

## 流星群分光観測用高分散素子の開発および性能評価

柏木 正子<sup>1</sup>, 新山 陽子<sup>1</sup>, 海老塚 昇<sup>2</sup>, 小館香椎子<sup>1</sup>

<sup>1</sup>日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

<sup>2</sup>理化学研究所

(2005年11月30日受理)

**要 旨** 分光分析の分野において高精度なスペクトル情報を得るために、高効率・高分散の分光素子が要求されている。屈折率変調格子である Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングは入射光がブラッグ条件を満たす時、100%に近い回折効率が得られ、2 光束干渉法を用いて作製するため微細周期の作製が可能で、表面形状型に比べて高い効率を得ることができるので、注目されている。

これまでに、すばる望遠鏡用直視型高分散分光素子として、2 枚のプリズムの間にこの VPH グレーティングを挟んだ構造の、回折効率 80% 以上、分解能 2000 以上、透過波面精度  $\lambda/2$  以下の要求を満たす、高性能な 3 種類の VPH グリズム (大きさ: 100mm 角) を、厳密結合波解析 (RCWA) を用いた最適設計や光学系精度の改善など作製条件の最適化により開発している。すばる望遠鏡微光天体分光撮像装置 (FOCAS) から作製を要求された VPH グリズムのうち、VPH400 (設計波長 400nm, 分解能 2500) は 2003 年 6 月に完成し、すでに FOCAS 搭載して、性能評価観測に成功し、従来型のグリズムよりも約 3 倍高い効率を得たことを確認し、作製プロセスの有効性を確かめた。

今回は、確立した高性能 VPH グリズムの作製プロセスを適用し、ペルセウス座流星群 (プリズム頂角  $\alpha = 23^\circ$ , 設計波長  $\lambda = 600\text{nm}$ , 格子周期  $\Lambda = 1.0\mu\text{m}$ ) と本学の小型天体望遠鏡ドームで観測することが出来る月の観測用 ( $\alpha = 23^\circ$ ,  $\lambda = 430\text{nm}$ ,  $\Lambda = 0.72\mu\text{m}$ ) の、2 種類の高分散 VPH グリズム (大きさ: 50mm 角) の設計と作製を行った。また、この素子の評価として、ペルセウス座流星群のスペクトル観測を行ったので報告する。

**キーワード:** 流星群分光観測, 高効率, 高分散, VPH グレーティング, VPH グリズム, スペクトル解析

### 1. はじめに

我々はこれまでに、すばる望遠鏡用直視型高分散分光素子として、回折効率 80% 以上、分解能 2000 以上、透過波面精度  $\lambda/2$  以下の要求を満たす、高性能な 3 種類の VPH グリズム (大きさ: 100mm 角, 直進波長: 400, 520, 680nm, 格子周期: 1.0, 1.0,  $0.625\mu\text{m}$ ) を、厳密結合波解析 (RCWA) を用いた最適設計と、記録材料の最適化、光学系の検討により開発している<sup>1-9)</sup>。この確立した高性能 VPH グリズムの作製プロセスの手法を適用し、8 月に出現するペルセウス座流星群と Fig. 1 の本学の小型天体望遠鏡ドーム (口径: 250mm, 焦点距離: 1000mm) で観測することが出来る月の観測用の、2 種類の高分散 VPH グリズムの設計と作製を行った。この素子を用い

た流星群分光観測では彗星の氷やチリである流星のスペクトルを取得し、その組成を調べることにより、太陽系の原料になった暗黒星雲の物質を明らかにすることができる<sup>10, 11)</sup>。また、月からのスペクトルの取得は、太陽の反射光なので、地球上の生命活動を支える太陽の成分を調べることができる。すばる望遠鏡では遠方の銀河 (多数の微光天体) を CCD カメラを用いて観測していた。今回の観測対象である流星群は動きが速い (60km/s) ため、流星のスペクトルをビデオ撮影により取得する方法を用いた。この場合には積分時間が 1/30 秒と少ないため、高効率 (80% 以上) の分光素子が必要となる。そこで、高精度な測定のために、すばる望遠鏡用に作製したものと同様の機能を持つ、2 つのプリズムの間に屈折率変調格子を挟んだ構造の Volume Phase Holographic (VPH) グリズム (50mm 角) の作製をすることにした。これを用いて 2005 年 8 月 12 日に長野県小川村で試作



Fig. 1. Telescope setting on the roof of JWU.



