共同研究契約報告書

平成29年4月24日

平成29年6月2日付「高効率高分散回折格子の開発」 研究代表者:先端光学素子開発チーム・研究員・海老塚昇

上記共同研究契約について、下記のとおり報告いたします。

所在地:埼玉県和光市広沢2番1号

名 称:国立研究開発法人理化学研究所

代表者:外部資金室長 大塚 健一 印

記

1. 成果報告書(別紙のとおり)

2. 使用実績報告書(別紙のとおり)

以上

成果報告書

1. 研究の実績

(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
VB grating	SOQ (silicon on quartz)基板の試作 試作・Si 格子の酸化											
RFT grating	 効率計算 金型試作・測定 レプリカ加工 金型試作・測定 金型試作・測定 ペーン 											
Hybrid grism	レプリカ加工実験 効率測定・計算 工具手配 効率計算											
Si grism	試験加工・試作(フライカット)											
LightSmith transmission grating	効率測定 MOIRCS用効率計算依頼											
VPH grating	試作・効率測定 試作・効率測定 UV透過率測定 ↔											
回折格子測定装置								回転ス	テージ	^ジ ・測定	Ĕアー♪ ━►	製作

(2)研究の成果の説明

天体望遠鏡の大型化に伴って分光観測装置も巨大化してしまう。図1 左のように透過型回折格子は コリメータや結像光学素子の近傍に置くことができ、図1 右の反射型回折格子より、装置を小型化で きるために、高分散の透過型回折格子の実用化が望まれている。TMT の第一期観測装置である可視光 広視野分光撮像装置 WFOS は当初、反射型エシェルタイプ回折格子を採用する計画であったが、装置 全体が大型化して大幅なコストの上昇が懸念されている上に、コリメータやカメラレンズ用の口径が 現在入手可能な φ440mm の硝材より大きくなってしまうことがわかった。そのために透過型エシェル タイプ高分散回折格子の開発が検討されている。また、E-ELT や CFHT の後継望遠鏡の MSE (Maunakea Spectroscopic Explorer) 等にも、いくつかの可視光-近赤外線の高分散分光観測装置が提案されており、 それらのためにサイズが 400×600 ~ 600×900 [mm]程度の透過型エシェルタイプ回折格子の開発が検討 されている。

従来のノコギリ歯形状の表面刻線型(SR: surface relief) grating は、入射および出射する面の屈折率を 利用して光束を折り曲げるために、回折角が大きくなるのに従って屈折率を大きくしなければならな い。例えば、入射角および回折角が 45°の SR 回折格子の場合に格子の屈折率が 2.3 以上必要であるた め、光学ガラスや樹脂等を利用できない。一方、屈折率が正弦波状に変調された Volume phase holographic



図1 透過型(左)と(反射型右)回折格子の分光計のサイズ。



(VPH) grating は1 次回折光のS あるいはP 偏光に対して最大 100%の回折効率を達成可能であり、大き な角度分散を達成できるために、すばる望遠鏡をはじめ多くの天文学観測装置に搭載されている。しか し、VPH grating はS と P 偏光との回折効率の波長特性が異なるために、角度分散が大きくなると自然 偏光や円偏光等に対して高い効率を達成できなくなってしまう上、高次の回折効率が低いためにエシ ェルタイプの回折格子として利用できない。

我々は TMT 戦略基礎開発経費等の支援を受けてエシェルタイプの透過型回折格子として Reflector facet transmission (RFT) grating や Volume binary (VB) grating を開発している。また、RFT grating のプロトタイプとして MOIRCS 用に高屈折率プリズムと格子が鋭角な SR grating を組み合わせた Hybrid grism や LightSmith 社製の透過型回折格子を採用するグリズム(直視回折格子)、VB grating を採用する nuMOIRCS 用のエシェルグリズム、液晶を用いた複屈折性 VPH grating、近-中間赤外線用のシリコンや ゲルマニウムの Immersion grating 等を開発している。

1. RFT grating の開発

RFT grating は図 2 のようにノコギリ歯形状の格子の一方の面から入射した光束が、もう一方の面で 反射して格子の裏面の平面から回折光が出射する新しい透過型回折格子である。屈折を利用する格子 が階段形状の従来の SR 回折格子のと比べて、RFT 回折格子は格子の内部反射を利用するために、格 子の屈折率が小さくても大きな回折角にも対応できる

