

# 天体観測用分光素子グリズム

小館香椎子\*・岡 恵子\*・海老塚 昇\*\*

## Spectroscopic Element Grism for Astronomical Observation

Kashiko KODATE\*, Keiko OKA\* and Noboru EBIZUKA\*\*

We have developed and designed a grism with high resolution power level 5000 in the visible light domain (350-1000 nm), for the Subaru telescope on Mauna Kea, Hawaii. In order to improve both efficiency and cost effectiveness, we proposed a new type of volume phase holographic (VPH) grism by sandwiching a VPH grating between two prisms. Conditions of the optimal fabrication to acquire the high dispersion were examined using rigorous coupled wave analysis (RCWA). The liquid photopolymer with large refractive index modulation was used for trial fabrication of VPH grating. As a result, a large size of VPH grating (110×106 mm<sup>2</sup>, period: 1.0 μm, thickness: 10 μm) was fabricated by the two beams interference exposure. This achieved the first order diffraction efficiency of about 90% by the Bragg condition (7.48 degree) at the incident wavelength of 400 nm.

**Key words:** volume phase holographic grating, refractive index modulation, rigorous coupled wave analysis

天文学は人類の文明とともに発生した古くからある学問のひとつであるが、19世紀になって望遠鏡と分光器の性能向上とともに、分光観測で取得したスペクトル解析により、飛躍的に進展した<sup>1)</sup>。この天体分光観測用の分散素子としては、古くから用いられていたプリズムに代わり、今では最も暗い等級の恒星の観測を可能とする性能をもつ回折光学素子が用いられている。また、アメリカ合衆国ハワイ島マウナケア山頂には、近年の技術革新によりすばる望遠鏡(口径8.2 m)<sup>2)</sup>やケック望遠鏡(口径10 m)などの大口径望遠鏡が相次いで建設され、これらの大口径望遠鏡用に撮像と分光の2つの機能をもつ新しい観測装置の開発が進められている<sup>3)</sup>。さらに、検出器としてのCCDカメラなどの半導体撮像素子の感度の向上に伴い、より遠くの暗い天体からの光を高効率・高分解能で観測する分光素子が要求されている。これらの要求を満たす分光素子として、図1(a)に示すようにプリズムと回折格子を組み合わせ、任意の次数、任意の波長を直進させる、直視分散素子である表

面形状型グリズムが開発されている<sup>2)</sup>。グリズムは、(1)撮像から分光観測に容易に切り替えられる、(2)光学系を直線上に配置できるので分光装置の小型、省スペース化ができる、(3)理想的な直視型の光学系なのでスペクトルの歪みがない、などのすぐれた特徴をもっているため、すばる望遠鏡の微光天体撮影分光装置(faint object camera and spectrograph; FOCAS)をはじめ多くの観測装置に搭載され、観測も始まっている<sup>3)</sup>。

この表面形状型グリズムは、ルーリングエンジンで作製したブレード格子を母型とする高分子樹脂のレプリカ格子とプリズムを張り合わせた構造になっている。したがって、より高い分解能や回折効率を得るには、測定波長に合わせた微細な周期のブレード形状のマスター格子の作製が必要となるが、現状の技術では難しい。

この問題を解決する分光素子として、図1(b)に示す2つのプリズムで屈折率変調格子を挟んだ構造をもつ、volume phase holographic (VPH) グリズムを筆者らは提

\*日本女子大学理学部(〒112-8681 東京都文京区目白台2-8-1) E-mail: kodate@fc.jwu.ac.jp

\*\*理化学研究所(〒351-0198 和光市広沢2-1)