観測日：2005. 8. 12－8. 14  
場 所：長野県上水内郡小川村大洞高原

Fig. 2. Perseus meteor steam observation.

VPH グリズムを組み入れたシステムによりペルセウス座流星群を観測し、その解析による性能評価も行ったので報告する (Fig. 2)。

## 2. ペルセウス座流星群天体分光観測システム

屈折率変調格子である Volume Phase Holographic (VPH) グレーティングに 2 枚のプリズムを貼りあわせた VPH グリズムは任意波長の 1 次光を直進させることができるため、撮像と分光観測の切り替えが容易に行える。また、記録材料に 2 光束干渉縞を記録するホログラフィック技術を用いた作製により、格子周期の微細化が容易となり、素子の高分解能化が実現できる。さらに、観測波長のブラッグ条件を満たすことで、1 次光が 100 % 近い効率を得ることが可能である (Fig. 3)。

Fig. 4 に流星群分光観測用装置の原理を示す。星の分

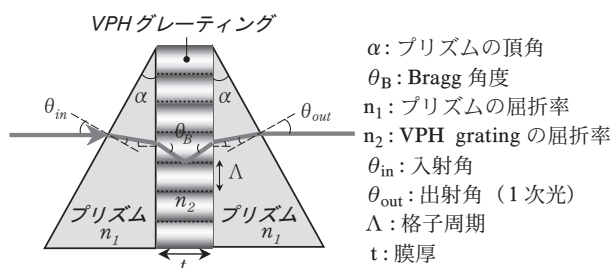


Fig. 3. Volume Phase Holographic (VPH) grism.

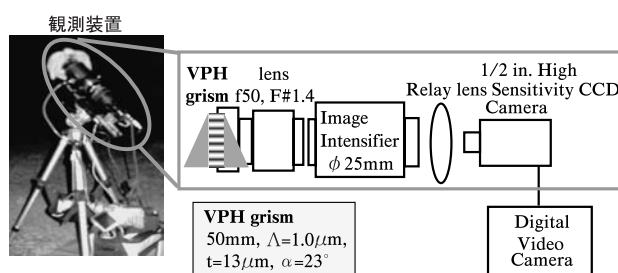


Fig. 4. Structure of spectroscopy for meteor steam.

散方向に対して垂直に流星が流れるように注意し、VPH グリズムを対物レンズの前に設置する。そして、VPH グリズムに入射した流星の光はイメージインテンシファイアにより増幅された後、CCD カメラを経て、ビデオカメラへ映像としての信号を送る構造となっている。また、取得対象の流星自体が細い直線のため、通常分光器のようにスリットを必要としない。このようにビデオ出力を用いた観測手法は時間分解観測が行え、運動の速い天体の観測に有利である。

## 3. 高効率分散素子の設計と作製の最適化

ここでは、高効率の高分散素子 VPH グレーティング

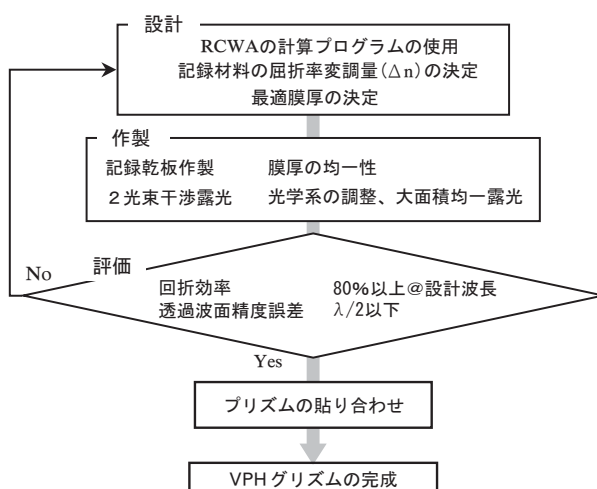


Fig. 5. Algorithm for the design and fabrication process of VPH grism.

