

# 次観測装置用の新しい回折格子 の開発状況 V

海老塚 昇<sup>1</sup>, 岡本 隆之<sup>1</sup>, 竹田 真宏<sup>1</sup>, 細畠 拓也<sup>1</sup>, 山形 豊<sup>1</sup>,  
佐々木 実<sup>2</sup>, 魚本 幸<sup>3</sup>, 島津 武仁<sup>3</sup>, 佐藤 慎也<sup>4</sup>, 橋本 信幸<sup>4</sup>,  
田中 壺<sup>5</sup>, 服部 堯<sup>5</sup>, 尾崎 忍夫<sup>6</sup>, 青木 和光<sup>6</sup>

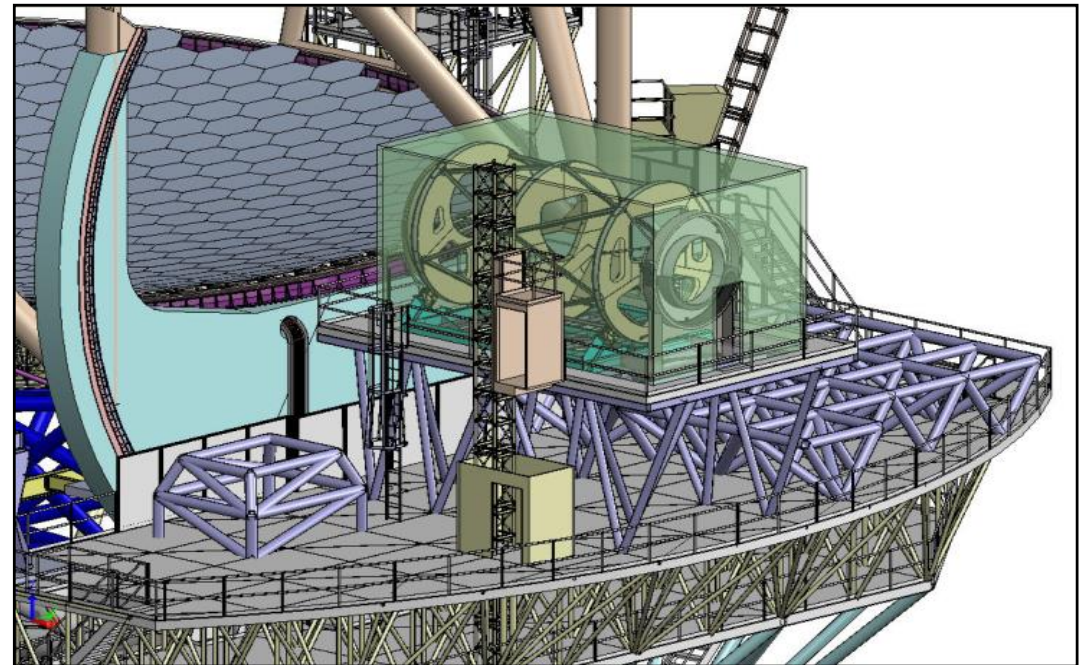
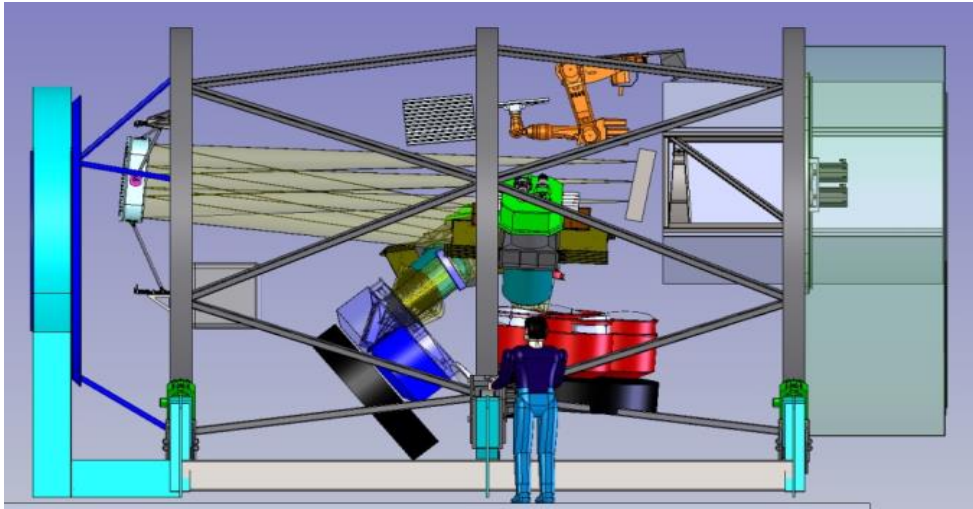
<sup>1</sup>理化学研究所, <sup>2</sup>豊田工業大学 工学部, <sup>3</sup>東北大学 学際科学フロンティア研究所, <sup>4</sup>シチズン時計 研究開発センター,  
<sup>5</sup>国立天文台 ハワイ観測所, <sup>6</sup>国立天文台 TMT推進室





# Wide Field Optical Spectrograph (WFOS)

- TMT(30m望遠鏡)第一期観測装置の1つ。
- 広視野可視光多天体分光撮像装置。
- カリフォルニア大学サンタクルーズ(UCSC)がリード。
- 国立天文台、ハワイ大学、中国科学技術大学、南京天文光学研究所が協力。
- 現在他の研究機関も加えて新たな開発チームの再編が行われている。

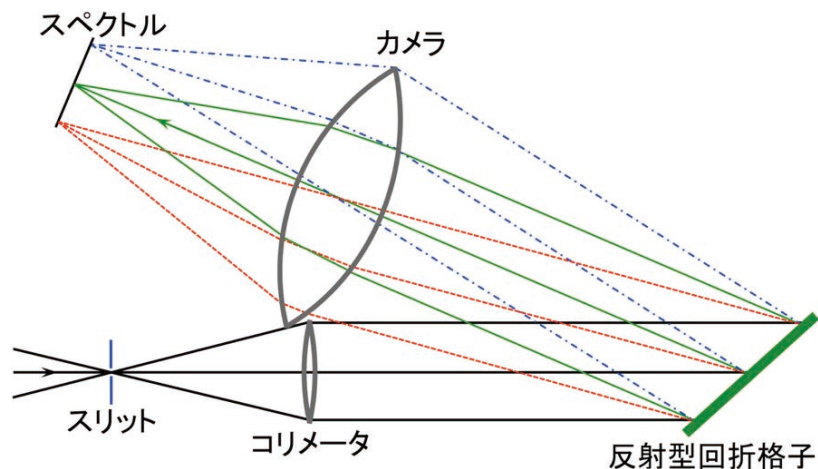


国立天文台 尾崎氏のスライド

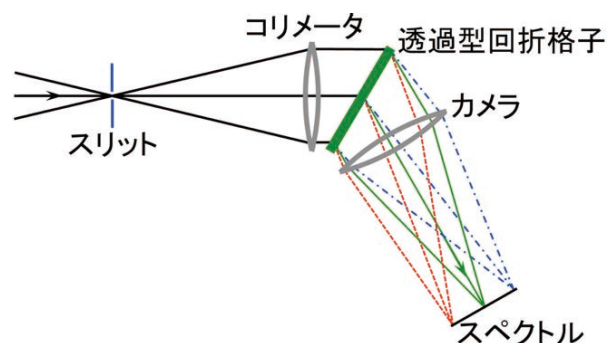
# WFOS装置パラメーター

視野	$8.3 \times 3 \text{ arcmin}^2$ ( $1086 \times 392 \text{ mm}^2$ 望遠鏡焦点面において)
波長範囲	310 – 600 nm (青側) 550 – 1000 nm (赤側)
観測モード	撮像 ロングスリット分光 多天体スリット分光
波長分解能	R~1000, 5000, 8000 (0.75" 幅スリット使用時)
コリメーター焦点距離	4500 mm
カメラレンズ焦点距離	600 mm
分光器内瞳径	300 mm
検出器フォーマット	12K × 16K

# 反射型と透過型回折格子の得失



反射型回折格子



透過型回折格子

- X線からTHz波におよぶ電磁波に対して利用可能。
- 比較的安価。
- 明るい光学系ではリトロマウント\*が困難。

- コリメータ等の光学素子を近接して置くことができる。  
→ 分光観測装置を小型化できる。
- 完全なリトロマウント\*に光学系を配置ができる。

\*リトロマウント: 入射角と回折角が等しく、入射と回折光束の断面形状が同一になる分光器の光学系配置。

# 表面刻線型回折格子の限界

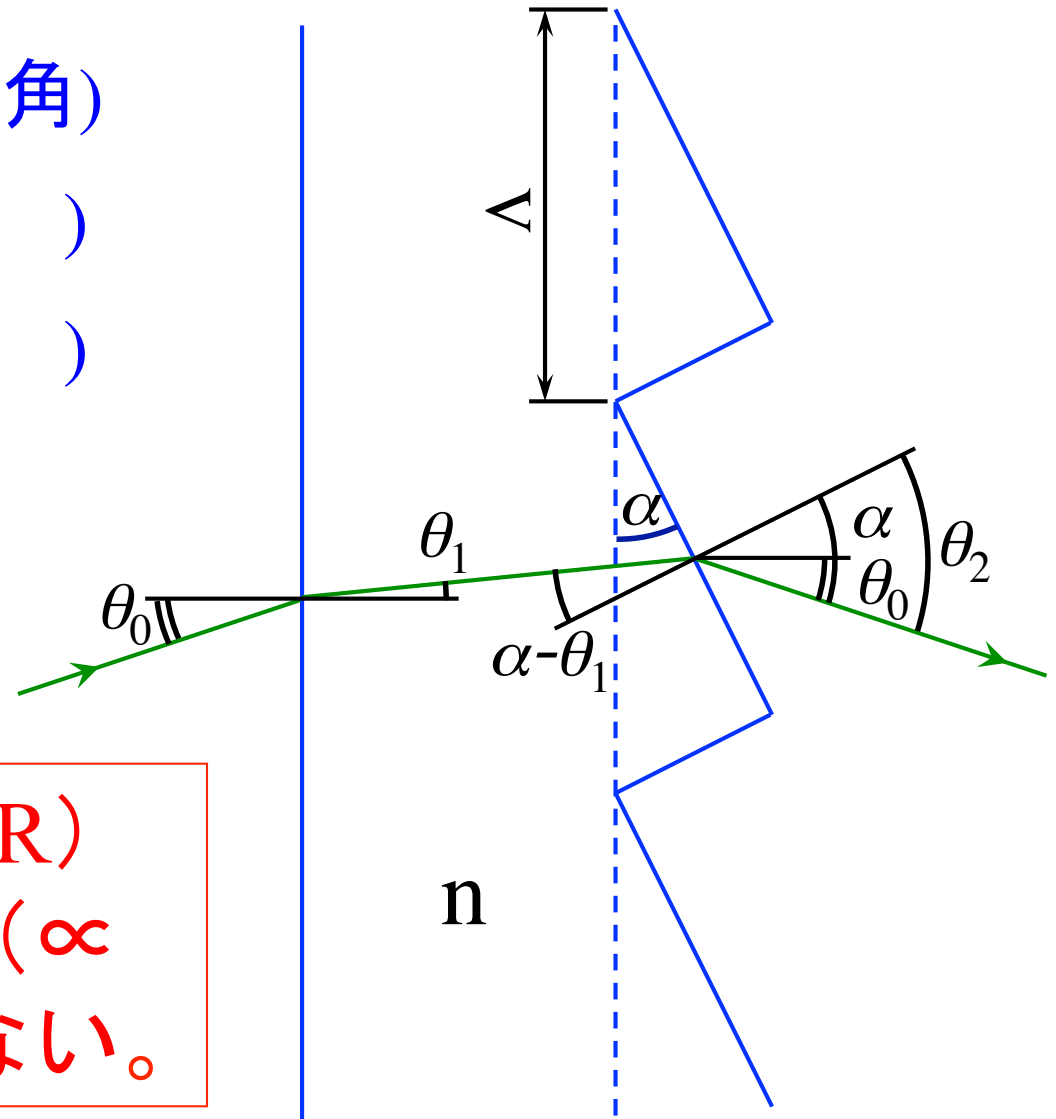
$n = 1.5, \theta_0 \leq 29^\circ$  ( $\theta_2 > 90^\circ$ : 臨界角)