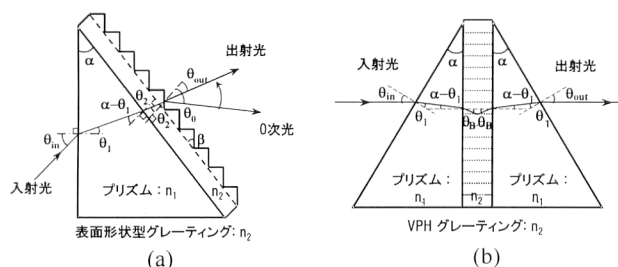


図1 天体観測用分散素子グリズムの原理。(a) 表面形状型グリズム, (b) VPH グリズム.  $\alpha$ : プリズムの頂角,  $\beta$ : グレーティングの頂角,  $\theta_{in}$ : 入射角度,  $\theta_{out}$ : 1次光の出射角度,  $\theta_0$ : 0次光の出射角度,  $\theta_B$ : ブラッグ入射,  $n_1$ : プリズムの屈折率,  $n_2$ : グレーティングの屈折率.

案している<sup>4)</sup>. この VPH グリズム用の VPH グレーティングとして, ホログラフィック法で作製した屈折率変調格子を用いているので, 光学系の調整のみで仕様を変えられ, 作製も容易で比較的安価である. このような利点をもつ VPH グレーティングの高性能化に向けて, 筆者らは厳密波結合解析 (rigorous coupled wave analysis; RCWA) の数値解析プログラム<sup>5)</sup>を適用し, 感光性高分子材料の屈折率変調量, 周期と膜厚などの作製条件の最適化の検討を加えている.

本稿では, すばる望遠鏡 FOCAS への搭載を目指して開発している大面積 (110×106 mm<sup>2</sup>) の VPH グリズムの設計と作製について述べる.

### 1. 天体観測用 VPH グリズムの設計

すばる望遠鏡は4つの焦点をもち, 観測の目的に応じてそれらの焦点に7つの観測装置が装着されている. そのうちカセグレン焦点の FOCAS は, グリズムを分散素子として用い, 分光観測を行っている. FOCAS の目指す天文学は, 宇宙の構造や進化を調べるために, 遠方にあるより暗い天体のスペクトル観測を可視から近赤外に及ぶ波長領域で詳細に研究することである. そのために, 可視域に効率がよく, ロングスリット分光・多天体分光・エシエル分光 (高次高分散)・偏光分光の各モードに最適な性能をもつグリズムが必要である. ここでは, 可視波長域 (350~1000 nm), 各波長のブラッグ入射条件で, 高効率 (80%以上)・高分解能 ( $R = \lambda / \Delta\lambda$  が 5000 程度) をもつ VPH グリズムの設計について述べる.

分光器の分解能を満たす格子周期の値の算出は, FOCAS の固定条件である, スポットサイズの半値幅 0.5 秒角 (1 秒角 = 1/3600 度) 程度, スリット幅 0.2 秒角 (0.1 mm), 焦点距離 1098.75 mm を考慮し, さらに VPH グリズムの使用条件として, 直進波長 400 nm におけるブラッグ角 ( $\theta_B$ ) 7.48 度, プリズム頂角 ( $\alpha$ ) 20.0 度と作製に用いるプリズム, ガラス基板, 高分子感光材料の屈折率

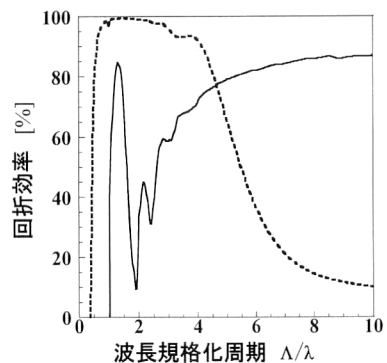


図2 表面形状型グレーティング (実線:  $t=2\lambda$ ,  $n_2=1.5$ ) と VPH グレーティング (破線:  $\lambda=400$  nm,  $t=10.0$   $\mu\text{m}$ ,  $n_2=1.5$ ,  $\Delta n=0.02$ ) における回折効率の周期依存性.

(1.63, 1.49, 1.54) の値を関係式<sup>6)</sup>に代入して行う. これらの値を用いた結果, 格子周期は  $0.923 \mu\text{m}$  となるが,  $1.0 \mu\text{m}$  で作製すれば分光器の分解能は 4616 となり, 十分に条件を満たしていることになる.

