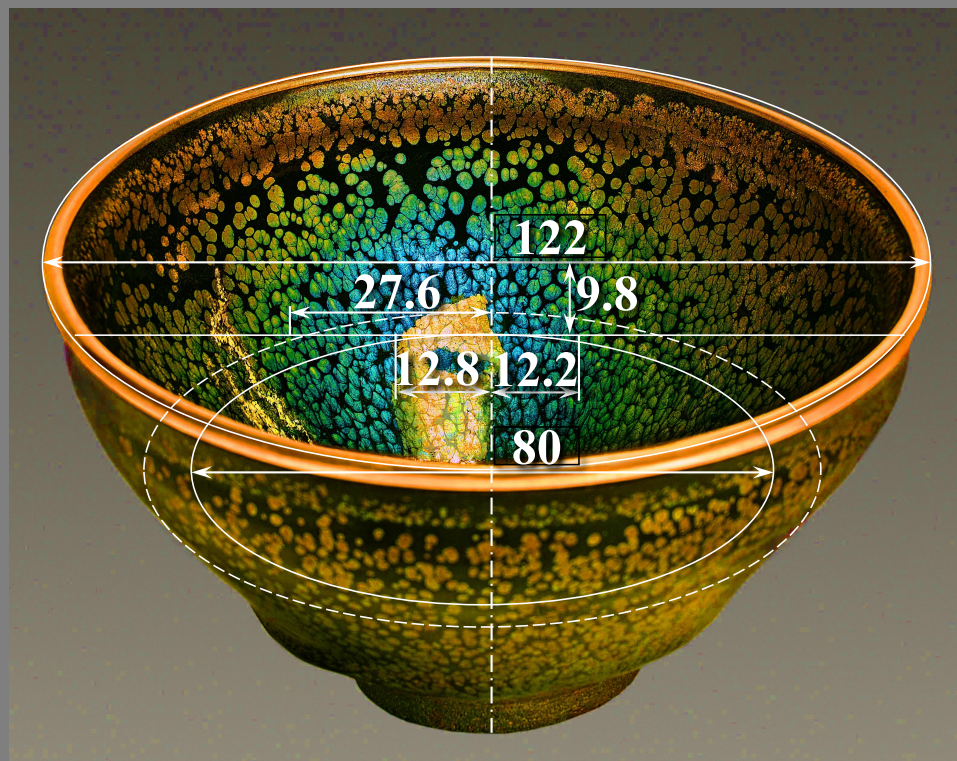


国宝油滴天目茶碗の光彩に関する一考察



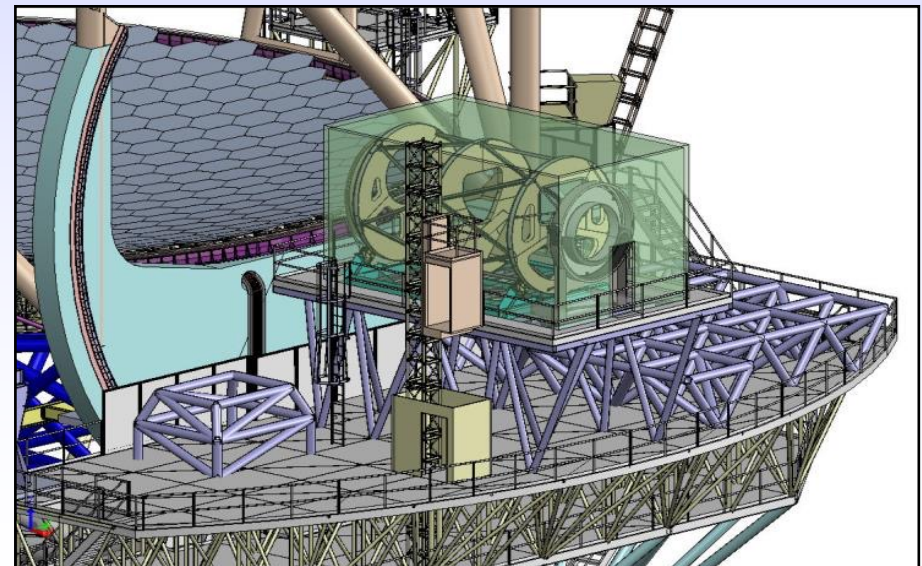
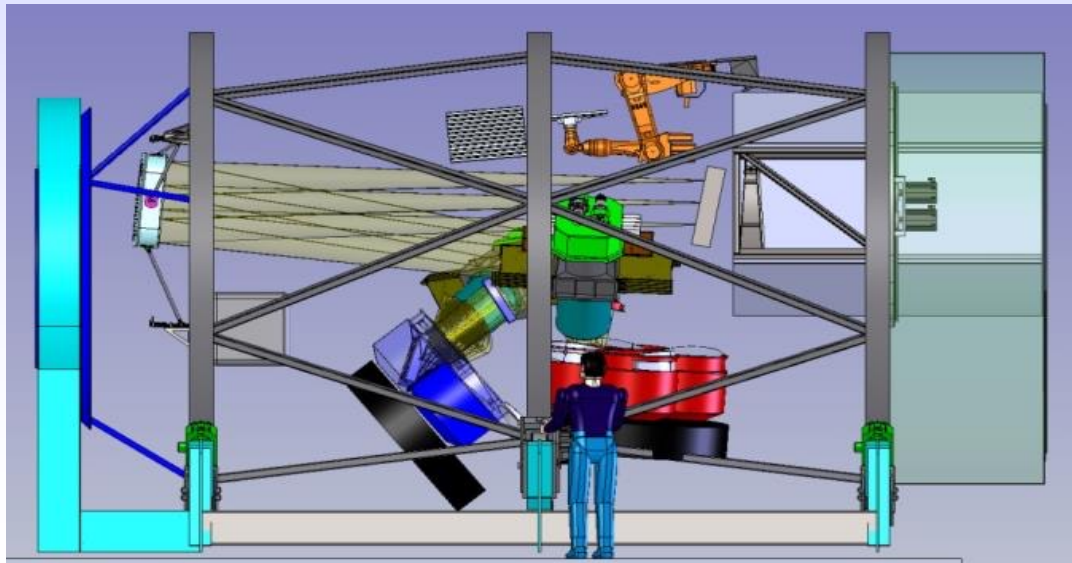
理化学研究所 光量子工学研究センター
先端光学素子開発チーム

海老塚 昇、

元 理化学研究所
岡本 隆之

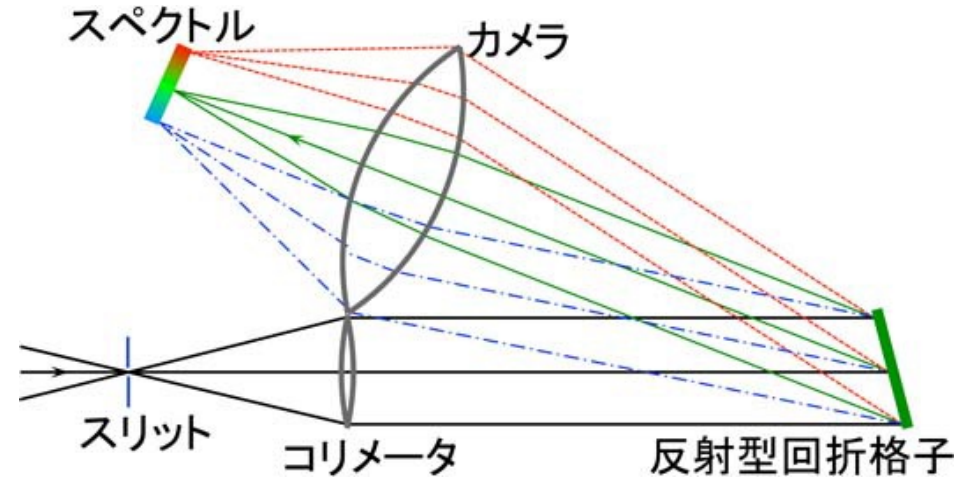
WFOS: Wide Field Optical Spectrograph

- TMT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、中国科学技術大学等が協力。
- 最初は**反射型回折格子**で設計、**光学系が大きくなる**ことが問題。
- 現時点ではVolume phase holographic (VPH) gratingを採用。
- **VPH gratingは分散が大きくなると帯域幅が狭くなる**。

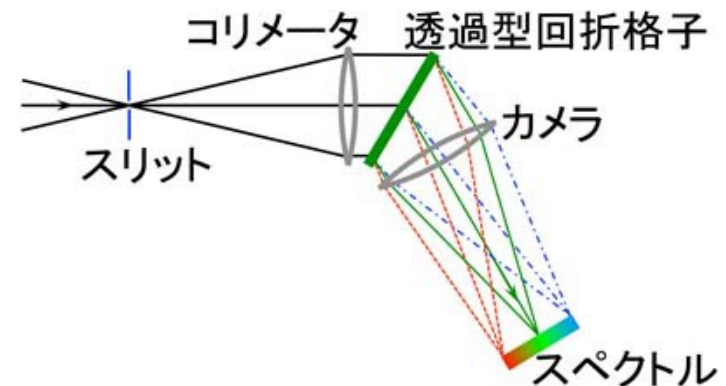


反射型と透過型の回折格子

- X線からTHz波におよぶ電磁波において使用可能。
- 比較的安価。
- 明るい光学系ではリトロ配置*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。
- 光学系を完全なリトロ配置*ができる。



反射型回折格子



透過型回折格子

*リトロ配置: 入射角と回折角が等しい分光器光学系の配置。
スペクトルの歪みが少ない。

表面刻線型 (SR) 回折格子の限界

リトロ一配置の場合

$$\sin \theta_0 = n \sin \theta_1$$

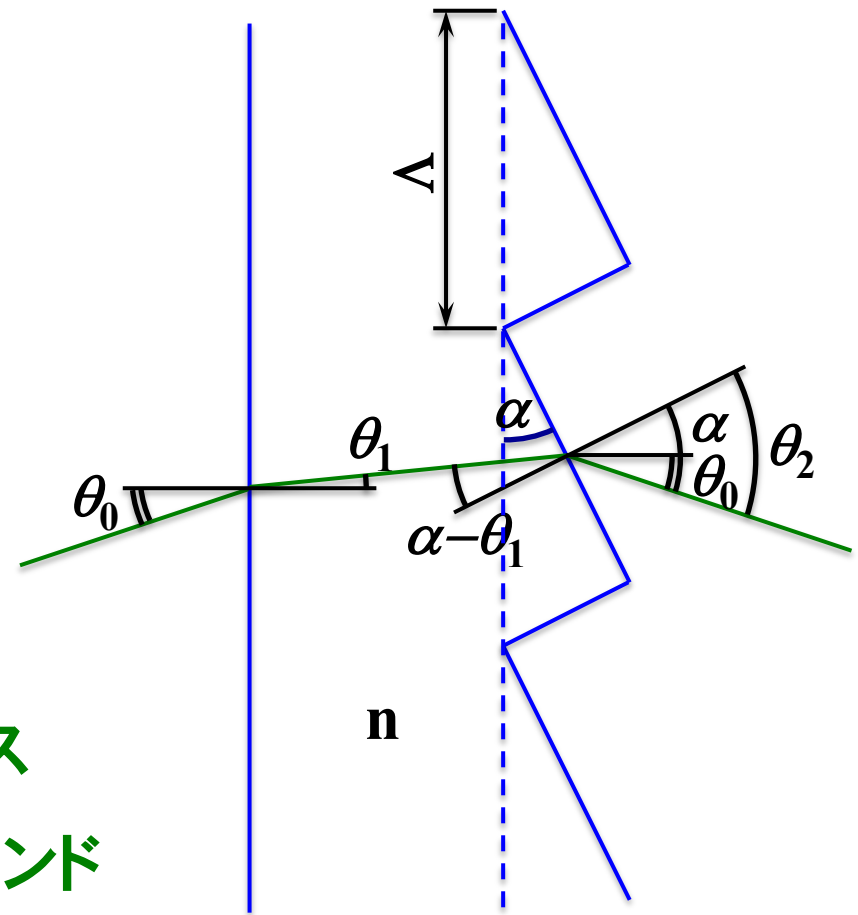
$$n \sin(\alpha - \theta_1) = \sin \theta_2$$

$$\theta_2 = \alpha + \theta_0$$

$n = 1.5, \theta_0 \leq 29^\circ (\theta_2 > 90^\circ)$ 光学ガラス

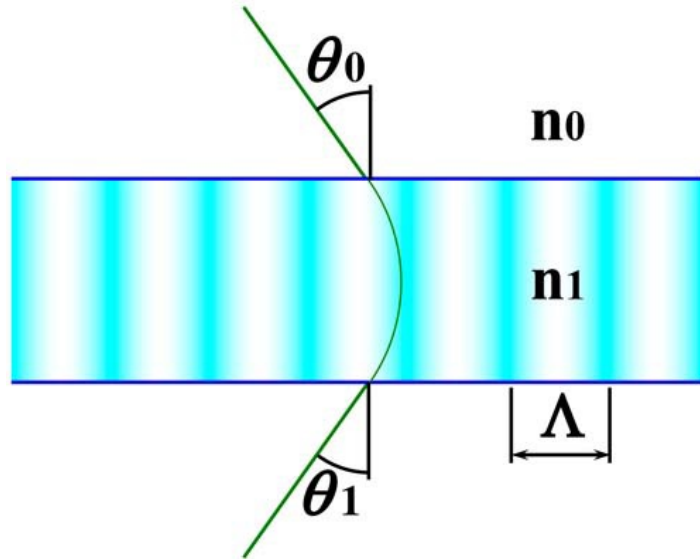
$n = 2.0, \theta_0 \leq 40^\circ$ (同上) 高屈折率ガラス

$n = 2.5, \theta_0 \leq 48^\circ$ (同上) ZnSe, ダイヤモンド

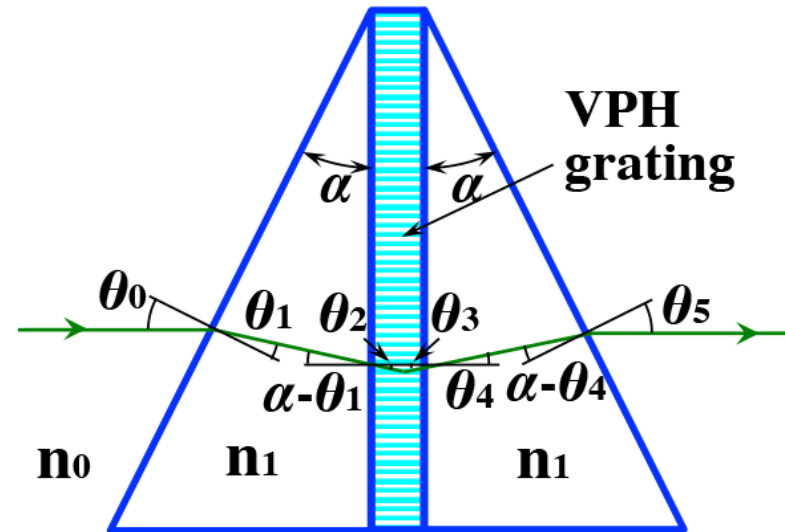


従来のノコギリ歯形状の表面刻線型回折格子は大きな回折角 (∞ 角度分散) では使用できない。

Volume Phase Holographic (VPH) Grating



VPH grating



VPHグリズム

- ・ VPH gratingは屈折率が正弦波状に変調された厚い透過型回折格子。
- ・ 屈折率の変調量と厚さを調整することにより、100%に近いピーク効率を達成できる。
- ・ 入射角を変えると、ピーク波長を調整できる。
→場合によっては欠点になる。
- ・ VPH gratingは分散が大きくなると帯域幅が狭くなる。