$n = 2.0, \theta_0 \leq 40^\circ$  ( 同 上 )

$n = 2.5, \theta_0 \leq 48^\circ$  ( 同 上 )

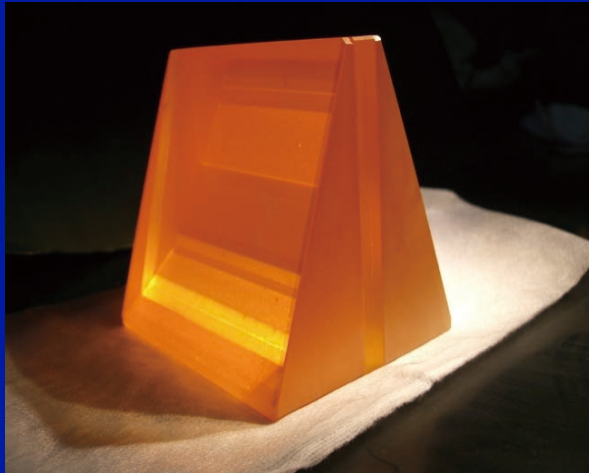
ダイヤモンド:  $n = 2.46@400\text{nm}$

階段形状の表面刻線型 (SR)  
回折格子は大きな回折角 ( $\infty$   
角度分散) では使用できない。

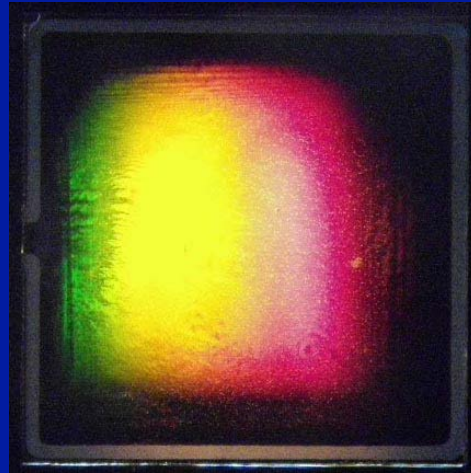




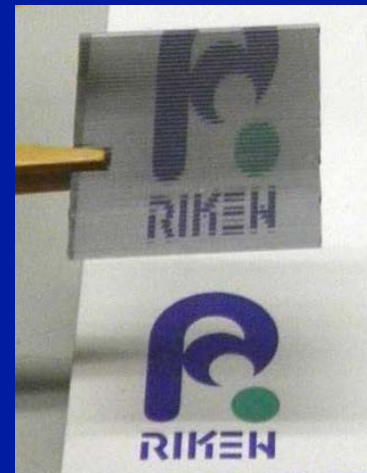
# 開発済および開発中の回折格子



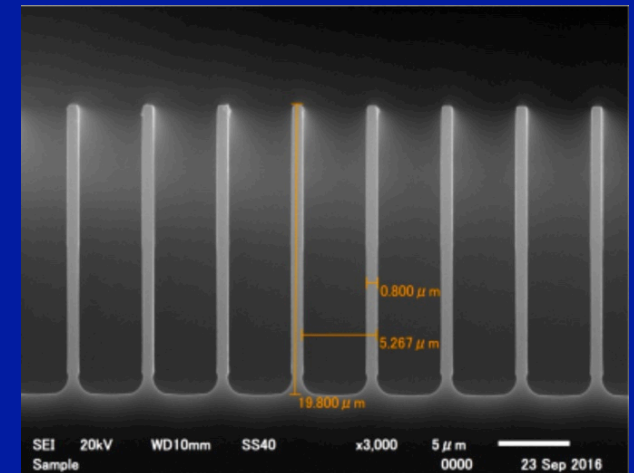
VPH grating



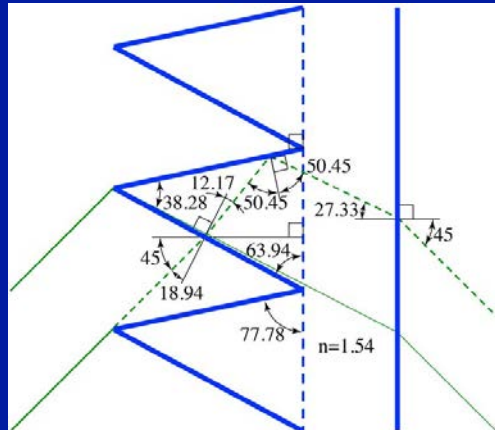
複屈折性のB-VPH grating



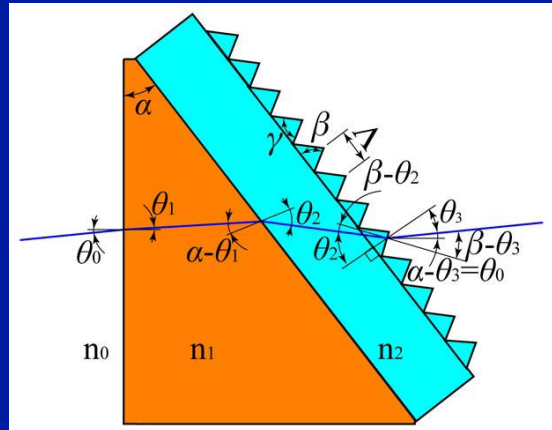
Quasi-Bragg (QB) grating



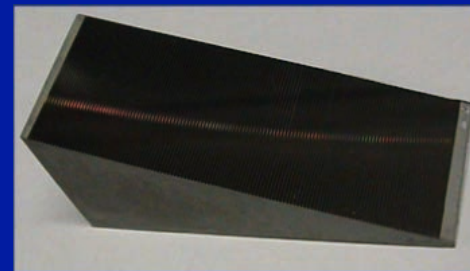
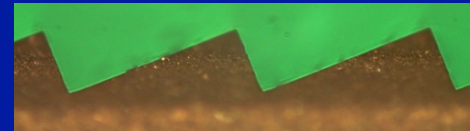
Volume binary (VB) grating



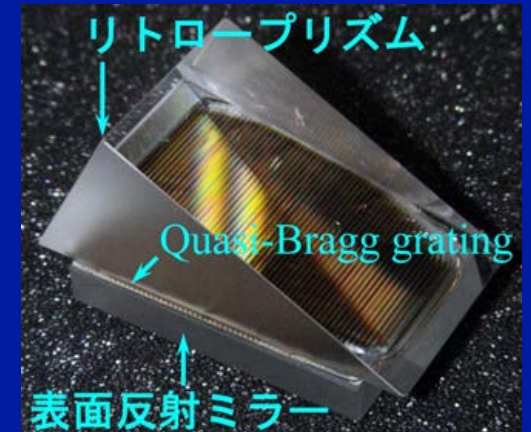
Reflector facet transmission (RFT) grating



Hybridグリズム



Immersion grating



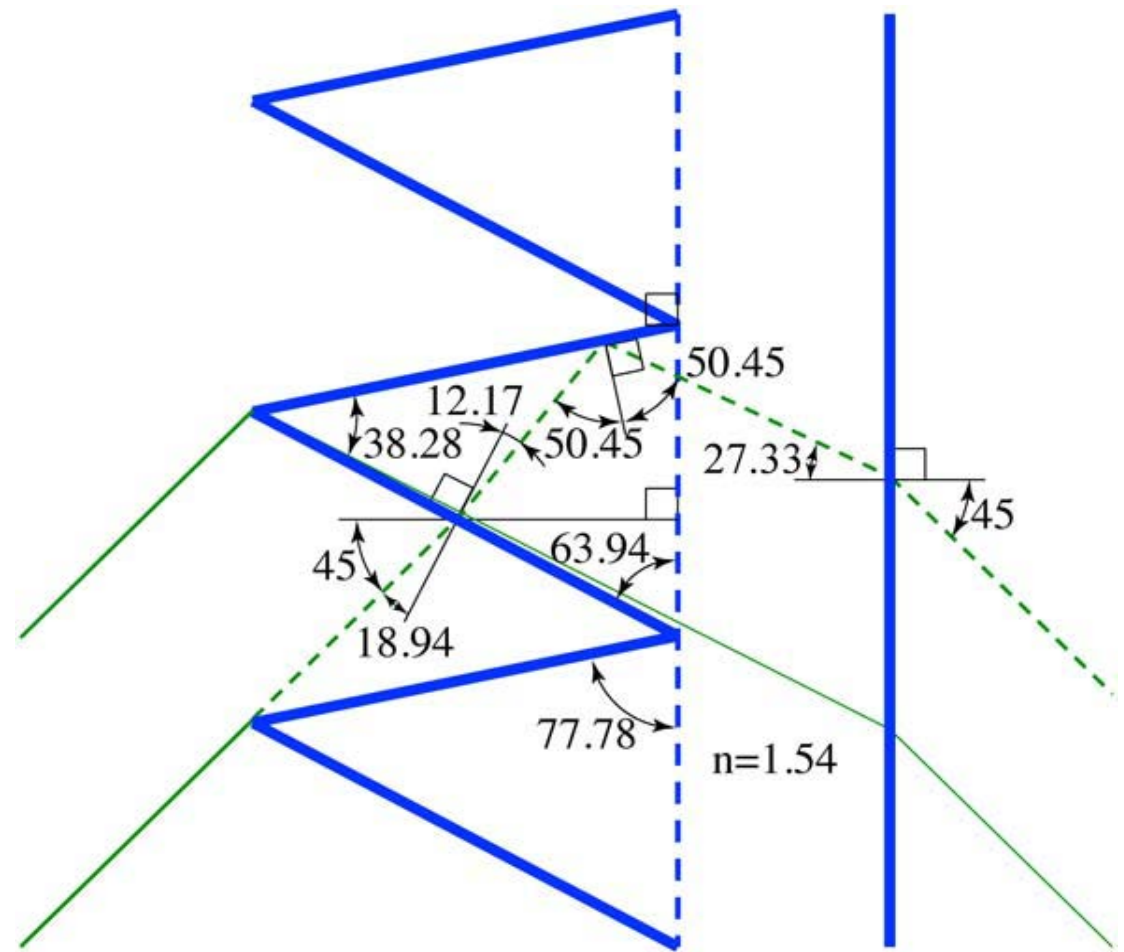
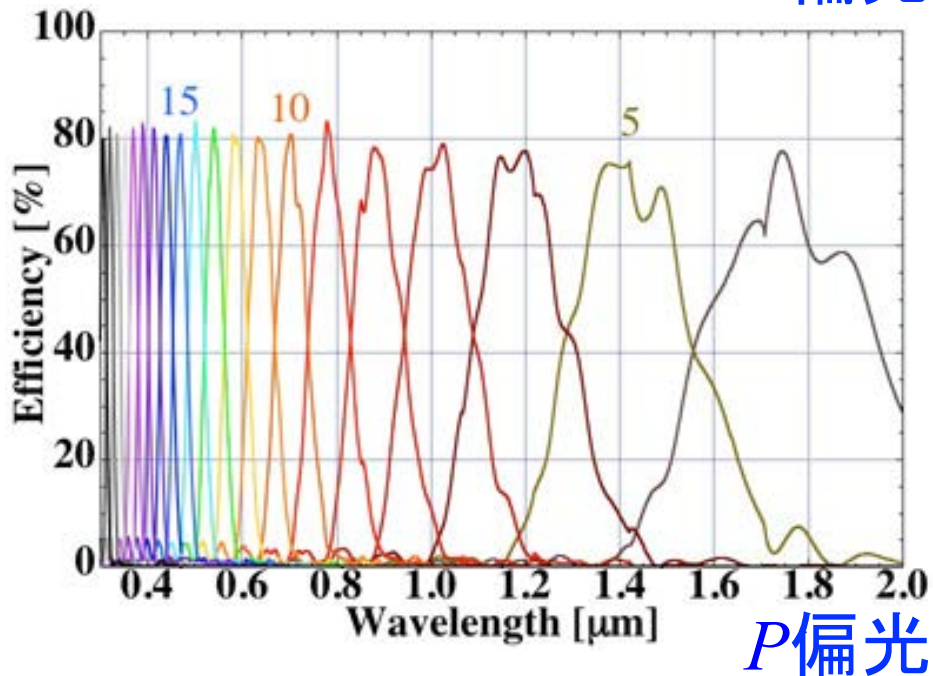
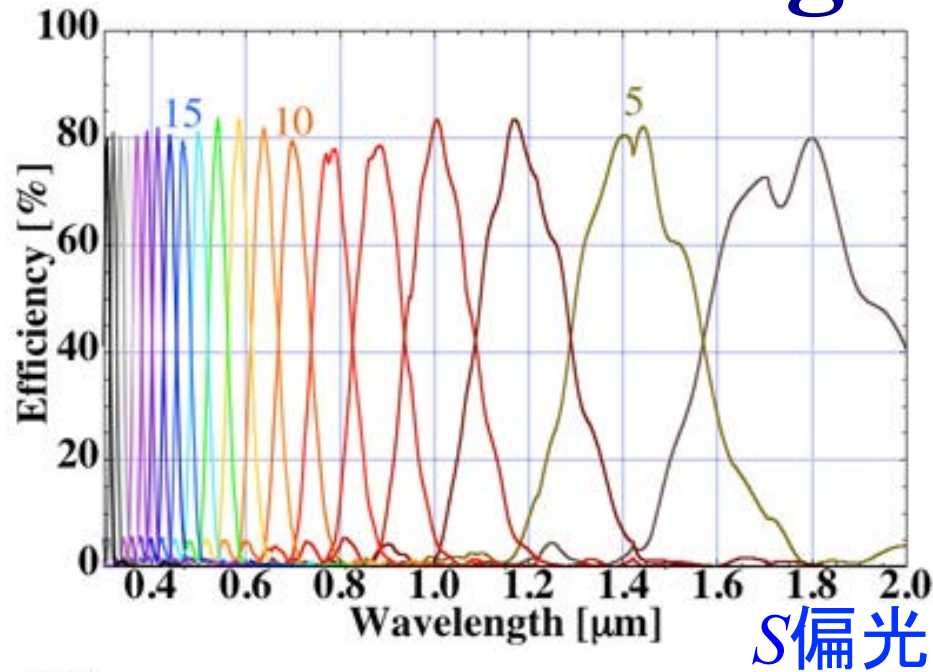
QB immersion grating