回折格子の設計・評価には, 光波の扱いをスカラー波およびベクトル波として扱う回折理論が用いられ, 種々の数値解析法の研究がなされている<sup>7-9)</sup>. 今回対象とする回折格子は周期が微細で屈折率変調型であることから, 筆者らが開発した RCWA を用いて回折効率の周期依存性の数値計算を行い, 表面形状型グレーティングと VPH グレーティングの性能を比較した (図2). この結果から, 表面形状型グレーティング (実線) は, 微細化とともに効率の低下が始まり高い効率を得ることは難しく, 一方, VPH グレーティング (破線) は, 例えば直進波長を 400 nm とすると, 周期  $1.0 \mu\text{m}$  で 90% を超す高効率を得られている. したがって, 高分解能を得るためには VPH グレーティングを用いたグリズムのほうがはるかに適している.

### 2. VPH グレーティングの作製と評価

今回の試作には, 日本ペイント (株) で新たに開発した, 屈折率が異なるラジカル重合性モノマー (RPM) とカチオン重合性モノマー (CPM) に光重合開始剤が混合されたハイブリッドのフォトポリマーを用いている<sup>10)</sup>. 作製に先立ち, RCWA を用いた数値計算を行い, 直進波長 400 nm に対し 80% 以上の高効率を得られる膜厚として  $10 \mu\text{m}$  を算出した. 屈折率変調量は, 予備実験から求めた 0.02 を用いている. 基板には, 厚さ 6 mm の S-FLS5 (サイズ 110×106 mm<sup>2</sup>,  $n$  1.49) を 2 枚用い, ガラスビーズをスペーサーとして混入した透明液体状の感光材料をこの間に挟み記録用乾板とした. 露光には, Nd:YVO<sub>4</sub> レーザーの第二高調波 ( $\lambda$  532 nm, 出力 1 W) を光源とする二光束干渉光学系を用いている. 露光により干渉縞の明部では高反応性化合物であるラジカル重合性のモノマーの重合が進行し, カチオ

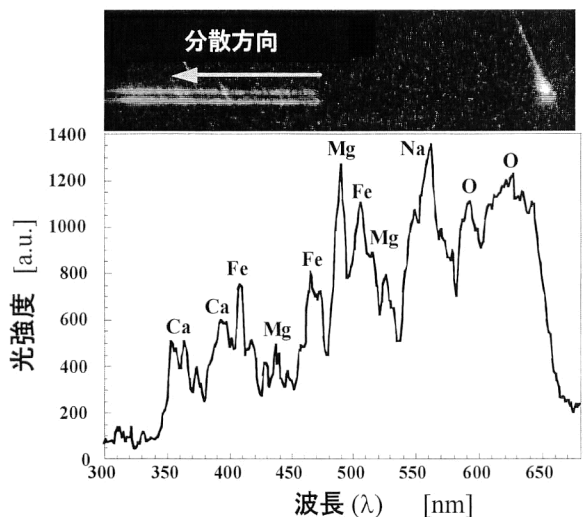


図3 流星スペクトル写真(上)と1次スペクトルの解析結果(下).

ン重合性モノマーは未反応のまま存在するので、重合で生ずる濃度勾配により、ラジカル重合性のモノマーの暗部から明部への拡散が促進する。この結果、屈折率差のある干渉縞が2種類の化合物の組成成分の形で形成される。この後、UV光による全面露光で、カチオン重合性モノマーと残留しているラジカル重合性モノマーを同時に光重合して硬化し、形成された干渉縞を固定し記録が終了する。この工程により、露光量  $70 \text{ mJ/cm}^2$  (レーザーパワー  $1.0 \text{ mW/cm}^2$ ) で作製した VPH グレーティング (膜厚  $10 \mu\text{m}$ , 周期  $1.0 \mu\text{m}$ ,  $n=1.536$ ) は、波長  $400 \text{ nm}$  (ブラッグ角  $7.48$  度入射) で  $90\%$  近い高い回折効率を示し、数値計算結果ともよく一致した。この VPH グレーティングの両側にプリズム (PBM3,  $n=1.63$ , 頂角  $22.5$  度) を貼りつけ、紫外線を照射し、大面積 ( $110 \times 106 \text{ mm}^2$ ) の VPH グリズムを作製した。

