

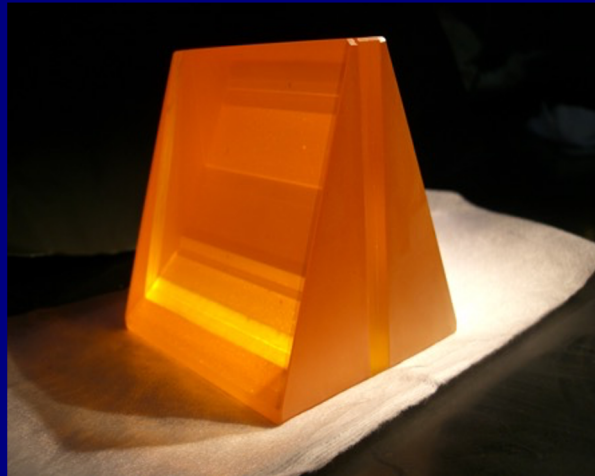
次世代観測装置用の新しい 回折格子の開発状況 VII

海老塚 昇¹, 岡本 隆之², 山形 豊¹, 佐々木 実³,
仲内 悠祐⁴, 西牧 真木夫⁵, 山本 和也⁵, 佐伯 和人⁶

¹ 理化学研究所 光量子工学研究センター,
² 理化学研究所 石橋極微デバイス研究室,
³ 豊田工業大学 工学部, ⁴ JAXA/ISAS,
⁵ ナルックス (株), ⁶ 大阪大学 理学研究科



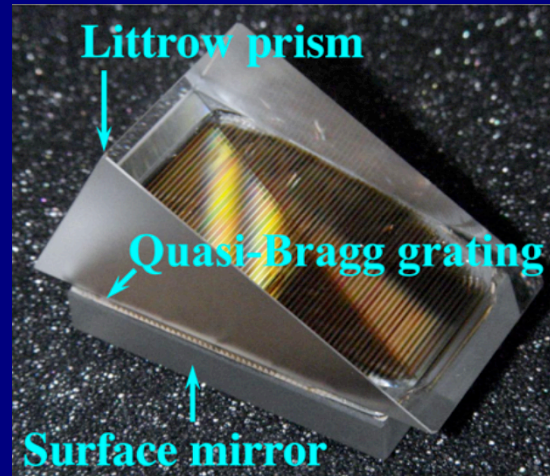
各種回折格子の開発



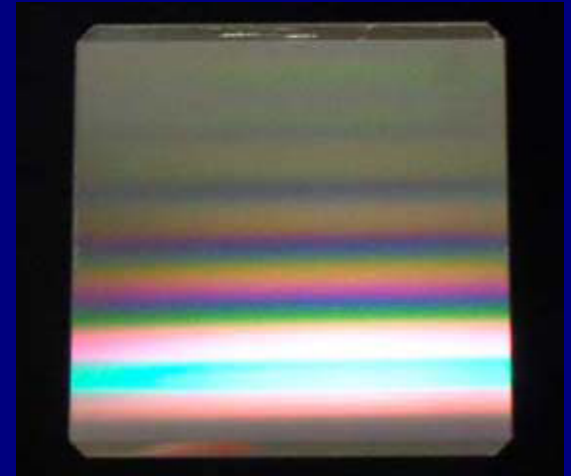
VPHグリズム



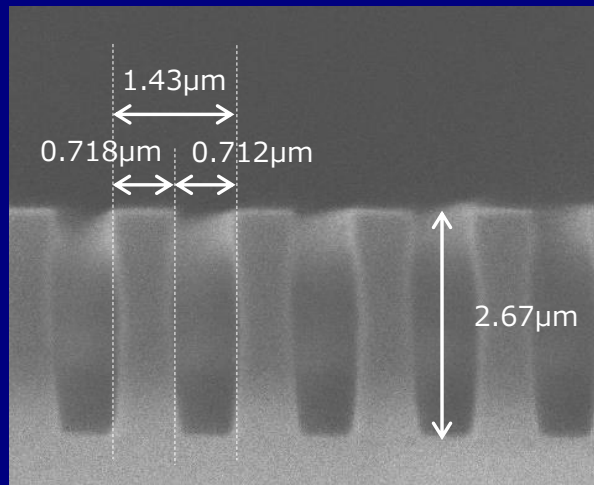
Quasi-Bragg (QB) grating



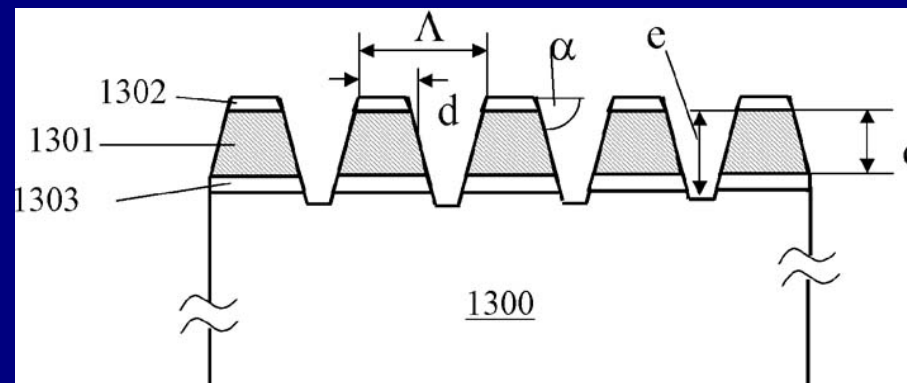
QB immersion grating



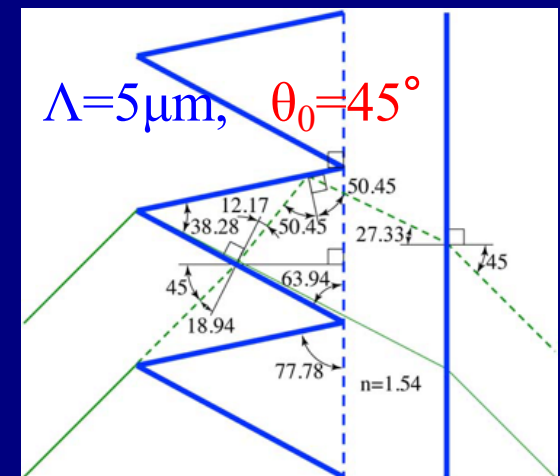
近-中間赤外線 Geグリズム



Volume binary (VB) grating



LightSmyth transmission grating



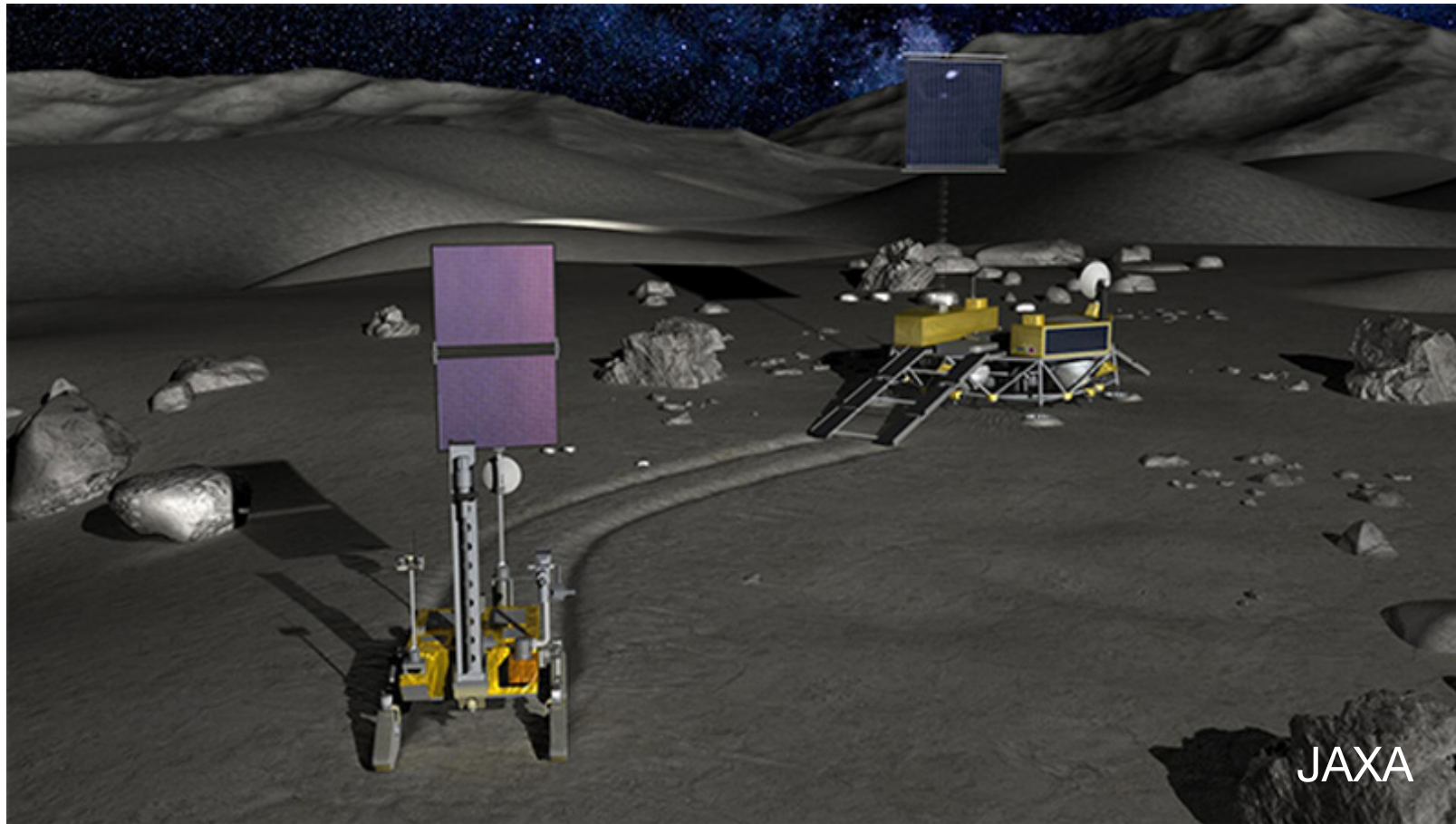
Reflector facet transmission (RFT) grating

ALIS用VB gratingの開発

月極域探査計画(LUPEX)



月の水資源が将来の持続的な宇宙探査活動に利用可能か判断するための探査



JAXAと、インド宇宙研究機関(ISRO)との国際協働ミッション
2023年度以降の打ち上げを目指す。

©大阪大学 佐伯さんのスライド

氷の存在イメージ



JAXA提示の機器提案の目安は、0.5wt% (0.1wt%精度)の氷を検出すること。

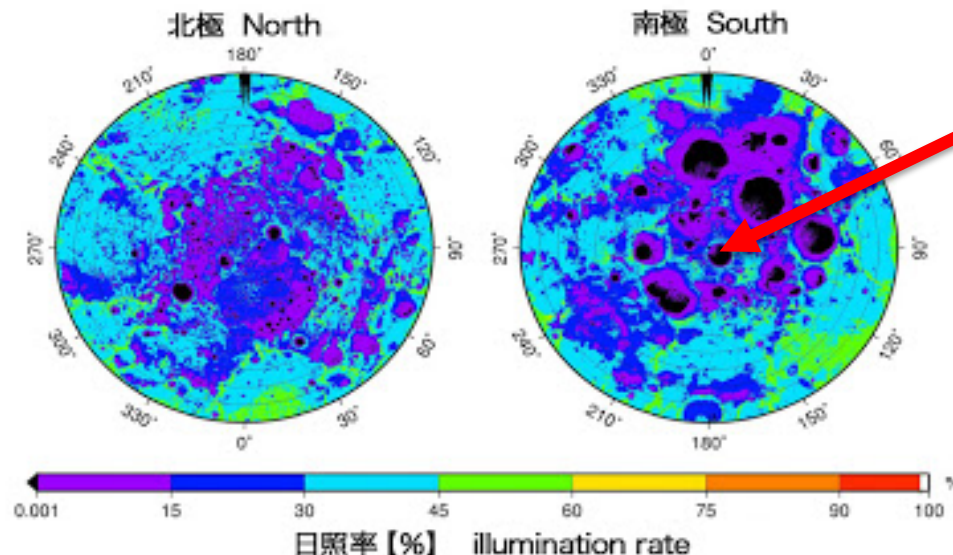
$$\frac{7500 \times 7500 \times 3.14 \times 1 \times 2 \times 0.5}{100} = 1,766,250$$