# Reflector Facet Transmission (RFT) Grating



**Echellegram**

# RFT Gratingの回折効率 (RCWA)

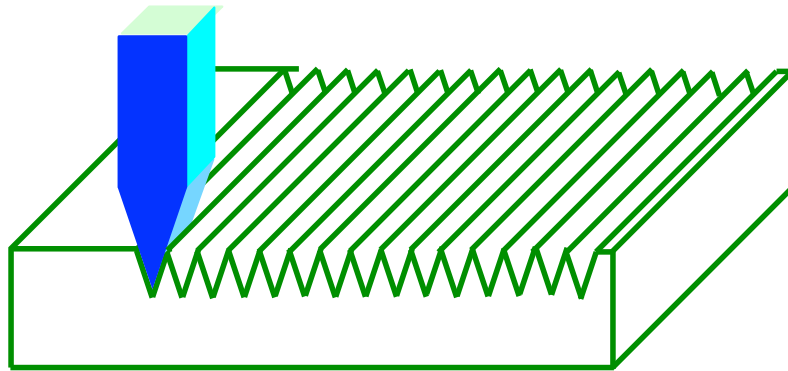


$\Lambda=5\mu\text{m}, \theta_0=45^\circ, n=1.54$

WFOS用:  $\Lambda=2.2\sim 4.7\mu\text{m}, \theta_0=36\sim 53^\circ$



# RFT Gratingの製作方法



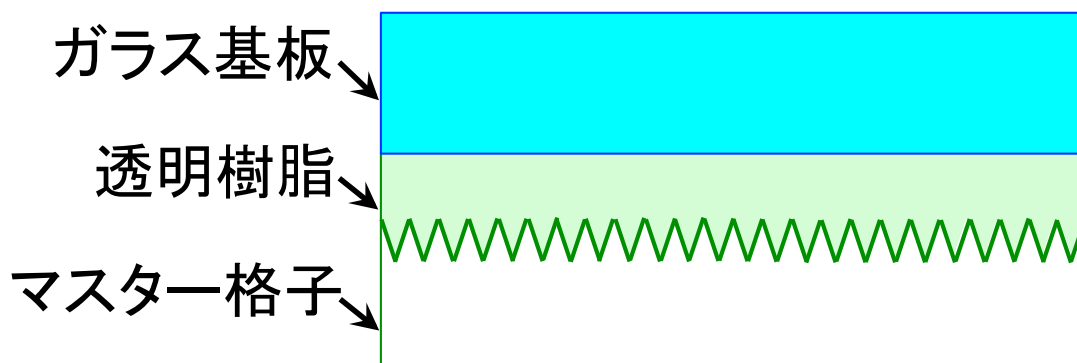
マスター格子(金型)の  
シェーパー切削加工

ワークピース: 無電解Ni-P合金

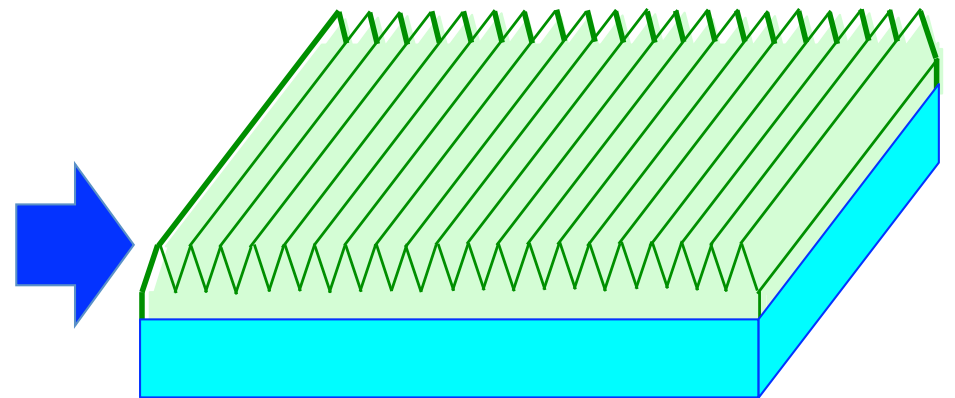
ブレード角 :  $\beta = 58\sim 67^\circ$

格子の頂角 :  $\gamma = 36\sim 44^\circ$

格子周期 :  $\Lambda = 2\sim 4 \mu\text{m}$



レプリカ加工



完成

# MOIRCS用ハイブリッドグリズム



## RFT Gratingのプロトタイプ



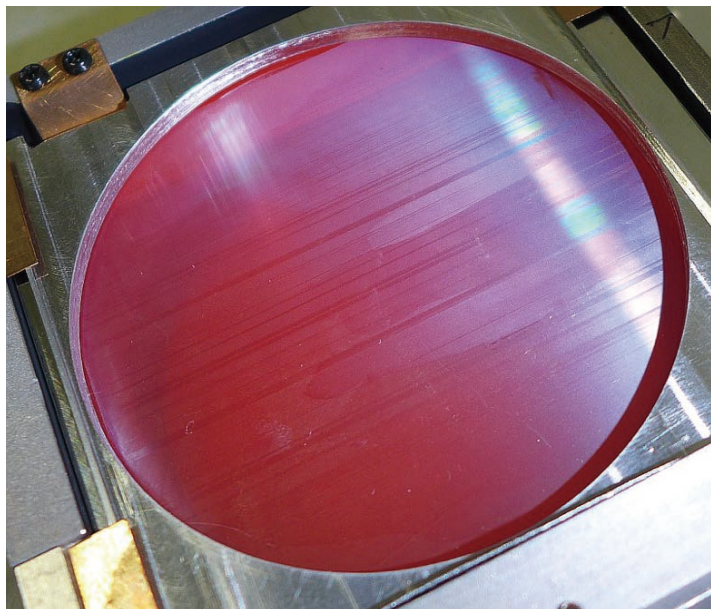
**NGC 2392** [ Eskimo Nebula ]

Ultra-high-sensitivity HDTV I.I. color camera (NHK)

