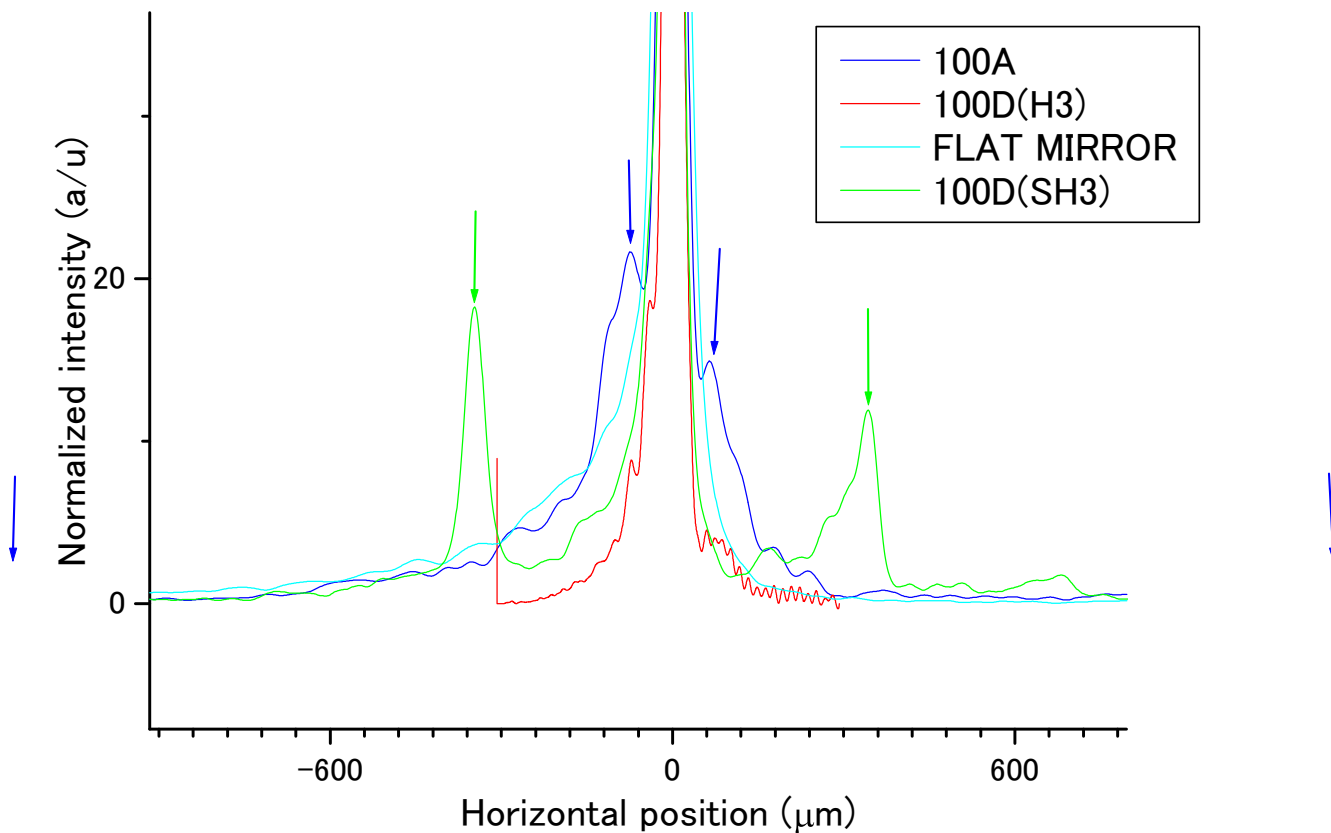
第3回可視赤外線観測装置子ワークショップ 測定データ(全体)

2013Dec17 @ 京都大学セミナー

実験結果一回折パターン



実験結果一回折パターン拡大図



	ピーク1		ピーク2		平均値		
ピーク	離散距離 (μm)	ピーク値 (%)	離散距離 (μm)	ピーク値 (%)	離散距離 (μm)	ピーク値 (%)	離散角度 ($^\circ$)
100Aその1	-73.5	21.63	64.5	14.93	69	18.28	1.32E-02
100Aその2	-1153.5	1.91	1153.5	1.61	1153.5	1.76	2.20E-01
100D (SH3)	-348	18.2	342	11.9	345	15.05	6.59E-02

第3回可視赤外線観測装置ワークショップ
 2013Dec17 @ 京都大学セミナーハウス

解析結果

- 観測されたピークの離散角度およびピークの高さから、変動量を計算した。
- 100D(H3)はほとんどピークが見られないため計算不能であった。

- サイドローブピーク強度と外乱振幅の関係

A:外乱振幅(nm o-p)、I:サイドローブ強度、I₀:主回折光強度

$$A = 8.06 \times 10^2 \sqrt{\frac{I}{I_0}}$$

- サイドローブ離散角と外乱変動ピッチの関係

p:変動ピッチ(mm)、Δθ:離散角(度)

$$p = 3.7 \times 10^{-2} \frac{1}{\Delta\theta}$$

	平均値			変動要因	
ピーク	離散距離 (μm)	ピーク値 (%)	離散角度 (°)	周期(mm)	振幅(nm o-p)
100Aその1	69	18.28	1.32E-02	2.81	344.61
100Aその2	1153.5	1.76	2.20E-01	0.17	106.91
100D (SH3)	345	15.05	6.59E-02	0.56	312.69