シャクルトンクレーターに含まれる水の量

永久影クレーターシャクルトン(直径21km)のうち、直径15km、深さ1m分の円筒の体積が氷を含む層だと考えると、0.5wt%の水含有量でも180万トンの水があることになる。

5 wt% (10 vol%)の H₂Oが
月高地のレゴリスブレ角礫岩に
存在するイメージ

Fagan and Kring (2013)



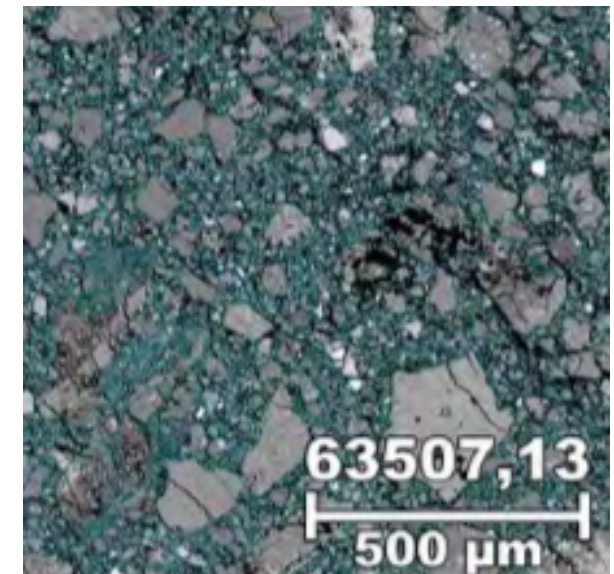
シャクルトン

永久影領域

(JAXA/KAGUYA)

北極周辺と南極周辺(緯度85度以上)の日照率マップ。黒い部分が永久影領域。

提供 / 野田寛大(国立天文台)/JAXA



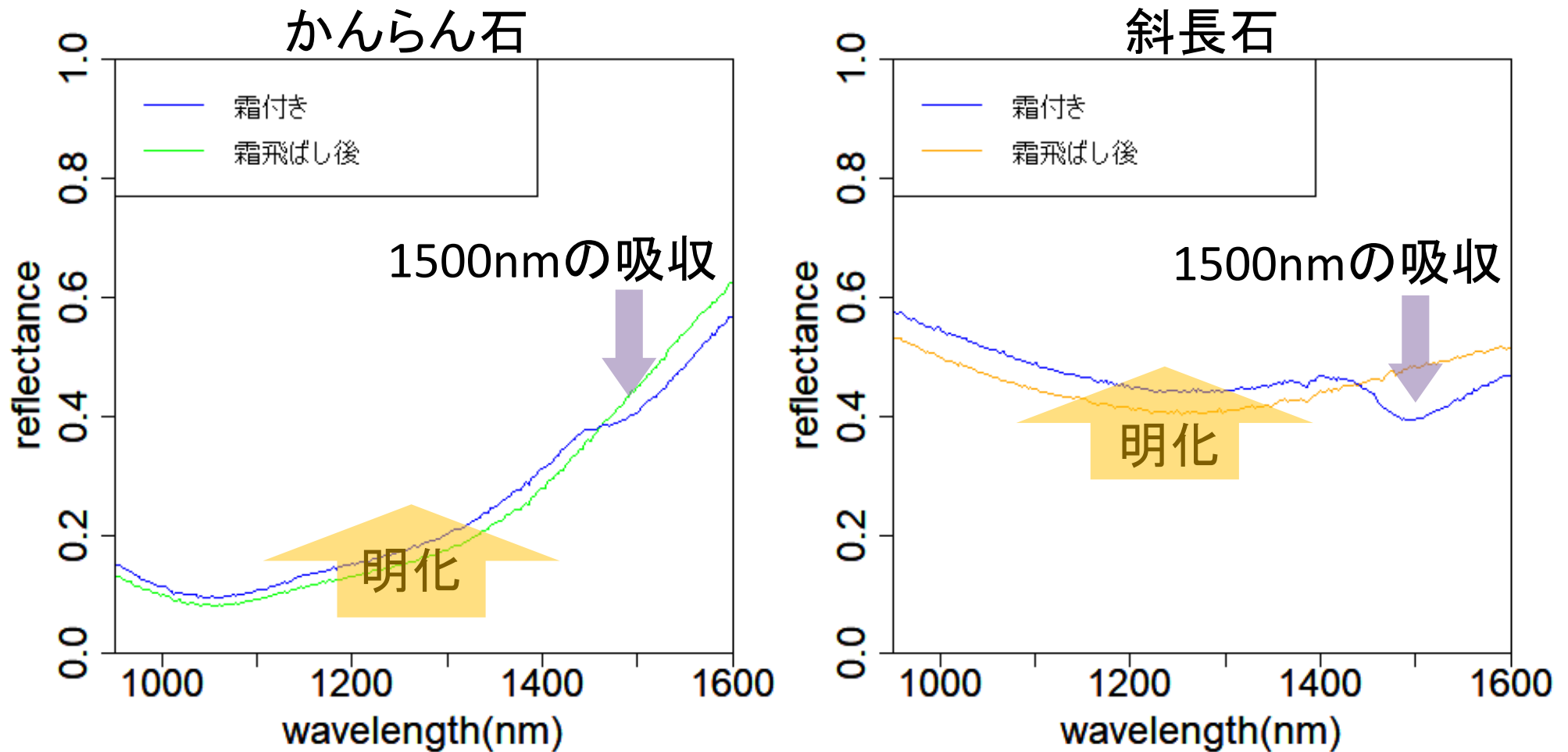
レゴリス粒子の間に
存在する場合

©大阪大学 佐伯さんのスライド

着氷スペクトル(実測値)

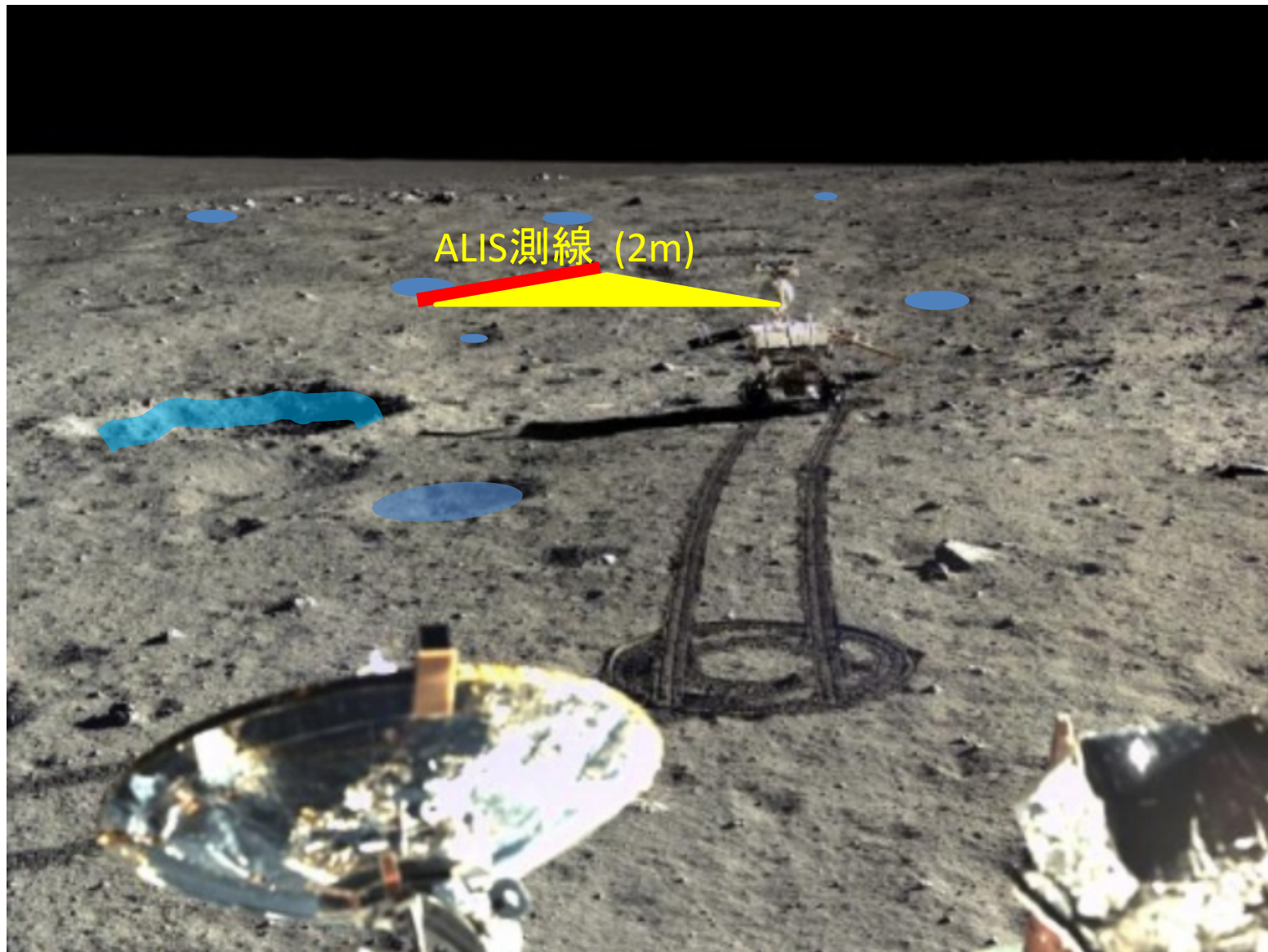


着氷スペクトルの特徴



全体的な明化・O-H伸縮振動による吸収(1500nm)が見られた

大雑把な氷の観測イメージ



一度に連続スペクトルが観測できるので、
永久影で光源を短時間点灯させて弱い吸収帯を探すという運用が可能

嫦娥4号の画像に加筆

Advanced Lunar Imaging Spectrometer (ALIS)

ALIS-L

ALIS-R is likely to be stuck on the side of ALIS-L.

IFOV:

2000 mm x 10 mm @ 5 m

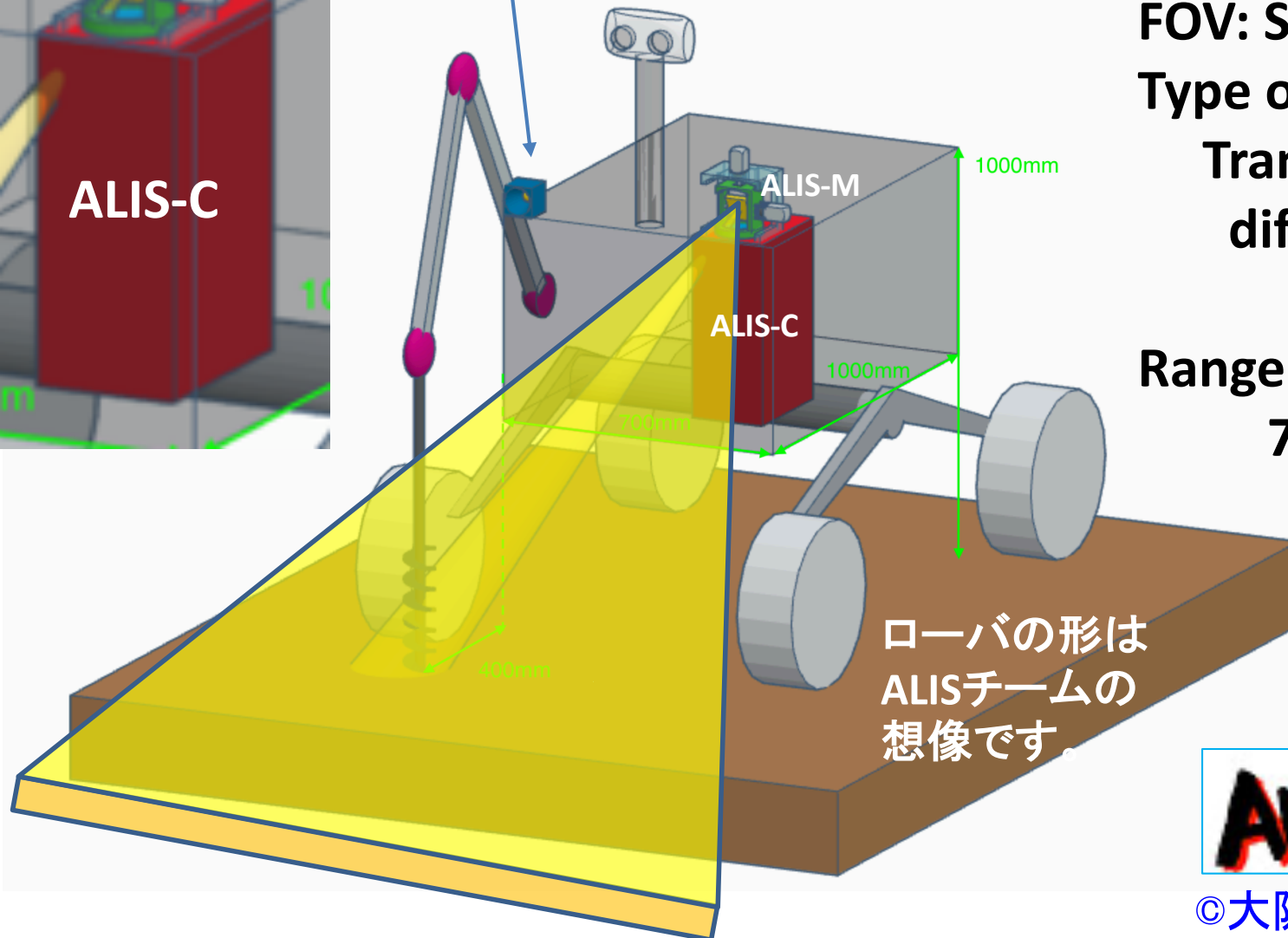
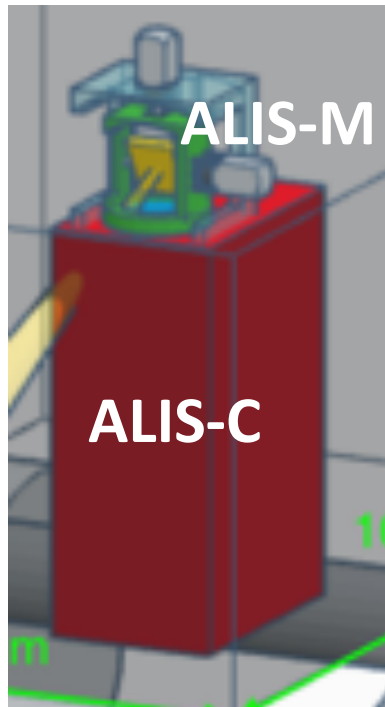
FOV: Scan operation

Type of spectroscopy:

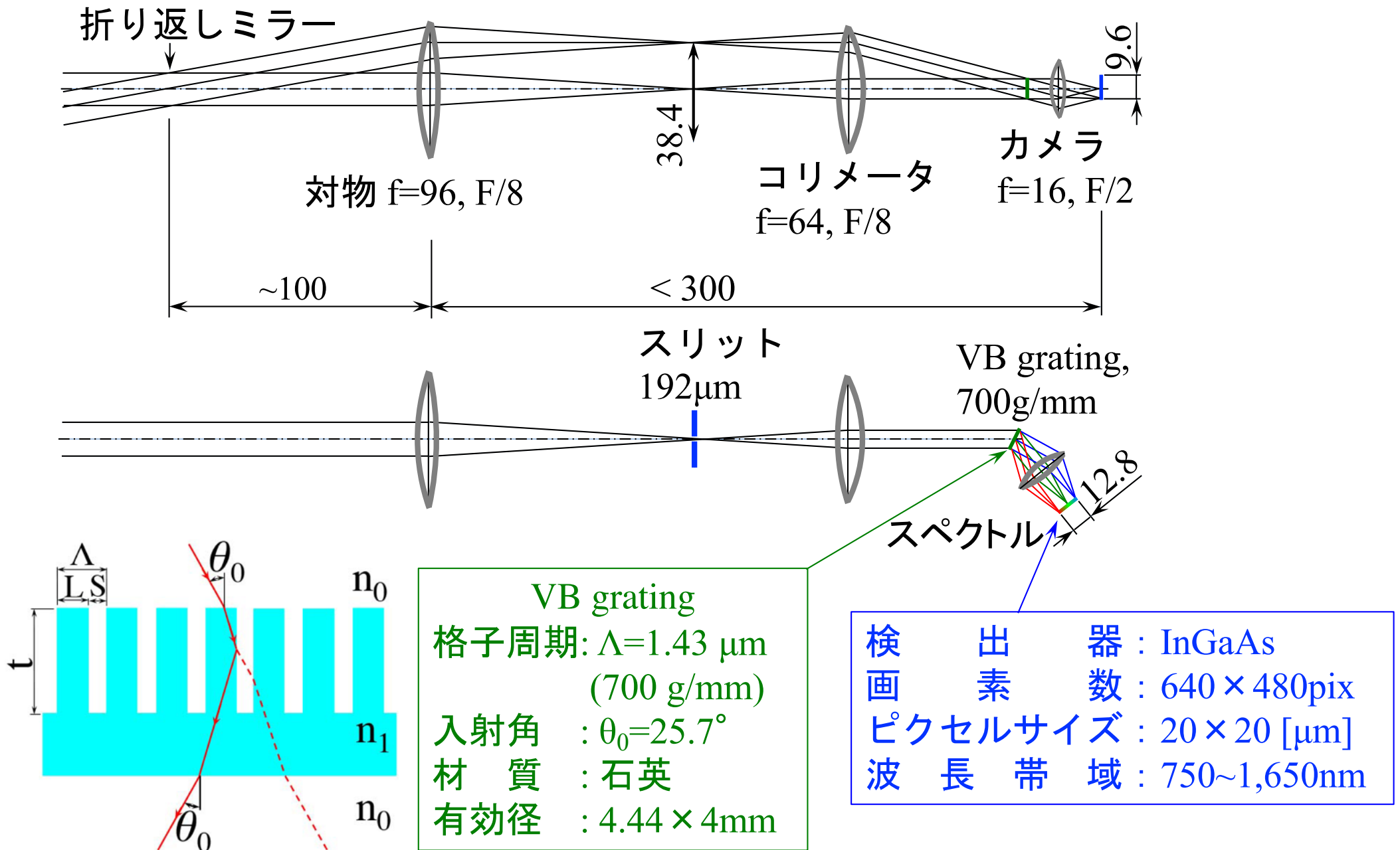
Transmission type
diffraction grating

Range of wavelength:

750 nm – 1650 nm

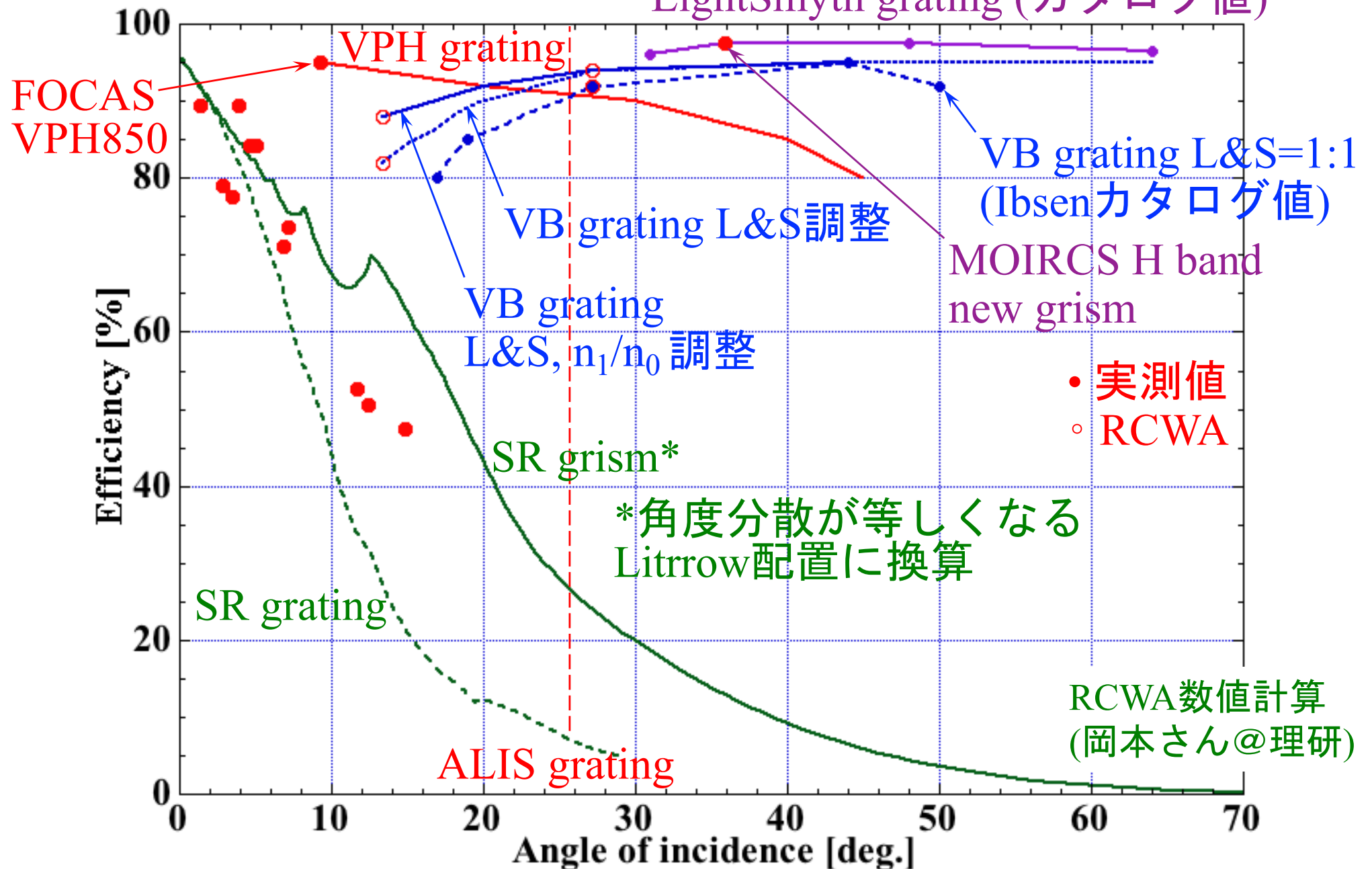


ALISの光学系

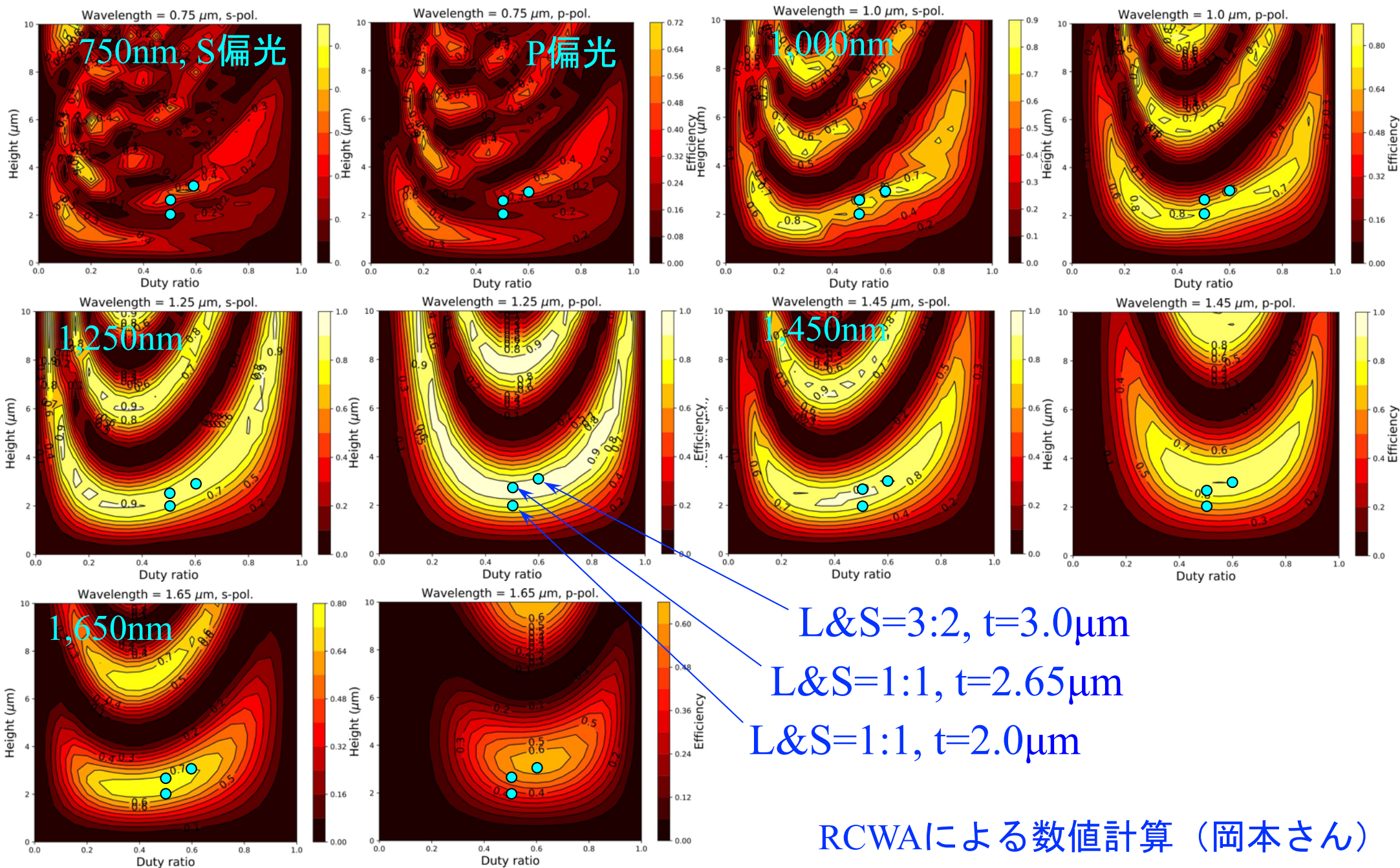


透過型回折格子の入射角と最大効率

LightSmyth grating (カタログ値)