を作製するために、本研究室で開発した厳密結合波解析 (RCWA) の数値計算プログラム<sup>12-16)</sup>を用いた設計と作製の最適化を検討した作製プロセスについて述べる (Fig. 5)。

### 3.1 設計

#### (1) 格子周期

VPH グリズムの設計には、まず始めに観測対象とする天体によって、設計波長 ( $\lambda$ ) を決定し、プリズム屈折率 ( $n_1$ )、頂角 ( $\alpha$ )、記録材料 (フォトポリマー感光性樹脂) の屈折率 ( $n_2$ ) の値を式 (1)~(3) に入力し、格子周期 ( $\Lambda$ ) の値を算出する。

$$\sin \theta_{in} = n_1 \sin \theta_1 \quad (1)$$

$$n_1 \sin(\alpha - \theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (2)$$

$$2n_2 \Lambda \sin(\theta_B) = m\lambda \quad (3)$$

$$\theta_w = \sin^{-1} \left( \frac{m\lambda_l}{2\Lambda} \right) \quad (0^\circ < \theta_w < 90^\circ) \quad (4)$$

ここで、 $m$ : 回折次数、 $\theta_1$ : プリズムの屈折角、 $\theta_B$ : ブラッグ角、 $\lambda_l$ : 露光用レーザー波長を示している。また、高効率を得るためにブラッグ角 ( $\theta_B$ ) と VPH グレーティングに入射する角度 ( $\theta_2$ ) が等しくなるように設計する。記録材料には日本ペイント製の屈折率  $n_2=1.536$  の液状フォトポリマー (波長感度: 460~600nm)<sup>17)</sup> を使用した。

ペルセウス座流星群観測用の場合、主に波長範囲 400~800nm に強いスペクトル線があるため、設計波長を 600nm とした。また、格子周期  $1\mu\text{m}$  に合わせて入手可能なプリズム材質として LAH-66 ( $n_1=1.769$ ) を選択し、頂角  $\alpha=23^\circ$  を算出した。月観測用グリズムは、水素のバルマー線付近に見られる物質のスペクトル線を観測するために、設計波長を 430nm とし、ホルダーサイズによる制限を考慮して流星群用のプリズムと同様の LAH-66 を使用することに決め、格子周期  $\Lambda=0.72\mu\text{m}$  を算出した。

算出した格子周期に応じて、VPH グレーティング作製の際、式 (4) より Nd:YVO<sub>4</sub> レーザ ( $\lambda_l=532\text{nm}$ ) の 2 光束書き込み角度  $\theta_w$  が決まる。格子周期が微細になるにつれ、書き込み角度は大きくなることが分かる。

#### (2) 最適膜厚

高効率な VPH グレーティングの実現には、その記録材料の屈折率変調量  $\Delta n$  と膜厚の関係が非常に重要となる。我々は任意の高次回折光および、TE、TM モードの偏光特性やエバネッセント波などを厳密に取り扱うこと

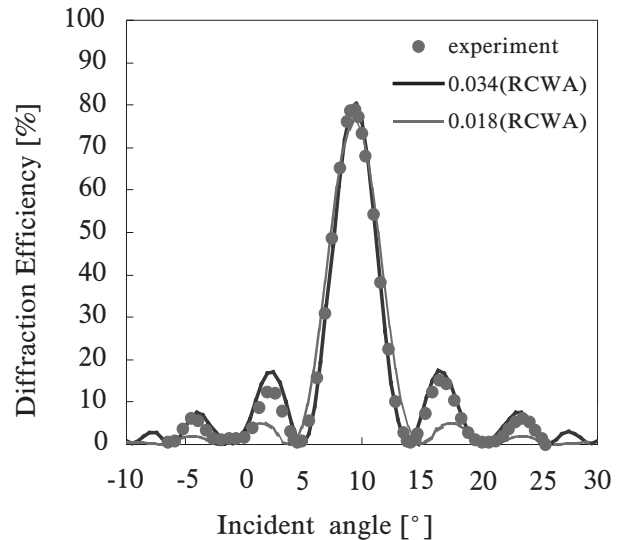


Fig. 6. Diffraction efficiency on the incident angle.

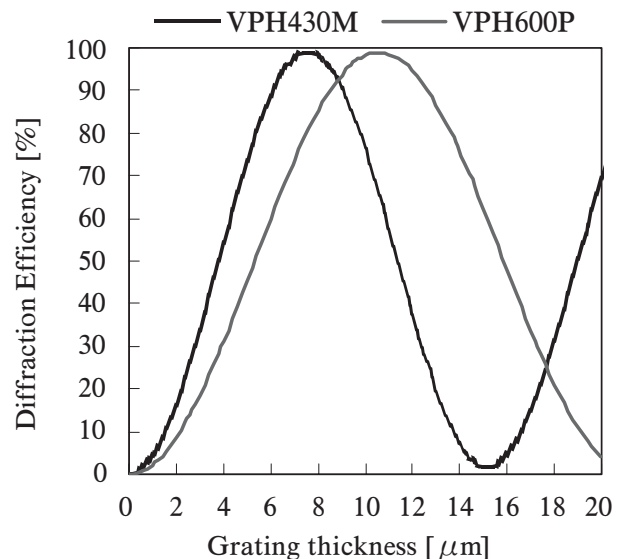


Fig. 7. Diffraction efficiency on the grating thickness.