まとめ

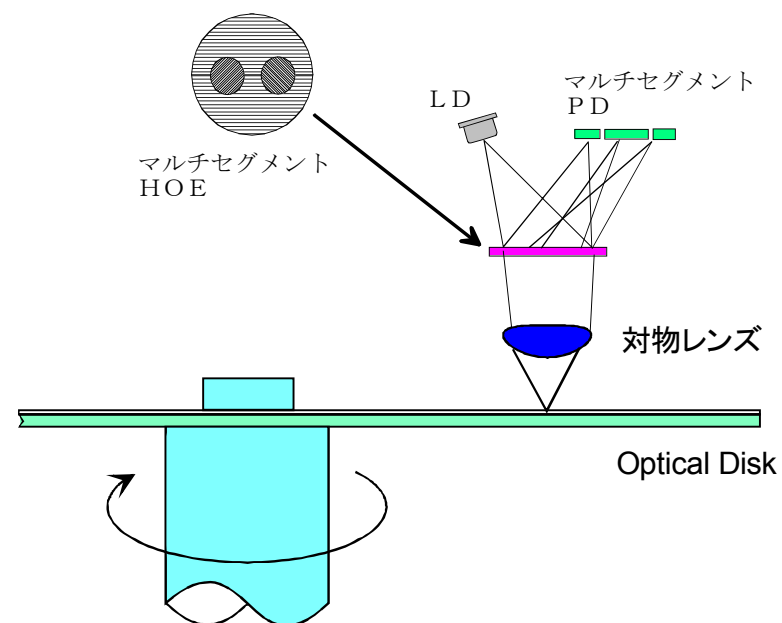
- 回折格子を加工し、その回折パターンを観測することにより加工装置の送り精度を検証する手法を提案した。
- シミュレーションにより、回折パターンと送り誤差との関係を明らかにした。
- 3種類の超精密加工装置を比較することにより、送り誤差の情報を得ることができた。
- 特に、リニアモータを採用した2台の比較では、Y軸のボールネジ駆動による誤差のみを抽出することができたと考えられる。
- 現在の回折格子による試験法ではリニアモータ型超精密加工装置の送り精度を検証することは困難と考えられるため、更に分解能を高める工夫が必要と考えられる。
- こうした手法は、従来の測定方法では判別が困難な導光板の“むら”の定量的評価や、ナノメータの精度を持つ加工装置の評価に応用できると考えられる。



曲線・曲面上への回折格子加工

ホログラム光学素子の適応分野

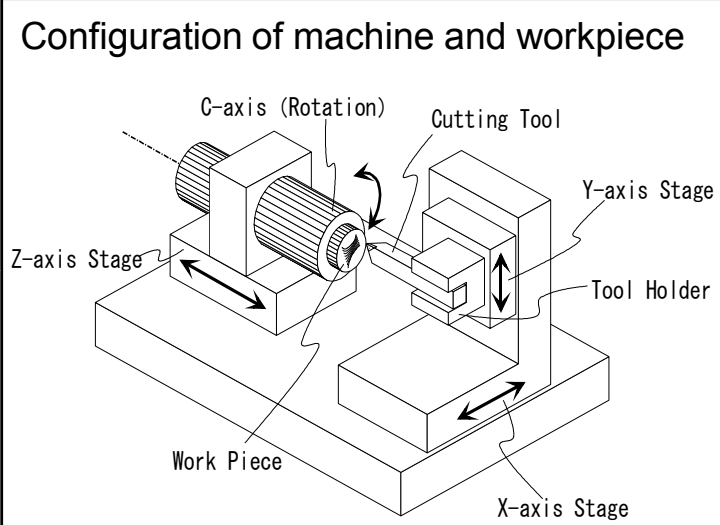
- 可視光・真空紫外光・X線分光素子
- 光計測装置
- 光ディスクピックアップ光学系
- 光通信・光ファイバー光学系
- 分光分析装置



工具回転法によるHOEの加工

- 4軸制御可能な超精密加工装置を使用
- 単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削加工
- 工具を回転させることにより溝の幅を変化させる

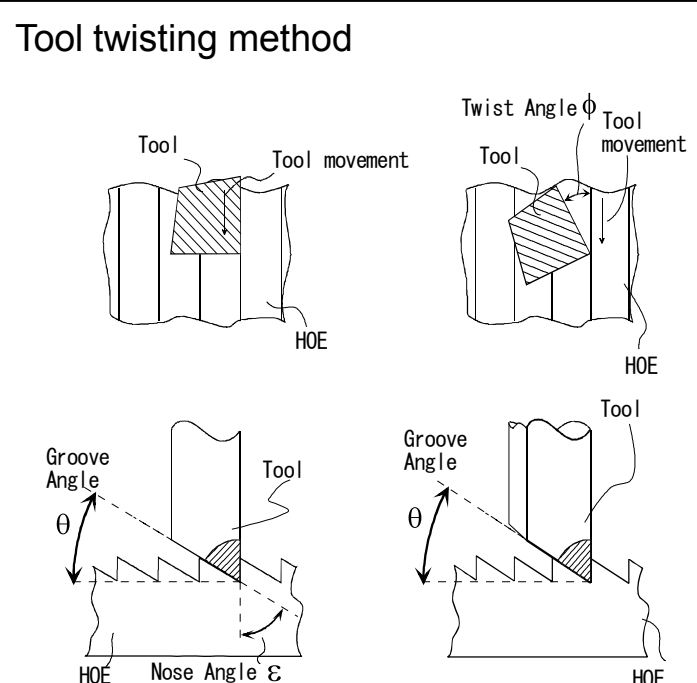
Configuration of machine and workpiece



Machine tool specification

Linear Axis (Special Roller Guide)
Stroke x:200mm,y:150mm,z:220mm
Scale Resolution: 1nm, Straightness:0.1 μm
Max. Speed: 1000mm/min
C Spindle (Precision Air Bearing)
Rotary Encoder: 1/10000', Max. Speed: 3000rpm
Rotation Precision: 0.05 μm
Grinding Spindle (Precision Air Bearing)
Max. Speed: 40,000rpm
Rotation Precision: 0.05 μm
Controllable Axis
Four (X, Y, Z, and C)