Volume Binary Gratingと Trapezoid grating



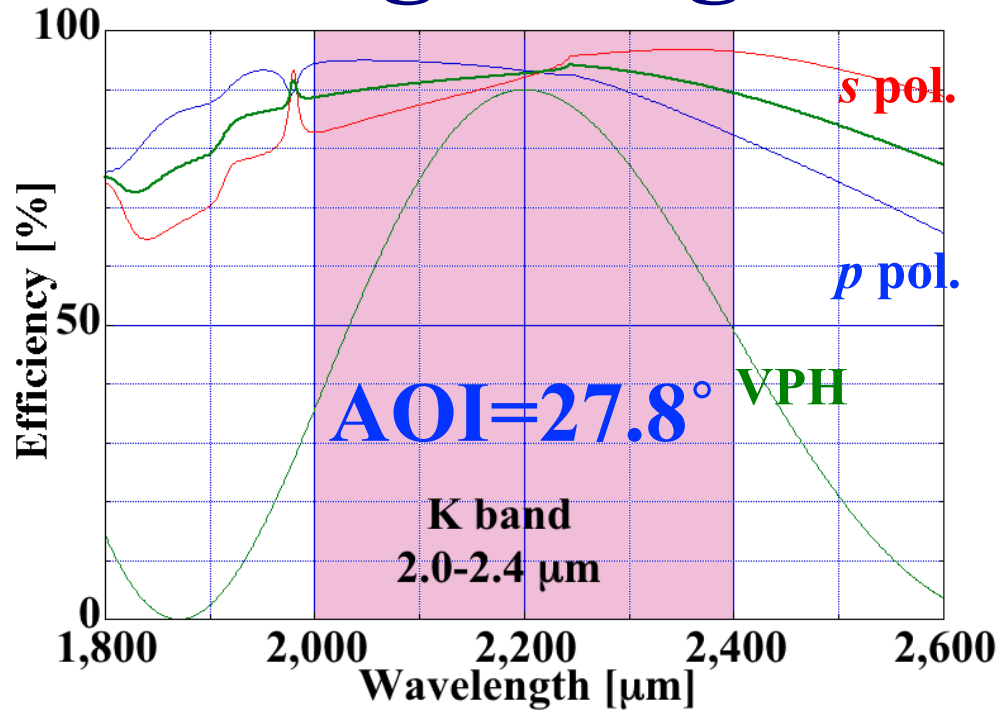
NGC 2392 [Eskimo Nebula]

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

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

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

VB grating と Trapezoid grating 1



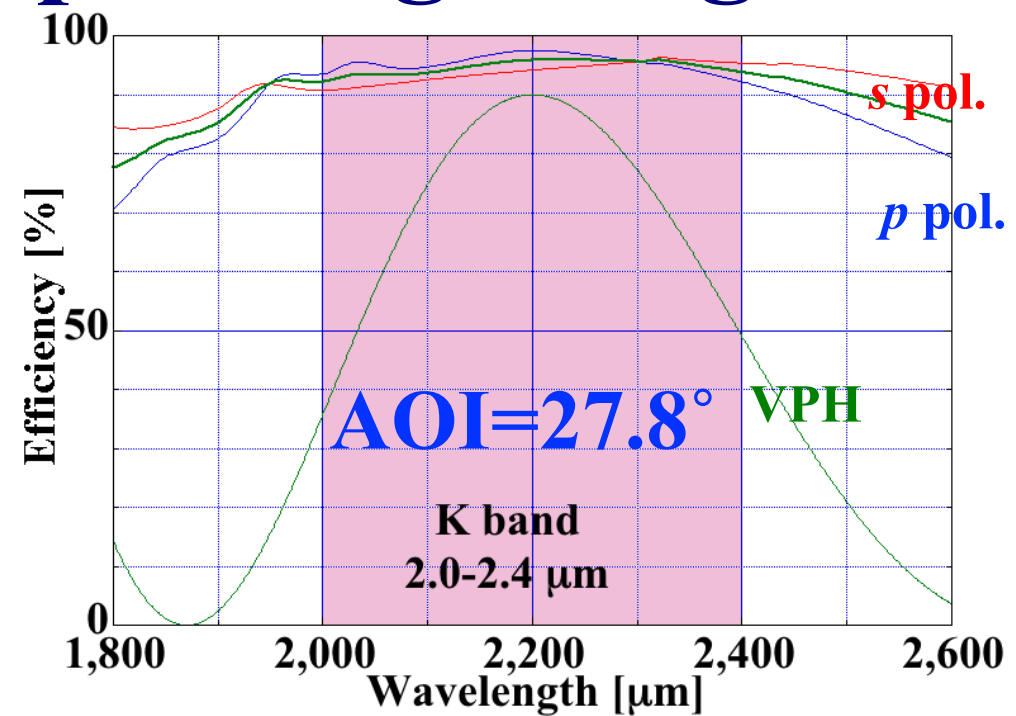
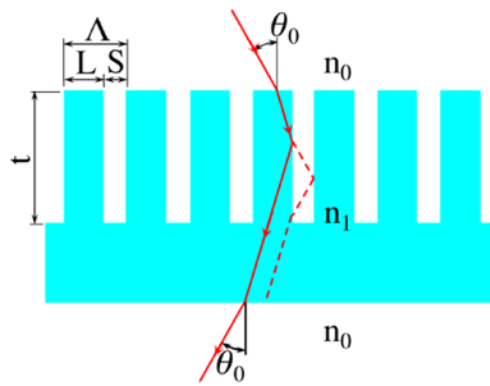
VB grating (MOIRCS K band)

材 質: 石英ガラス ($n=1.435$)

$\Lambda=2.36\mu\text{m}$ (423.7 g/mm)

L&S=1:1

$t=4.25\mu\text{m}$



Trapezoid grating (MOIRCS K band)

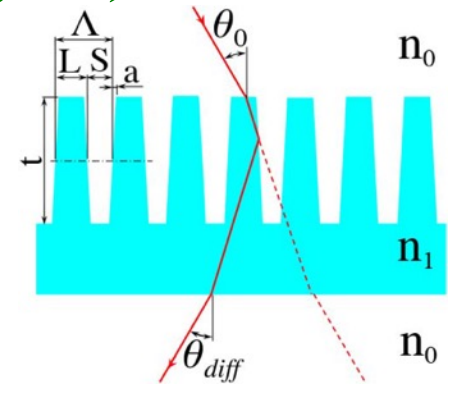
材 質: 光学樹脂 ($n\sim 1.5$)

$\Lambda=2.36\mu\text{m}$ (423.7 g/mm)

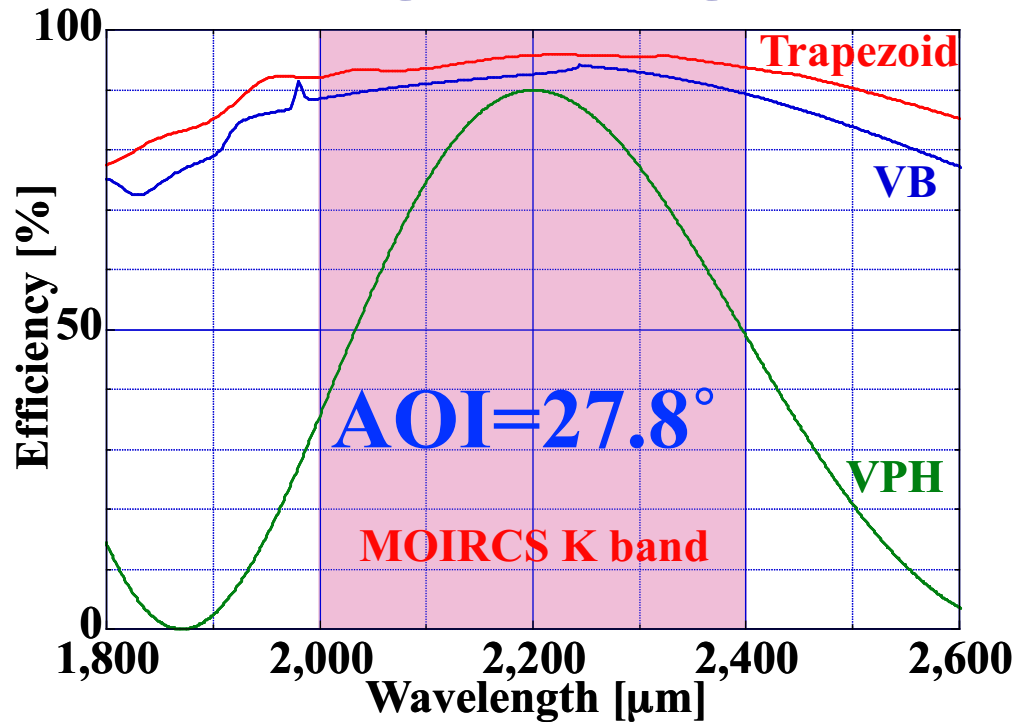
L&S=7:5

$t=4.5\mu\text{m}$

$a=0.28\mu\text{m}$



VB grating & Trapezoid grating 2



$\Lambda=2.36\mu\text{m}$ (423.7 g/mm)

VB

L&S=1:1

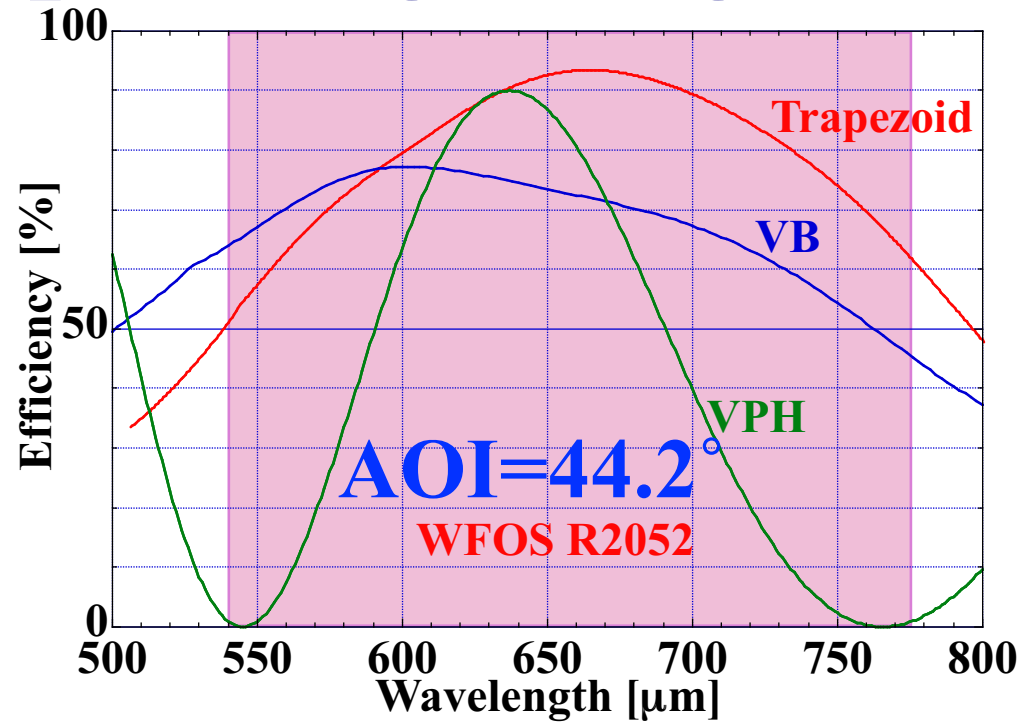
t=4.25 μm

Trapezoid

L&S=7:5

t=4.5 μm

a=0.28 μm



$\Lambda=0.489\mu\text{m}$ (2,045g/mm)

VB

L&S=11:9

t=1.06 μm

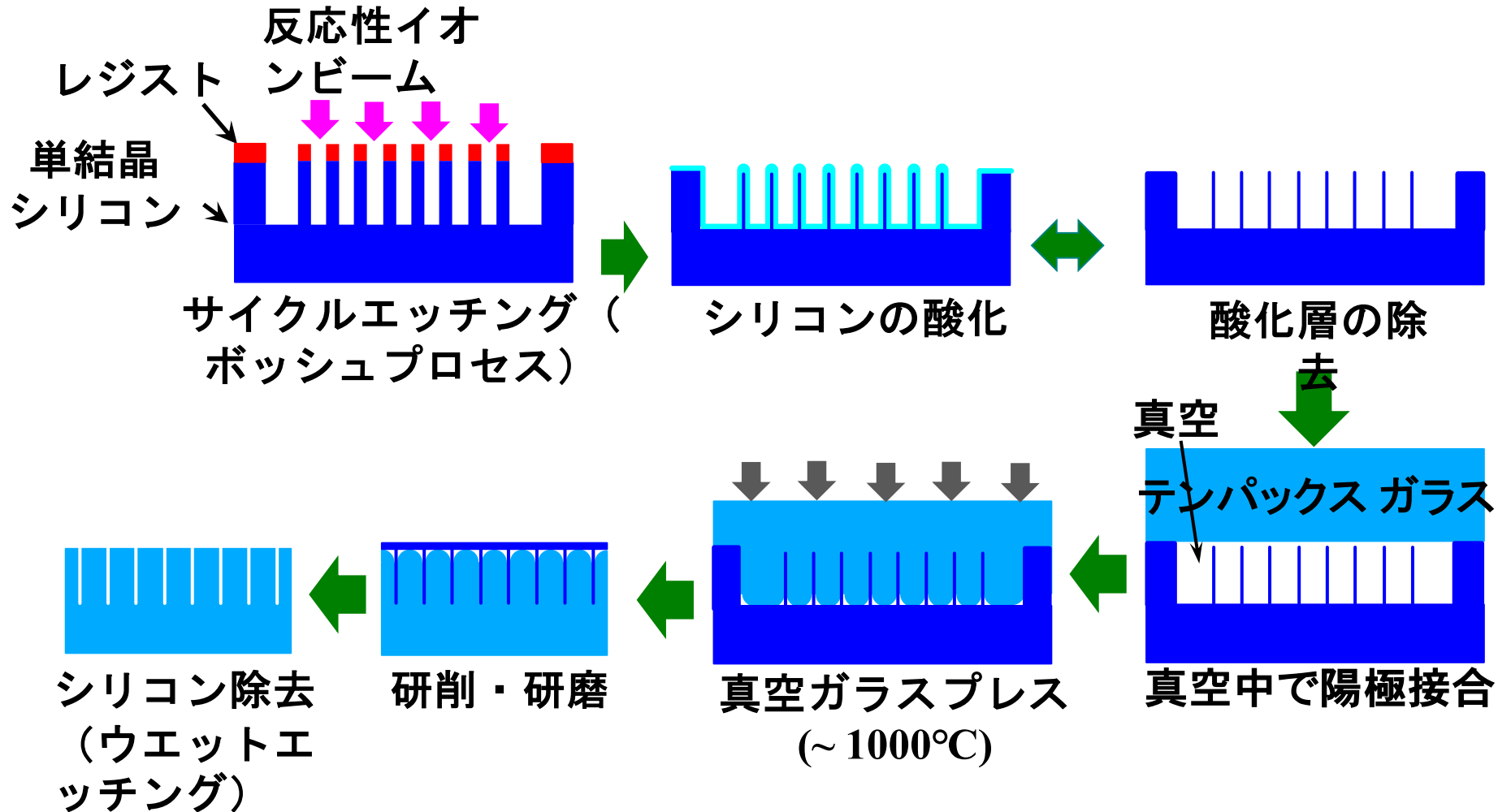
Trapezoid

L&S=2:1

t=1.36 μm

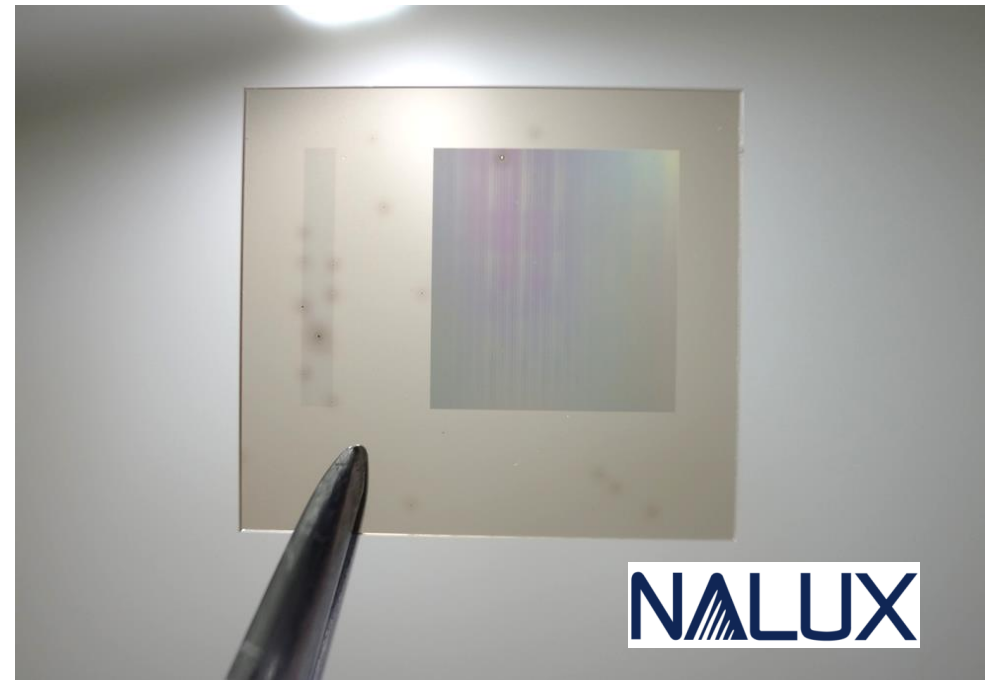
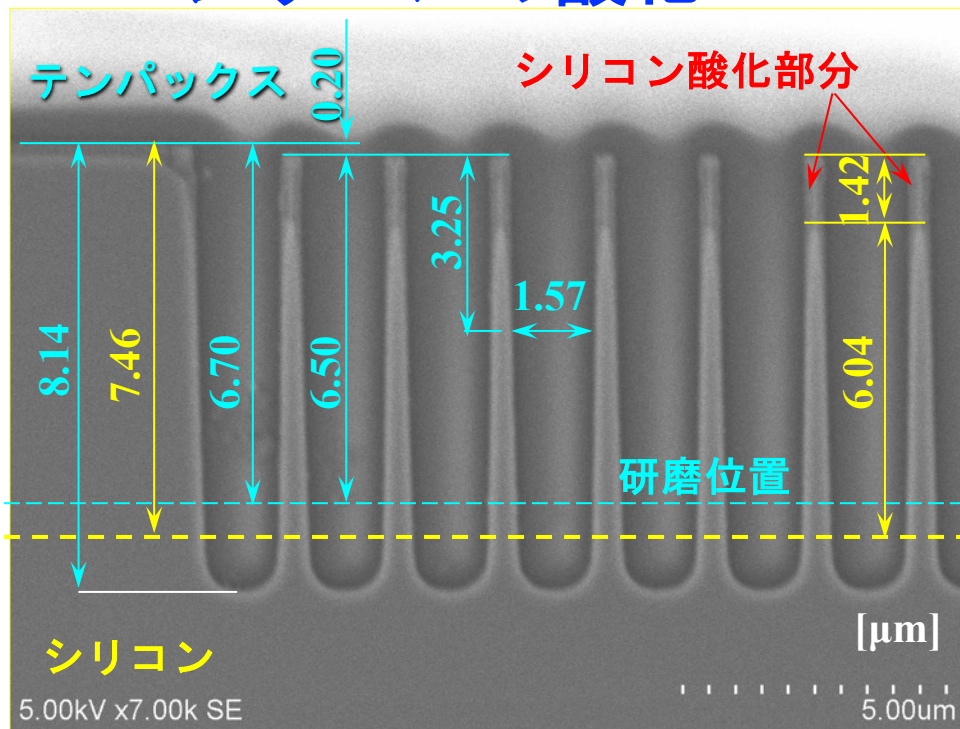
a=0.07 μm