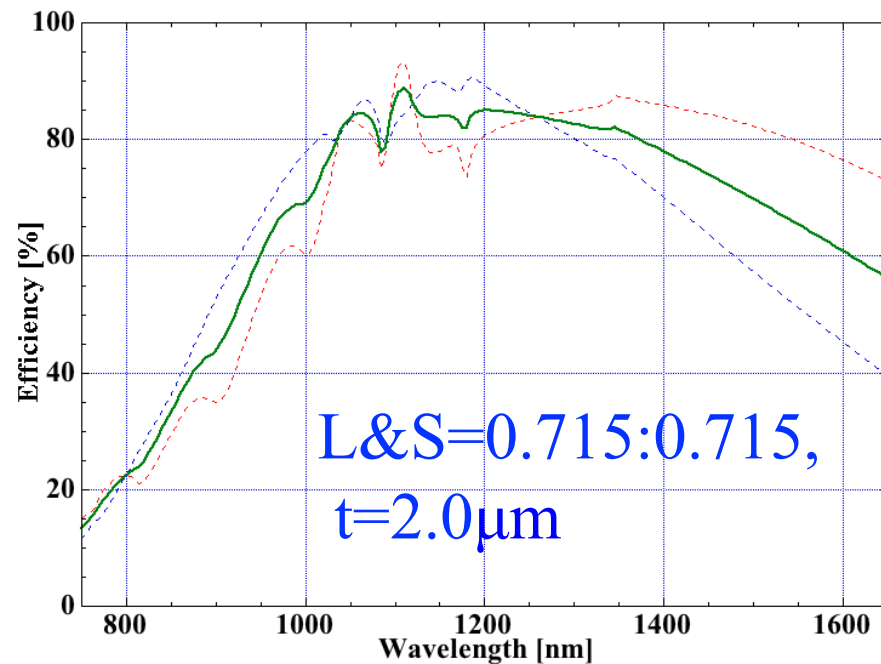
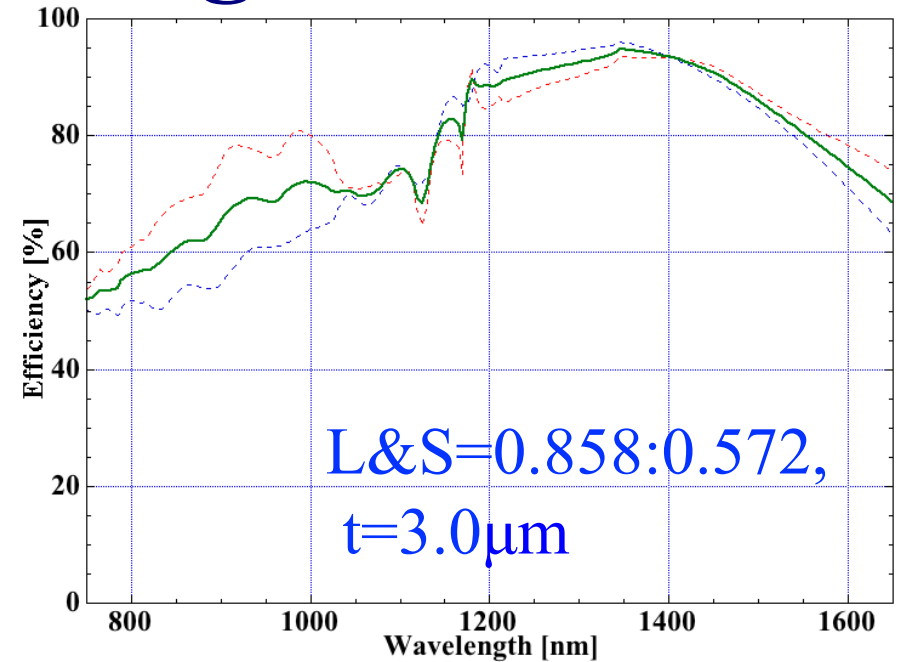
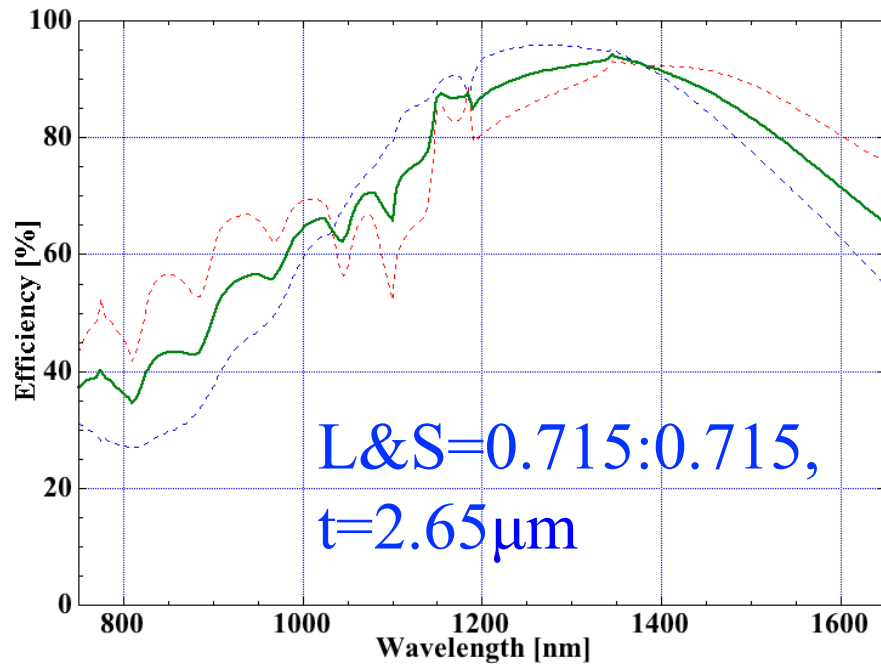


$\Lambda=1.43\text{ }\mu\text{m}$ のVB gratingの効率マップ



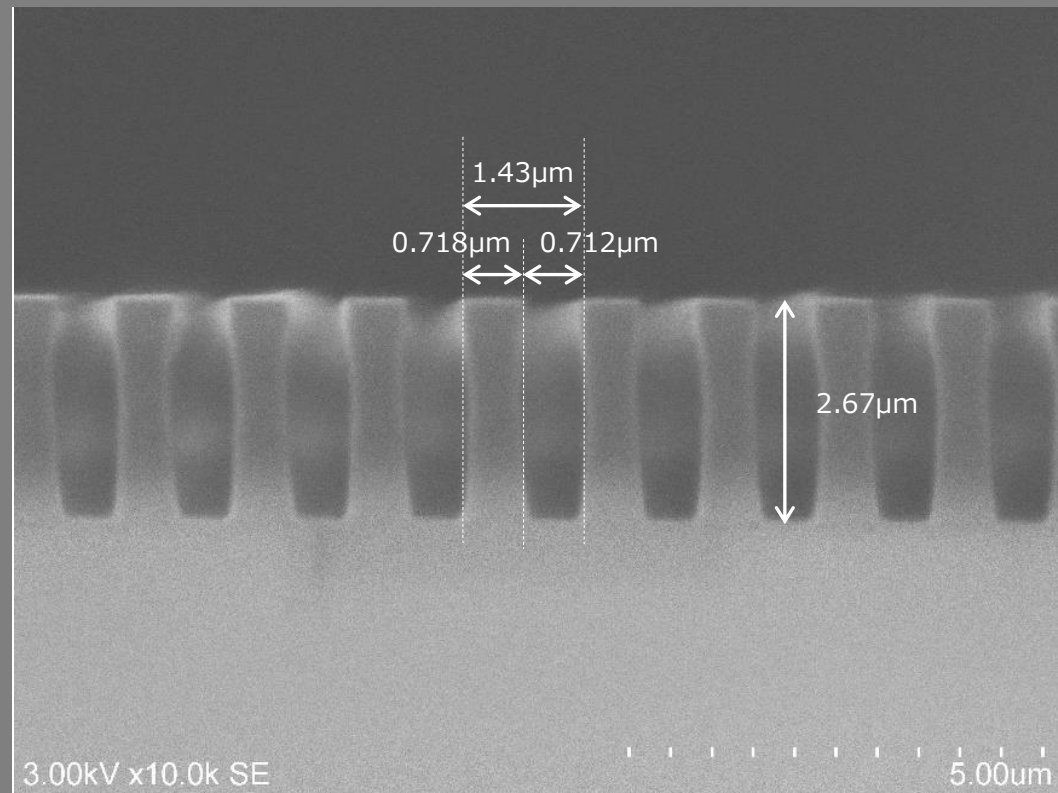
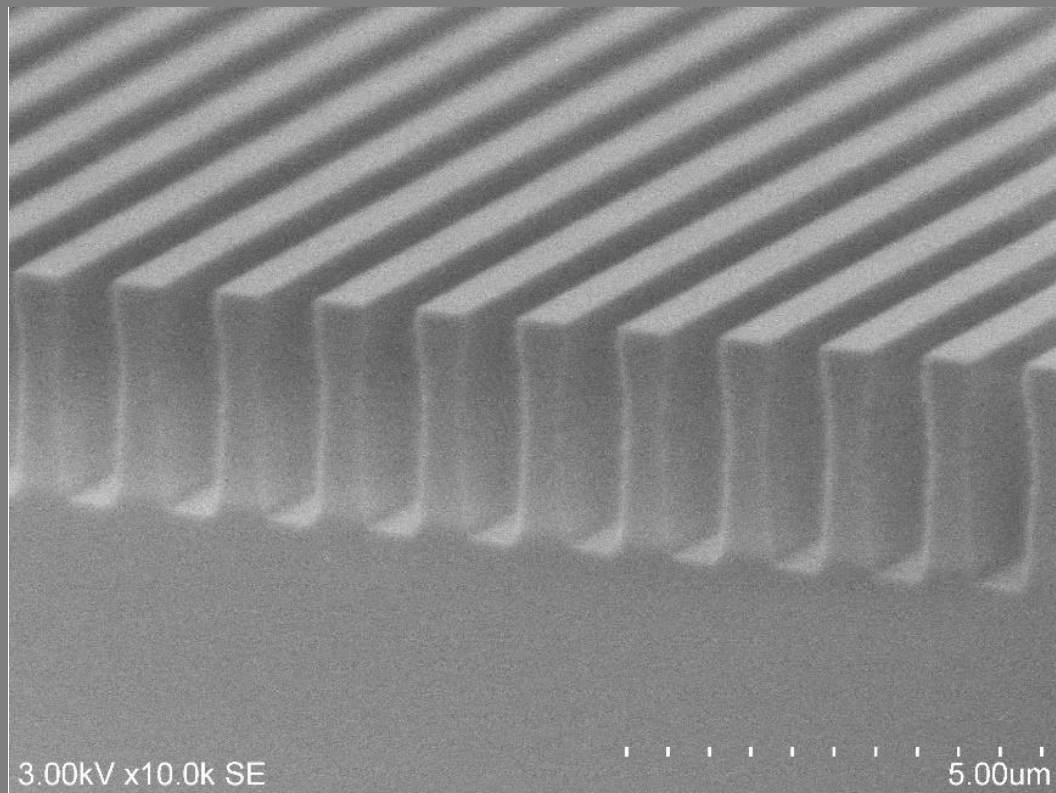
RCWAによる数値計算 (岡本さん)