Tool twisting method

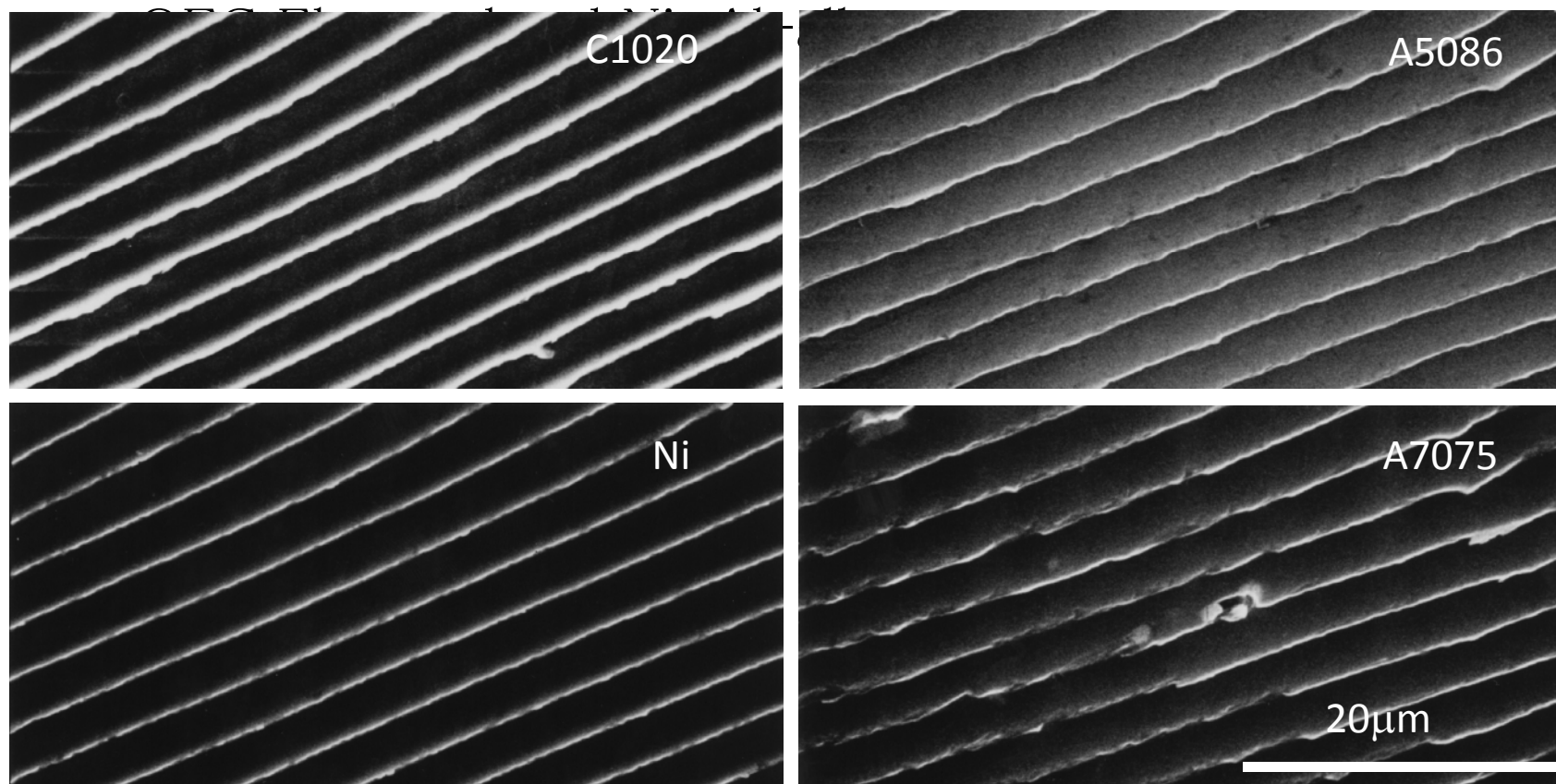


$\phi = 0$ $\phi \neq 0$

ϕ can be described as follows:

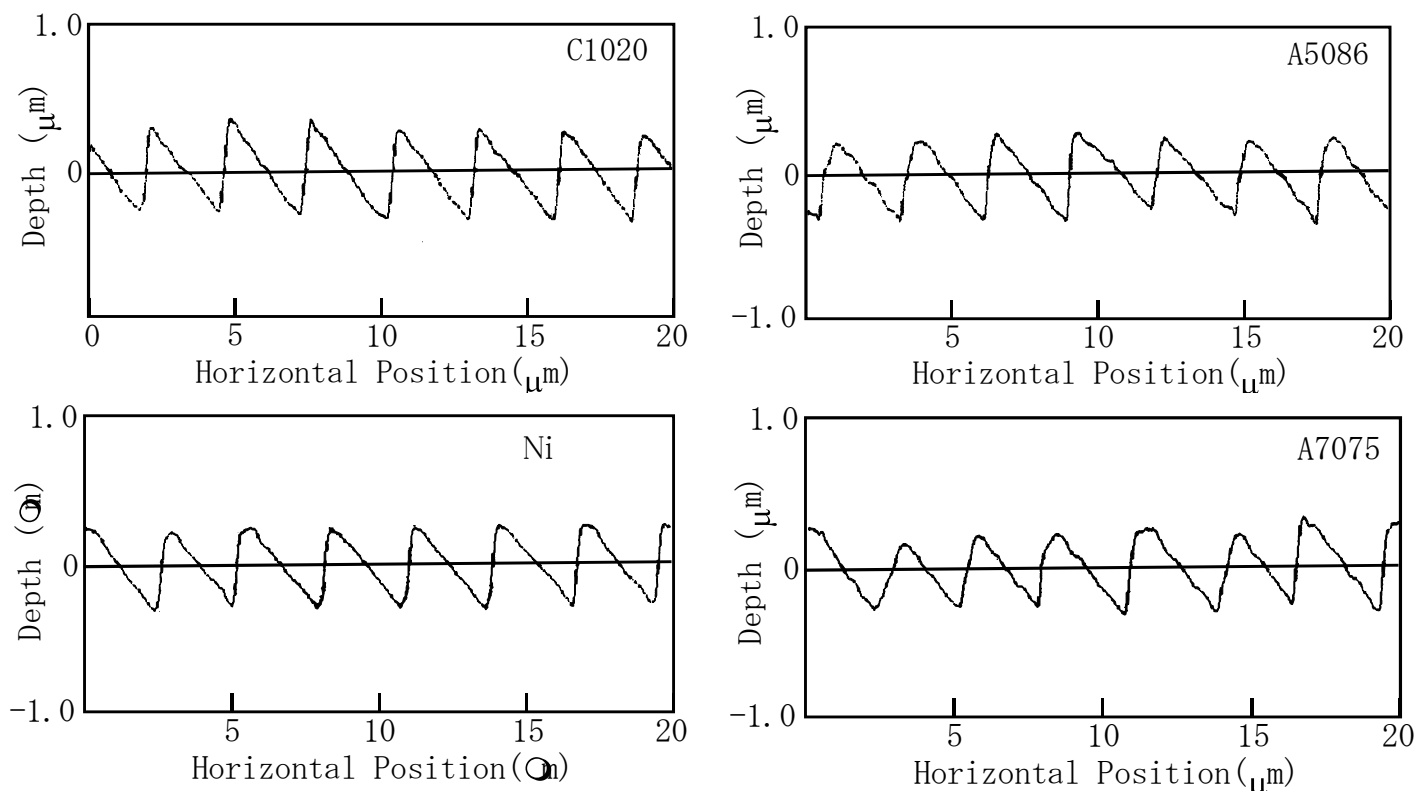
$$\tan\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \tan \varepsilon \cdot \tan \phi$$

Fabrication condition test -- material



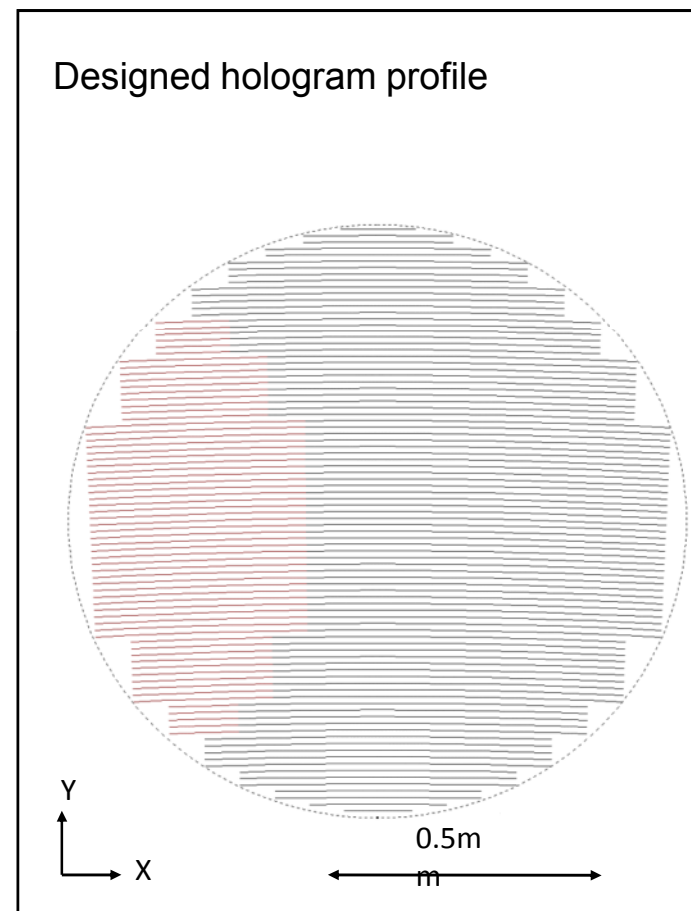
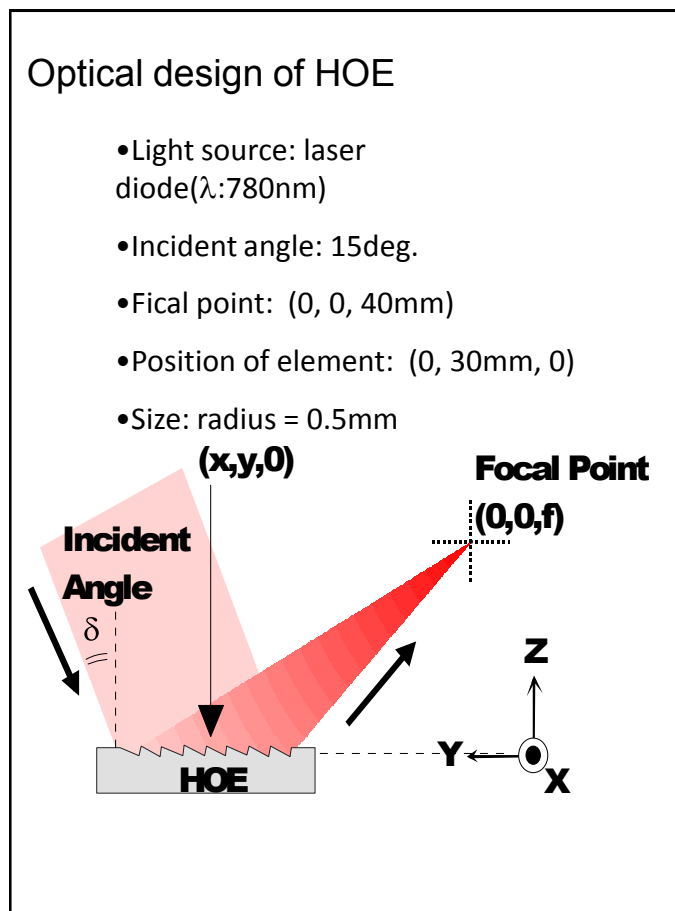
Fabrication condition test -- material