シリコンを鋳型としたテンパックス ガラスのVB gratingの製作方法



テンパックスガラス のTrapezoid grating

シリコンの酸化



ガラスの着色

格子周期: $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$ (500 g/mm)
L&S : 1.6:0.4 [μm] (4:1)
溝の深さ: $t=6.5 \mu\text{m}$
入射角 : $\theta_0=19.2^\circ$

鋳込む温度を1100°Cから1,000°Cに下げる
ためにホットプレスの実験を実施。

Reflector Facet Transmission (RFT) Grating



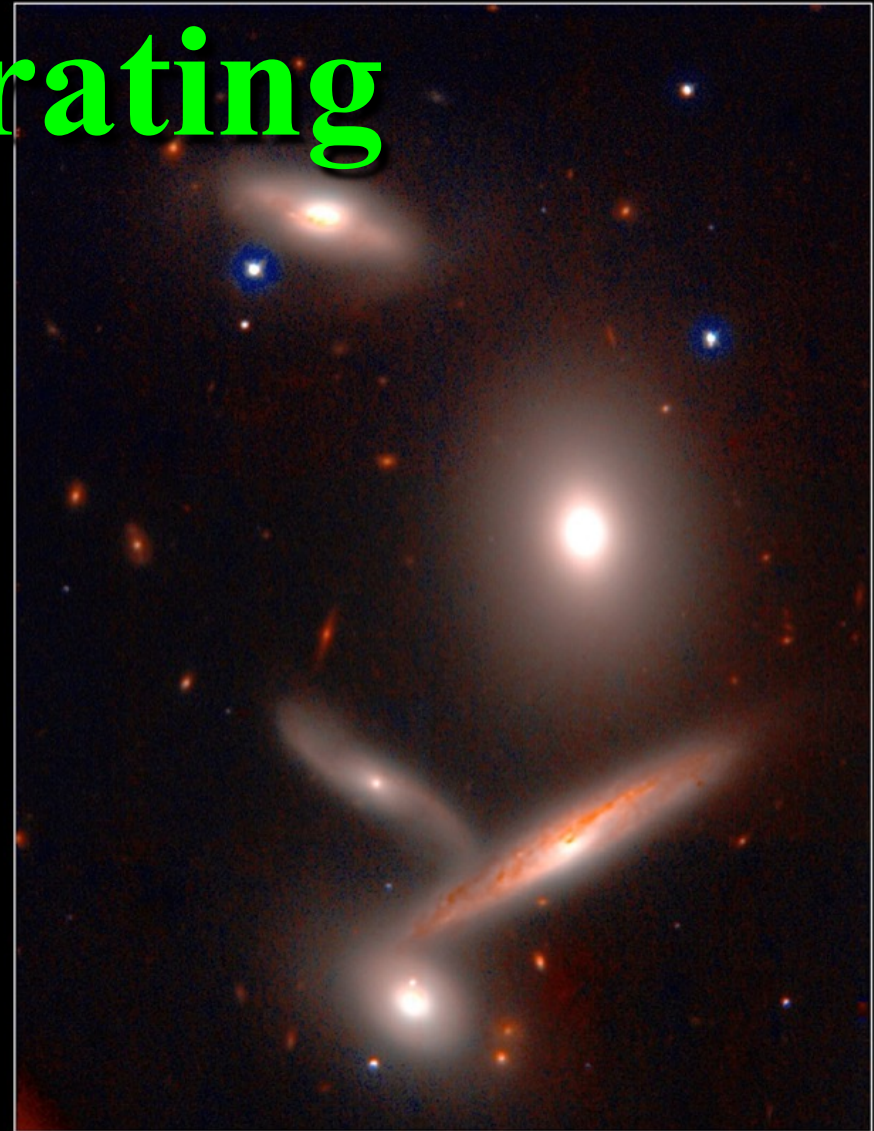
M 82 (NGC 3034)

FOCAS (B, V, H α)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

March 24, 2000

Copyright © 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved



Hickson Compact Group 40

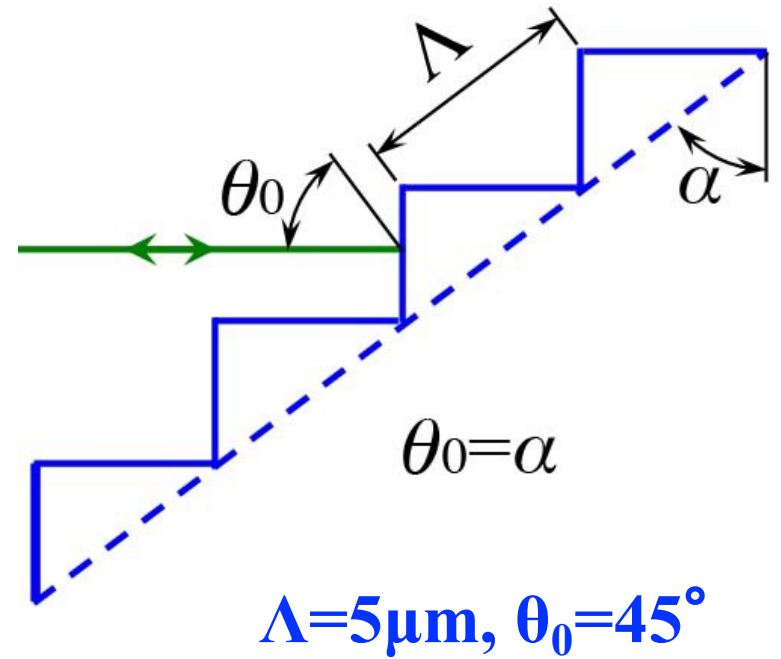
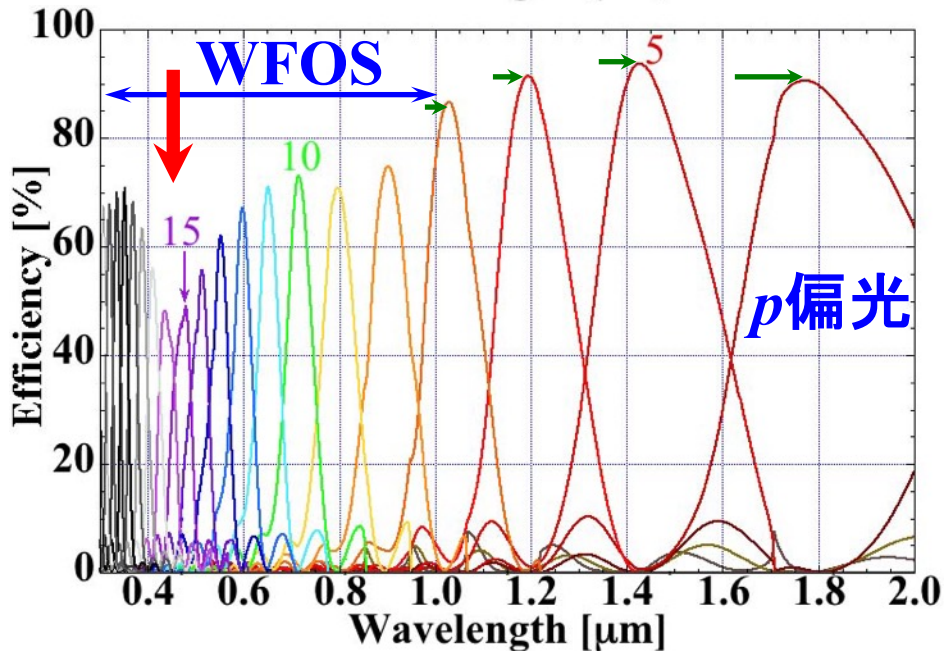
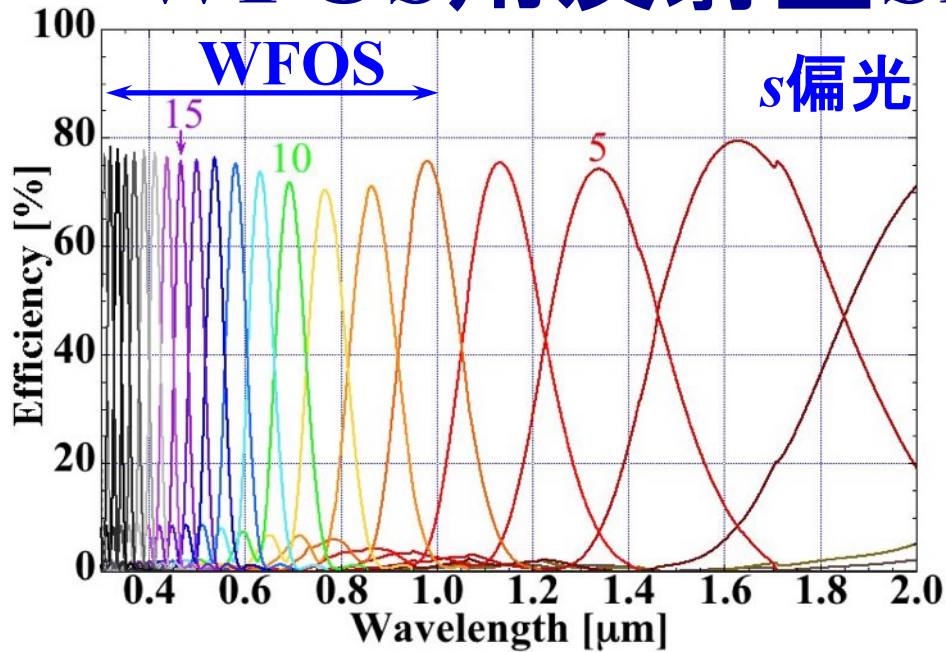
CISCO (J & K')

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

January 28, 1999



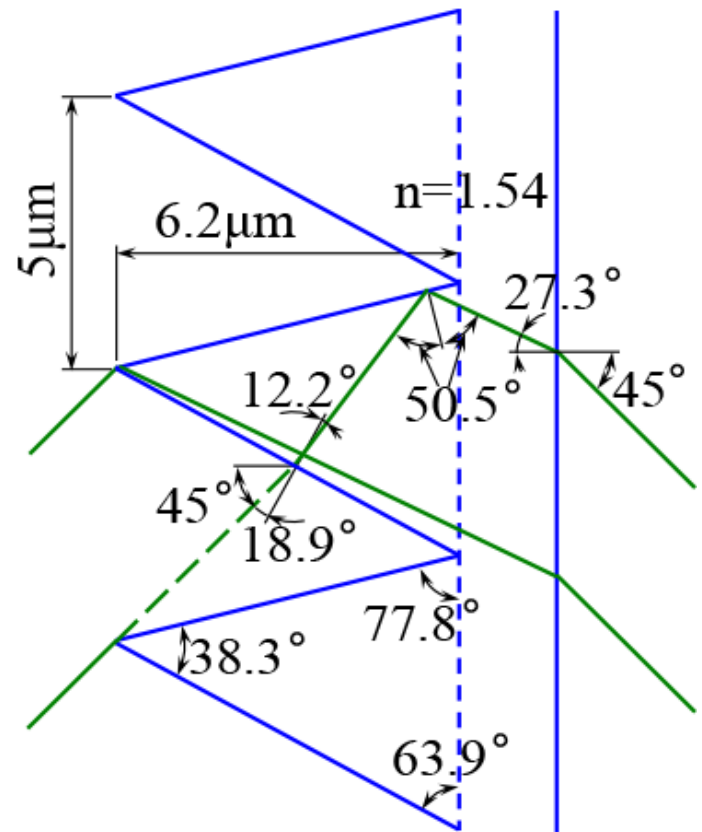
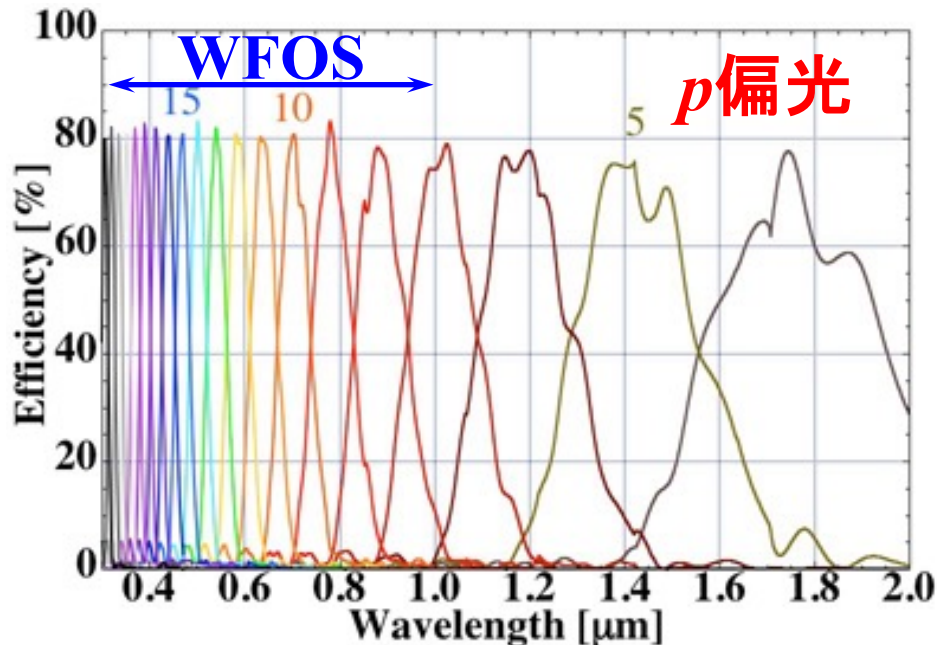
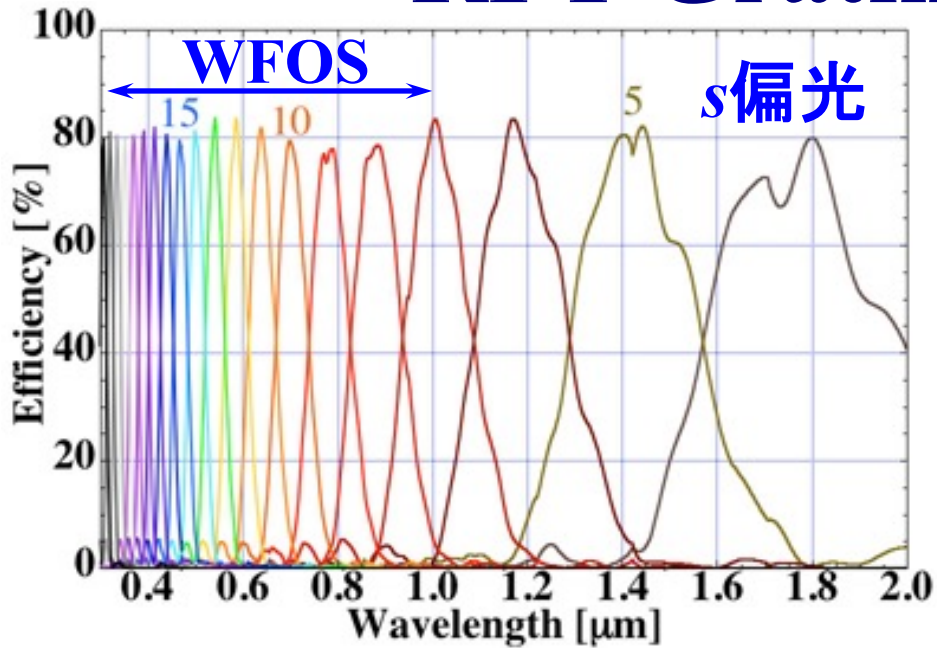
WFOS用反射型SR gratingの回折効率