January 17, 1999. exp. 1/4 sec. 12 frames composited

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

# R1300 (KRS-5) グリズムの性能低下

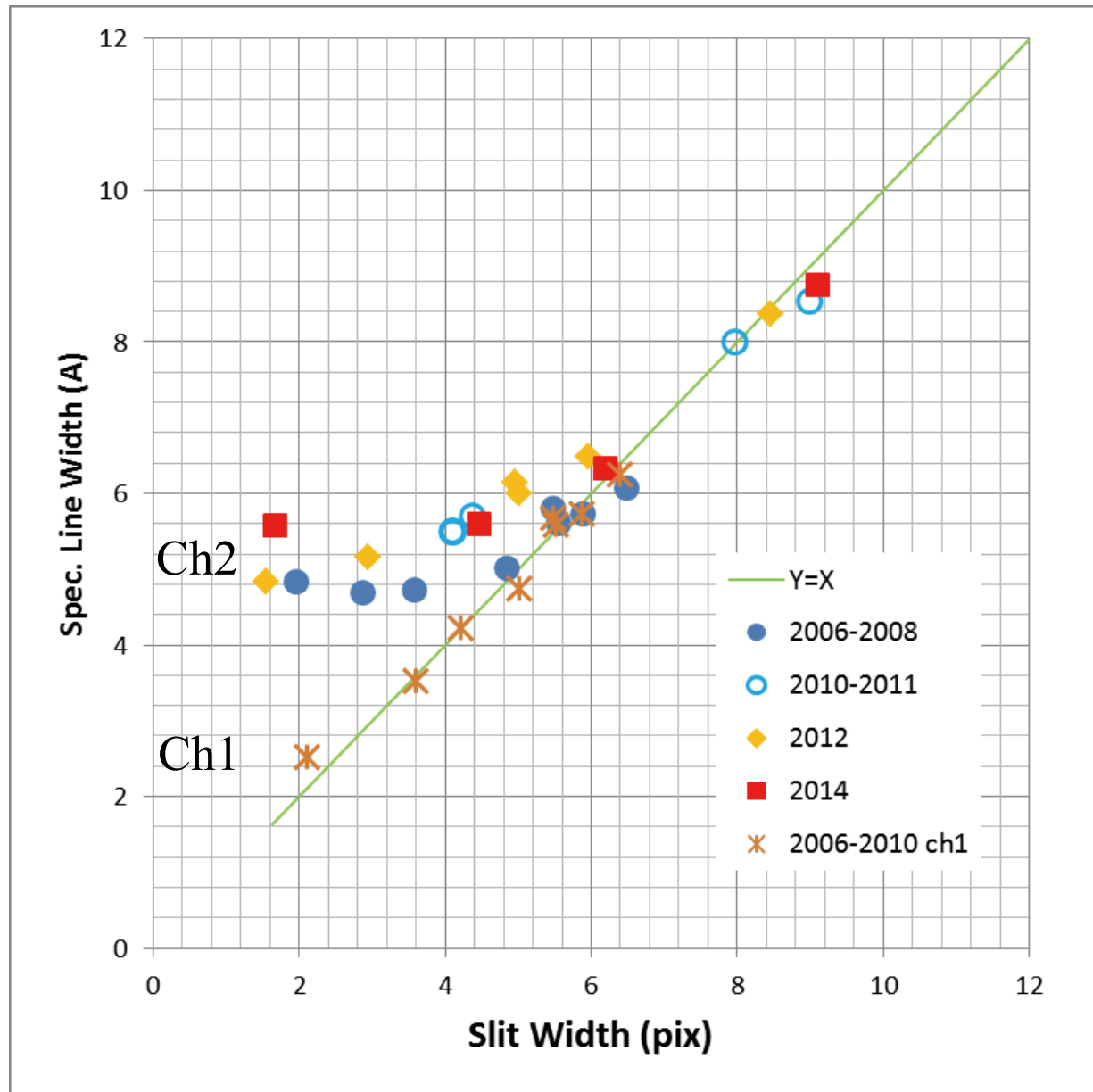


Ch2のルーリング面



常温 $\leftrightarrow$ -200°Cのヒート  
サイクルにより、クラック  
発生

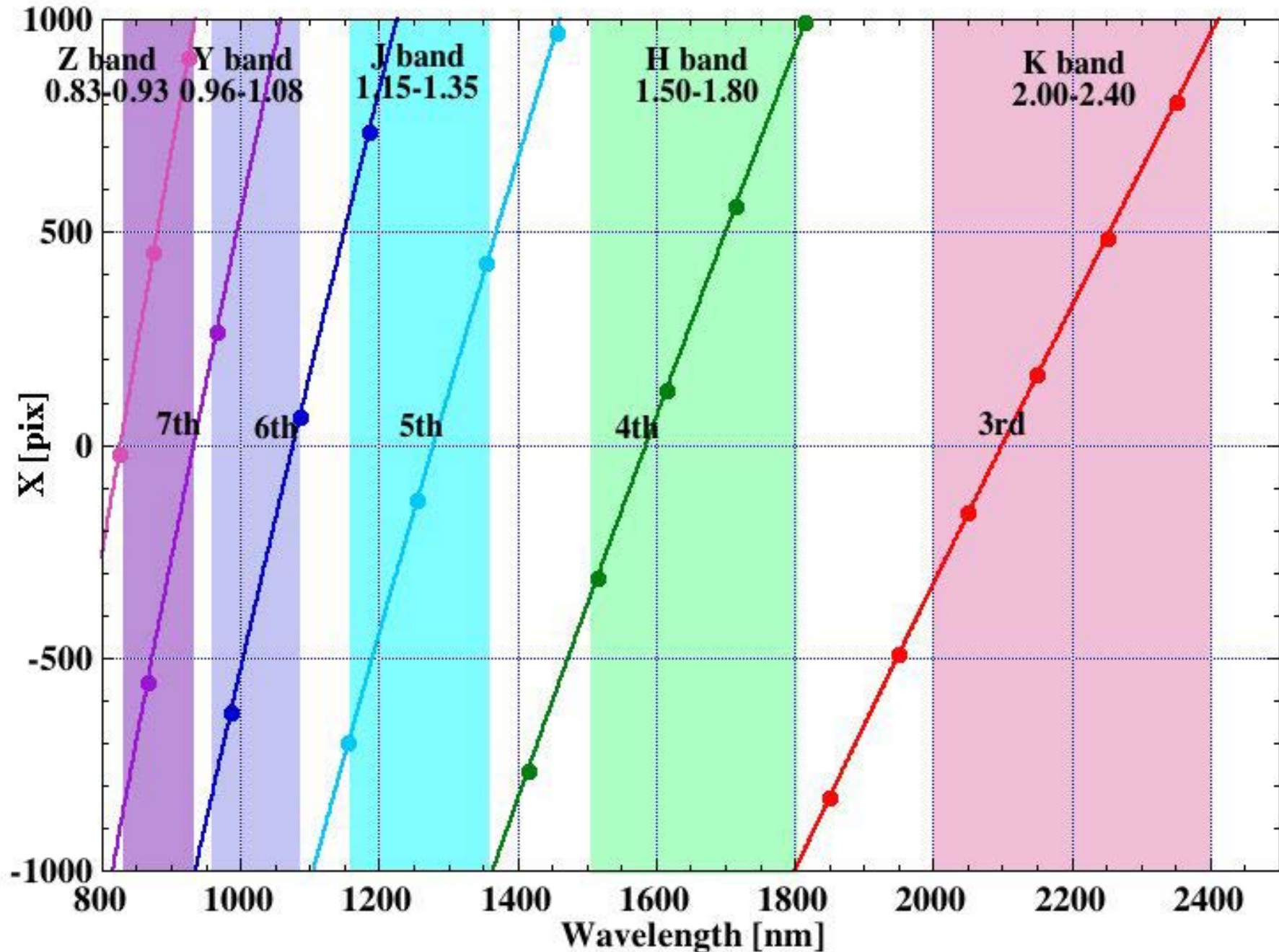
Ch2の裏面(×200)



スペクトル幅の広がり

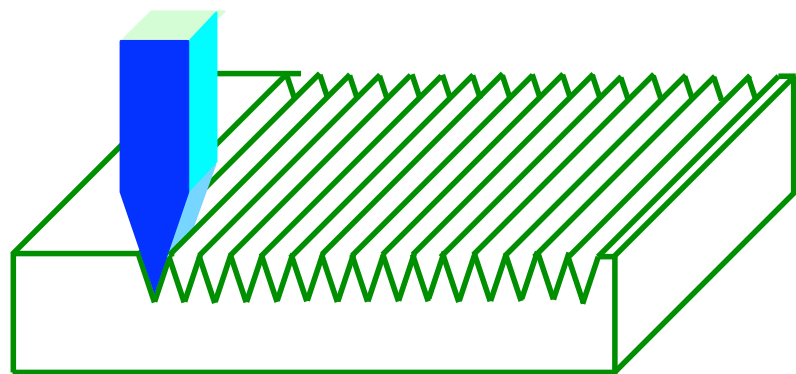


# ハイブリッド・グリズムの観測波長領域



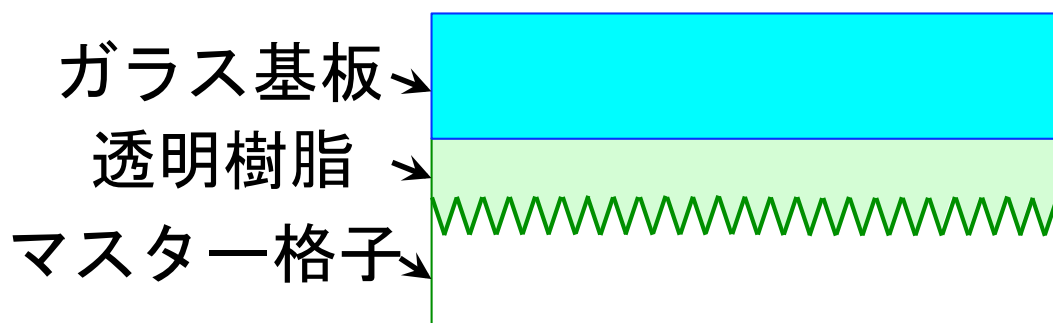


# ハイブリッド・グリズム用回折格子の製作方法

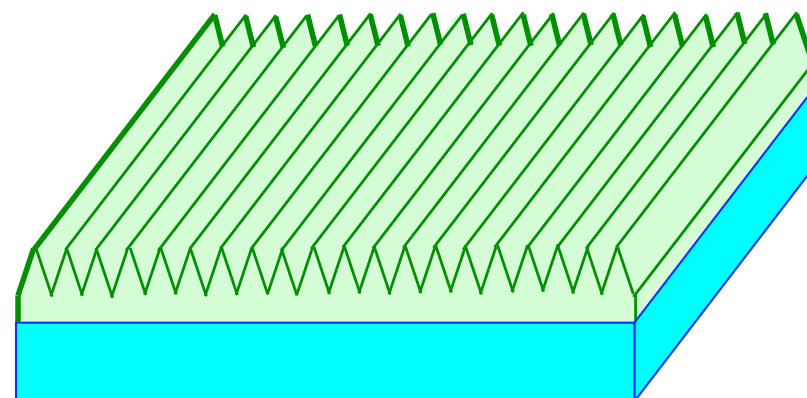
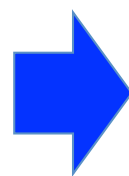


マスター格子(金型)の  
シェーパー切削加工

ワークピース: 無電解Ni-P合金  
ブレード角 :  $\beta = 64.8^\circ$   
格子の頂角 :  $\gamma = 61.8^\circ$   
格子周期 :  $\Lambda = 10.79\mu\text{m}$



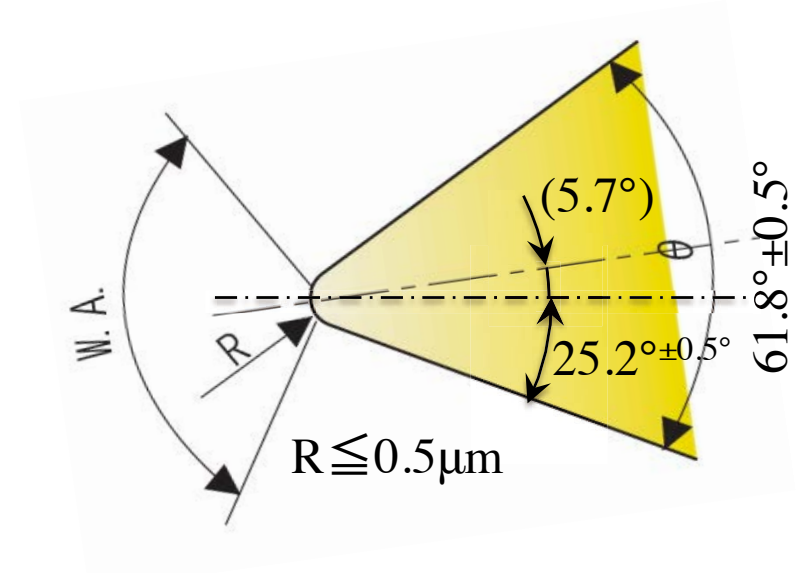
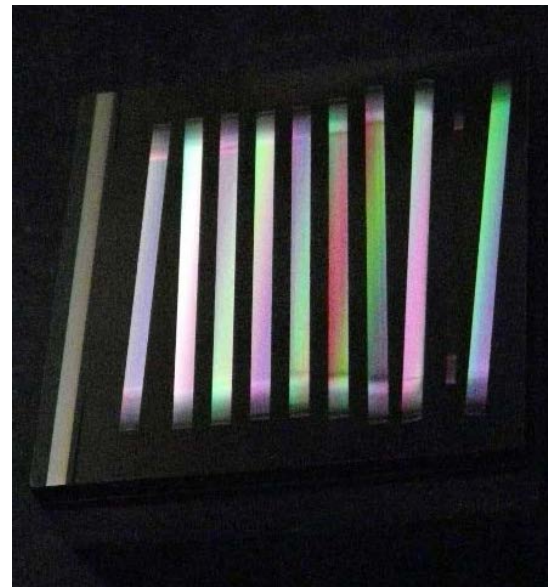
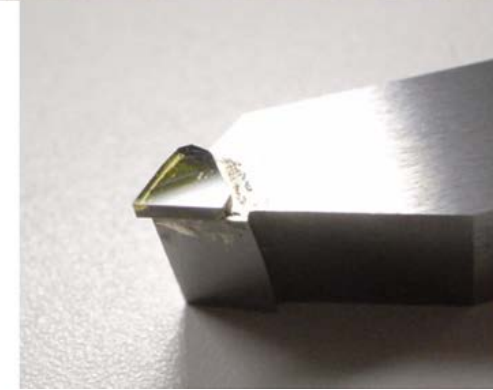
レプリカ加工