- Surface Profile Data measured by AFM



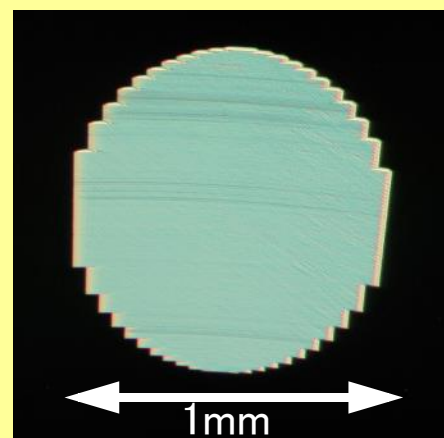
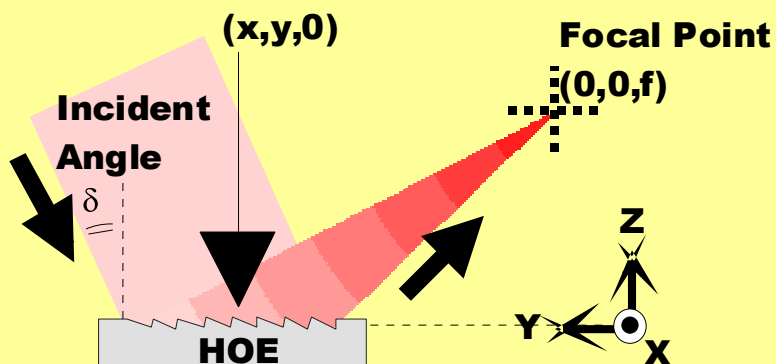
反射型ホログラム光学素子の設計例

- Optical function: refractive convergence
- Elliptical curves (interference fringes of incident and output rays)



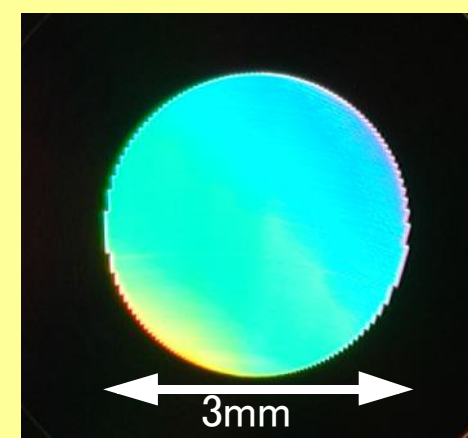
Common HOE design data

Incident Angle : 30 deg.
 Wavelength: He-Ne 635.8nm
 Focal Point: (0,0,20) (mm)
 Element Position: (0,20,0) (mm)



ϕ 1mm HOE

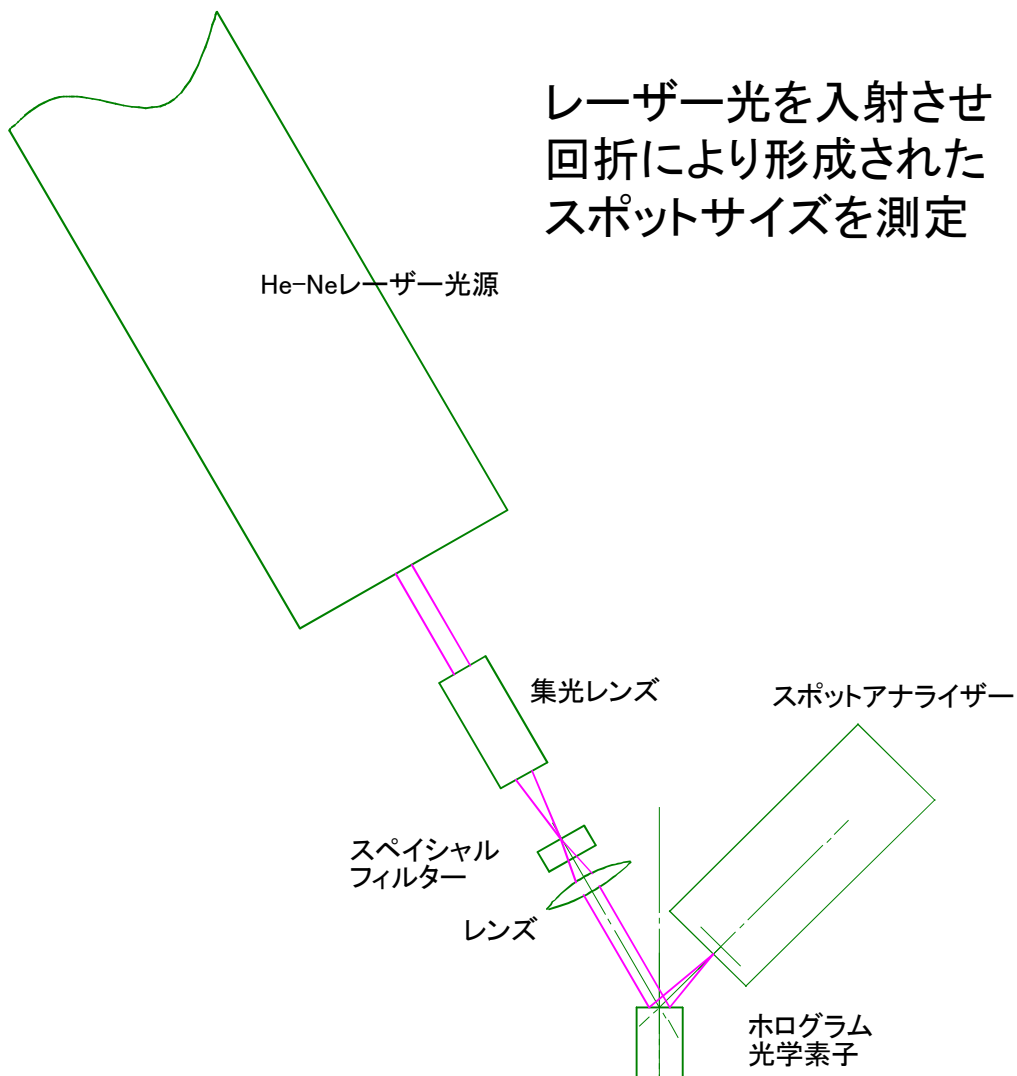
pitch: 2.94~3.2 μ m
 blaze angle: 7.13~7.85deg.
 depth: 0.406~0.401 μ m
 line # : 326



