

成 果 報 告 書

(1) 研究の実施日程

研究項目	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
シリコンを鋳型にした樹脂のTrapezoid grating									←		→	
RFT grating					←		→					
グリズム用プリズムアレ				↔			←					→

(2) 研究成果

1. シリコンを鋳型にした樹脂の Trapezoid grating

新設計の WFOS 用の高効率かつ広帯域の透過型回折格子として、シリコンのサイクルエッチングとイオンミリング、シリコンの酸化・酸化膜除去の工程によって製作する Trapezoid grating のシリコン鋳型の製作方法を開発した。ナルックス (株) に依頼して試作したシリコンを鋳型として Fig. 1 のように Trapezoid grating のレプリカ加工実験を実施したところ、顕著な白濁が見られ、回折効率を測定したところピークが 30%程度であり、RCWA の計算値の 90%と比べて 1/3 程度であった。レプリカの離型工程を改善して白濁が生じない離型方法を見出すために新たにシリコン鋳型を製作した。

2. RFT grating

我々は TMT の WFOS 用の分散光学素子として 2015 年度から RFT grating の開発を進めていたが、WFOS の仕様変更のため、2019 年度以降は開発を中断していた。2021 年度に、すばる望遠鏡用に高次回折光を利用したエシエル分光観測装置: NINJA の開発が決まり、RFT grating が搭載できないか検討されたが、開発途上であるために、従来の SR 反射型 echelle grating を採用することになった。一方、2022 年 6 月の TMT 科学諮問委員会で策定された「TMT 次期装置実現に向けた開発ロードマップ」の候補に挙げられている「可視光～近赤外線を同時観測する広帯域高感度分光装置」や、すばる望遠鏡等の次世代観測装置用の透過型 echelle type grating として 2022 年度から RFT grating の開発を再開した。

2022 年度には硬質樹脂材料にダイヤモンド工具を用いたフライカットによって、クモリやバリが生じないような加工条件を見出し、2023 年度はフライカット (回転工具) によって硬質樹脂の RFT grating (頂角 38.3°, 20 本/mm) を試作した。2024 年度にはダイヤモンド工具のシェーパーカット (カンナのような加工) によって、頂角 38.3°の RFT grating を試作した。フライカットの RFT grating と比べるとシェーパーカットの方は格子表面の散乱が多く、効率が前後の次数に分配されており、633nm における中心次数の効率は

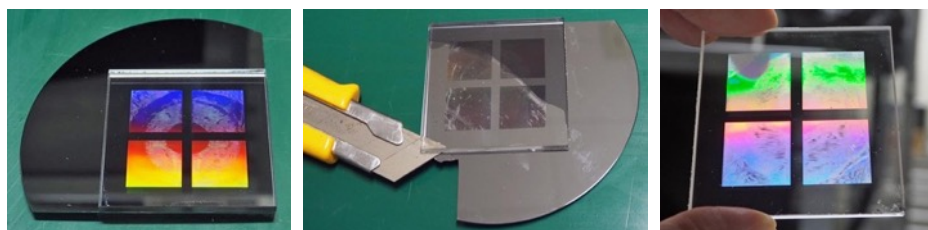


図 1 シリコンを鋳型とした Trapezoid grating のレプリカ加工。格子周期 $\Lambda=2.0\mu\text{m}$ (500 lp/mm), $L\&S=1.38:0.62\mu\text{m}$, $t=3.8\mu\text{m}$, アスペクト比 1:6.1.

RCWA の計算値が 84.4%に対して、フライカットが 59%, シェーパーカットが 36%、中心と ± 1 次の効率の合計がそれぞれ 88.0%, 74%, 57%、中心と ± 2 次までの効率の合計がそれぞれ 90.6%, 81%, 65%であった。