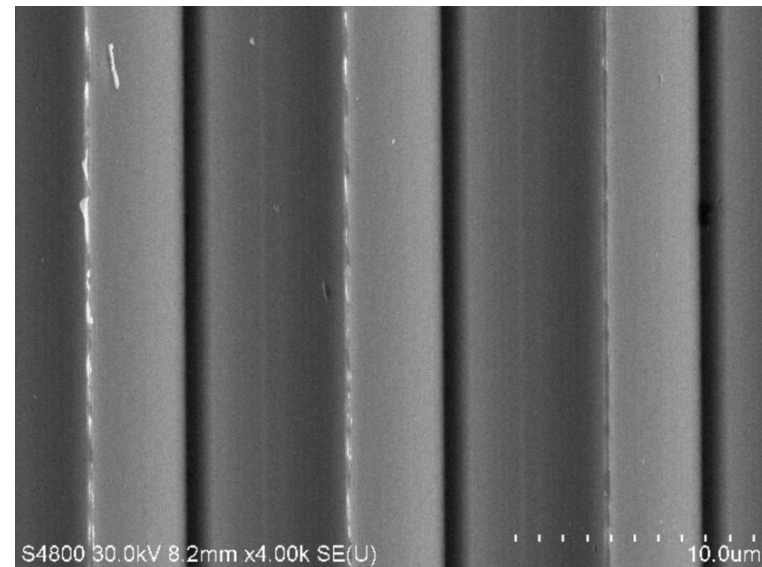
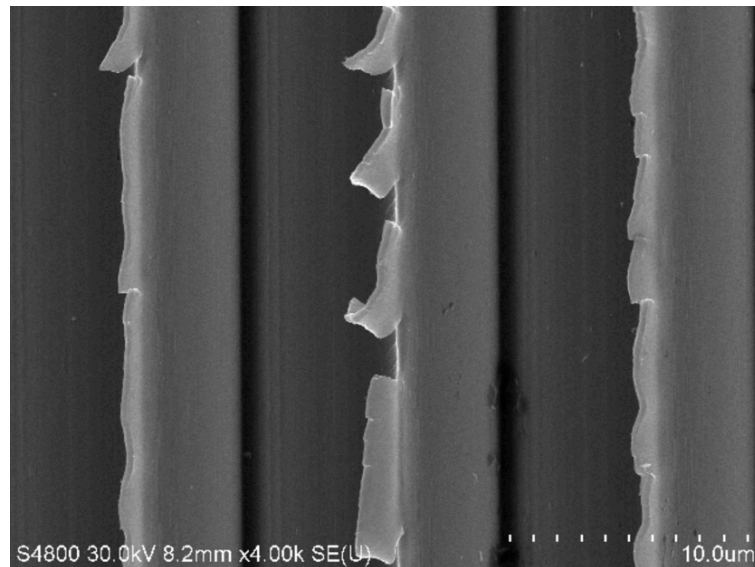
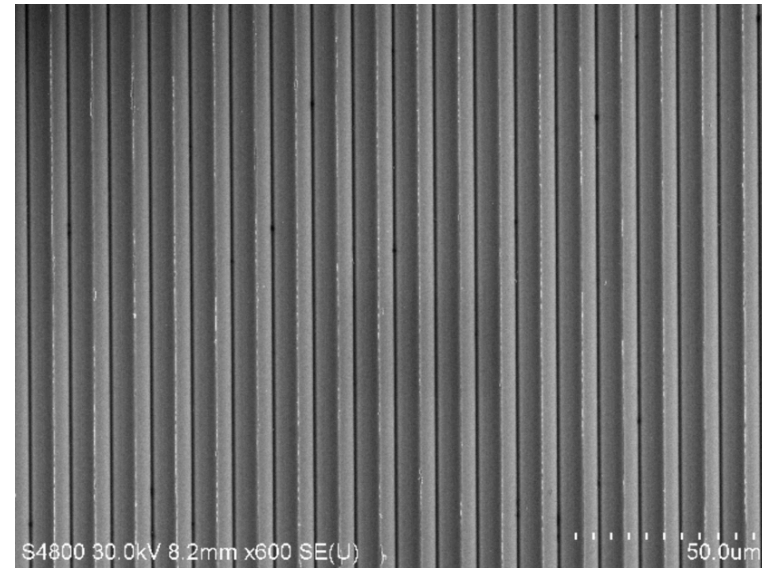
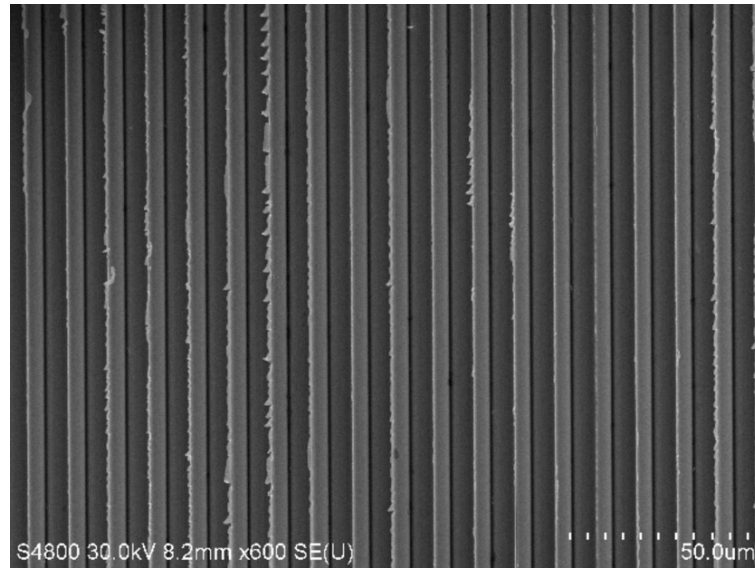
完成



# マスター格子の試験加工 I



# マスター格子 (Ni-P金型) 試験加工品のSEM写真



試験加工品のSEM写真。左:カエシ大。右:カエシ小、  
50×50のレプリカ実験用サンプルの加工条件。

# Ultraprecision Cutting of Ni-P Mold for Reflector Facet Transmission Grating

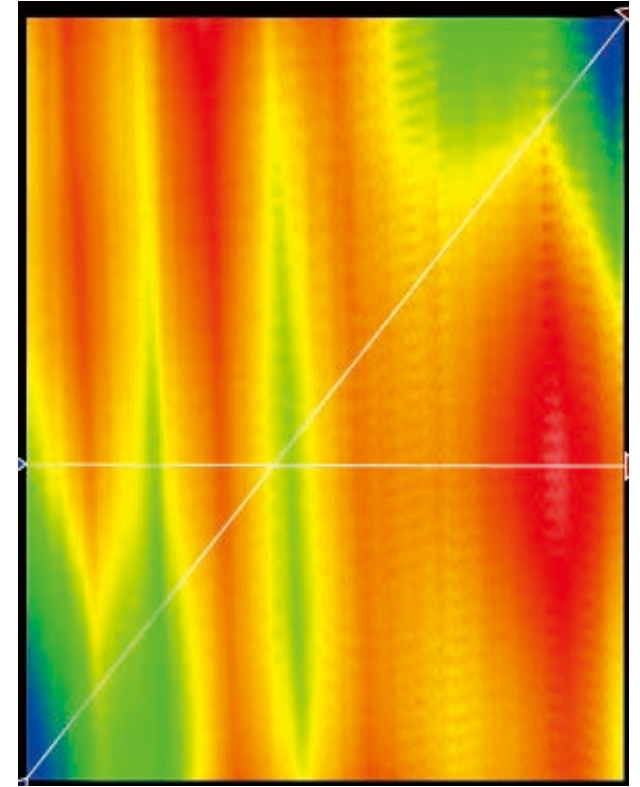
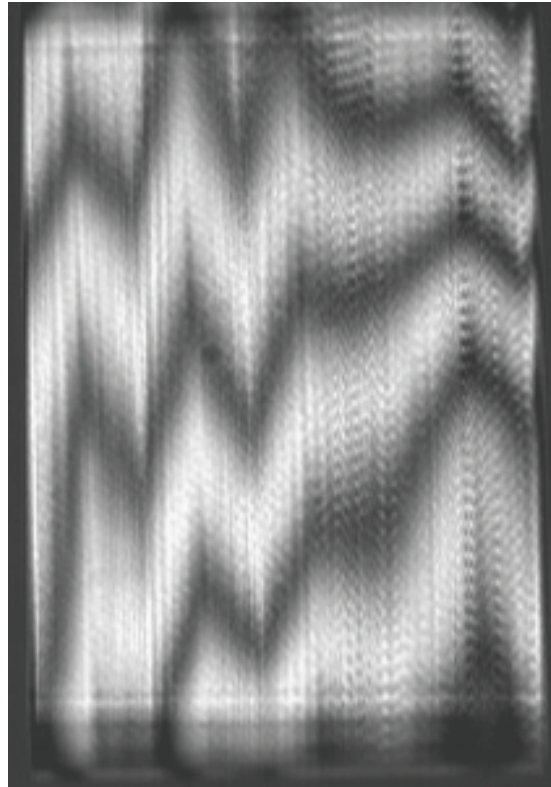
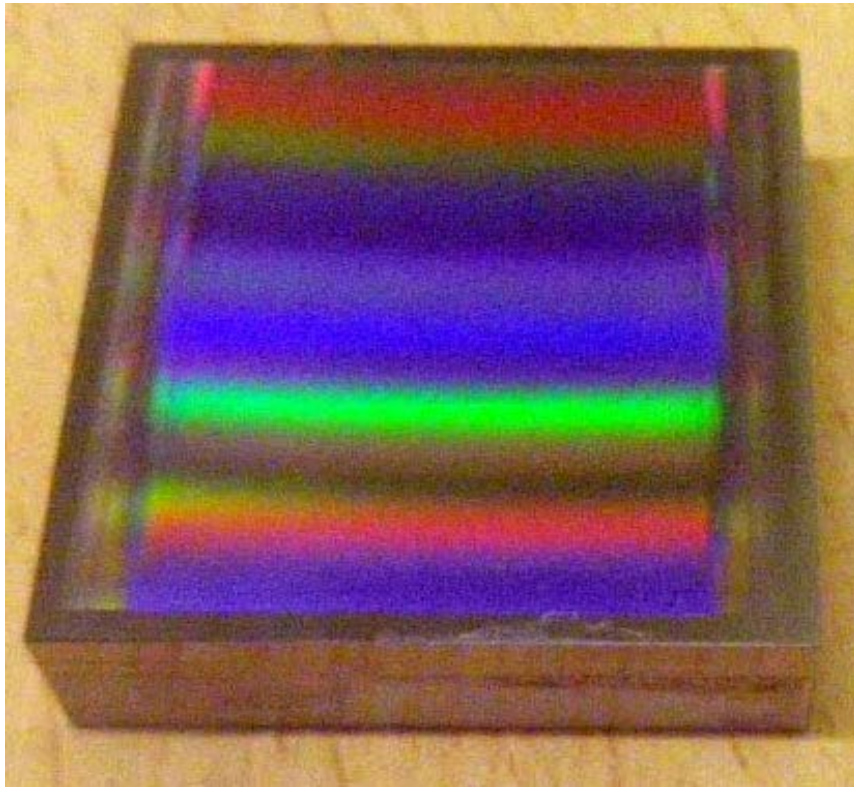
**Machine: NPIC-M200  
(Nagase Integrex)**