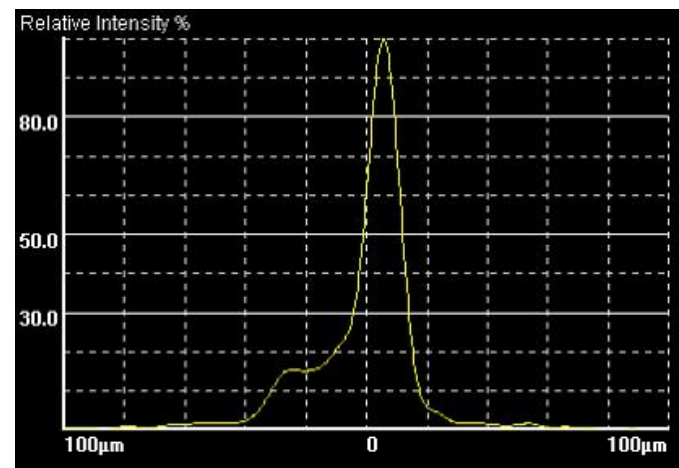
ϕ 3mm HOE

pitch: 2.73~3.54 μ m
 blaze angle: 6.38~8.52deg.
 depth: 0.39~0.41 μ m
 line # : 980

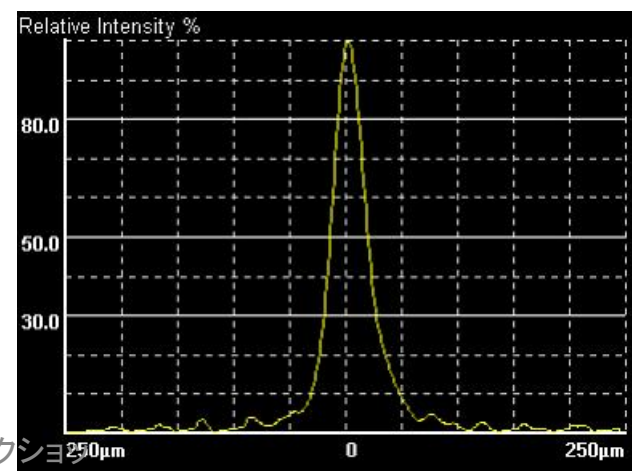
光学特性評価



Φ3mm

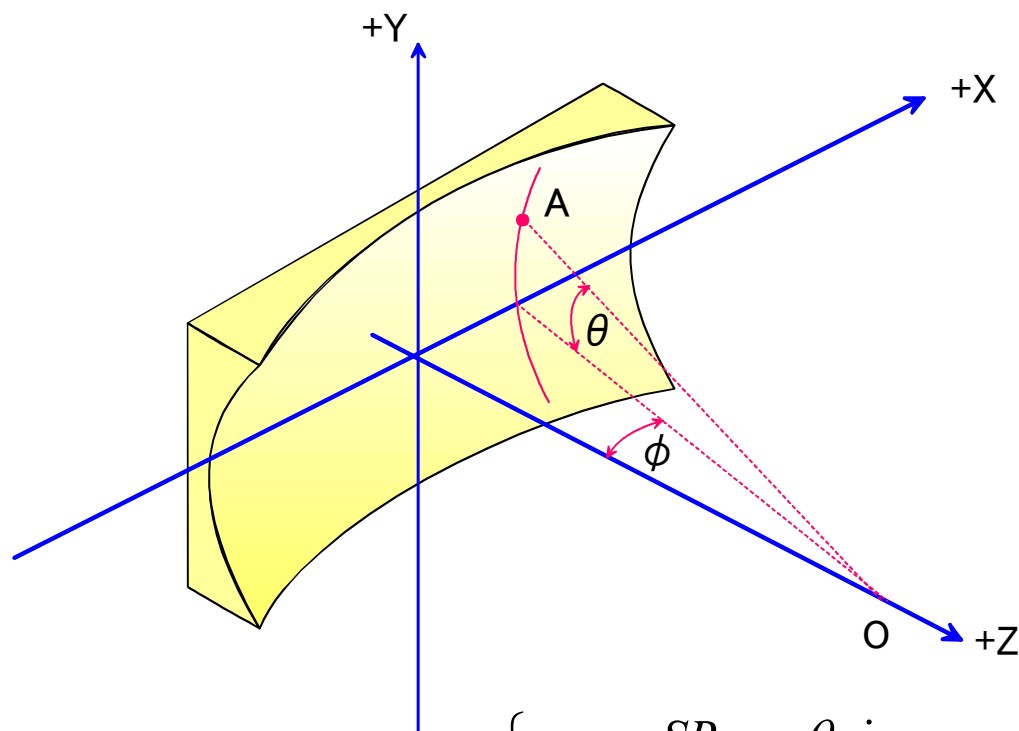


Φ1mm



5軸加工による制御方式