$\Lambda=1.43\text{ }\mu\text{m}$ のVB gratingの回折効率



RCWAによる数値計算（岡本さん）

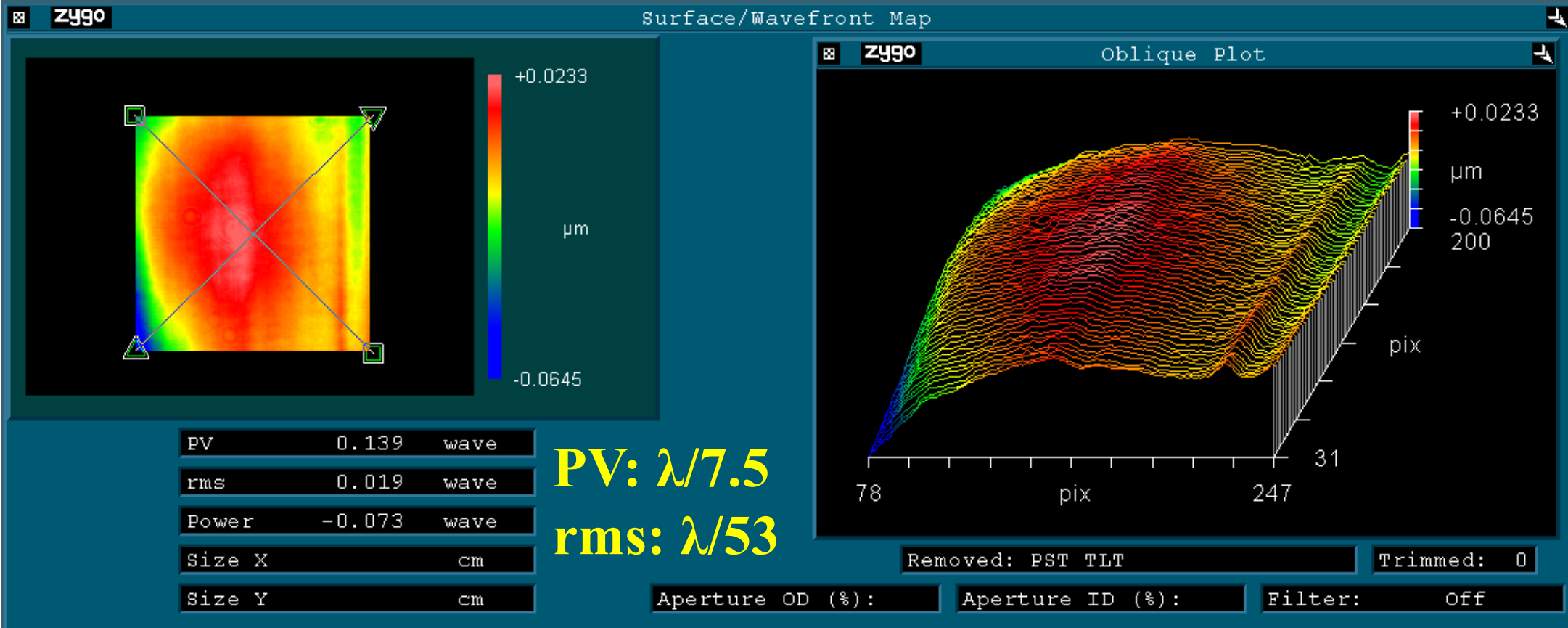
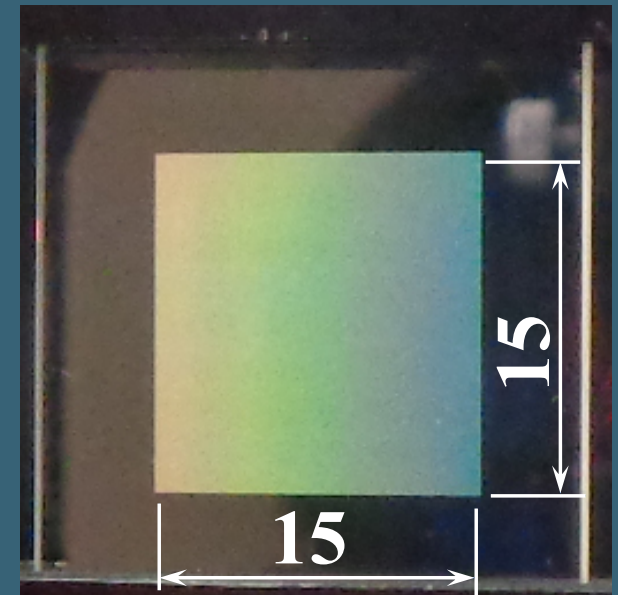
異方性ドライエッチングによる 石英VB gratingの直接加工



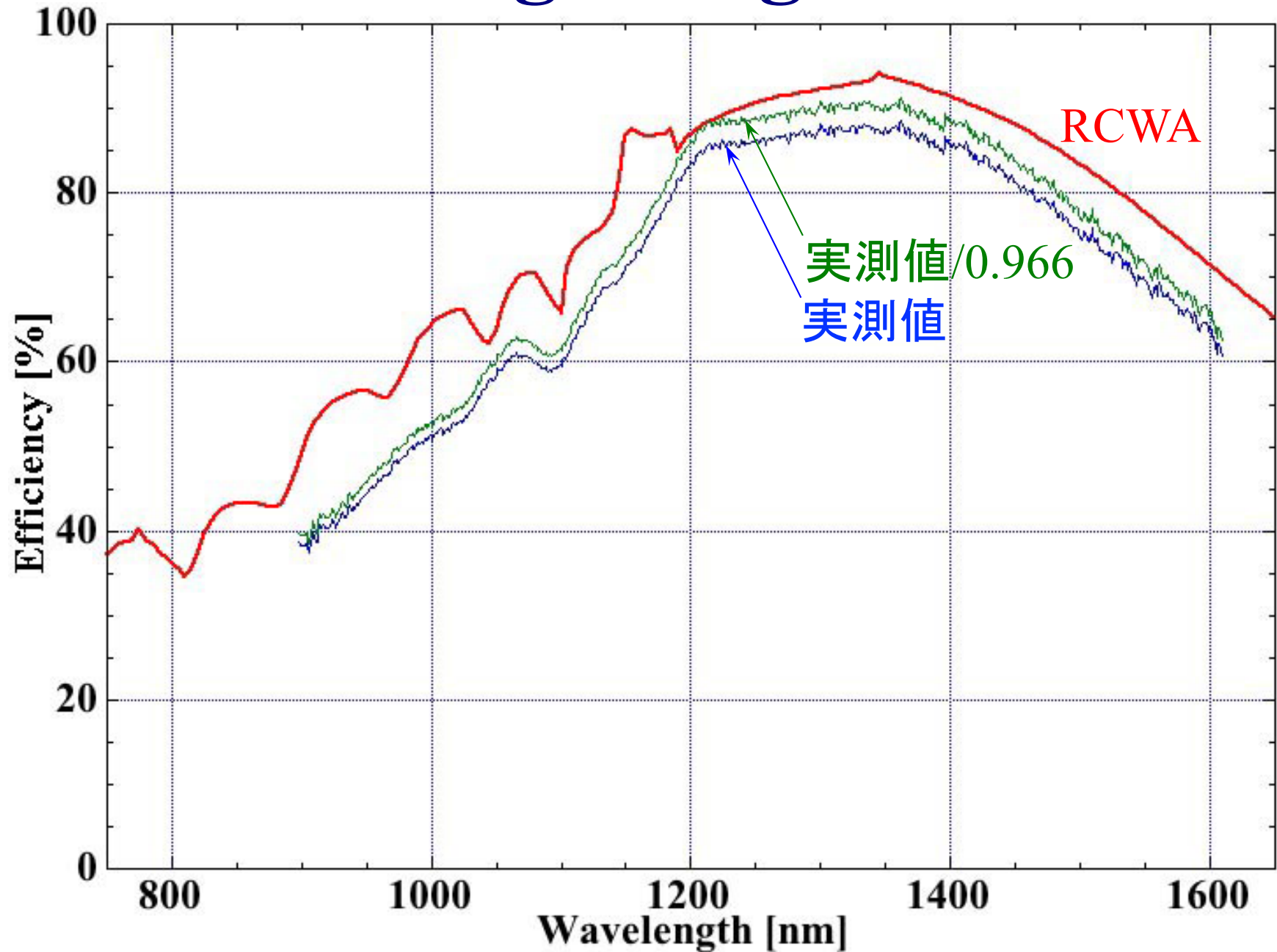
格子周期

Space

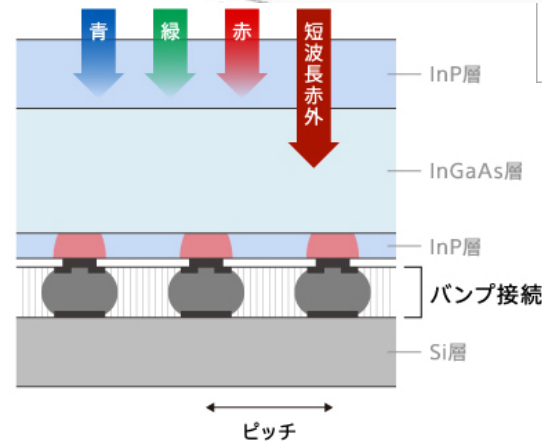
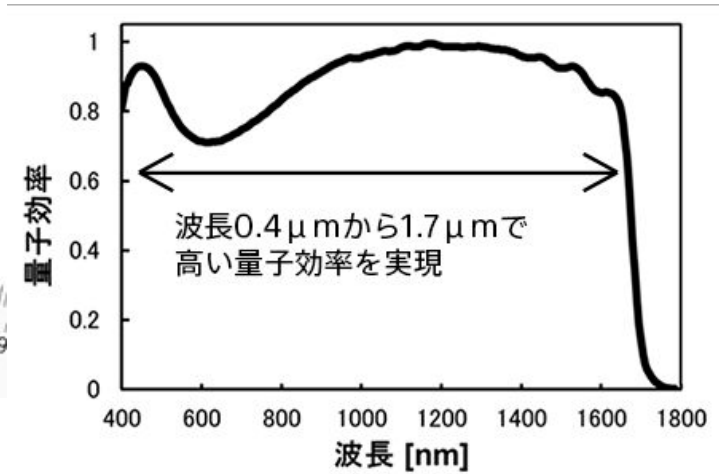
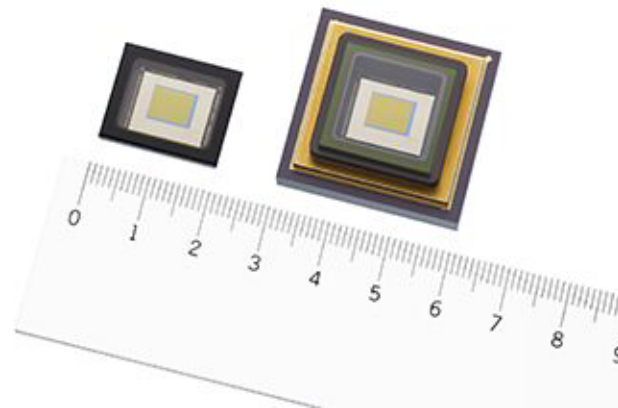
試作したVB grating の回折光の波面



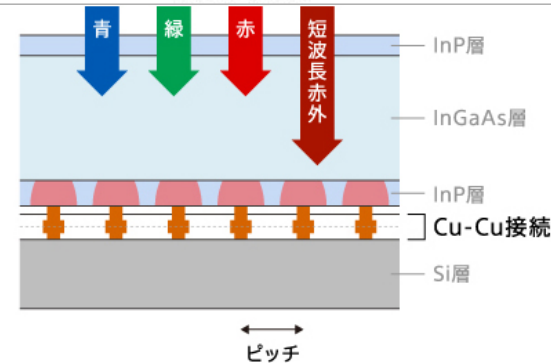
試作したVB gratingの回折効率



ALIS用InGaAs検出器の変更



パンプ接続の場合(従来)