**Tool:  
Nano-Polycrystalline  
Diamond Cutter**



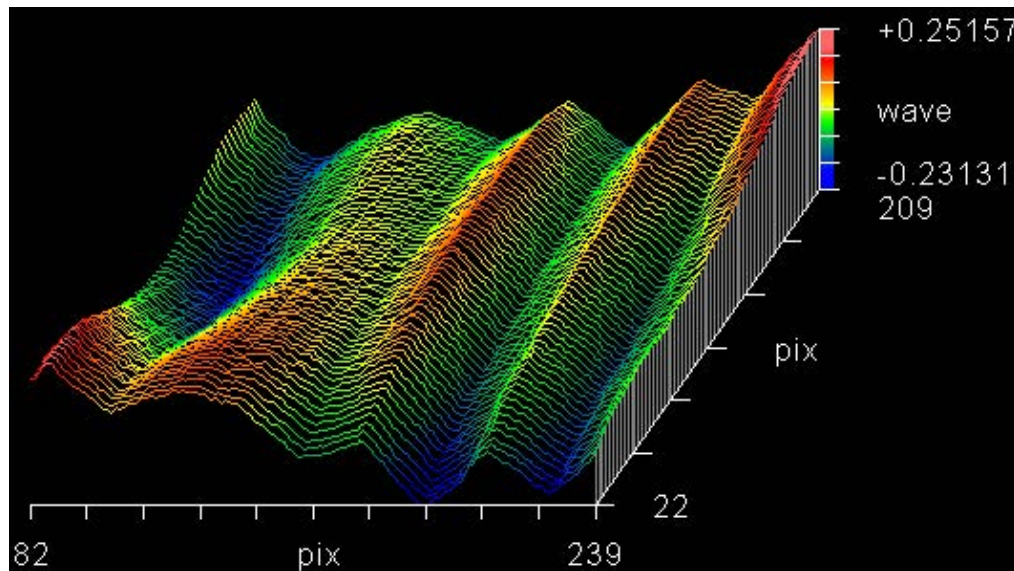
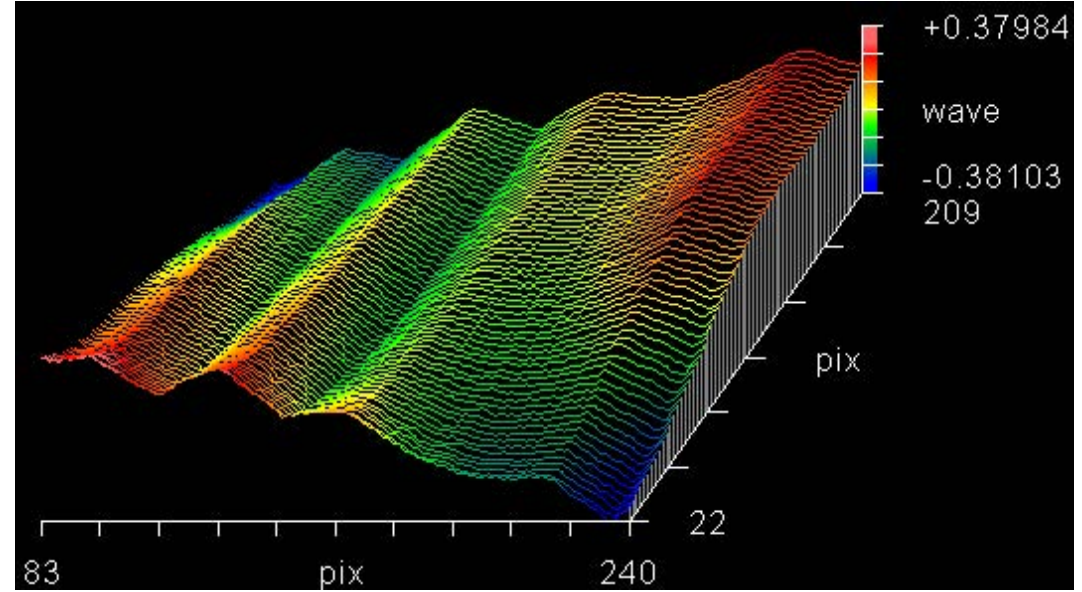
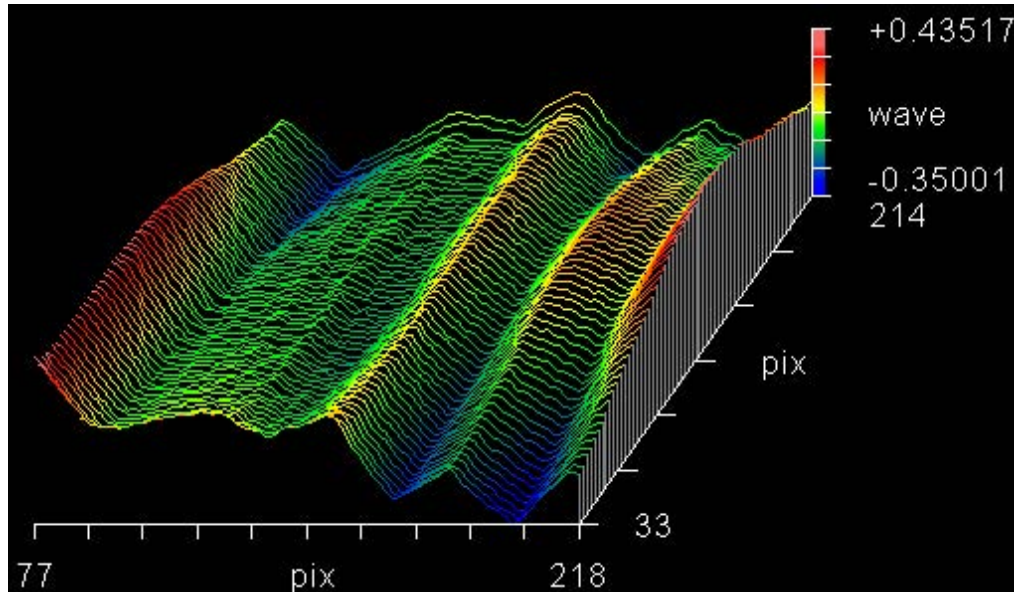


# マスター格子の試験加工 II



レプリカ実験用金型50×50(左)。レプリカ実験用金型の波面、  
PV:0.79 $\lambda$ , RMS: 0.12 $\lambda$ (中央、右)

# RFT Gratingのマスターおよびレプリカの回折光波面



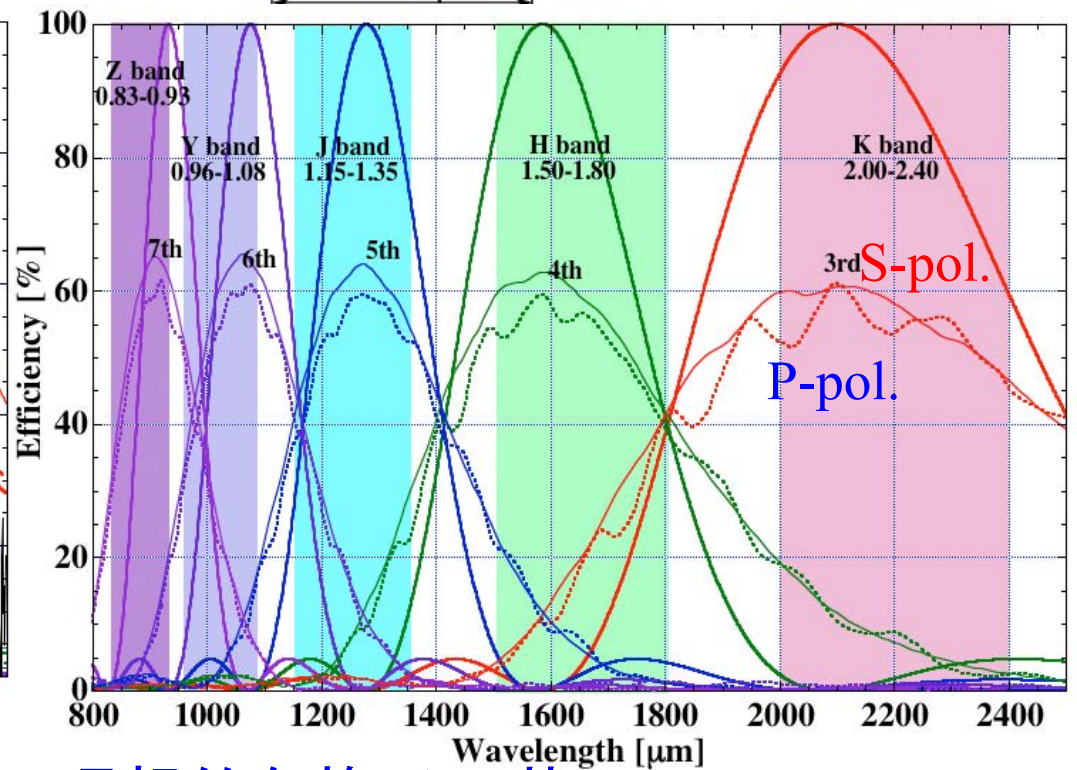
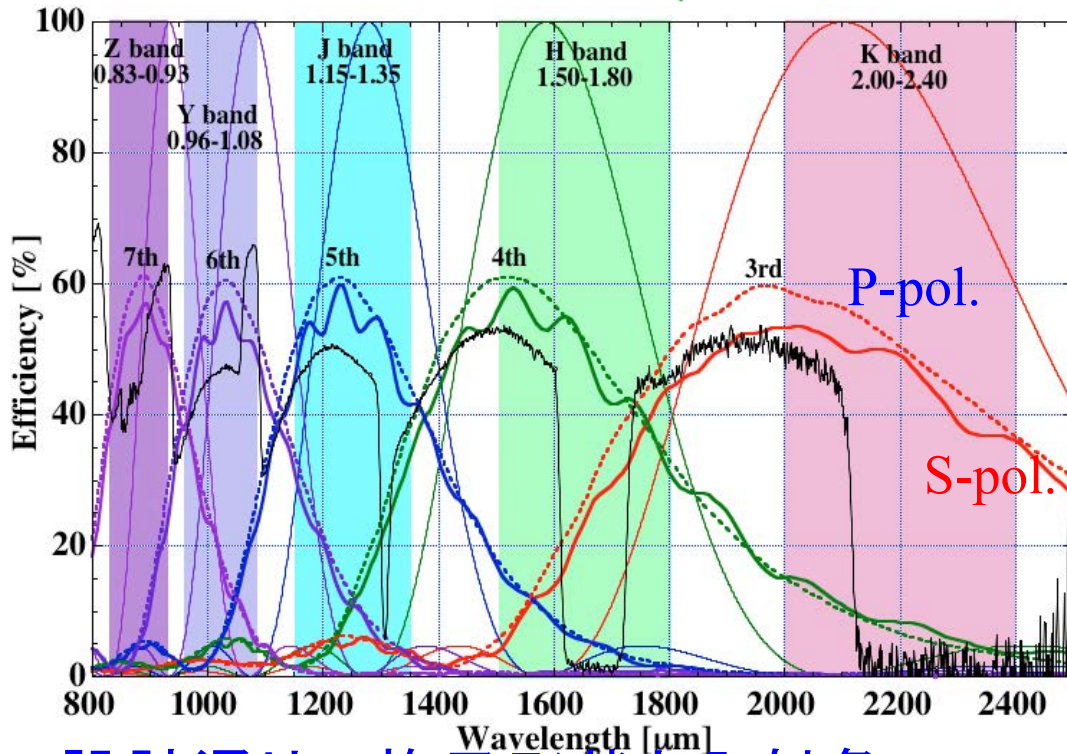
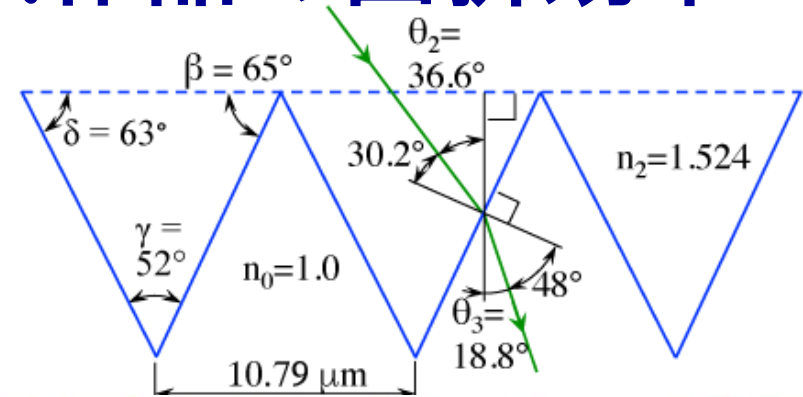
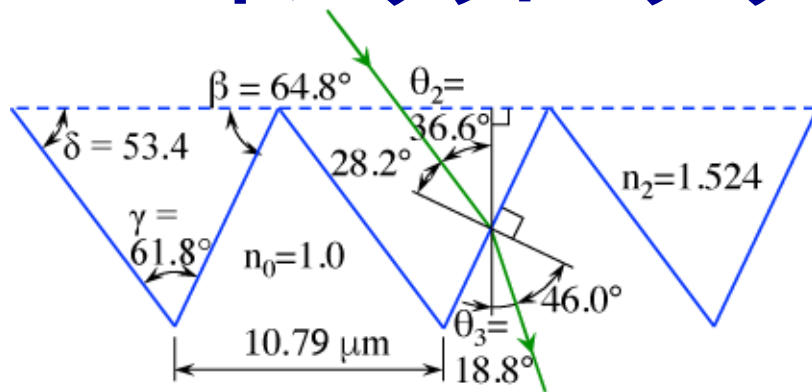
マスター; PV:  $0.79\lambda$ ,  
(左上) RMS:  $0.12\lambda$