*p*偏光の効率が長波長側にシフトする。

表面プラズモンの影響により、*p*偏光の特定の次数の効率が低下する。

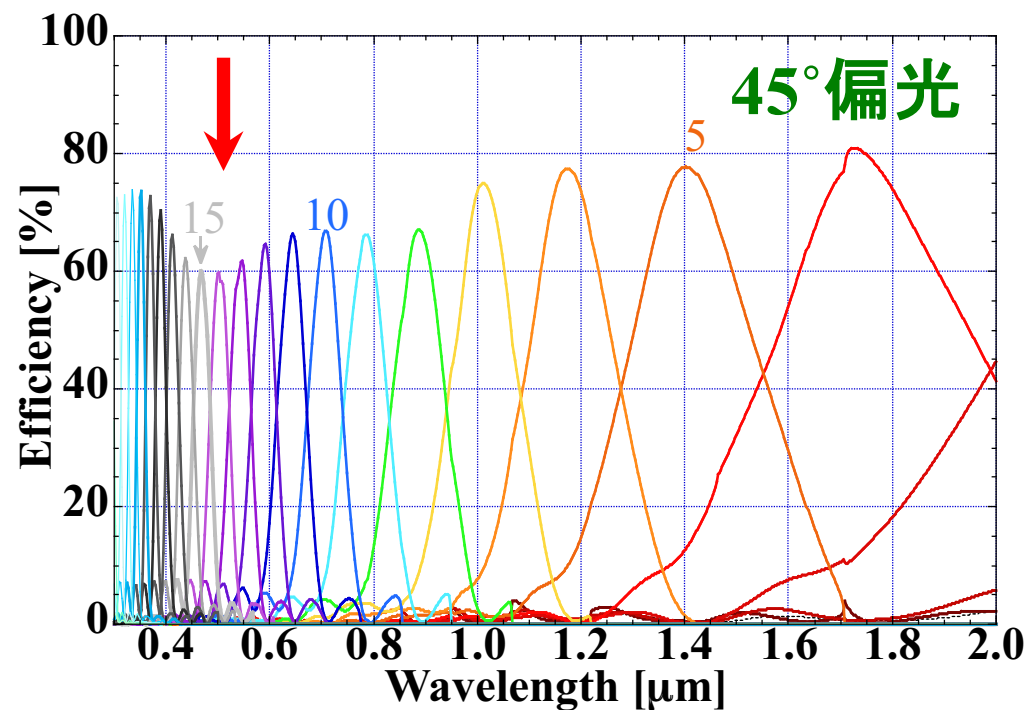
RFT Gratingの回折効率



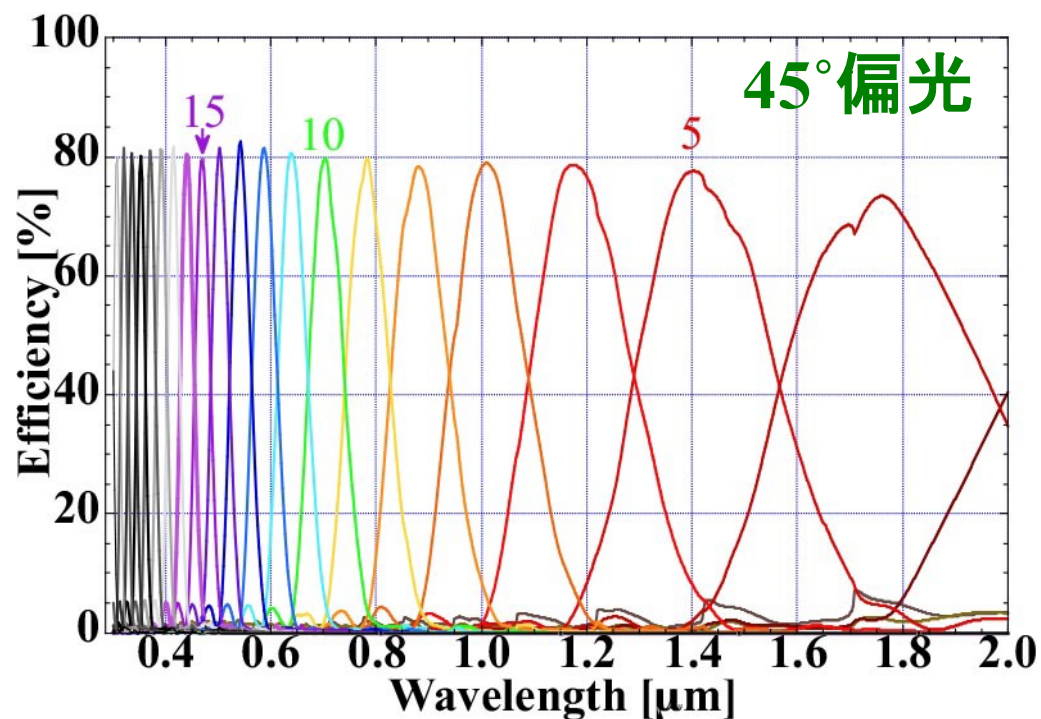
$$\Lambda=5\mu\text{m}, \theta_0=45^\circ, n=1.54$$

全反射によって高い回折効率を達成できる。

SR gratingとRFT gratingの回折効率

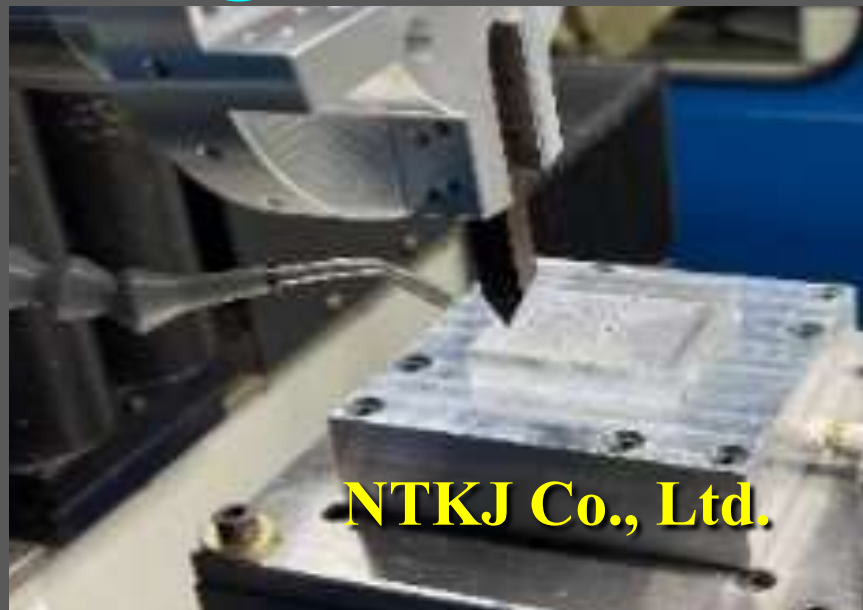
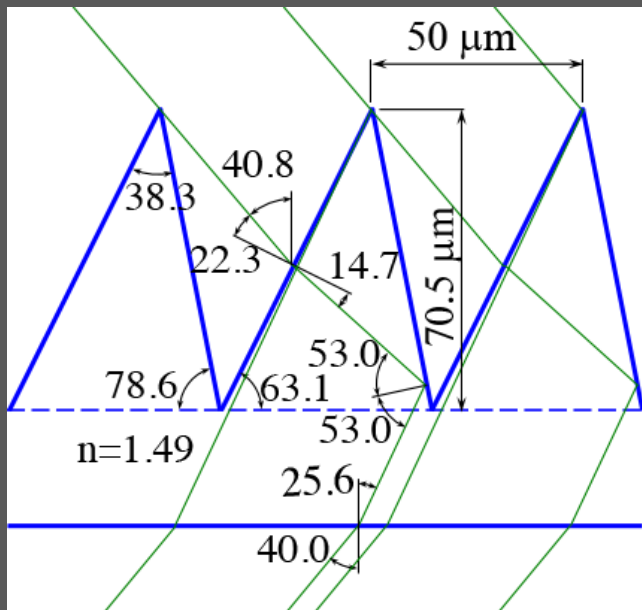


SR gratingの回折効率。
効率分布がピーキー。
特定の次数の効率が低下する。

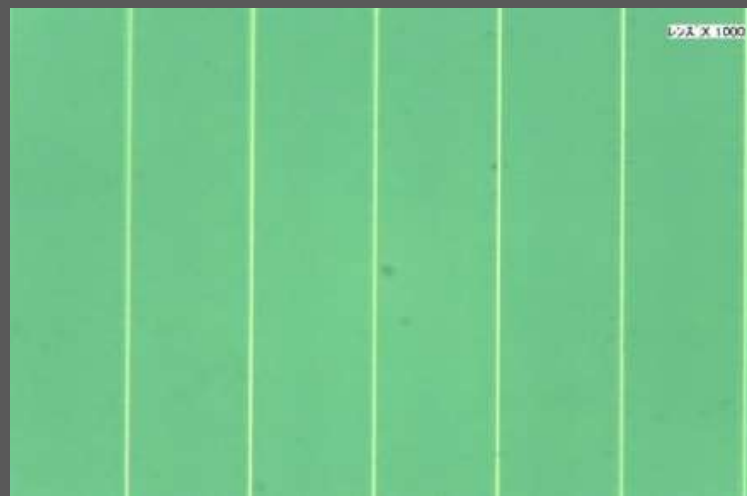
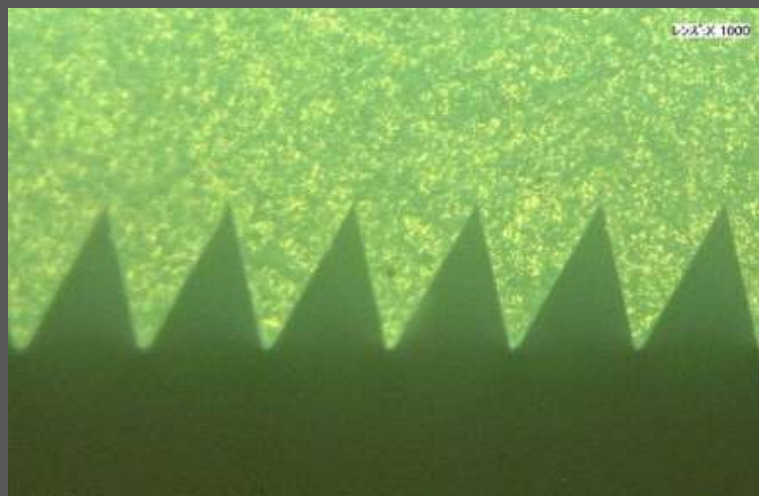


RFT gratingの回折効率。
効率分布がガウシアン。

硬質樹脂のRFT gratingの試作 (2023.3)



RFT gratingの仕様 (左)、硬質樹脂のフライカット加工 (右)。



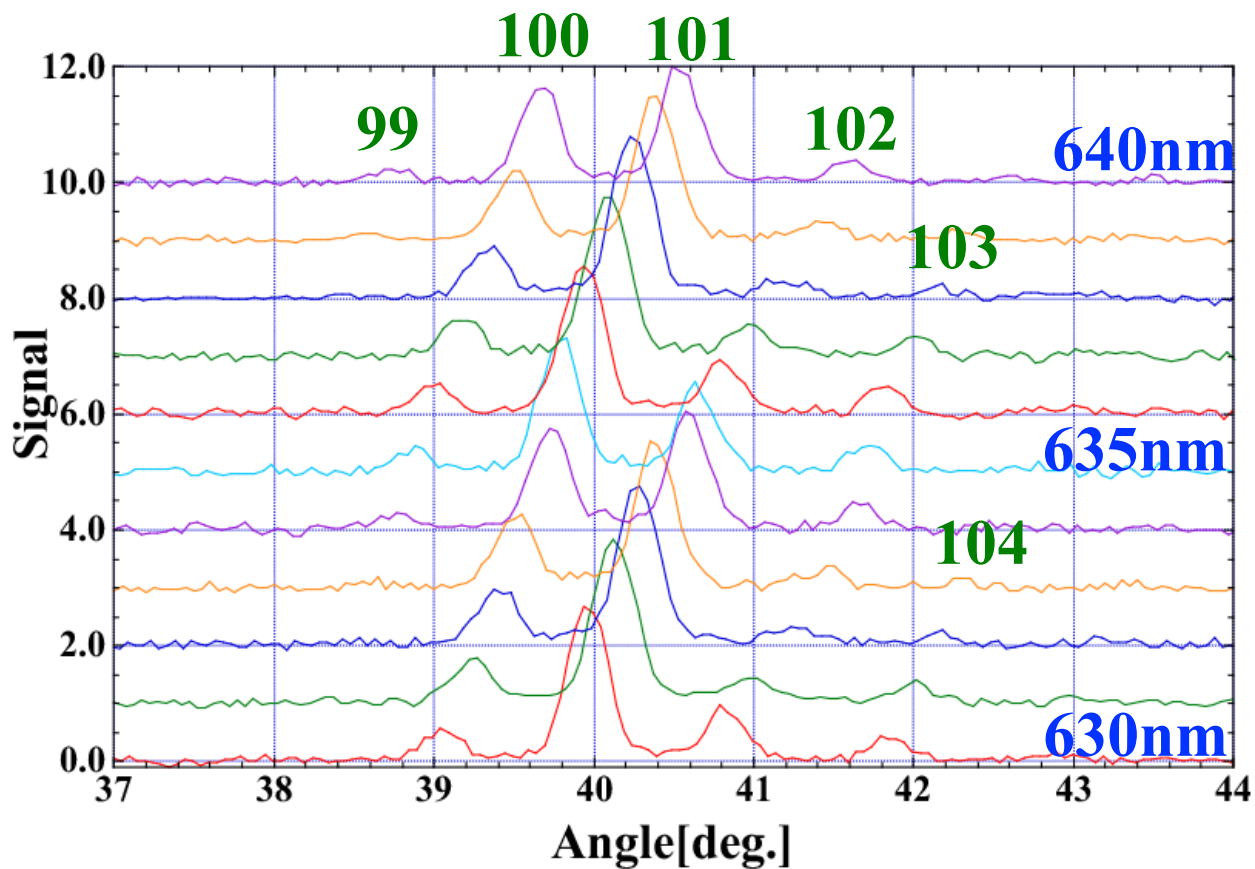
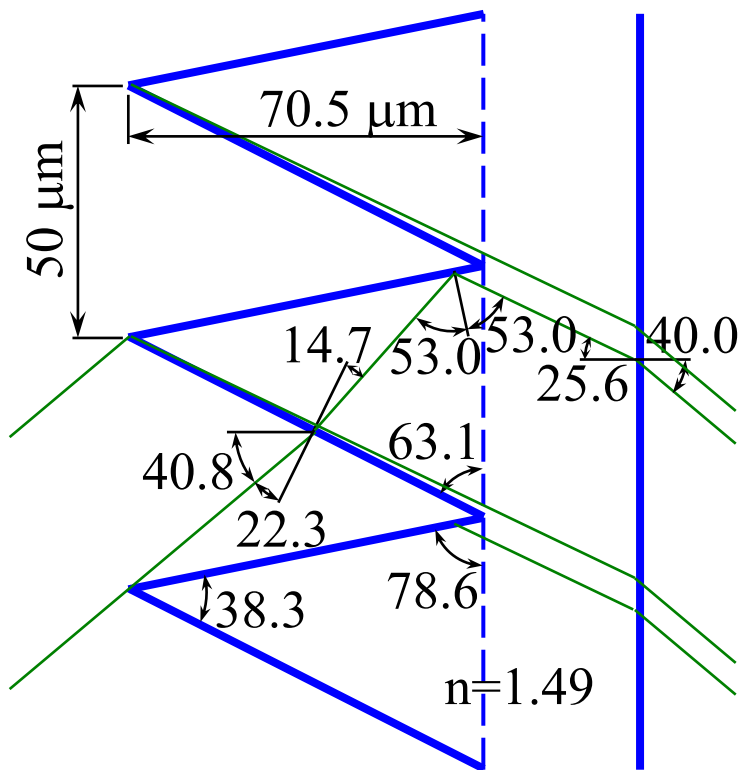
格子の顕微鏡写真：断面 (左)、直上 (右)