が可能な厳密結合波解析 (RCWA) を用い、実験との比較により信頼性の高い屈折率変調量  $\Delta n$  の決定方法を提案し、最適膜厚を設計している。Fig. 6 のように実験値と RCWA による理論値の突合せを行った結果、VPH グレーティングの記録材料の屈折率変調量  $\Delta n$  は良い一致を示している値、 $\Delta n=0.034$  であることを確認した。この値に基づき、今回作製した流星群 (VPH600P) と月用 (VPH430M) の設計条件のとき、最大回折効率を得ることができる最適膜厚は、Fig. 7 の回折効率の膜厚依存性のグラフより、VPH600P、VPH430M のときそれぞれ、膜厚  $t=10, 8\mu\text{m}$  である。この数値計算により、直進波長、格子周期に応じた最適膜厚の算出が可能となる。この設計プロセスは、高効率を持つ屈折率変調格子の作製

条件をあらかじめ求めることになり、高性能化に有効である。また、偏光状態が交じり合う天体の光を対象としているため、数値計算結果は全て **TE・TM** 偏光の平均値を用いている。

### 3.2 作 製

我々が確立した高性能な **VPH** グレーティングの作製プロセスを以下に述べる。

あらかじめ **RCWA** を用いて算出した最適膜厚で 2 枚のガラス基板の間に、記録材料である日本ペイント製のフォトリソグレイスを挿入し露光用乾板を作製する<sup>17)</sup>。このとき、大面積 ( $110 \times 106 \text{ mm}^2$ ) にわたり、均一な最適膜厚を得るために、スペーサとして最適膜厚と同じ大きさの直径のガラスビーズを用いた。ガラスビーズ屈折率 1.5、記録材料屈折率 1.536、ガラス基板屈折率 1.52 と屈折率差が小さいため、ビーズの散乱による影響は少ないと考えられる。実験からもビーズ量が面内で 0.03% のときと 0.3% のときでは回折効率に変化が生じないことを確認している。このフォトリソグレイスは、紫外域と 470 nm ~ 600 nm に感度を持つ高屈折率のラジカル重合性モノマー (**RPM**) と紫外域のみ感度をもつ低屈折率のカチオン重合性モノマー (**CPM**) によって構成され、2 光束の干渉縞の強度分布に反応したモノマーによって正弦波形状の屈折率分布が生じる。最後に、2 つのモノマーに感光波長域である UV 光 (200~320 nm) を一様照射すると、干渉縞が定着し、正弦波形状の屈折率分布を持つ、膜の透明性に優れた **VPH** グレーティングが完成する。

今回、作製条件の最適化を行うために、露光用光学系に Fig. 8 のように記録材料に感度を持たない He-Ne レーザ (633 nm) を用いてグレーティングにブラッグ角入射をさせて回折効率をリアルタイムで測定する機能を付加し、最適露光量を求めて作製した。また、均一性の高い

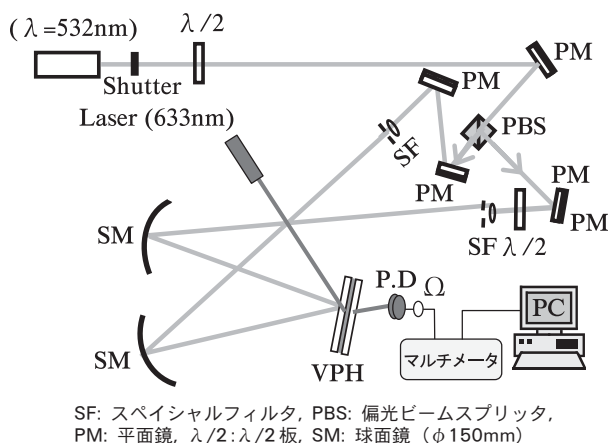


Fig. 8. Optical setup for recording interfering pattern and real time efficiency measurement.