3. グリズム用プリズムアレイ

6.5mTAO 望遠鏡の近赤外線観測装置 SWIMS の z-J band グリズム用に ZnSe プリズムを使用した場合には VB grating の入射角と回折角は 22.6° であり、分解能は $R=3,500$ 程度なので、目標の分解能 ($R=4,600$) の約 75% である。そこで、装置のコリメートビーム部分の限られたサイズ内でグリズムの角度分散 (分解能) の向上を目的として入射用と出射用プリズムアレイを考案した。入射側に ZnSe プリズム、出射側プリズムアレイを組合せた場合に、VB grating の入射角と回折角は 30.9° であり、角度分散は、ZnSe プリズム付き VB グリズムの約 $1.44 (= \tan 30.9^\circ / \tan 22.6^\circ)$ 倍なので、分解能は約 $R=5,000$ である。この値は z-J band グリズムの目標の分解能を超えることができる。

2024 年度にはプリズムアレイ等の特許を実用化するための理研の予算を獲得することができ、日本特殊光学樹脂 (株) において、ダイヤモンド工具のフライカット加工によって出射用プリズムアレイ試作を行った。この際に表面粗さが小さくなるような加工条件を探索した。その結果、切り込み深さが $536\mu\text{m}$ の場合には、1 回で切り込むより、1 回目に $533\mu\text{m}$ 、2 回目に $3\mu\text{m}$ 切り込むと図 2 のように滑らかな表面が得られることがわかった。また、2 回目の切り込み深さを $4\mu\text{m}$ 以上と増やすと表面粗さが悪くなり、 $80\mu\text{m}$ では 1 回で切り込んだ場合と同等であった。

日本特殊光学樹脂 (株) のカタログ品の頂角 40° のプリズムアレイが入射用プリズムアレイの仕様に近いことが分かり、購入した。これらのプリズムアレイと岡山天体物理観測所の KOOLS (可視光分光撮像装置) 用に製作した 1630 本/mm の VPH grating の在庫品について、単体と適宜これらを組合せた効率を測定した。その結果、入射用プリズムアレイの透過率が約 70%、出射用が 80%であった。また、VPH grating (ピーク効率 75%) と出射用を組合せた場合には、それぞれの効率を掛け合せた値であった。しかし、入射用と VPH grating の組合せおよび、入射用と出射用プリズムアレイ、VPH grating を組合せたグリズムの効率はそれぞれの効率を掛け合せた値より低く、原因を調査中である。さらに複数枚のガラス製のプリズムロッドをガラス基板に配列したプリズムアレイの開発も行っている。

4. 成果報告

- 1) 海老塚 昇, 他, “天文学観測および宇宙探査用の新しい透過型回折格子 IV,” 第 29 回 天体スペクトル研究会集録, (2025), in press.
- 2) N. Ebizuka, *et al.*, "Novel transmission gratings with large angular dispersion, high-efficiency, and wide spectral bandwidth," Proc. SPIE **13100** (2024) 501-507.
- 3) N. Ebizuka, *et al.*, "Novel echelle grating: reflector facet transmission grating and prism array for grism," Proc. SPIE **13100** (2024) 5N1-5N6.

5. 特許出願

- 1) 海老塚 昇, 他, “空中像表示装置,” 特願 2024-123459 (2024). RFT grating から派生した特許。
- 2) 海老塚 昇, 他, “グリズム,” 特願 2024-096885 (2024).

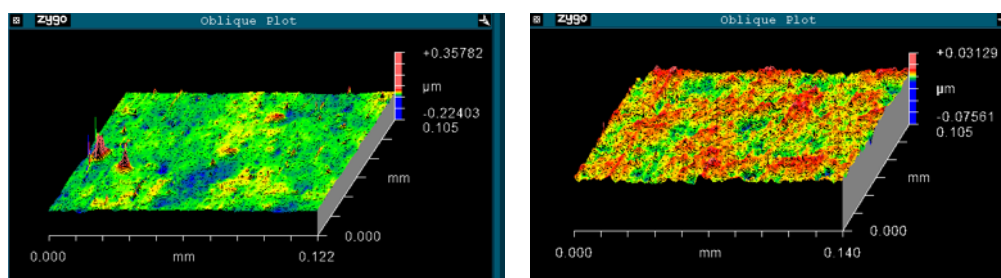


図 2 プリズムアレイの表面粗さ、左: $536\mu\text{m}$ 1 回切り込み PV: 582 nm, rms: 11.7 nm、右: $533+3\mu\text{m}$ 2 回切り込み PV: 107 nm, rms: 3.9 nm。