RFT gratingの回折効率測定

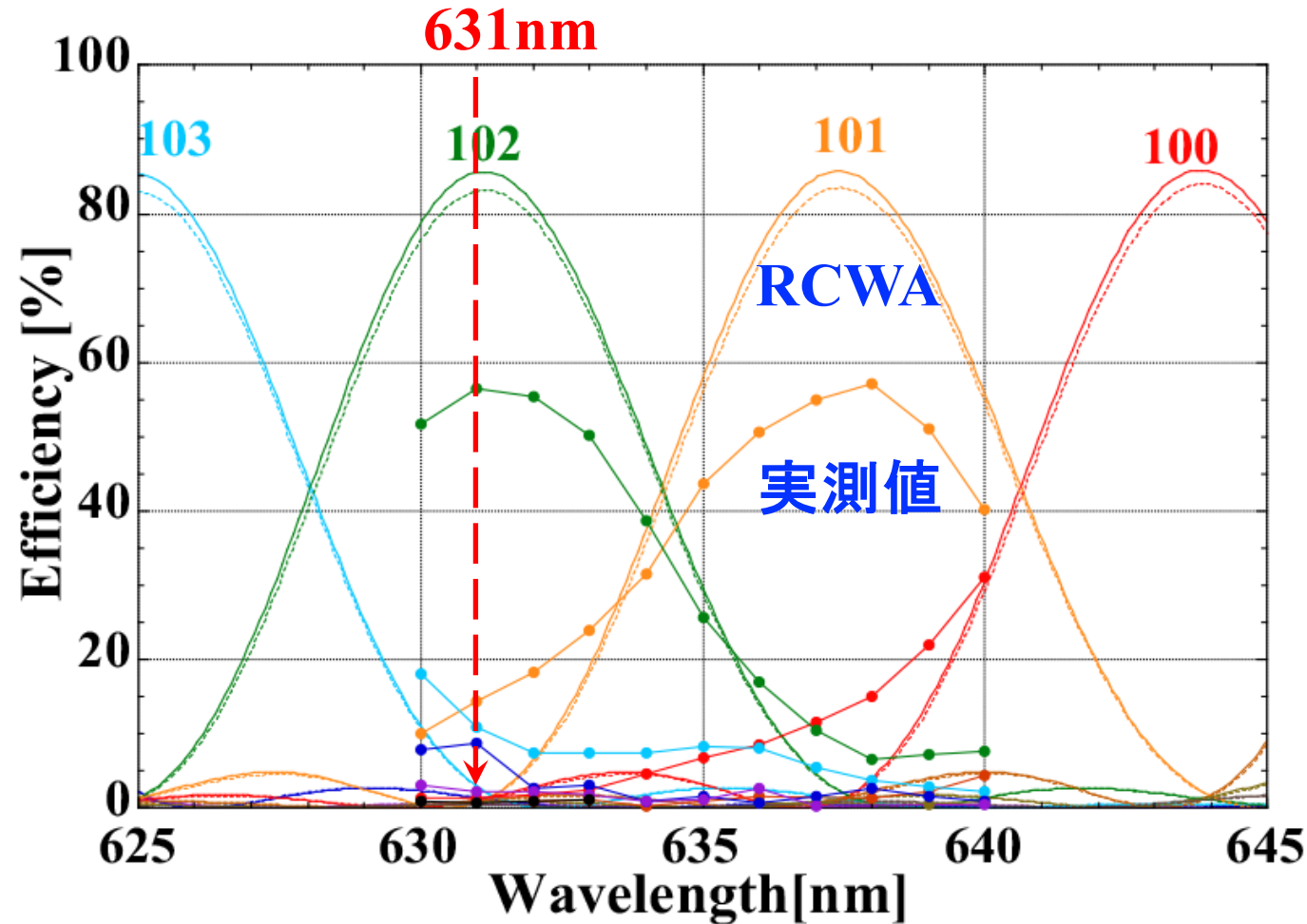


回転テーブルの回折効率測定システム

回折効率の測定結果



回折効率の数値計算と実測値



$\Lambda=50\mu\text{m}$, $\theta_0=40^\circ$, RCWA

次数 効率 [%]@631nm

99	1.1	} 88.0%	} 90.6%
100	1.2		
101	0.9		
102	84.4		
103	2.7		
104	1.4		
105	0.6		

$\Lambda=50\mu\text{m}$, $\theta_0=40^\circ$, 実測値

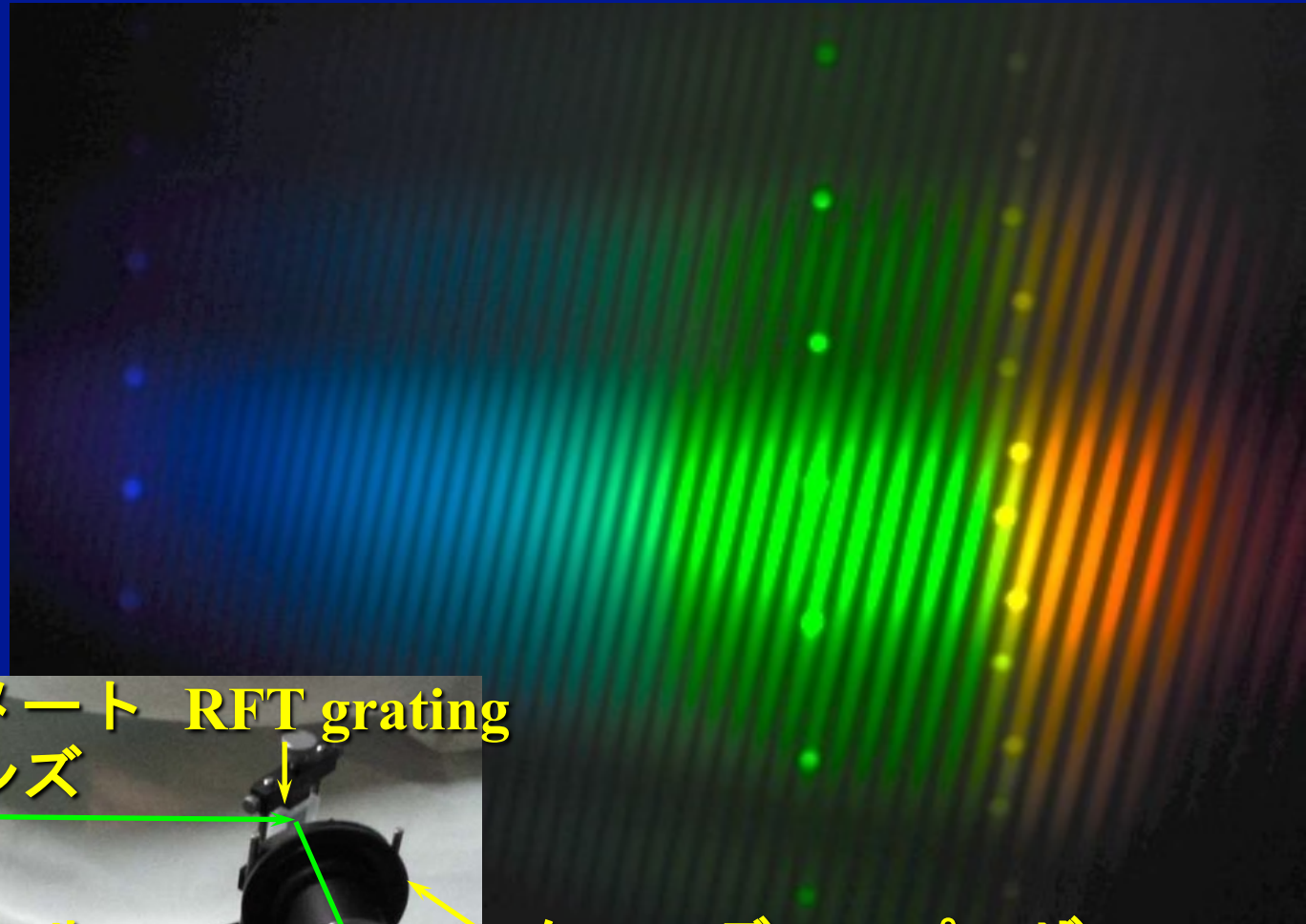
次数 効率 [%]@631nm

100	1.3	} 81.9%	} 92.1%
101	14.5		
102	56.5		
103	10.9		
104	8.9		
105	2.3	(± 2)	(± 3)

RFT grating ($\gamma=38.3^\circ$, $\Lambda=50\mu\text{m}$, $\text{AOI}=40^\circ$)

サンプルサイズが小さく、回折広がりにより前後の次数に効率が分配される。

RFT gratingのエシェルグラム



白熱電球 水銀放電管

コリメート RFT grating
レンズ

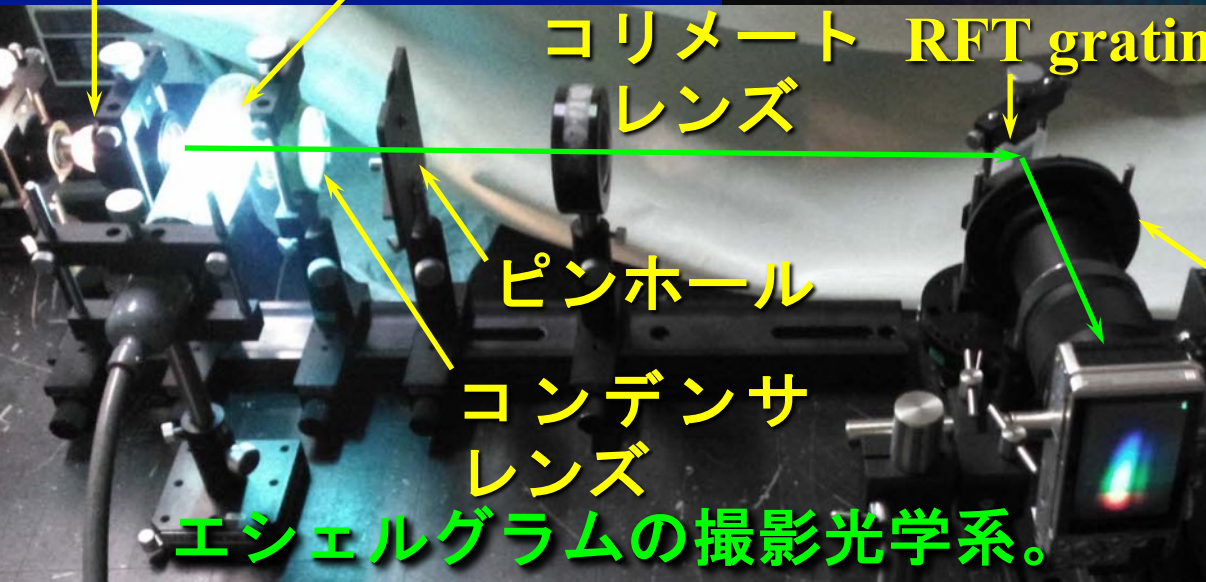
ピンホール

コンデンサ
レンズ

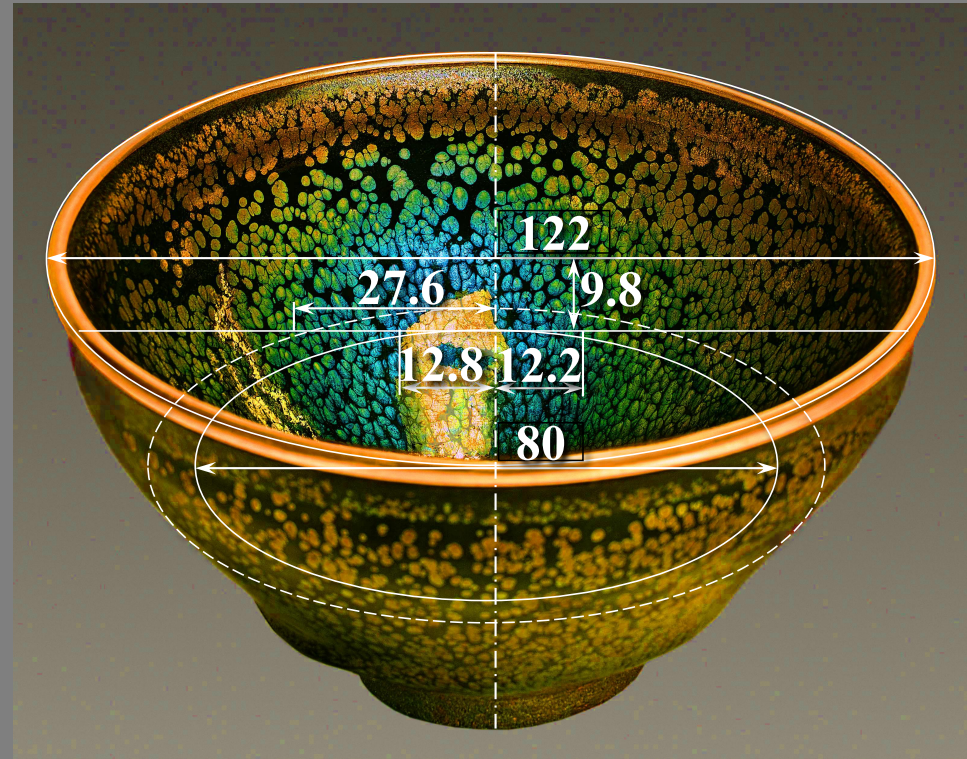
クロスディスパーザ
(グリズム)

デジカメ

エシェルグラムの撮影光学系。



国宝油滴天目茶碗の光彩に関する一考察



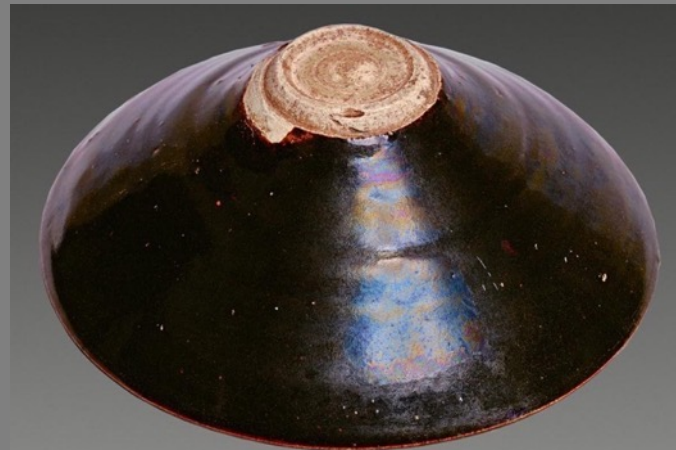
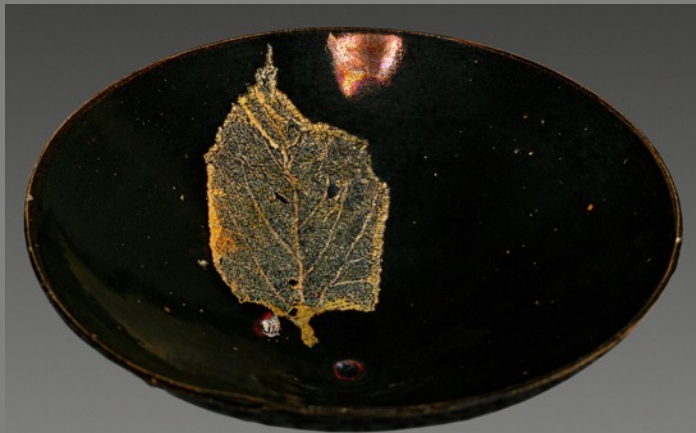
国宝 油滴天目茶碗: 南宋時代, 建窯, 大阪市立東洋陶磁美術館収蔵
(住友グループ寄贈/安宅コレクション)