Cu-Cu接続の場合

[<https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/202005/20-036/>]

Xenics (20 × 20 [μ m], 640 × 512 pix) → Sony (5 × 5 [μ m], 1280 × 1024 pix)

→ レンズの設計・製作が困難

$\Lambda=1.43\mu\text{m}$ (700g/mm) → $2.0\mu\text{m}$ (500g/mm)

→ 新しいVB gratingの製作方法を開発中。

TMT WFOS用Grating



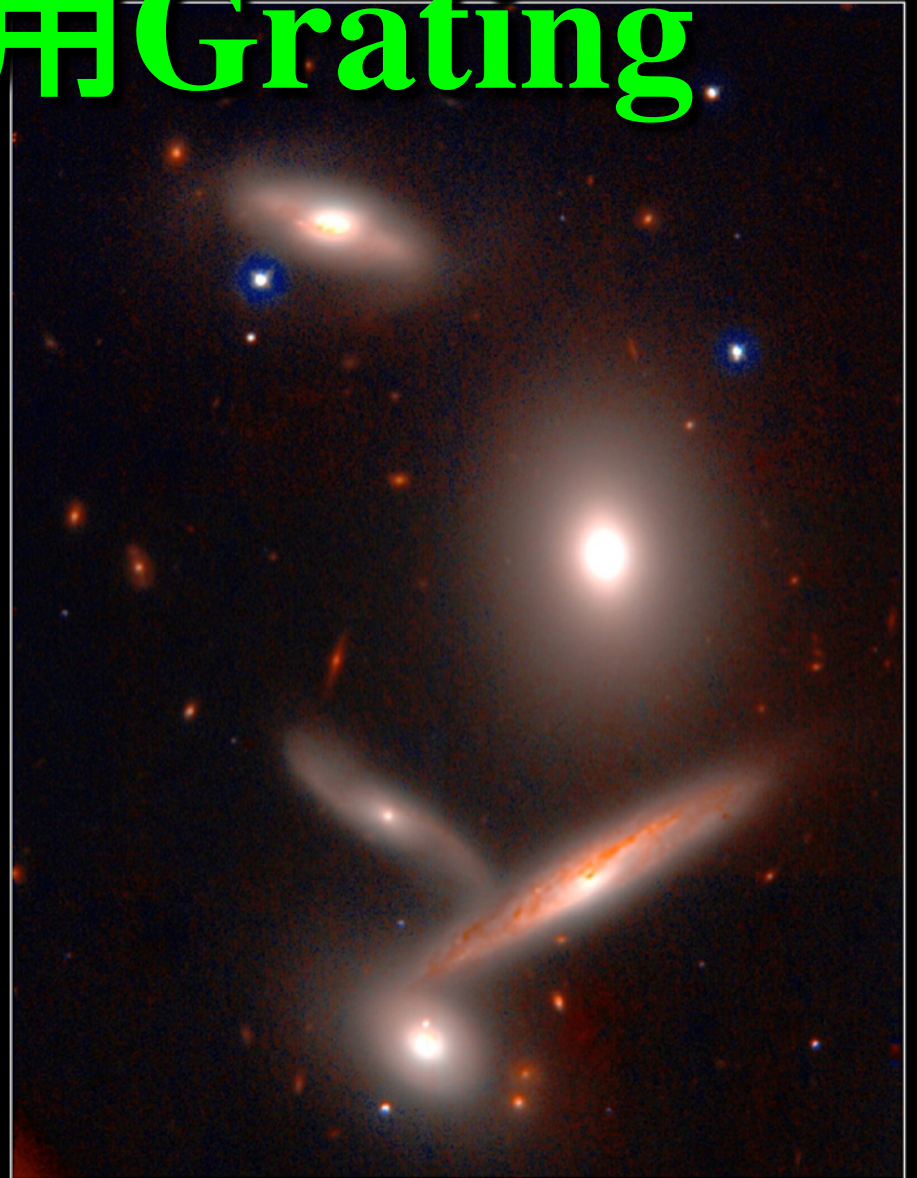
M 82 (NGC 3034)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

FOCAS (B, V, H α)

March 24, 2000

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



Hickson Compact Group 40

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

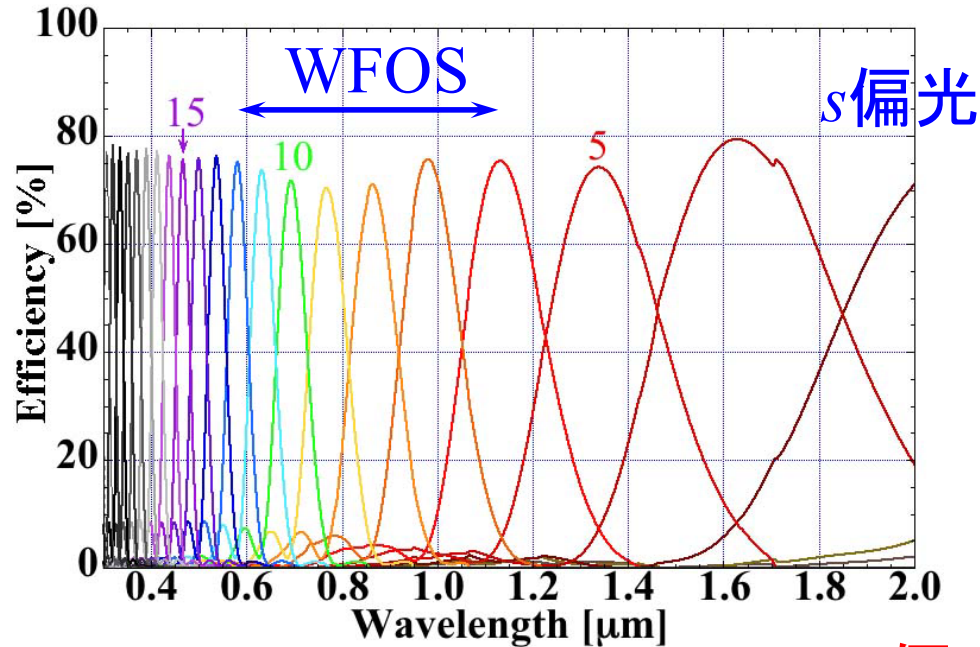
CISCO (J & K')

January 28, 1999

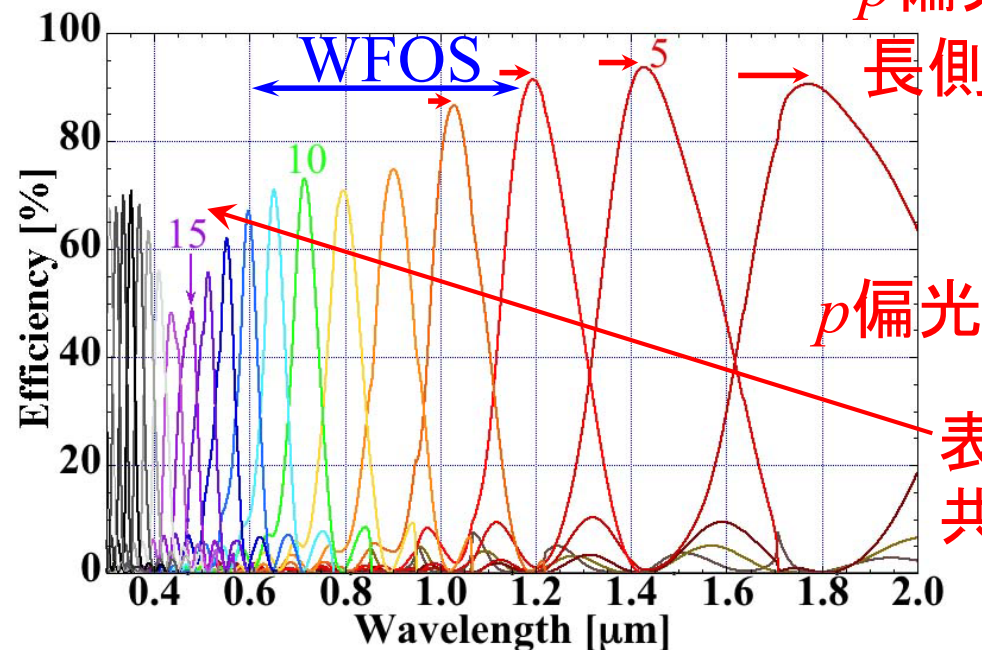
WFOS装置パラメーター

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

反射型のSurface relief gratingの回折効率

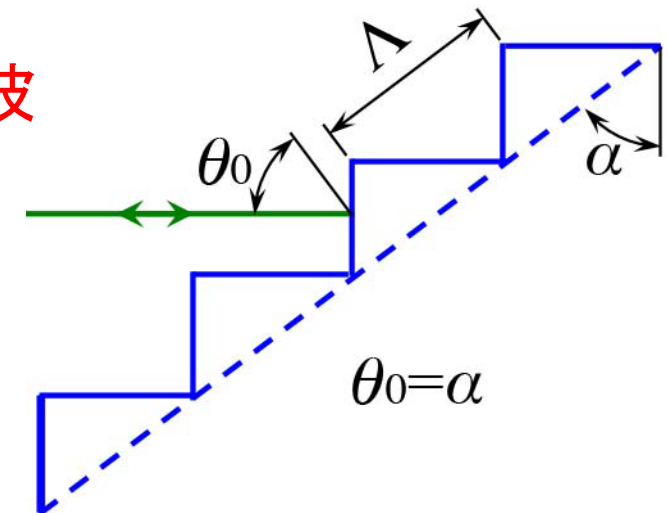


初期の設計: 必要なカメラ
(結像) レンズの口径より
大きな蛍石が入手できな
い。



p偏光の効率が長波
長側にシフトする

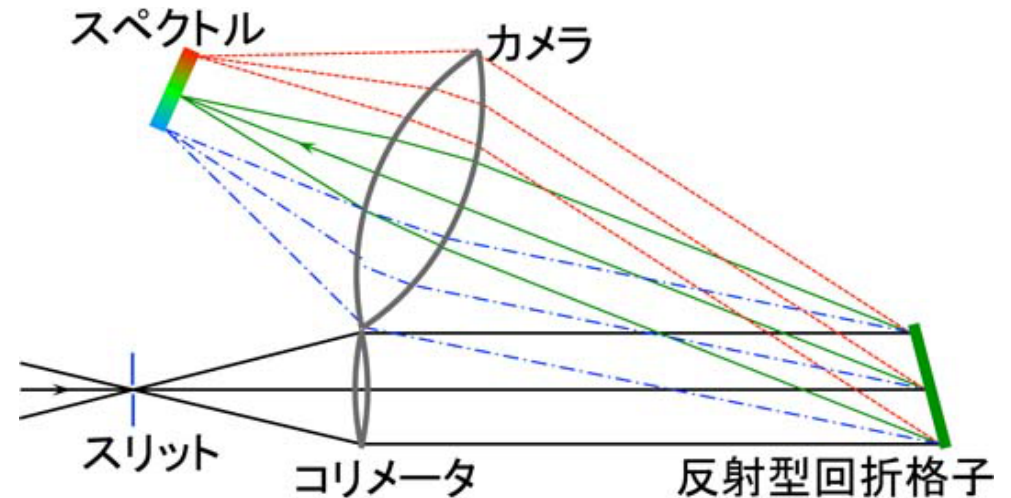
表面プラズモン
共鳴による損失?