第1世代; PV:  $0.76\lambda$ ,  
(右上) RMS:  $0.12\lambda$

第2世代; PV:  $0.48\lambda$ ,  
(左) RMS:  $0.07\lambda$



# ハイブリッド・グリズム試作品の回折効率



設計通りの格子形状と入射角:  
 $\beta = 64.8^\circ$ ,  $\gamma = 61.8^\circ$ ,  $\theta_2 = 36.6^\circ$

理想的な格子形状:  $\beta = 64.8^\circ \rightarrow 65^\circ$ ,  
 $\gamma = 61.8^\circ \rightarrow 52.0^\circ$ ,  $\theta_2 = 36.6^\circ$

[Ebizuka et al., Proc. SPIE10233, 2017]



# Test Fabrication of Master for RFT Grating



**Coma Galactic Cluster**  
(near NGC4889)

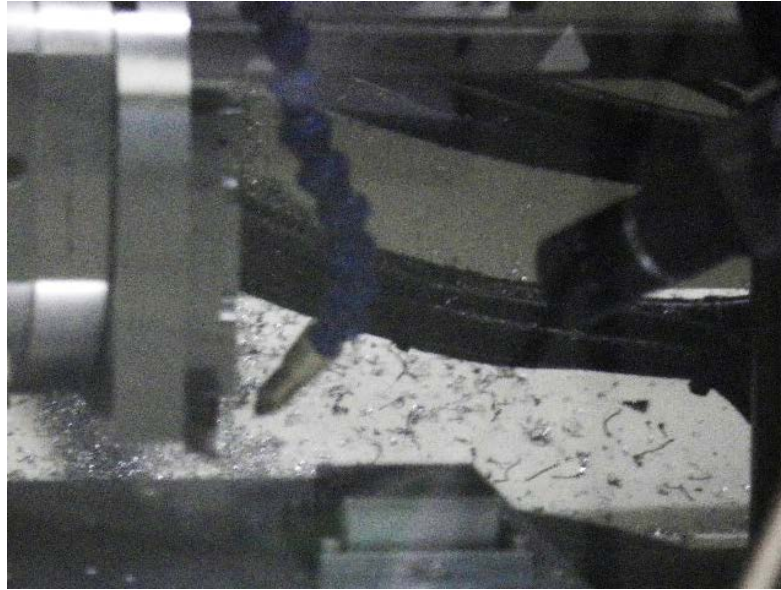
Ultra-high-sensitivity HDTV I.I. color camera (NHK)  
January 16, 1999. exp. 2 sec. 10 frames composit

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

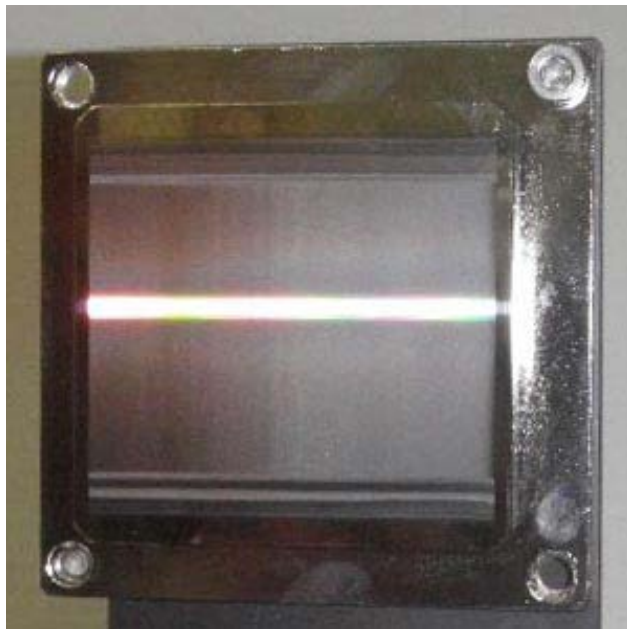
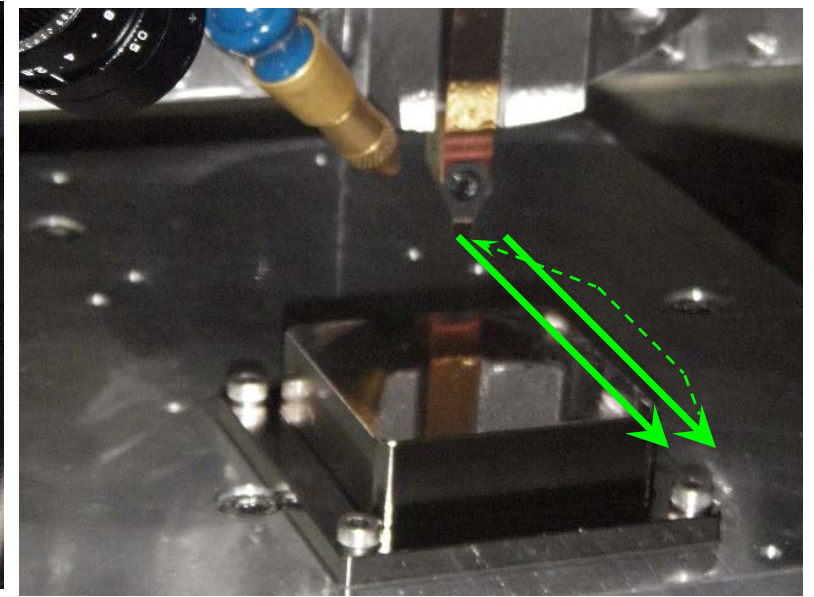
# RFT Grating用金型の試作 Grating



細畠 研究員

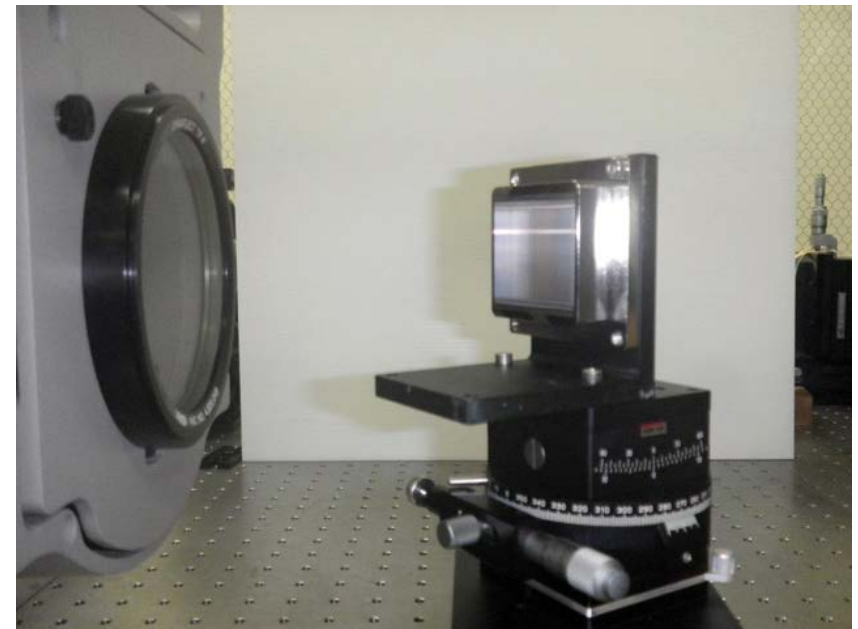


シェーパー切削



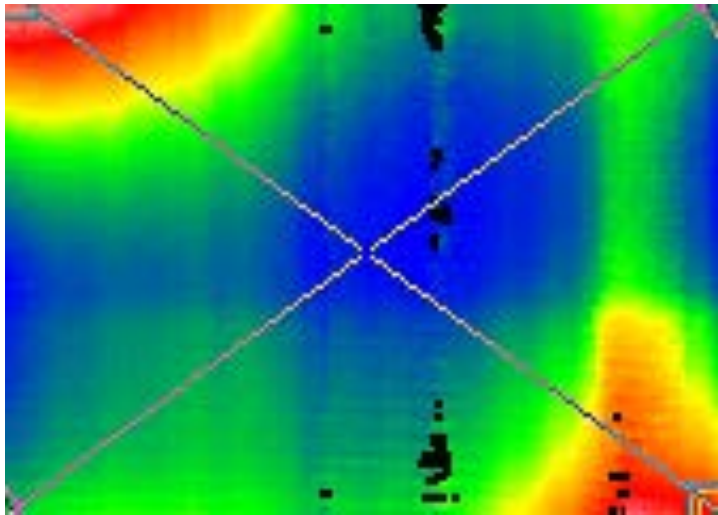
RFT gratingの  
金型(マス  
ター)

Zygo GPI干渉計  
による回折光波  
面の計測

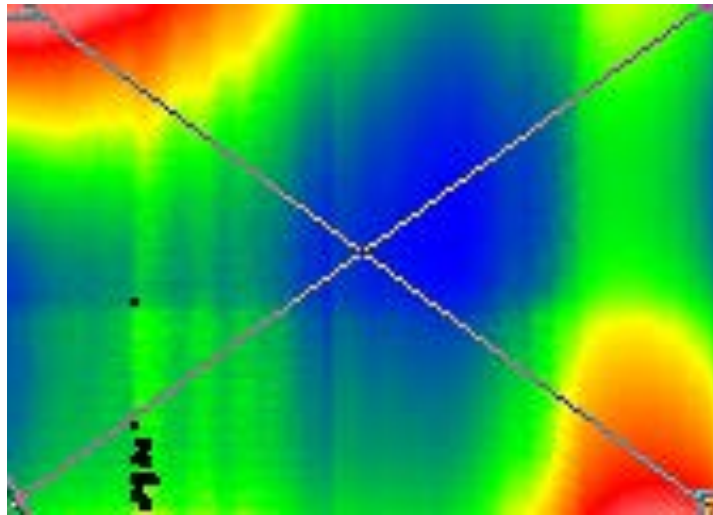




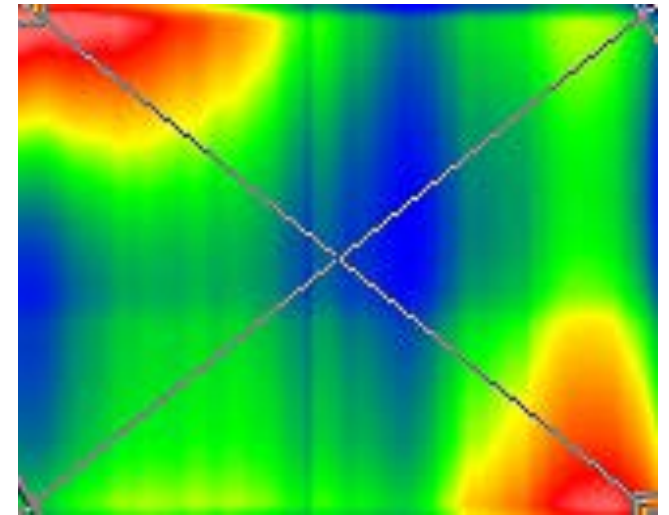
# マスター格子の波面誤差



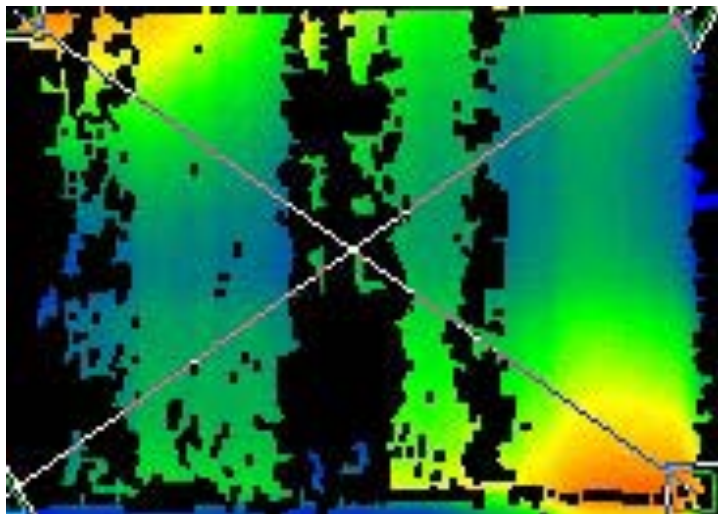
0次; PV:  $1.20\lambda$ ,  
RMS:  $0.21\lambda$