国宝油滴天目茶碗と木葉天目茶碗の光彩



反射光を中心に暈のような構造色が見られる。薄膜の二光束干渉では説明できない。

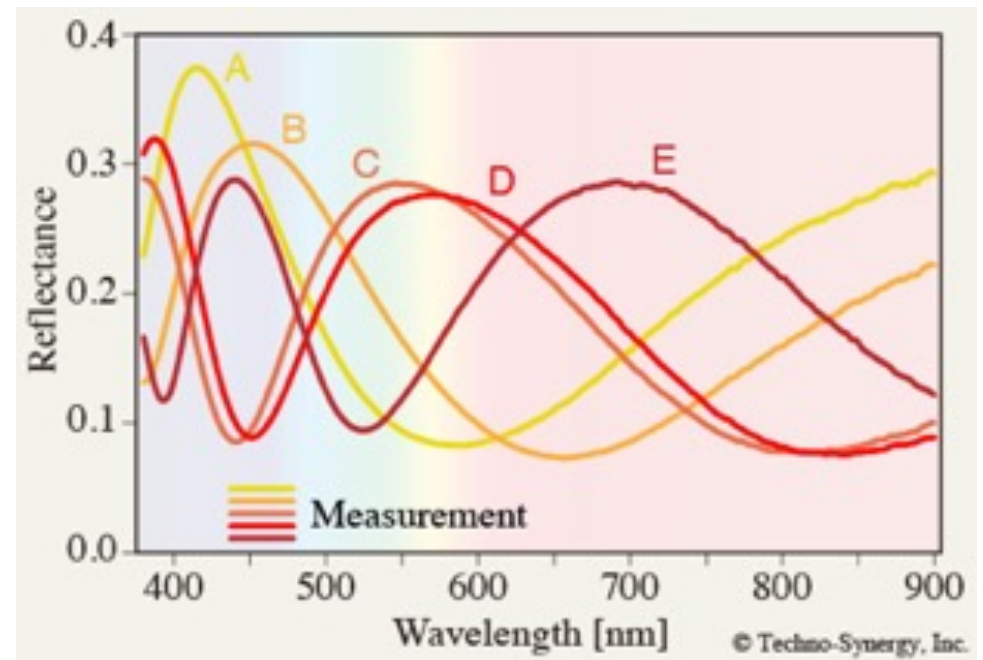
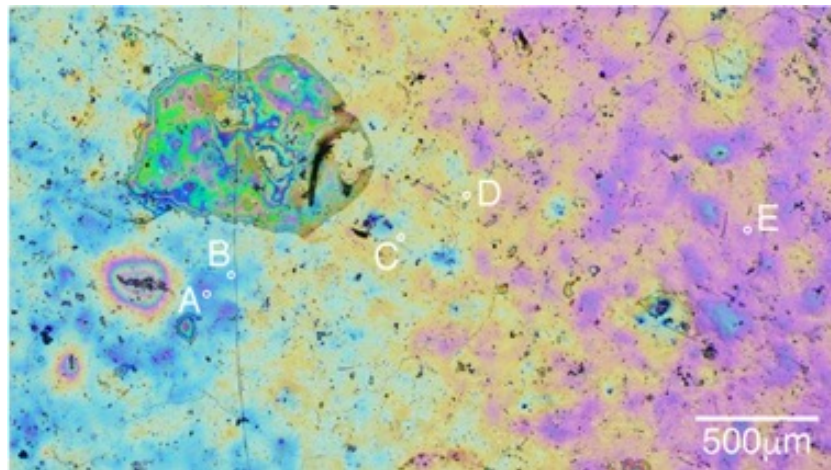
国宝 油滴天目茶碗: 南宋時代, 建窯, 大阪市立東洋陶磁美術館収蔵 (住友グループ寄贈/安宅コレクション)



反射光の位置に薄膜の二光束干渉によって説明できる構造色が見られる。

重要文化財 木葉天目茶碗: 南宋時代, 吉州窯, 大阪市立東洋陶磁美術館 収蔵 (住友グループ寄贈/安宅コレクション)

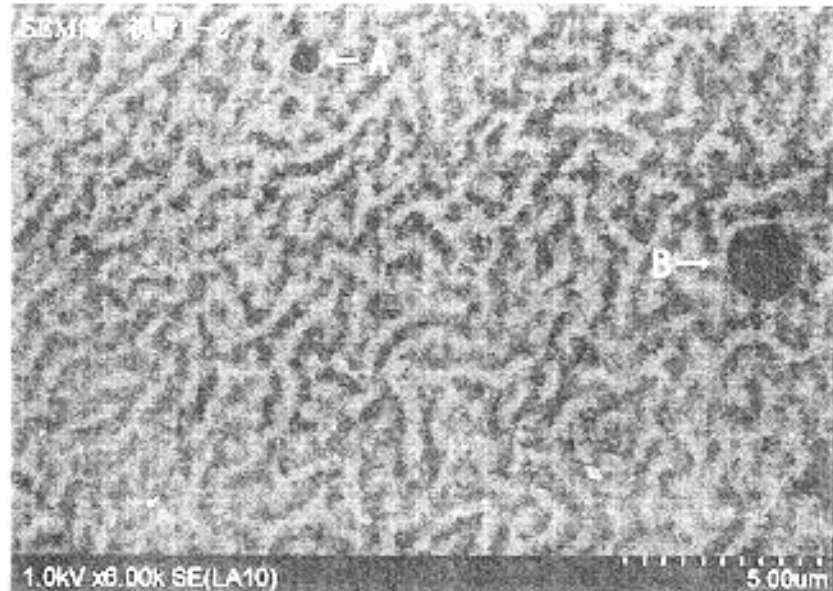
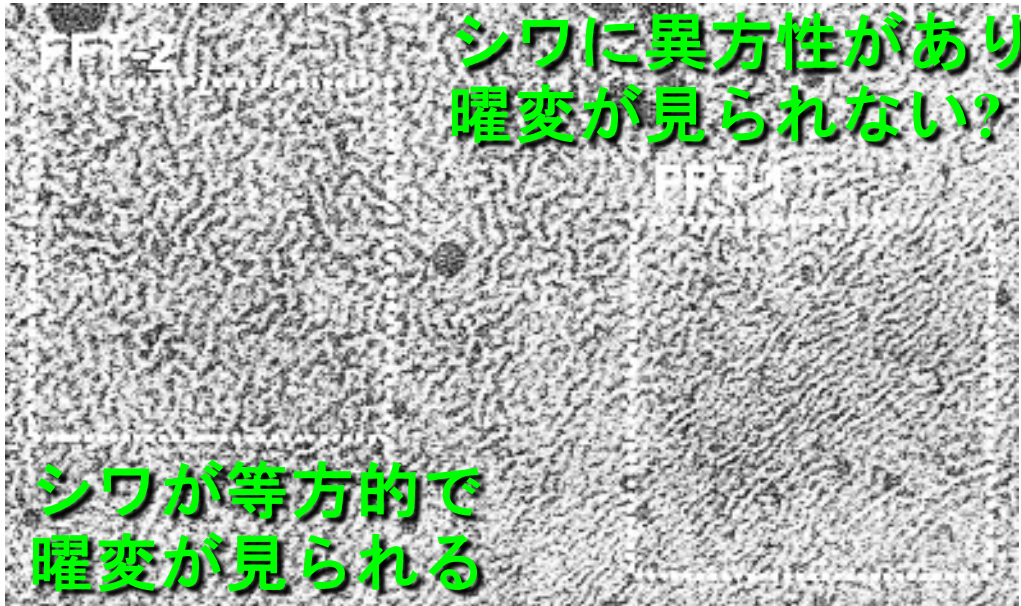
薄膜の発色とスペクトル



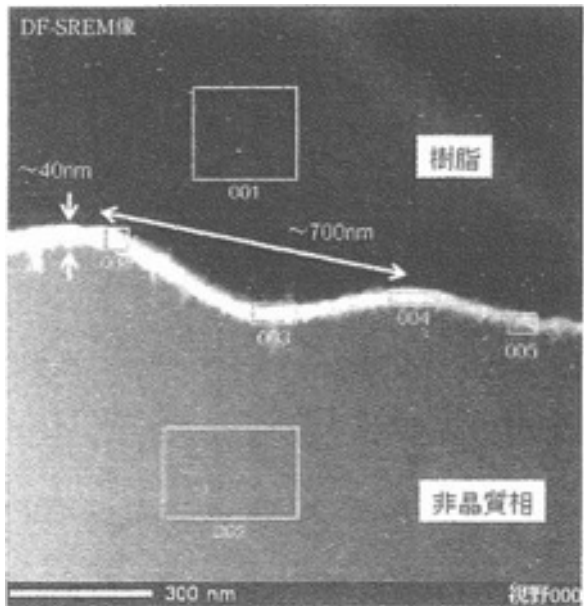
左上: 金属（酸化）皮膜を焼付けられた陶片。左下: 反射スペクトル測定を行った陶片サンプルの顕微鏡写真。右上: 薄膜の干渉色。右下: 陶片サンプルの反射スペクトル。

(有) テクノシナジー: http://www.techno-synergy.co.jp/nkd_appli/ex-micro070.html

曜変が見られる陶片の電子顕微鏡写真

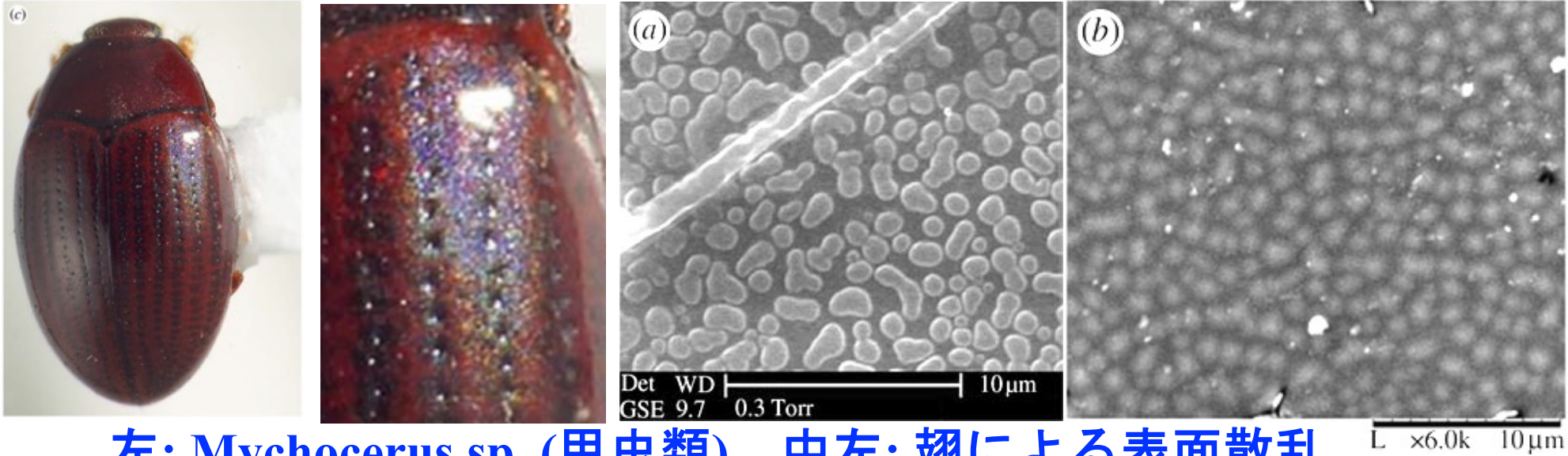


等方的なシワの部分 (FFT-2) の拡大。



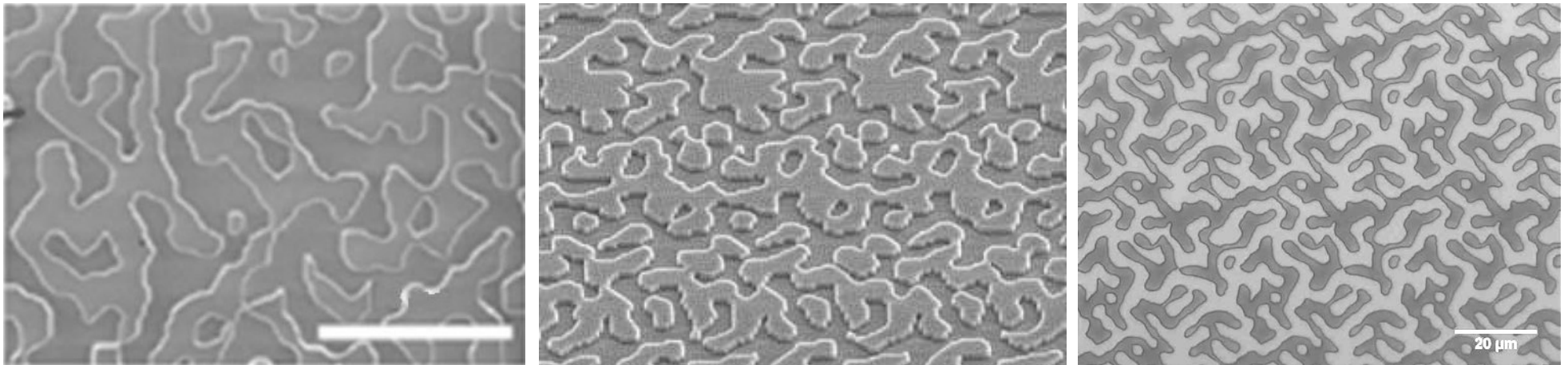
シワ部分の断面。樹脂と非晶質相の間の白い部分はマグネタイト(Fe_3O_4)と同様の結晶構造を有しFeサイトにSi, Mg, Al, Mn, Cu等が固溶したと思われる多結晶。

甲虫の表面微細ドットとDOE



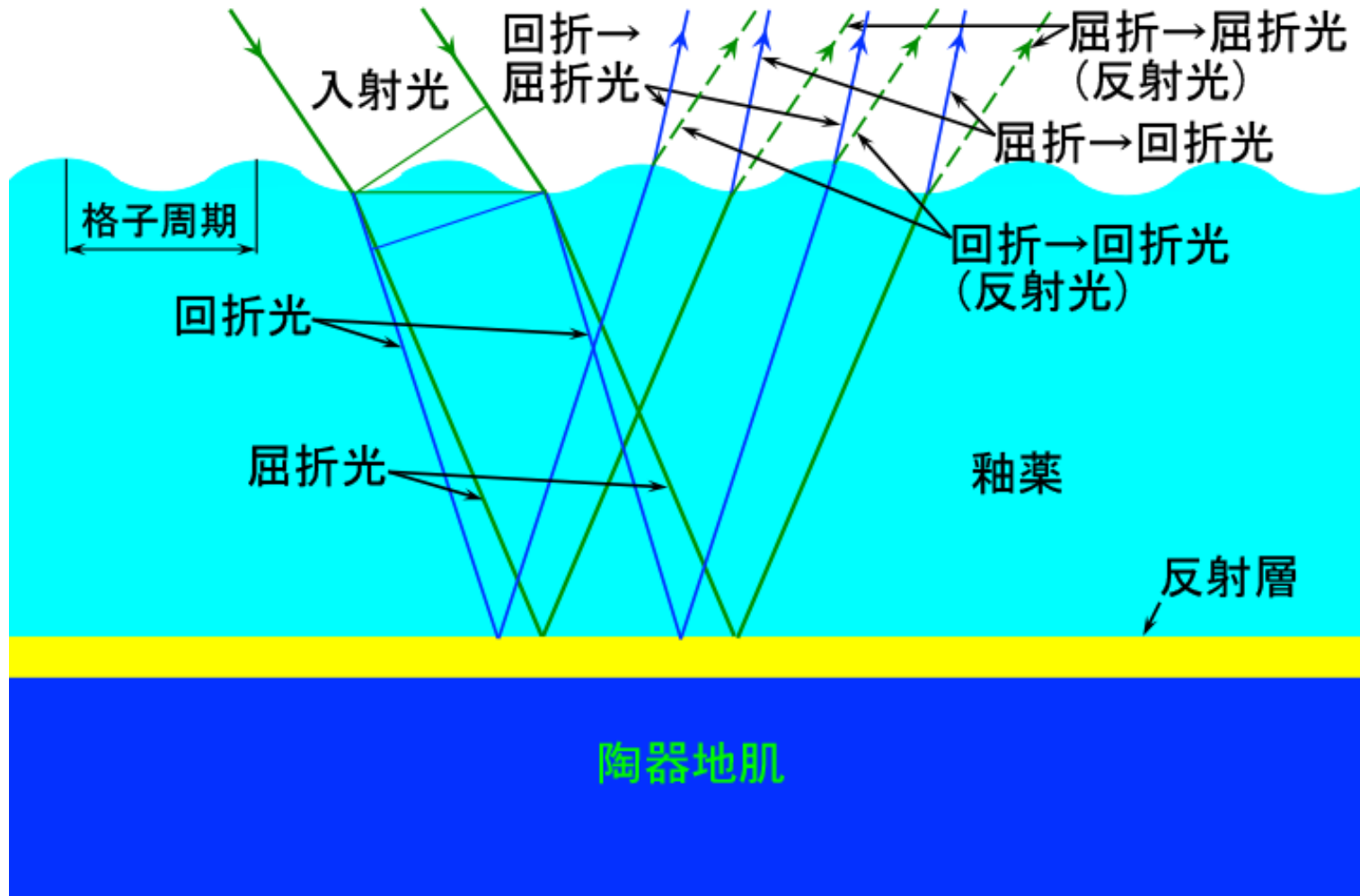
左: *Mychocerus* sp. (甲虫類)。中左: 翅による表面散乱。
右: 翅の電子顕微鏡写真。