WFOS は 5~8 次あるいは 8~13 次の高次の高分散回折格子とプリズムまたは低分散回折格子を組み合わせて 2 次元検出器上にスペクトルを折り込むエシェル分光観測を行う。WFOS 用の透過型回折格子は入射角と回折角が 36~53°であり、WFOS 用の RTF 回折格子は、格子の屈折率が 1.54 の場合に、格子の頂角が 35~44°である。そこで、格子の屈折率が 1.54 の RFT grating について入射角および回折角が 45°の場合に厳密結合波解析(RCWA)法を用いた数値計算(理研の岡本 隆之 専任研究員)によって 回折効率を求めた結果、図 3 のように 4 次以上の高次回折光において 80%程度の回折効率を達成できることがわかった。この場合の格子の頂角は 38.3°である。

RFT grating の製作方法として、刃先を格子形状と同じ角度の単結晶ダイアモンドバイトを超精密加 工装置に取り付けて無電解メッキのニッケル・リン合金のワークピースをシェーパー切削加工によっ て金型を製作する。その金型に離型材を塗布して紫外線硬化型等の樹脂を滴下した後に平行平面基板 を置き、基板側から紫外線露光を行ない、金型を剥離することによって完成する。昨年度に理研の超精



図 4 RFT grating のシェーパー切削加工(左)と格子の SEM 写真(右)。



密加工装置にダイアモンド工具を取り付けて、シェーパー加工(カンナで削るような加工、図4左)に よって金型の試作を2回行った(理研の細畠 拓也 研究員と竹田 真宏 氏)。1回目の試作品は格子の 頂点付近にカエシ(バリ)があり、レプリカ加工を行った結果、樹脂が金型から離型できなくなってし まった。2回目の試作において、ほぼ理想的な格子形状(図4右)を形成できる加工プログラムを見出 した。近日中にレプリカ加工実験用の金型の試作を行う予定である。

2. MOIRCS 用 Hybrid grism (中分散エシェル分光用)の開発

WFOSのRTF grating は格子の頂角が 35-44°と小さく、金型やレプリカ加工の工程において困難が予 想された。そこで、MOIRCSの中分散グリズム用としての、格子の頂角が 60°程度のハイブリッド・グ リズム用に表面刻線型(SR)回折格子を試作して、WFOSのRTF gratingを製作する場合の問題点を明 らかにすることになった。MOIRCS用の中分散グリズムは図 5 左のような ZnSe プリズム (n=2.45@1.65µm)にレプリカ(n=1.52@1.65µm)のSR gratingを組合せたハイブリッド・グリズムで ある。当初の設計では、ハイブリッド・グリズムは格子間隔が 10.8µm、光束が出射する斜面の角度が β=64.8°、格子の頂角がγ=61.8°であった。一昨年度に理研の超精密加工装置を用いて、シェーパー切削 加工(カンナがけのような加工)によって 50×50 のレプリカ実験用の金型を試作した(細畠 拓也 研究 員と竹田 真宏 氏)。昨年度に島津製作所に依頼してレプリカの加工実験を行った。

試作したハイブリッド・グリズムのレプリカ実験用金型(図6左上)とレプリカ1世代目(中央上) と2世代目(右上)の電子顕微鏡写真から、金型が忠実に転写されていることがわかる。また、金型と レプリカの回折光の波面を測定した結果、金型の回折光波面(反射、図6左下)がRMS: \/8@633nm 程 度であり、可視光用の反射型回折格子用としても実用的な値であった。またレプリカの回折光波面(透 過)は1世代目がRMS: \/8 程度(中央下)、2世代目がRMS: \/14 程度(右下)であった。MOIRCS用 のグリズムは使用波長が0.9µm以上なので1世代目と2世代目のレプリカともに仕様を充分満足する。

レプリカ試作品の回折効率は、ピークの実測値が 50%程度であった。RCWA を用いた数値計算によって効率の分光特性を調べたところ、ピーク効率が約 55%であり、波長帯域が短波長側にシフトしているために観測波長帯の回折効率が全体に低下していることがわかった。そこで、光束が出射する斜面の角度(β) や格子の頂角(γ)を変化させて効率の分光特性を調べた結果、図5右のような格子形状(β=65.5°,γ=56.0°)の場合に波長帯域と回折効率が最適であり、ピークの計算値が約 60%(実測値が 55% 程度の見込み)であることがわかった。今年度はMOIRCS ハイブリッド・グリズムの実機用(口径 70×70)の透過型回折格子の製作を行う予定である。