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

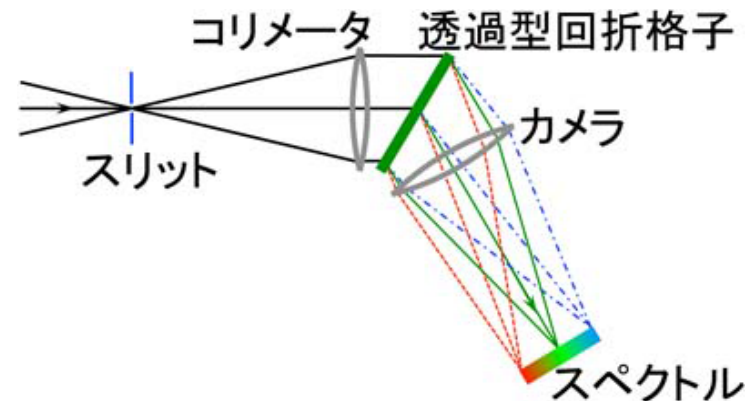
反射型と透過型の回折格子

- 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ロー配置*が困難。



反射型回折格子

- 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ロー配置*ができる。



透過型回折格子

*リトロローマウント: 入射角と回折角が等しい分光器光学系の配置。
入射と回折光束の断面形状が同一になるため収差が小さい。

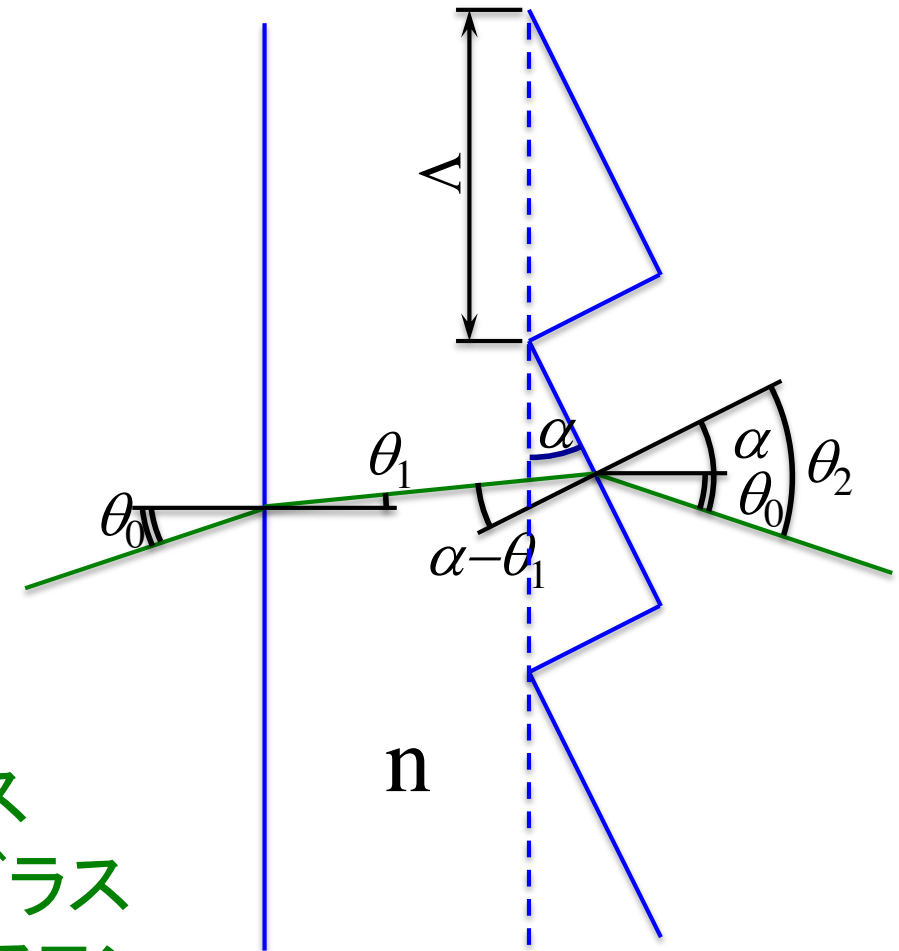
表面刻線型回折格子の限界

$$\begin{aligned}\sin \theta_0 &= n \sin \theta_1 \\ n \sin(\alpha - \theta_1) &= \sin \theta_2 \\ \theta_2 &= \alpha + \theta_0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}n \sin(\alpha - \theta_1) &= \sin(\alpha + \theta_0) \\ n (\sin \alpha \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \alpha) &= \sin \alpha \cos \theta_0 + \sin \theta_0 \cos \alpha \\ (n \cos \theta_1 - \cos \theta_0) \sin \alpha &= (\sin \theta_0 + n \sin \theta_1) \cos \alpha \\ &= 2 \sin \theta_0 \cos \alpha \\ \tan \alpha &= 2 \sin \theta_0 / (n \cos \theta_1 - \cos \theta_0)\end{aligned}$$

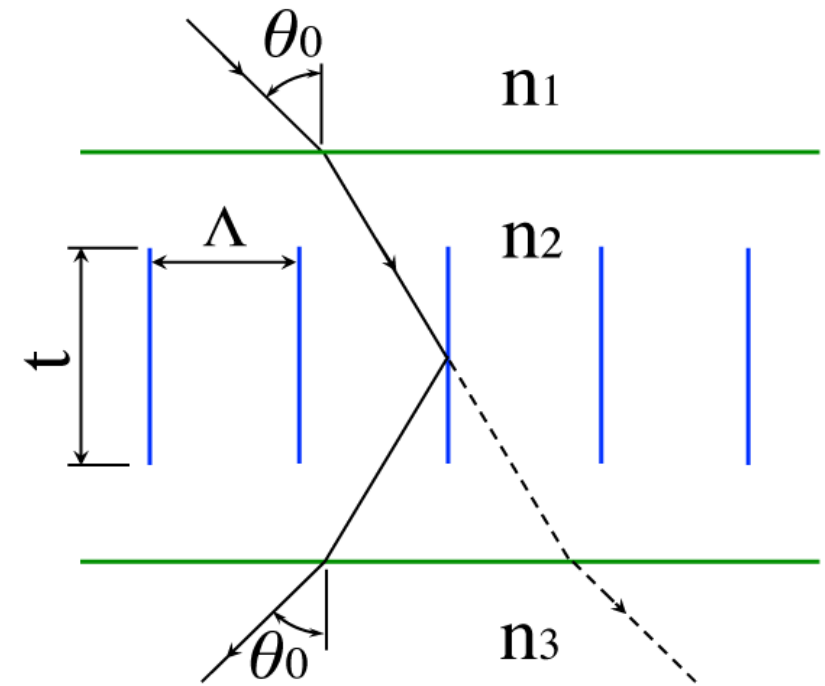
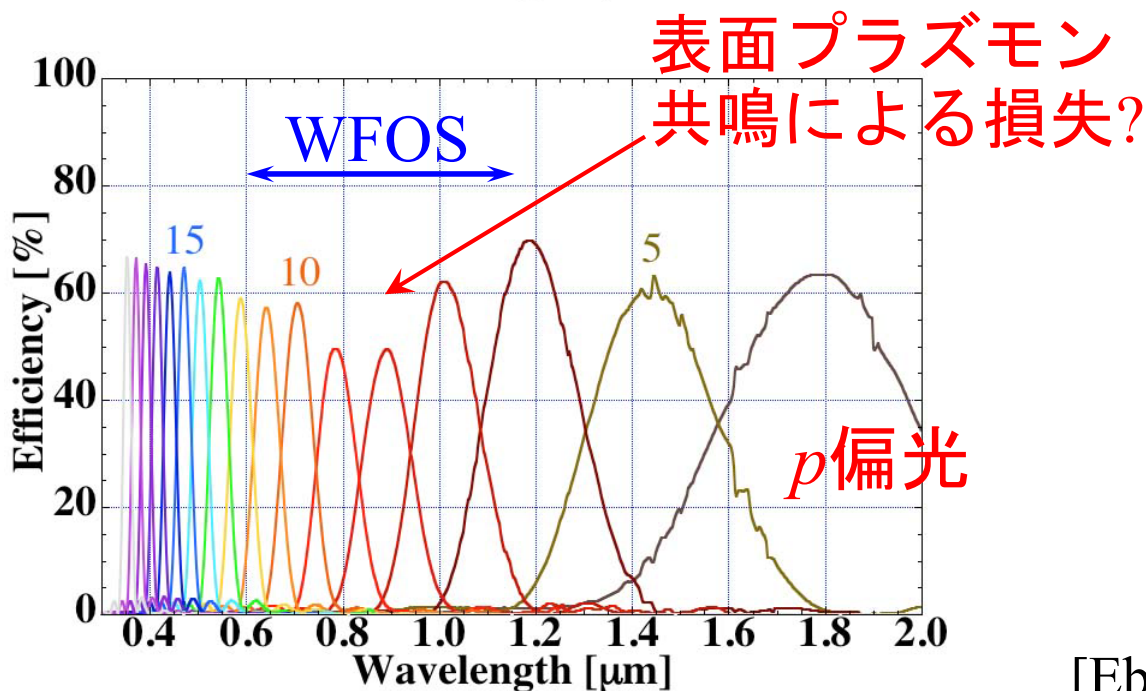
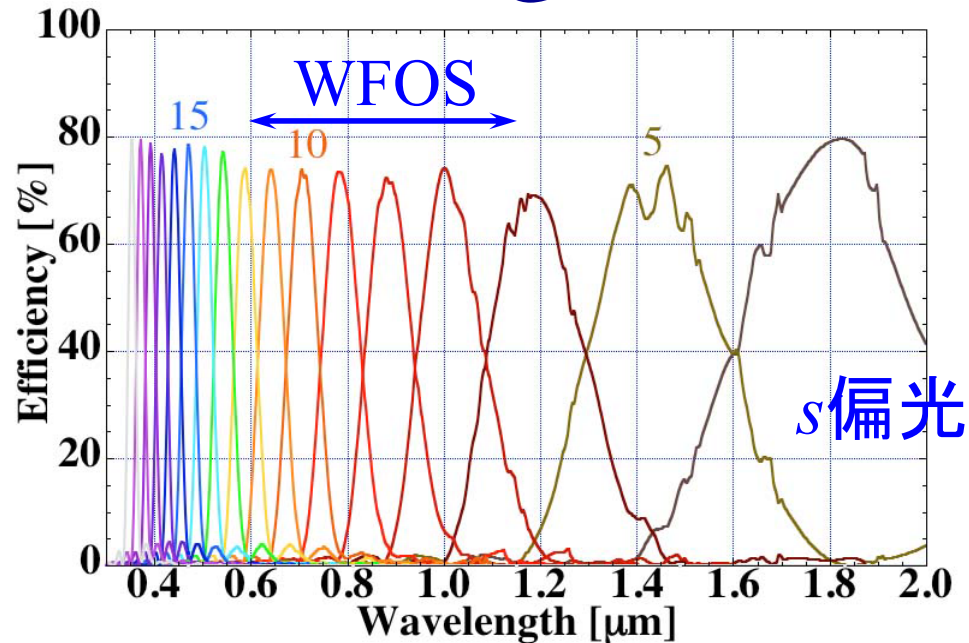
$n = 1.5, \theta_0 \leq 29^\circ$ ($\theta_2 > 90^\circ$) 光学ガラス
 $n = 2.0, \theta_0 \leq 40^\circ$ (同上) 高屈折率ガラス
 $n = 2.5, \theta_0 \leq 48^\circ$ (同上) ZnSe, ダイヤモン