A. E. Seago, et. al., (2009)



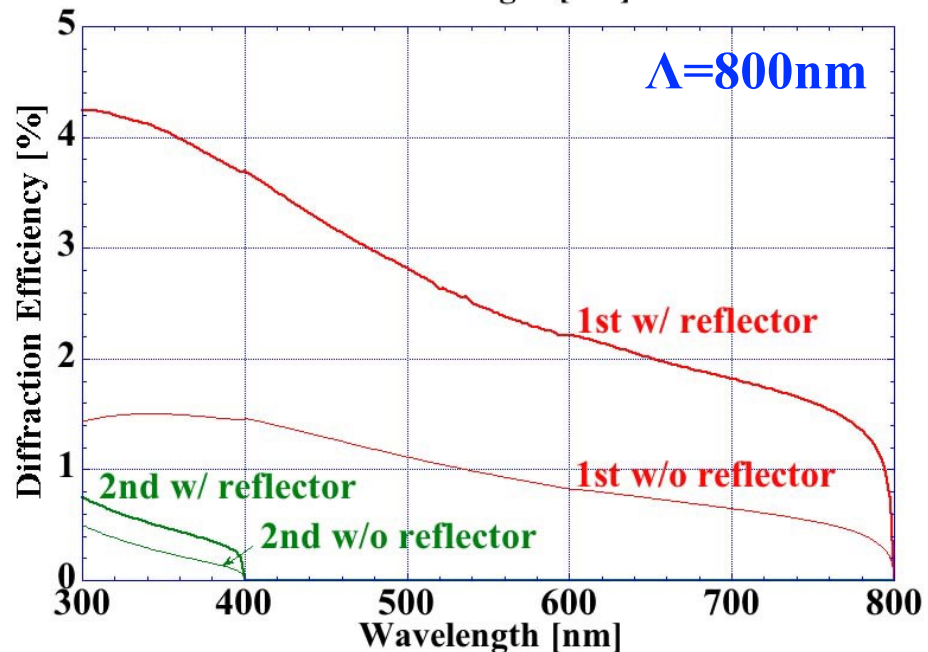
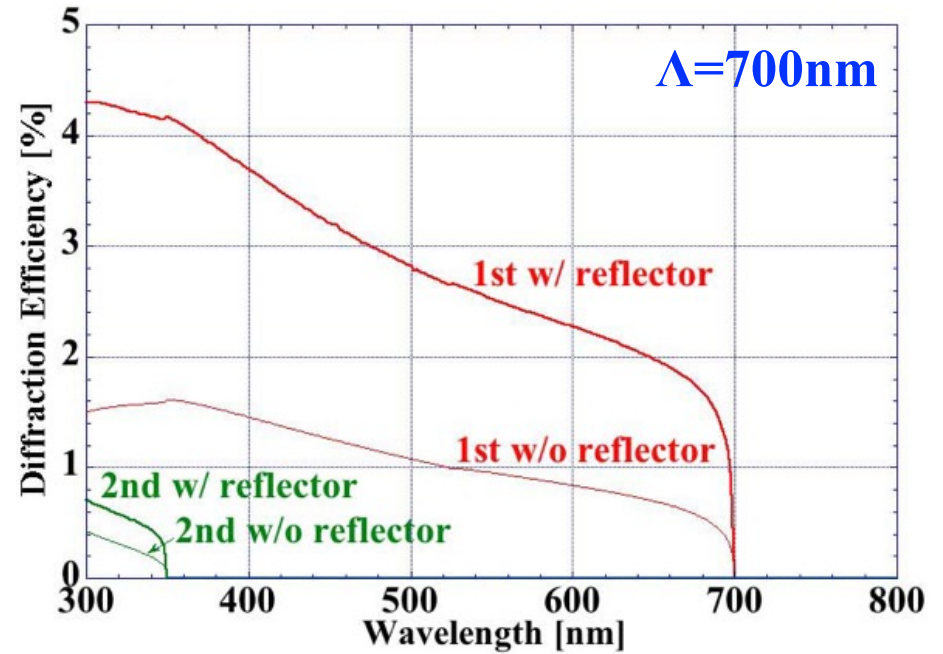
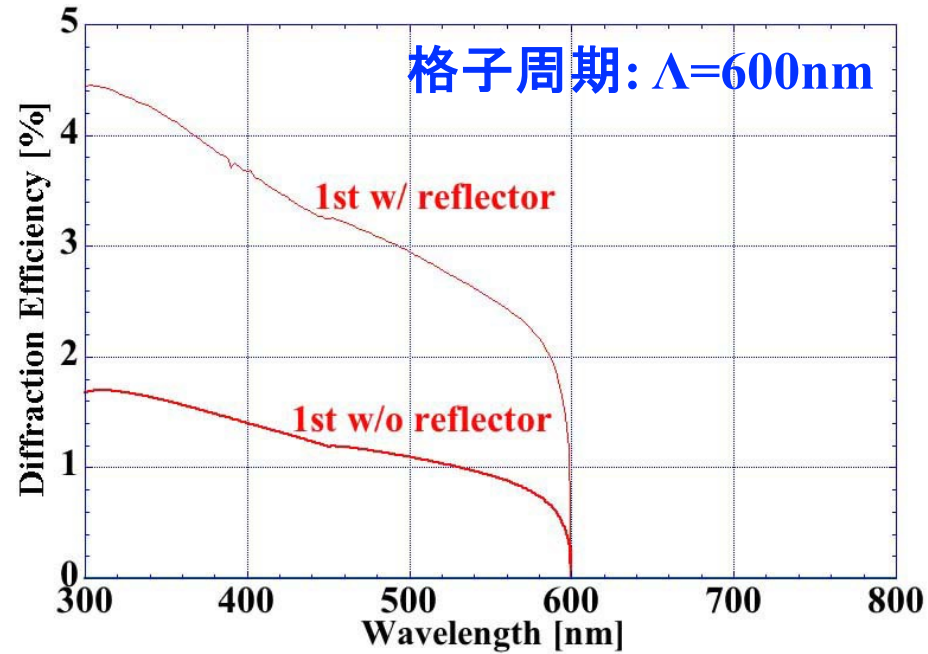
DOEの電子顕微鏡写真。左: AGC社、中: Scivax社、右: 新潟工技総研

裏面に反射層がある2次元回折格子



入射光は入射と出射の両方で回折光と屈折光に分離する。反射の1次回折光も回折→屈折光や屈折→回折光と同じ方向に進む。

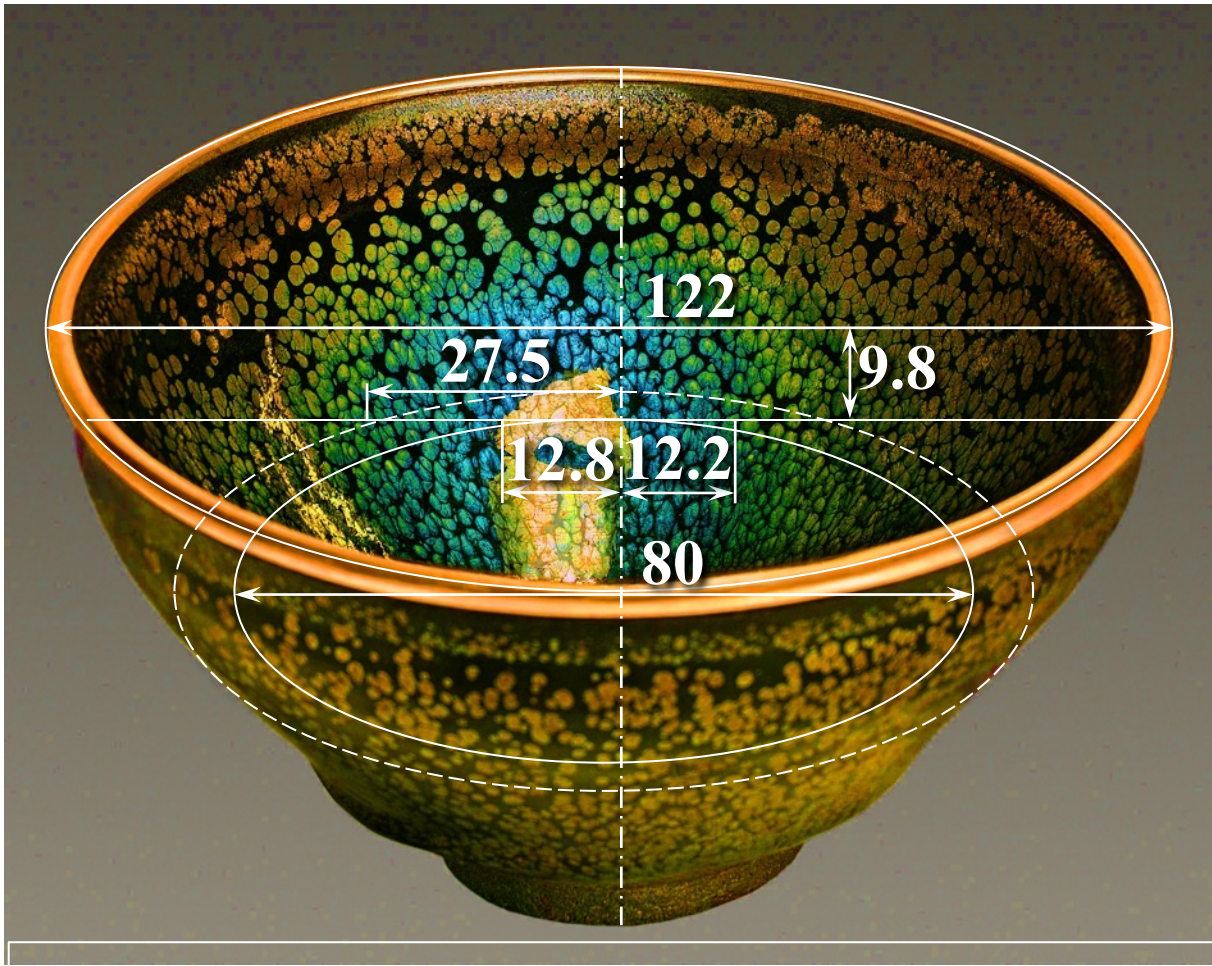
裏面に反射層がある2次元回折格子の回折効率



油薬の屈折率が $n_1=1.5$ 、反射層が金属鉄、振幅が 100nm の場合の正弦波回折格子による垂直入射の回折光強度。

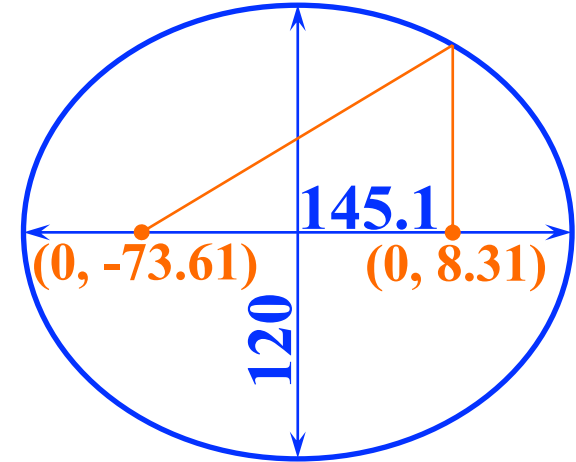
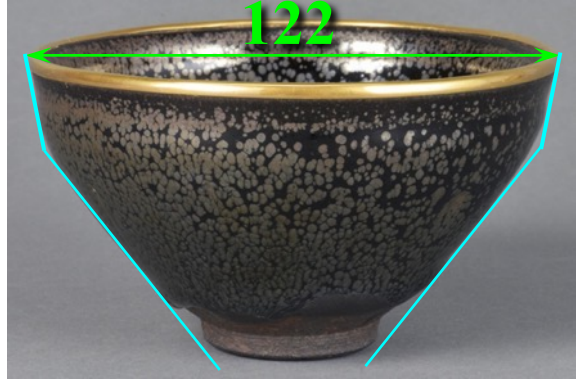
1stと2ndはそれぞれ1次と2次回折光、w/ reflectorとw/o reflectorはそれぞれ反射層ありと反射層なし。

彩度を上げた国宝油滴天目茶碗の写真

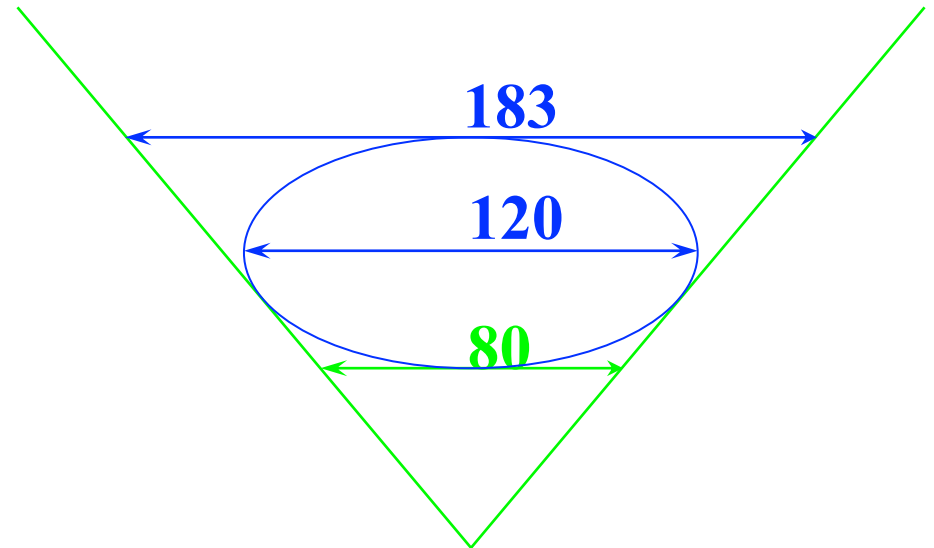
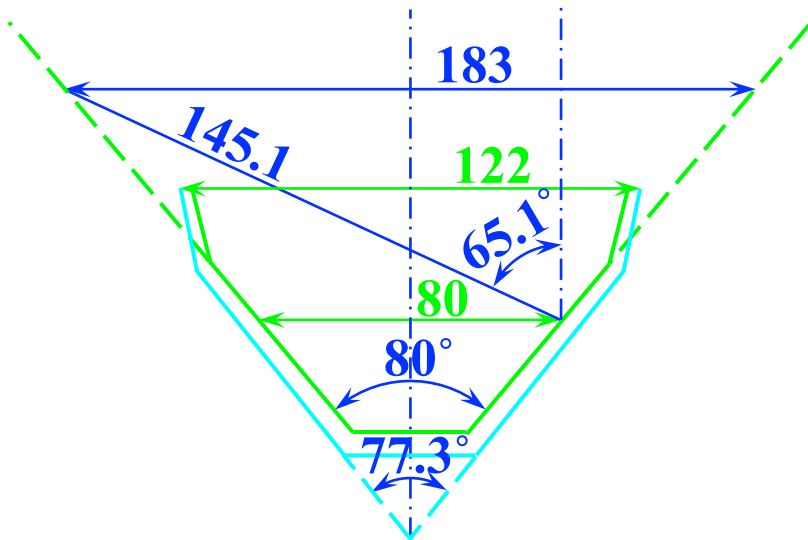