図 6 ハイブリッド・グリズムの金型(左)とレプリカ 1 世代目(中央)と 2 世代目(右)レプリカ (右)の格子の透過型電子顕微鏡写真(上段)と回折光の波面(下段)。 左下: PV: 0.79\, RMS: 0.12\ (反射)、中央下: PV: 0.76\, RMS: 0.12\ (透過)、右下: 0.48\, RMS: 0.07\ (透過)。



図 7 VB 回折格子(左)と VB グリズム(中央)の概念図および、MOIRCS のエシェル・グリズム用の VB grating の回折効率(右)。ni=1.33, n2=1.6, n3=1.6, A= 5.1 µm, L&S = 4.6:0.5 [µm], t = 16 µm, θ_{θ} =28.4°.

3. Volume Binary grating (MOIRCS 高分散エシェルグリズム用)の開発。

ULTIMATE Subaru の第一期観測装置として、既存の MOIRCS を改造して分光性能を向上させる nuMOIRCS が予定されている。ULTIMATE Subaru は、すばる望遠鏡に新しい Ground layer adaptive optics (GLAO)によって限界等級と空間分解能を向上させるとともに、分光器の波長分解能も向上させること ができる。nuMOIRCS に搭載されるエシェル・グリズムは 3~6 次回折光のスペクトルを、垂直分散光 学素子としての直視プリズムと組み合わせて、検出器上に折り込むことによって、0.8~1.8µm の広い波 長範囲を同時に高分散分光観測ができるようになり、その性能向上の鍵となる。

我々は RCWA 法を用いた数値計算の結果から、図7左のように格子側面における全反射を利用する 高アスペクト比の Volume binary (VB) grating によって、高い回折効率を達成できることを見出し、開発 することになった。nuMOIRCS 用の VB グリズムは図7中央のように、2個のプリズムで回折格子を 挟む構造であり、VPH グリズムと同様に高屈折率プリズム(ZnSe: n=2.45@1.65µm)と回折格子の界 面における臨界角の制限が緩やかであるために、高分散グリズム用として最適である。図7 右は nuMOIRCS のエシェル・グリズム用の VB grating の回折効率である。

VB grating は図8左に示すような工程によって高アスペクト比のシリコンの回折格子を加工し、シリ コン全体を酸化して石英の回折格子を得る。さらに格子の溝に高屈折率の樹脂を充填することによっ て VB grating が完成する。一昨年度に豊田工業大学・ナノテクノロジープラットフォーム(ナノテク PF)との共同研究において、酸化膜除去の行程まで行い、図8右のように、それぞれ幅0.44µmと0.8µm の壁面が極めて滑らかな格子が得られている。しかし、シリコンの高アスペクト格子を酸化させたとこ



図 8 高アスペクト比の VB grating の製作方法(左)と試作した高アスペクト比のシリコン VB 回折 格子(酸化膜除去まで、格子周期 Λ = 5.1 μ m、右上:高さ t=10 μ m、幅 s=0.44 μ m。右下:t=20 μ m、s=0.80 μ m)。

ろ、格子がうねってしまった。その理由として酸化処理の約 1400K から常温の 300K に戻す際に、線 膨張係数が異なるために基板のシリコンが格子の石英より大きく収縮したためであると考えられる。

シリコンを酸化して全体が石英の VB grating を開発するために、豊田工大・ナノテク PF において SOQ (Silicon on Quartz) 基板の開発を行なった。SOQ 基板は、まず石英基板とシリコン基板を洗浄し て酸素プラズマを照射した後に、純水に浸漬して乾燥し、プラズマ照射面同士を接合して 200°C程度で 加熱すると石英とシリコンが強固に接合する。さらにシリコン側を厚さ 20µm 程度まで研磨する工程 によって SOQ 基板が完成する。昨年度に6枚の SOQ 基板を製作して、VB grating の試作を行った。現 時点においてマスク露光の密着方法やサイクル・エッチングの工程の SOQ 基板の下部電界を調整する 等によって、エッチング深さと格子の幅が均質になる条件を探っている。

4. LightSmith Technologies 社製の透過型回折格子(1回折光用)

MOIRCS は多天体分光機能を有し、焦点面上に置かれるスリットマスクには、光軸から離れた位置 にもスリットが切られるために、分散光学素子に入射する光束が傾く。MOIRCS の高分散グリズムと して搭載されている VPH 回折格子は、ピーク効率が高いものの、帯域幅が狭く、斜め入射光束に対し てピーク波長が変化してしまうために、中心から離れたスリット位置のスペクトルが観測波長帯域の 端の効率が著しく低下してしまうという欠点がある。