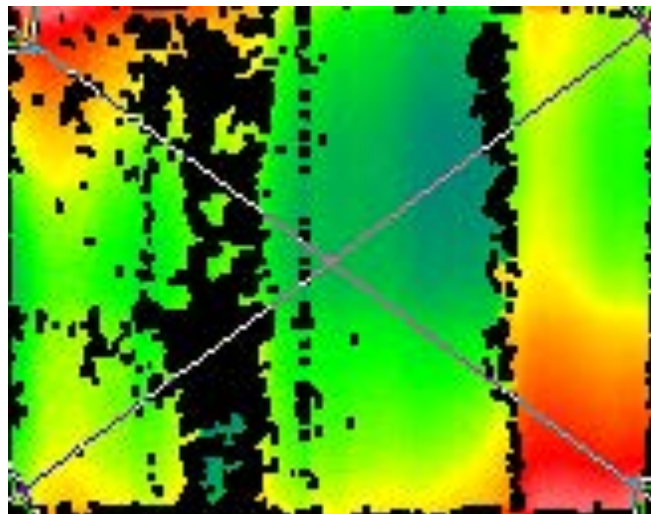
-1次; PV:  $1.28\lambda$ ,  
RMS:  $0.24\lambda$



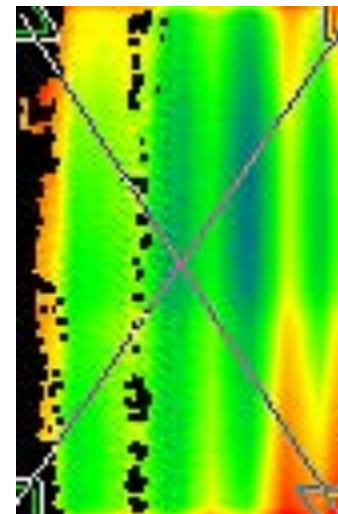
-5次; PV:  $1.29\lambda$ ,  
RMS:  $0.23\lambda$



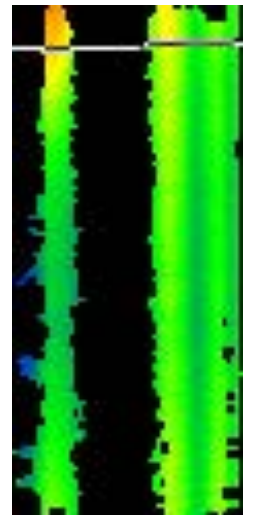
1次



6次

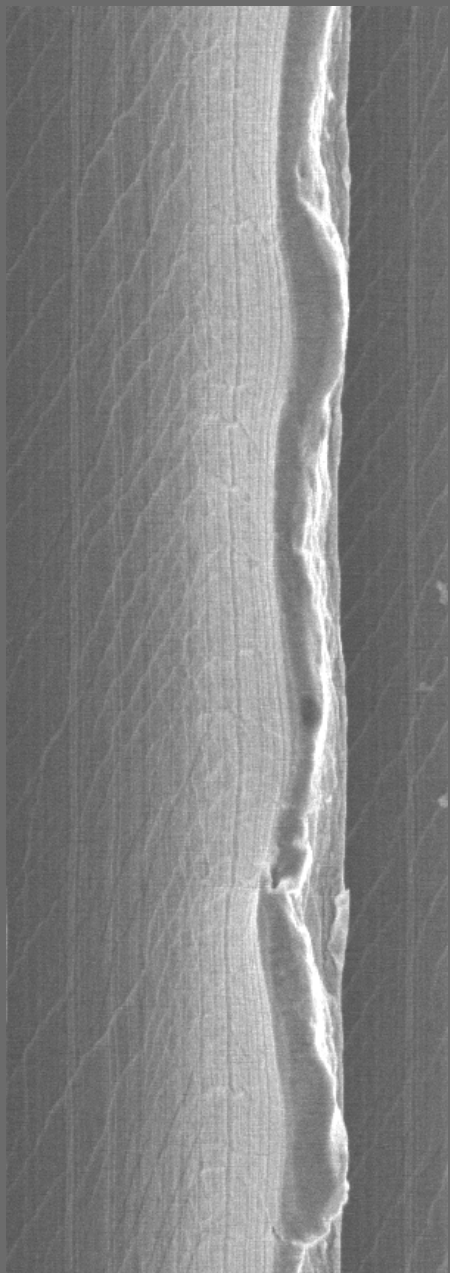


14次

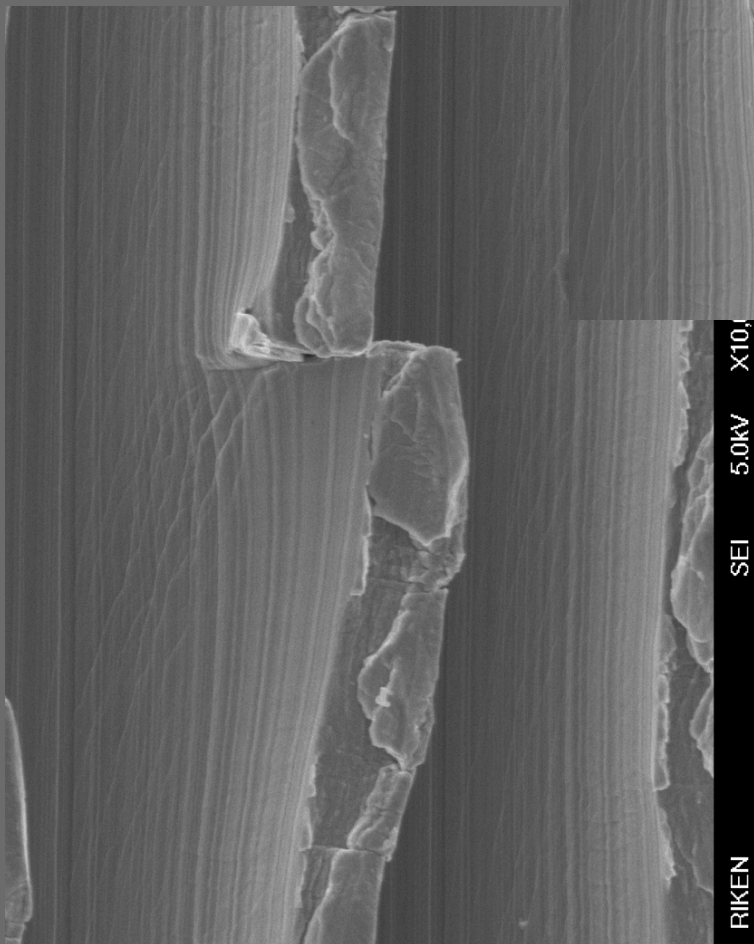


-15次

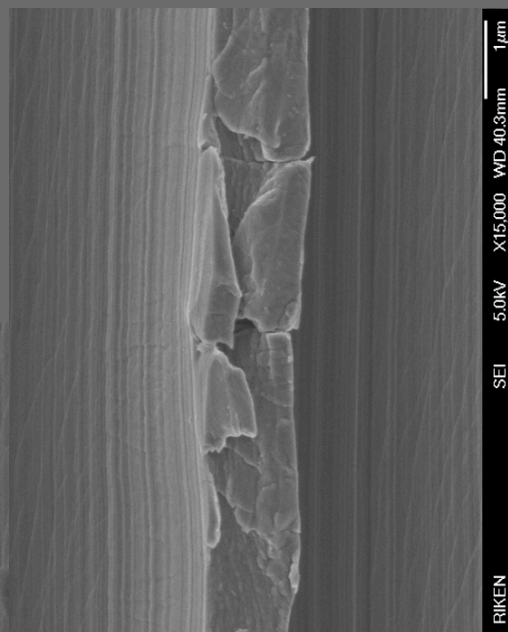
# マスター格子のSEM写真



右に30°傾斜



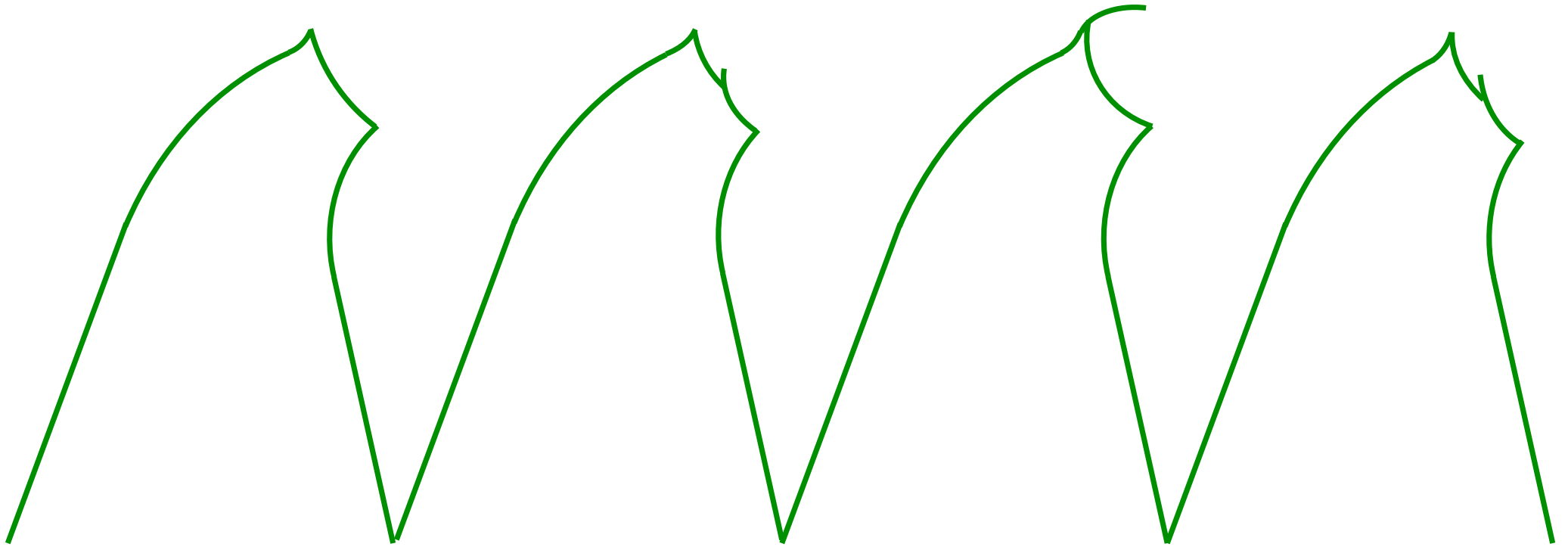
傾斜なし



左に30°傾斜



# マスター格子断面の想像図



# まとめ

	最適回折次数	Eff. [%] ( $\lambda$ - $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ])	開発状況
VPH grating → B-VPH grating	1 <sup>st</sup>	~90 → ~100 (0.32~2.4)	可視光硬化型樹脂と紫外線硬化型液晶を混合した記録材料により回折効率80%を達成。
RFT grating	3 <sup>th</sup> ~	~ 80 (0.32~2.4)	RCWAを用いた数値計算によって、理想形状を求めた。シェーバー加工による金型の再試作を近日開始予定。
ハイブリッド・グリズム	1 <sup>st</sup> ~	~ 80 (0.32~2.4)	RFT gratingのプロトタイプとして、すばる望遠鏡のMOIRCS用を開発。シェーバー加工により金型を製作し、レプリカ加工品を評価。
Volume binary grating	1 <sup>st</sup> ~	~ 80 (0.2~1000)	サイクルエッチング+酸化膜形成・除去によりシリコンの高アスペクト比の鋳型を試作。
Immersion grating	1 <sup>st</sup> ~	~ 80 (0.2~1000)	フライカット加工により、V溝格子のシリコン・グリズムを試作。
Quasi-Bragg immersion grating	3 <sup>th</sup> ~	~ 80 (0.2~1000)	金の常温接合による積層加工法により製作したQB grating (石英) とリトロープリズム、表面ミラーを組合せて試作。