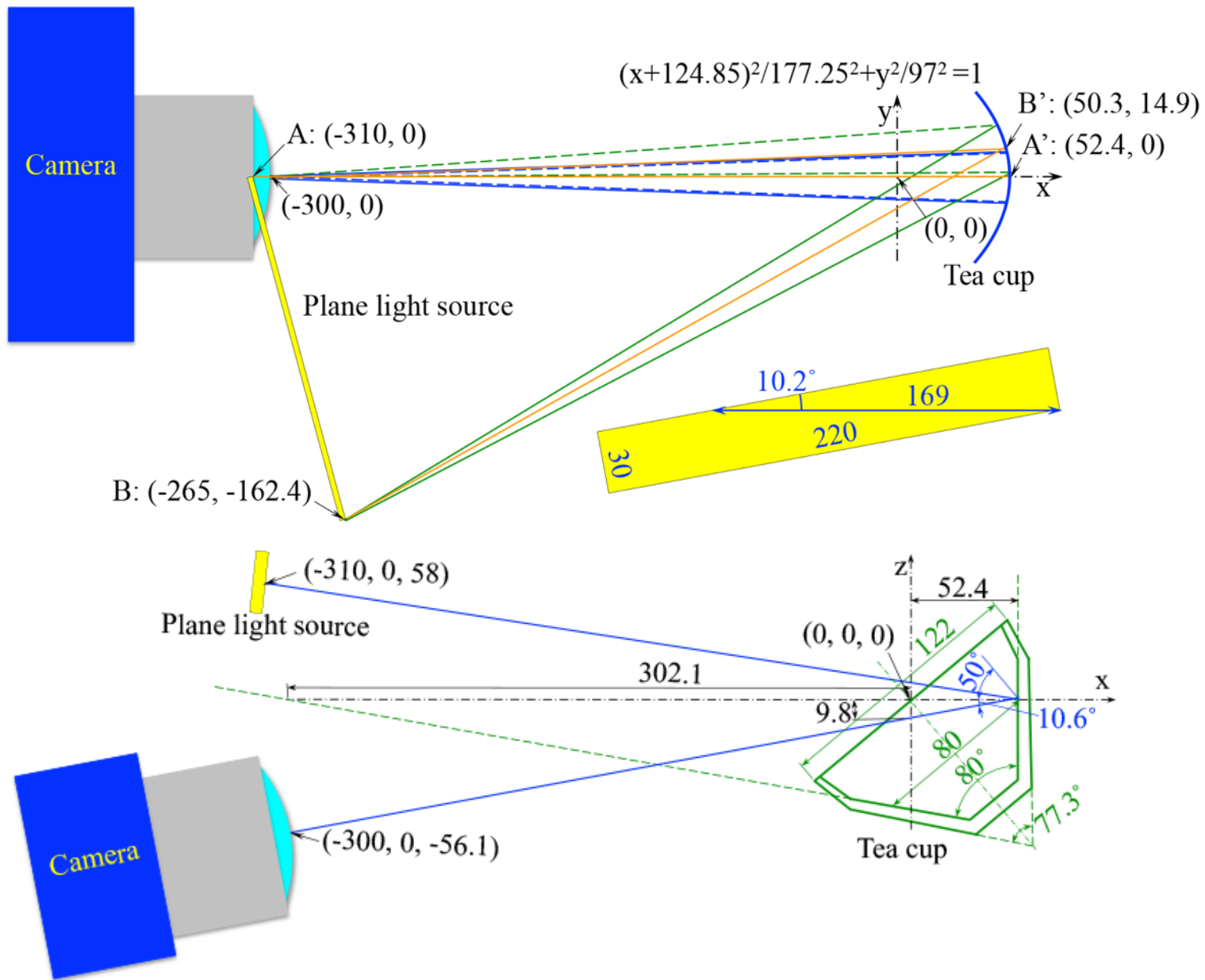
国宝油滴天目茶碗の内径と内面に写った照明の反射光と青色の回折光の位置。

カメラから見た茶碗の楕円

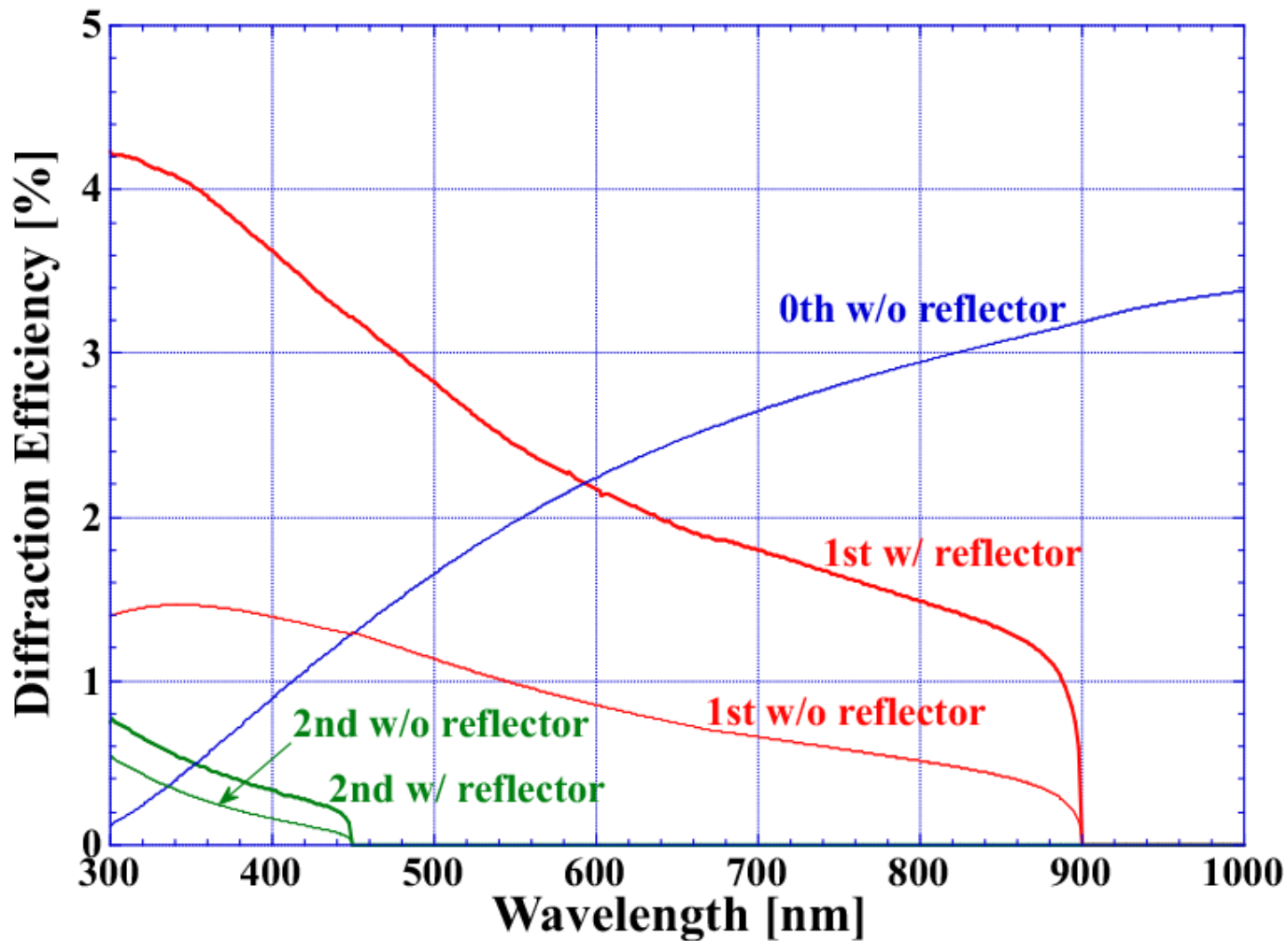


$$(x+32.65)^2/72.65^2 + y^2/60^2 = 1$$



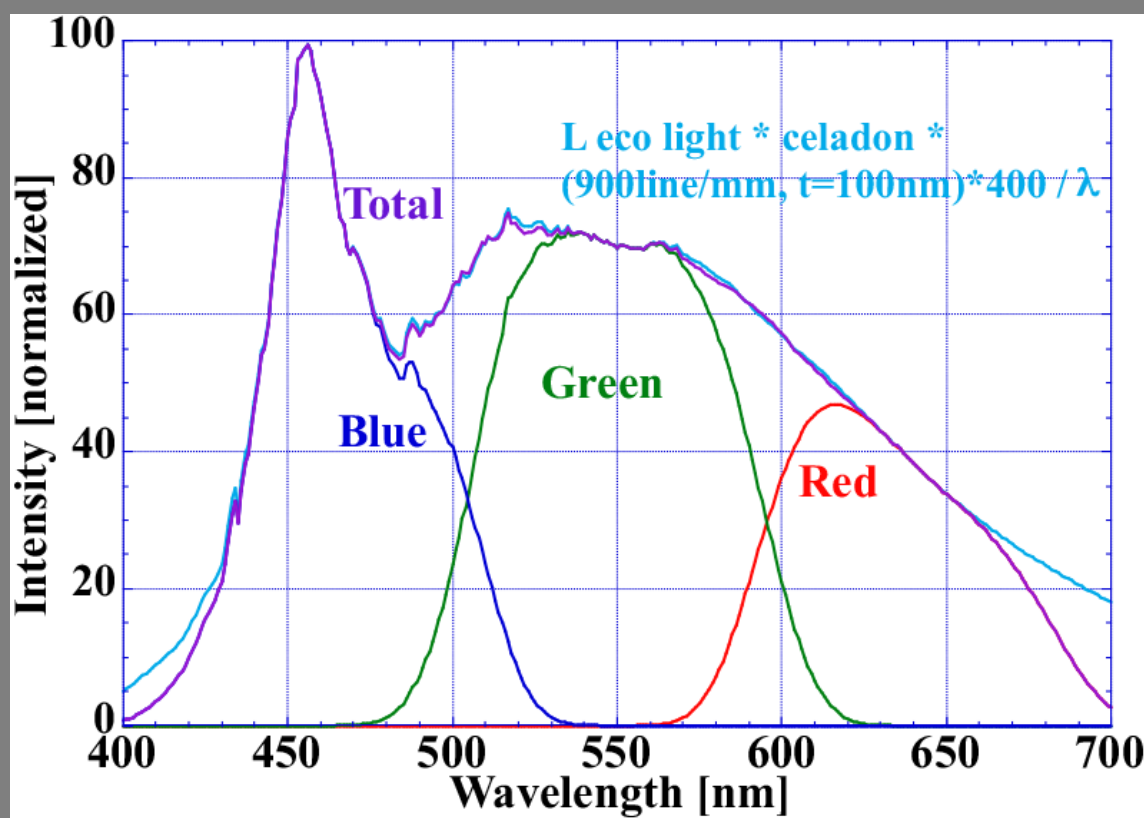


国宝油滴天目茶碗の内面に写った照明の反射光から求めた照明と茶碗、カメラの位置



釉薬の屈折率が $n_1=1.5$ 、反射層が金属鉄、格子周期: $\Lambda=900\text{nm}$ 、振幅が 100nm の場合の正弦波回折格子による垂直入射の回折光強度。

1stと2ndはそれぞれ1次と2次回折光、w/ reflectorとw/o reflectorはそれぞれ反射層ありと反射層なし。



スペクトル強度を波長帯域ごとに加算したRGB値。

Wavelength [nm]	R	G	B
400~450	0	0	255
400~500	0	11	255
400~550	0	178	255
400~600	20	255	214
400~650	106	255	208
400~700	145	255	208
450~700	145	255	160
500~700	148	255	23
550~700	255	223	0
600~700	255	15	0
650~700	255	0	0

光彩のスペクトルとRGB強度。

$$I_{\text{Diff}} = I_0 d\Delta / (2a m\lambda), \quad (m \neq 0, \lambda \neq 0)$$

I_{Diff} : 2次元の“シワ”の回折光強度

I_0 : 1次元の“シワ”の回折光強度

d : 入射光の半径

Δ : 格子周期

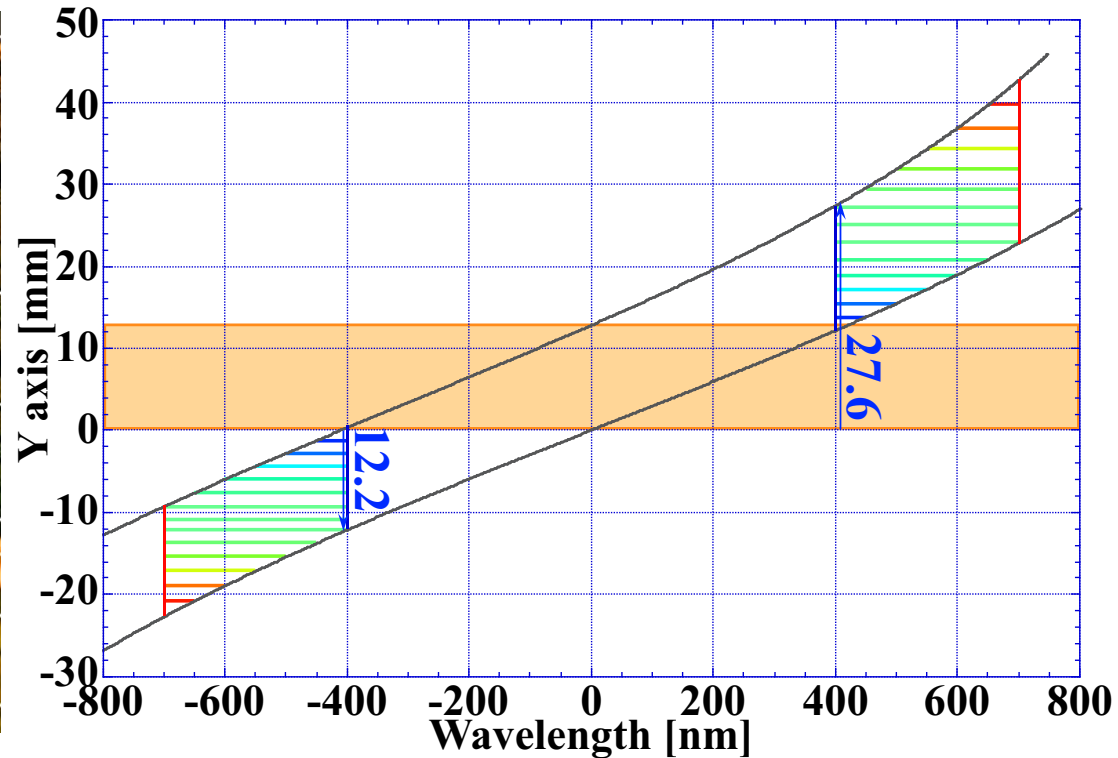
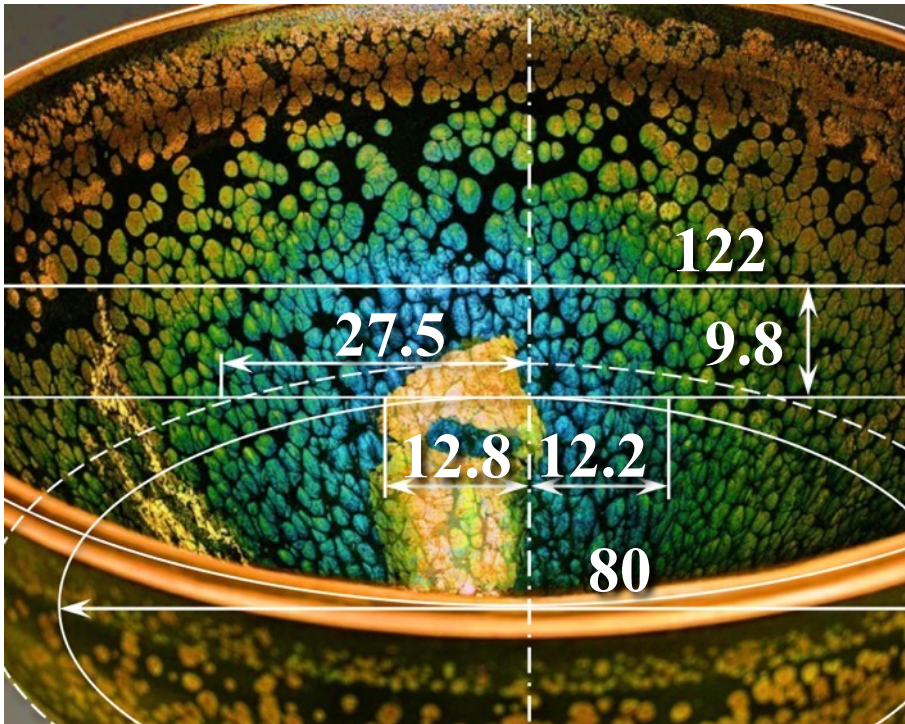
a : 回折格子から距離

m : 回折次数

λ : 波長

茶碗に写った反射光と光彩の位置

	左側の光彩	面光源の反射光	右側の光彩
位置 [mm]	$27.5 \leftrightarrow 12.8 >$	$12.8 \leftrightarrow 0$	$> 0 \leftrightarrow -12.2$



回折光の位置と波長分布および色彩

波長 [nm]	700 (赤)	400 (青紫)	400 (青紫)	700 (赤)
位置 [mm]	$42.6 \leftrightarrow 22.7$	$27.6 \leftrightarrow 12.2$	$0.3 \leftrightarrow -12.2$	$-9.3 \leftrightarrow -22.7$

プレスリリース

- ・ 理研ウェブサイト - October 10, 2023
国宝油滴天目茶碗の曜変（光彩）の秘密を探る
- ・ OPTRONICS ONLINE - October 12, 2023
理研、国宝油滴天目茶碗の光彩を回折格子により説明
- ・ マイナビニュース - October 13, 2023
理研、国宝「油滴天目茶碗」の発色の仕組みを説明することに成功
- ・ 科学新聞 10月27日号
国宝「油滴天目茶碗」いろつやの秘密に迫る
理研、電顕映像から推定
- ・ JST: 客観日本（中国語版） - November 14, 2023
日本理研通过电子显微镜图像揭开国宝“油滴天目茶碗”色泽的秘密
- ・ JST: Science Japan（英語版） - November 29, 2023
RIKEN discovers the secret behind the color and luster of the 'Yuteki Tenmoku' Tea Bowl, a national treasure