LightSmith Technologies 社製の透過型回折格子は、カタログによると、ピーク回折効率が94%以上である上に帯域幅がVPH 回折格子の数倍広い。我々は1,398本/mmの透過型回折格子(800nm 用)を購入して分光回折効率を測定した結果、図9のように仕様値(800±20nm において、回折効率94%以上)を満足することを確認した。また、Jハンド用(1,100-1,400nm,819本/mm)とHバンド用(1,500-1800nm,614本/mm)の透過型回折格子の回折効率の数値計算をLightSmith Technologies 社製に依頼した結果、いずれも現存のVPH グリズムより帯域幅が広くなることを確認した。そこで MOIRCS 用に、まずはHバンドのグリズムを開発することになった(児玉 東北大教授の科研費基盤 A)。

5. VPH grating の開発

従来のVPH grating は前述のようにSとP 偏光の回折効率特性が異なるために、角度分散が大きくなると自然偏光等に対して高い効率を達成できない。Birefringence VPH (B-VPH) grating は、ホログラム記録材料として液晶等の光学異方性媒質と等方生媒質、あるいは2種類の光学異方性媒質を組み合わせ、任意のブラッグ角において光学異方性媒質と等方生媒質の屈折率を調整してS偏光とP偏光の1次回折光の回折効率特性を一致させることによって、自然偏光や円偏光に対しても高い回折効率を達成できるようになる。

一昨年度まで我々は可視光硬化型樹脂と UV 硬化型液晶等を混合して記録材料とした B-VPH grating の試作を行ってきた。しかし、前節のように LightSmith Technologies 社製の透過型回折格子の性能が従来の VPH grating を凌駕することが分かったので、昨年度は B-VPH grating の開発を休止した。ただし、



図 9 LightSmith Technologies 社製の透過型回折格子の透過率のカタログ値(左)実測値(左)。1398.6 本/mm, 入射角: 34°。



図 10 フライカットによるシリコンリズムの試作(左)、MIMIZUKU 用グリズム(中央)格子の光学顕微鏡グ写真(右)。

LightSmith 社製の透過型回折格子は、中分散用(入射角 30°以下)では高い回折効率を達成できず、現時点において、波長 700nm 以下については製造が困難である。そのため、WFOS 用の低分散回折格子 やクロスディスパーザ等については、大面積の加工が容易な VPH grating が使用される。

現在では日本ペイント製のホログラム記録材料が入手できないために、可視光硬化型樹脂と高屈折率の紫外線硬化型樹脂を混合した記録材料の開発を行なっている。現時点において、この記録材料には VPH gratingの干渉露光工程において露光量が多くなると白濁するという欠点がある。また、回折効率 が想定より低い。白濁の原因として、樹脂の結晶化が考えられる。一方、効率が低いのは可視光レーザ の干渉露光中の明暗格子において、可視光硬化型樹脂のモノマーの重合によって生ずる2種類の樹脂 のモノマーの濃度勾配を緩和するためのモノマーの拡散が少なく、樹脂の分離が十分でないために、屈 折率の変調量が小さいことが考えられる。今後は専門家に意見を求め、結晶化の対策や屈折率変調量の 向上を目指す。

また、昨年度にWFOSの設計チームからクロスディスパーザとして使用される VPH grating の紫外 線透過率について問い合わせがあり、手持ちの日本ペイント製ホログラム記録材料と重クロム酸ゼラ チンの VPH grating、および石英基板を用いて可視光硬化型樹脂と紫外線硬化型樹脂の VPH grating を試 作して、これらの分光透過率データを彼らに提供した。

6. 近-中間赤外線グリズムの開発

近-中間赤外線用 Immersion grating のプロトタイプとして、2015 年度より TAO 望遠鏡の MIMIZUKU 近-中間赤外線 (2~5.3µm) 用のシリコン grism の開発を行っている。数回の試験加工を経て、昨年度に 超精密加工装置にダイアモンド工具を取り付けて、図 10 のようにシリコンのグリズム (24×24×t2.8, 頂角 4.2°,)をフライカット加工 (回転工具による加工) によって試作を行った。しかし、図 10 右のよう に格子面が粗面になってしまい、効率が数%程度であった。今年度はゲルマニウムのグリズムも、フラ イカット加工によって、試作を行う予定である。

審查付原著論文

N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings for next-generation instruments of astronomical observations," *Proc. SPIE* 10233, 0M1-0M8, 2017.