ド



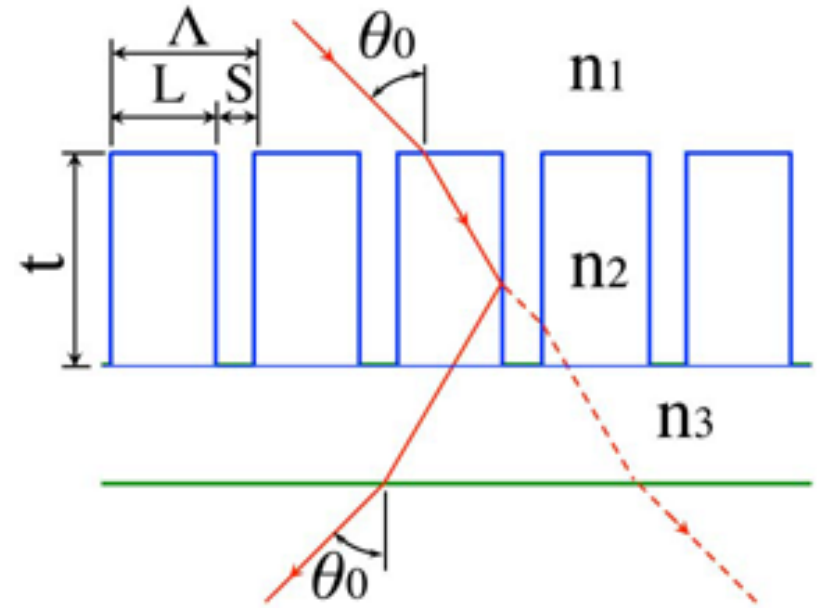
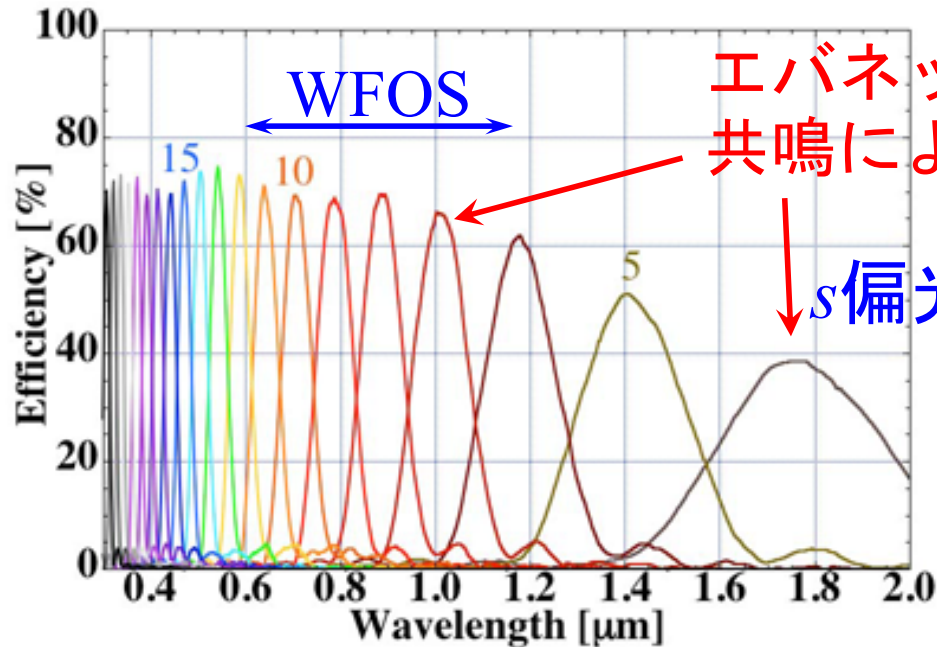
従来のノコギリ歯形状の表面刻線型回折格子は大きな回折角 (∞ 角度分散) 用には使用できない。

QB Gratingの回折効率

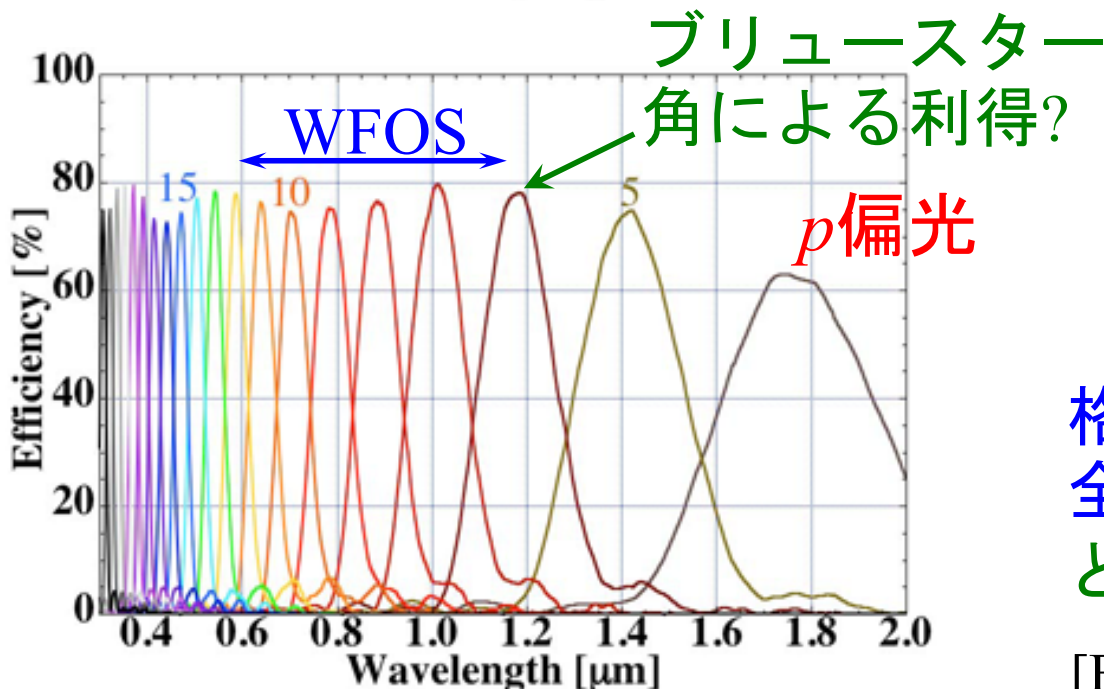


$\Lambda=5\mu\text{m}$, $\theta_0=45^\circ$, $n_1=1.0$,
 $n_2=1.54$, $n_3=1.0$, $t=9$
 μm , Al mirror: 50nm

VB Gratingの回折効率



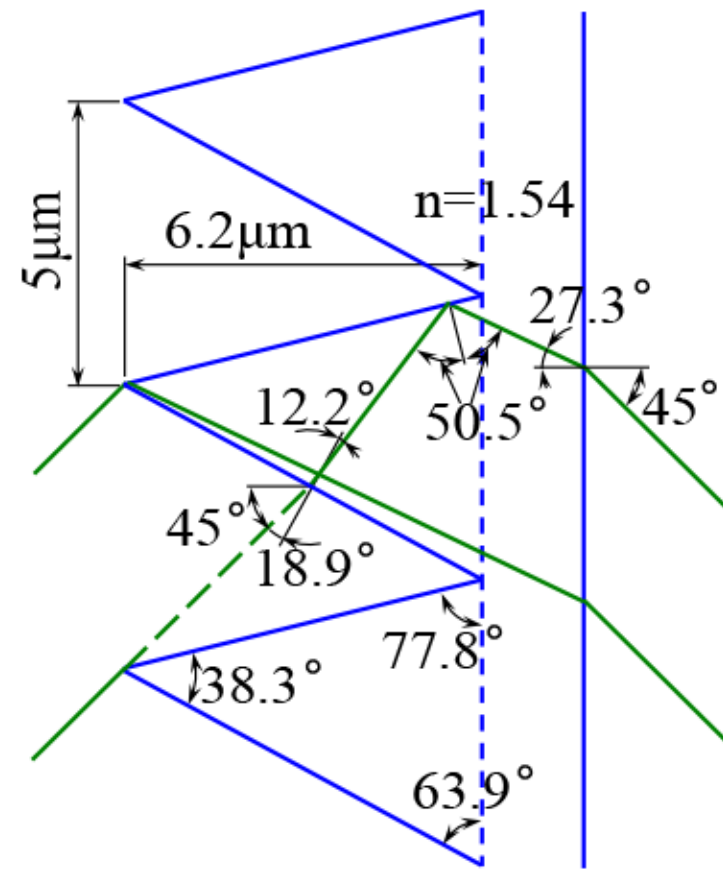
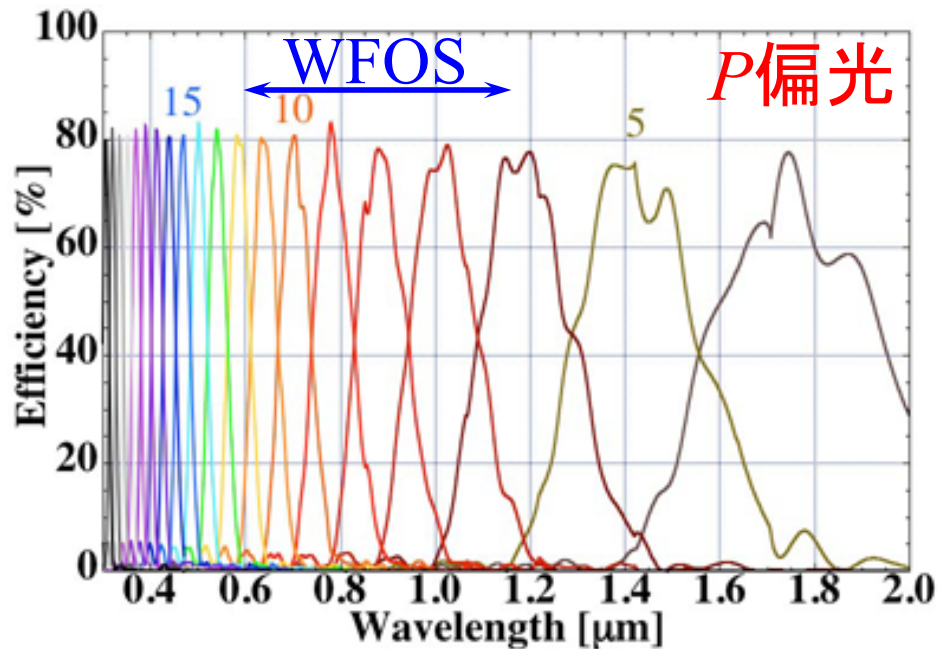
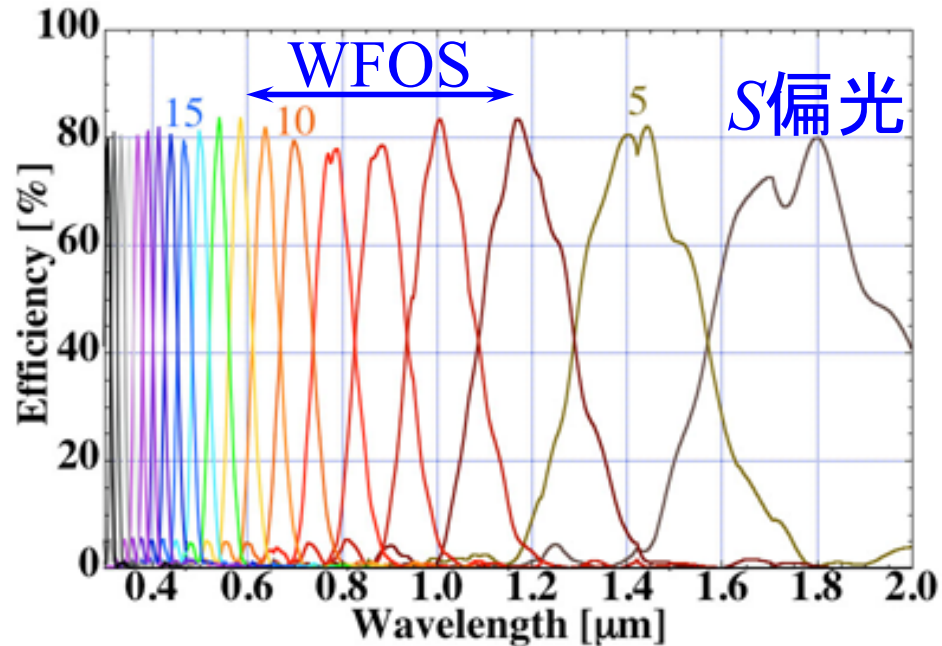
$\Lambda=5\mu\text{m}$, $L\&S=4.75:0.25\ [\mu\text{m}]$,
 $\theta_0=45^\circ$, $n_1=1.0$, $n_2=1.54$,
 $n_3=1.5$, $t=9\ \mu\text{m}$



格子の畝から溝の界面において
 全反射。→Quasi Bragg grating
 として機能。

[Ebizuka et al., CEAS Space Journal, 2020]

RFT Gratingの回折効率



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

内部反射によって高い回折効率を達成できる。

まとめ

	最適回折次数	Eff. [%] (λ - λ [μm])	開発状況
VPH grating → B-VPH grating	1次	~90 → ~100 (0.32~2.4)	感光性樹脂のVPHグリズムを8.2mすばる望遠鏡のFOCASやMOIRCS、岡山天体物理観測所のKOOLS用等を開発。
Volume binary (VB) grating	1次~	~ 100 (0.2~1000)	月極域探査用に石英VB gratingを試作。
LightSmyth社 のVB grating	1次~	~ 98 (0.4~2.4)	すばる望遠鏡のMOIRCS用高分散グリズムを開発（VPHグリズムの後継）。
RFT grating	数次~	~ 80 (0.32~2.4)	TMTのWFOS用を開発。反射型SR grating, QB grating, VB gratingとの効率を比較。
QB grating, QB immersion grating	数次~	~ 80 (0.2~1000)	金の融合接合やエンボス付ミラー基板の積層による製作方法を開発。
Immersion grating	1次~	~ 80 (1.2~1000)	超精密ダイヤモンド切削加工により6.5m TAO望遠鏡用Geグリズムを開発。