座標の計算



- 被加工面はSRの球面
- 工具回転はY軸周りのみを考慮し、X軸周りは無視する。
- スキューを加えるためにC軸を使用

→5軸制御

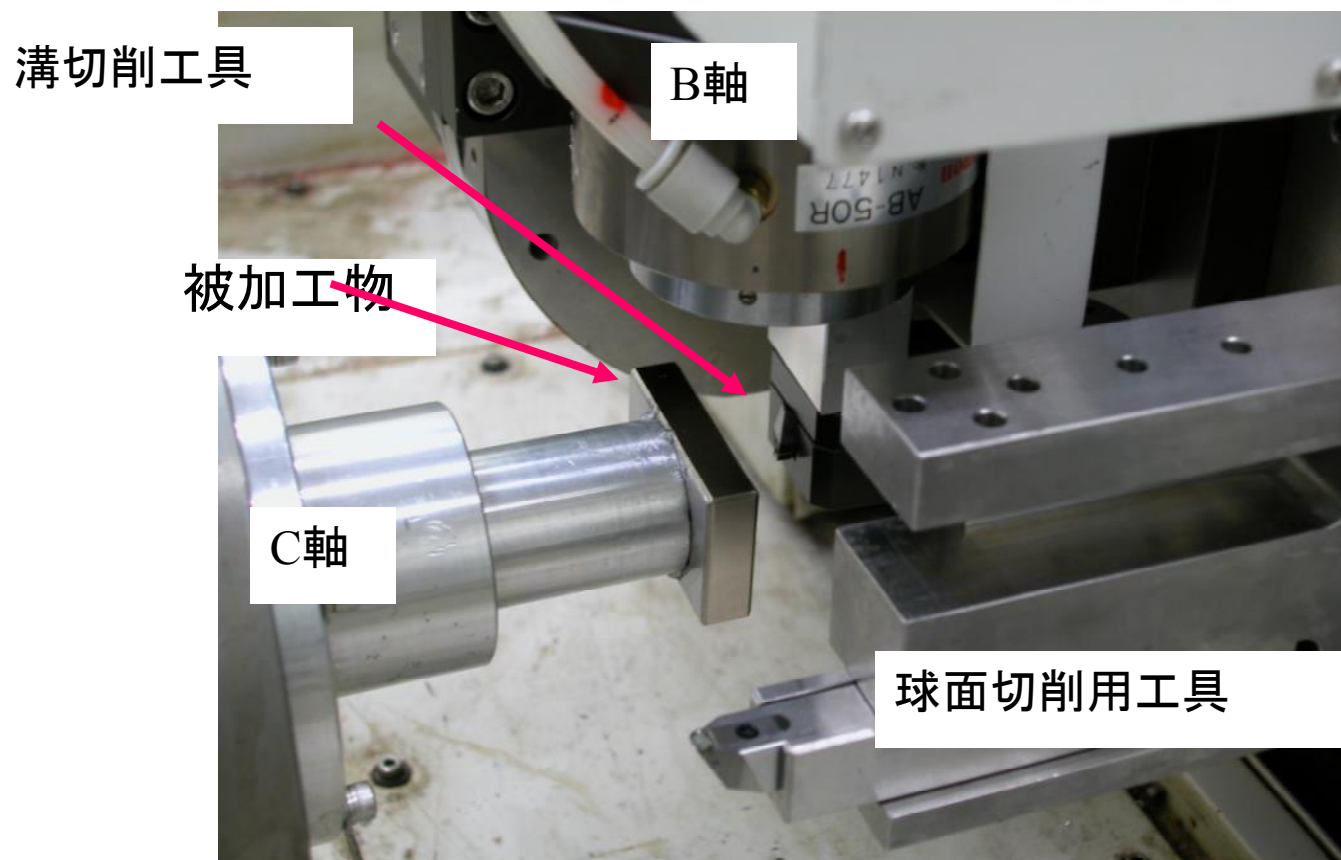
$$\begin{cases} x = SR \cos \theta \sin \varphi \\ y = SR \sin \theta \\ Z = SR(1 - \cos \theta \cos \varphi) \end{cases}$$

式(2)