集録論文

- N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Transmission gratings and immersion gratings for instruments of Subaru Telescope and TMT," *Proc. The 9th International Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, C18 (USB-165), 2017.
- 2) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings for astronomical instruments," *Proc. Workshop on dispersing elements for astronomy: New trends and possibility*, 45-46, 2017.

- N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings of high dispersion and high efficiency," *Proc. EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2017 (DO2017)*, 57-58 (USB), 2017.
- 4) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細畠 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 佐藤 慎也, 橋本 信幸, 田中 壱, 服部 堯, 尾崎 忍夫, 青木 和光, "次世代天文学観測装置用の新し い高分散回折格子 III", 第42 回光学シンポジウム講演予稿集, 27-30, 2017.

国際会議発表

- 1) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Current Status of Novel Gratings for Next Generation Astronomical Instruments V," Subaru Users' Meeting FY2017, 2018 年1月 17-19 日,国立 天文台(三鷹市),ポスター発表
- 2) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel diffraction gratings for astronomical instruments," *WFIRST-Subaru Synergistic Observation Workshop*, 2017 年 12 月 18-21 日,国立天文台 (三鷹市),ポスター発表
- 3) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Transmission gratings and immersion gratings for instruments of Subaru Telescope and TMT," *The 9th International Conf. on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21)*, 2017 年 11 月 14-17 日, 広島国際会議場(広島市), 口頭 発表
- 4) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings for astronomical instruments," *Workshop on dispersing elements for astronomy: New trends and possibility*, 2017 年 10 月 9-11 日, ミラノ水族館(イタリア・ミラノ), ポスター発表
- 5) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings of high dispersion and high efficiency," *Proc. EOS Topical Meeting on Diffractive Optics 2017 (DO2017)*, 2017 年 9 月 4-7 日, Karelia house レストラン (フィンランド・ヨエンスー), 口頭発表
- 6) N. Ebizuka, T. Okamoto, M. Takeda, T. Hosobata, Y. Yamagata, M. Sasaki, M. Uomoto, T. Shimatsu, S. Sato, N. Hashimoto, I. Tanaka, T. Hattori, S. Ozaki, W. Aoki, "Novel gratings for next-generation instruments of astronomical observations," *Holography: Advances and Modern Trends* (SPIE), 2017 年 4 月 24-27 日, Clarion Congress Hotel (チェコ・プラハ), 口頭発表

国内会議発表

- 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細畠 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 尾崎 忍夫, 青木 和光, "8.2m すばる望遠鏡および次世代 30m 望遠鏡: TMT 用 の新しい高分散回折格子 4,"理研シンポジウム:第4回 光量子工学研究, 2017年11月29, 30 日, 中小企業活性化センター(アエル, 仙台市), ポスター発表
- 2) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細畠 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 佐藤 慎也, 橋本 信幸, 田中 壱, 服部 堯, 尾崎 忍夫, 青木 和光, "次世代天文学観測装置用の新し い回折格子 V", 第7回 可視赤外線観測装置技術ワークショップ, 2017年11月16, 17日, 京都 大学(京都市), 口頭およびポスター発表
- 3) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細畠 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 田辺 綾乃, 橋本 信幸, 尾崎 忍夫, 青木 和光, "次世代観測装置用の新しい回折格子 III", 2017 年度

光学赤外線天文連絡会シンポジウム「国際協力で実現させる 2020 年代の光学赤外線天文学」, 2017 年7月 24-26 日, 国立天文台 (三鷹市),ポスター発表

4) 海老塚 昇, 岡本 隆之, 竹田 真宏, 細畠 拓也, 山形 豊, 佐々木 実, 魚本 幸, 島津 武仁, 佐藤 慎也, 橋本 信幸, 田中 壱, 服部 堯, 尾崎 忍夫, 青木 和光, "次世代天文学観測装置用の新し い高分散回折格子 III", 第42回光学シンポジウム, 2017年6月22, 23日, 東大生産研(東京都 目黒区),口頭発表

特許

海老塚昇、岡本隆之、細畠拓也、山形豊、尾崎忍夫、"透過型回折格子、光導波路、ならびに透過型回折格子の使用方法および設計方法"、 PTC/JP2017/13798 (2017)