### 3. VPH グリズムによるしし座流星群の観測

同様の作製法で試作した、直進波長  $400 \text{ nm}$  に対し  $82\%$  の高効率をもつ VPH グリズム ( $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ) を用い、しし座流星群の分光観測を 2001 年 11 月に国立天文台野辺山観測所で行った。図 3 に、取得した流星スペクトル写真と波長較正後の解析結果例を示す。この観測結果から、VPH グリズムが流星に含まれる物質同定にもきわめて有効である結果を得た。

現在、2003 年 6 月に観測が予定されている、すばる望遠鏡 FOCAS 用  $110 \times 106 \text{ mm}^2$  の VPH グリズムの高性能化を目指し、実験を進めている。さらに、より広い波長域に

わたり高次光まで高効率化が可能な楕円反射面をもつグリズムの提案など、天体観測用分光素子の新しい開発を進めていく予定である。

天体観測用分光素子に対する高度な要求の実現には、今後も高性能な高分子感光材料の開発と新しい作製技術の創生は不可欠である。微細加工技術をはじめすぐれた生産技術を有する日本におけるこの分野の研究の進展が、世界から期待されている。

本研究は、国立天文台家正則教授、日本ペイント株式会社の川畑政巳氏と寺西卓氏との共同研究として行っている。また、実験データを提供していただいた日本女子大学小館研究室の共同研究者の方々に感謝する。

### 文 献

- 1) 家 正則: “天体望遠鏡技術の発展”, 光技術コンタクト, **36** (1998) 5-11.
- 2) N. Ebizuka, K. Oka, A. Yamada, M. Watanabe, K. Shimizu, K. Kodate, M. Kawabata, T. Teranishi, K. Kawabata and M. Iye: “Development of volume phase holographic (VPH) grism for visible to near infrared instruments of the 8.2 m Subaru telescope,” Proc. SPIE, **4842** (2003) 319-328.
- 3) K. S. Kawabata, N. Ebizuka and T. Sasaki: “Properties of FOCAS optical components,” Proc. SPIE, **4841** (2003) 1219-1228.
- 4) 海老塚昇, 小館香椎子, 岡 恵子, 家 正則, 戎崎俊一: “グリズム”, 特願 2002-170068.
- 5) W. Klaus, K. Oka, M. Fujino and K. Kodate: “Analysis of near-field intensity distributions of high-compression talbot array illuminators using rigorous diffraction theory,” Opt. Rev., **8** (2001) 271-275.
- 6) K. Oka, A. Yamada, Y. Komai, E. Watanabe, N. Ebizuka, T. Teranishi, M. Kawabata and K. Kodate: “Optimization of a volume phase holographic grism for astronomical observation using the photopolymer,” Proc. SPIE, **5005** (2003) 8-19.
- 7) Y. Orihara, W. Klaus, M. Fujino and K. Kodate: “Optimization and application of hybrid-level binary zone plates,” Appl. Opt., **40** (2001) 5877-5885.
- 8) B. Kress and P. Meyrueis: *Digital Diffractive Optics* (John Wiley & Sons, West Sussex, 2000) pp. 17-34.
- 9) Y. Komai, K. Kodate and T. Kamiya: “Improved usage of binary diffractive optical elements in ultrafast all-optical switching modules,” Jpn. J. Appl. Phys., **41** (2002) 4831-4834.
- 10) M. Kawabata, A. Sato, I. Sumiyoshi and T. Kubota: “Photopolymer system and its application to color hologram,” Appl. Opt., **33** (1994) 2152-2156.

(2003 年 4 月 21 日受理)