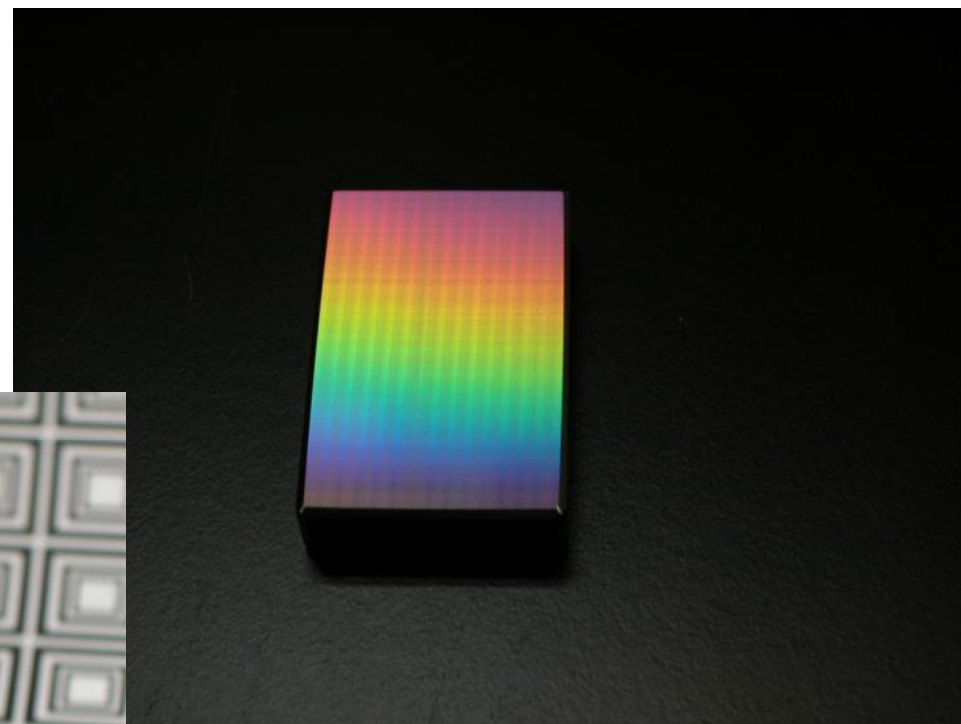
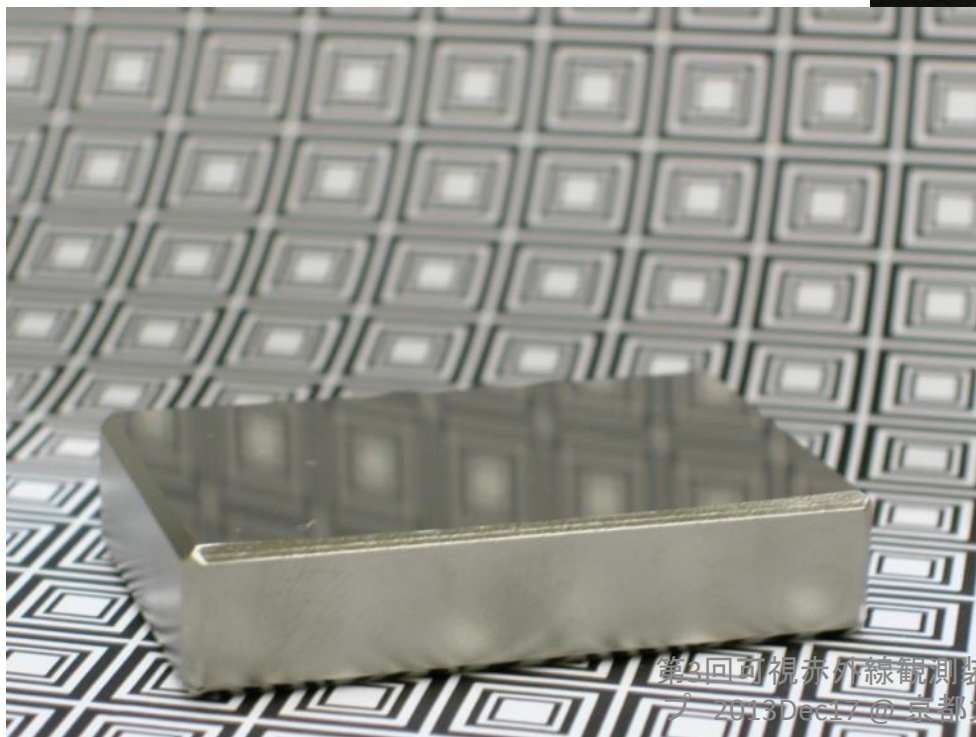
加工の手順

- 球面切削用工具および、溝切削用工具の中心出しを行う。
(テストワーク)
- B軸の角度を変化させて中心出しを行い $R_{b, \alpha b}$ を求める。
- 被加工物を正面旋削により $R=1000\text{mm}$ に加工する。
- 5軸制御にて溝加工を行う。

加工の様子



加工結果



まとめと今後の展望

- 超精密加工(切削、研削)による回折格子加工は、迷光・格子ピッチ精度の向上が課題であったが、近年の超精密加工装置は、ルーリングエンジンの精度を超えるレベルまで到達しつつある。
- これらのことから、超精密加工の自由度(ブレード角、材質、加工手法、曲面・曲線加工)を考慮すると、今後は超精密加工装置による回折格子加工が総合的性能として最も優れている可能性がある。
- 赤外分光素子において、用いられるSi、Geなどの加工に関しても研削のみならず切削工具による高精度な加工が実現できる可能性がある。



謝 辞



本研究にご協力いただいた各氏に謝意を表します。

超精密加工全般

理研 先端光学素子開発チーム 森田晋也
中部大学 鈴木浩文
東京大学 樋口敏郎
長津製作所 牧野俊清 ならびに関係者

Geイメージングレーティング

森田晋也 海老塚昇、平原靖大、大森整

曲面回折格子

森田晋也、守安精、大森整、滝澤慶之、清水裕彦

(敬称略)



ご清聴ありがとうございました。