大面積露光を可能にするため、この光学系に空間フィルタと直径 150 mm 凹面鏡を用いてビーム系を 150 mm に拡大した。そして、透過波面精度誤差を最小限に抑えるために、2 つの凹面鏡の回転角度を等しくし、収差を打ち消す配置を取った。光学系を改善した結果、100 mm 角の面積内で透過波面精度誤差  $0.097 \lambda$  の高精度な光学系を達成している (Fig. 9)。

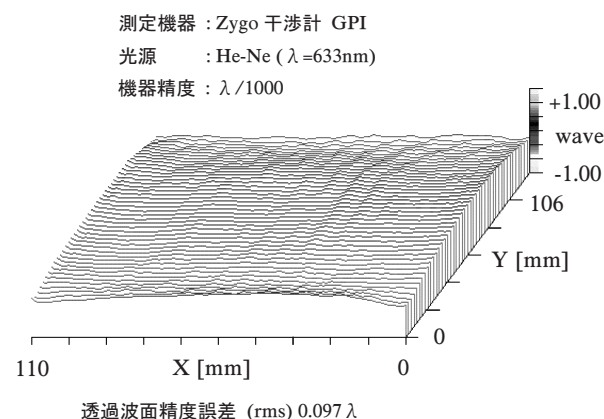


Fig. 9. Diffraction wavefront accuracy measurement by ZYGO interferometer.

### 4. VPH グリズムの性能評価および流星群スペクトル解析

キセノンランプを光源として、作製した **VPH600P** と **VPH430M** 用グレーティングの回折効率の波長依存性を各設計波長 (600, 430 nm) のブラッグ角を固定して測定した結果を Fig. 10 に示す。また、実線が **RCWA** プ

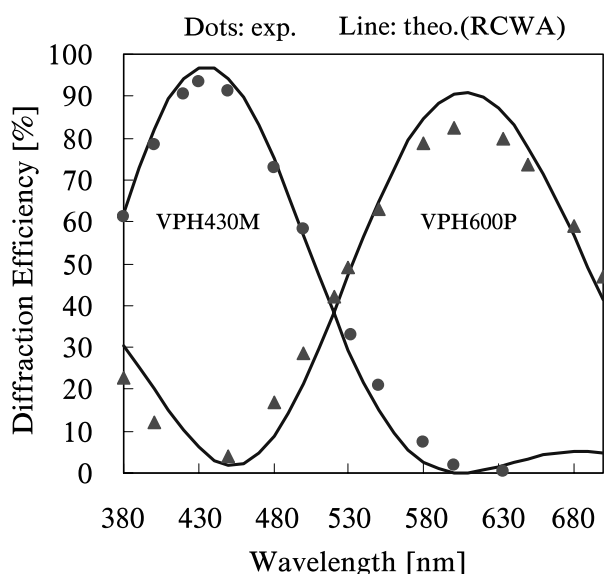


Fig. 10. Experimental and calculation results of diffraction efficiency on the wavelength.



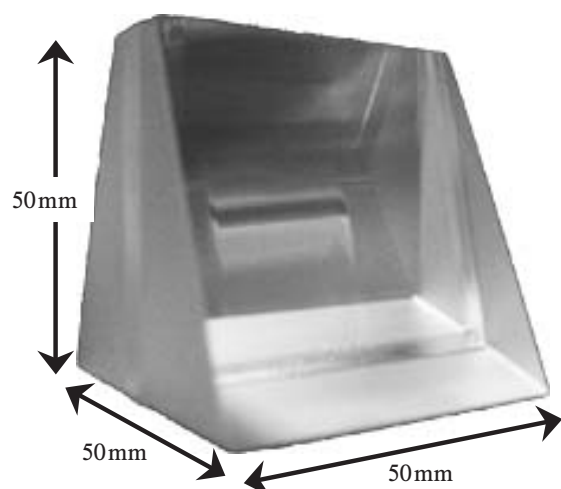


Fig. 11. 50×50mm<sup>2</sup> VPH grism designed and fabricated specially for the meteor.

ログラムによる数値解析結果, 点は測定結果を示す。数値計算と実験値は良い一致を示し, VPH600P は 83%, VPH430M は 92%と設計波長において高効率な VPH グレーティングを達成した。このグレーティングに 2 枚のプリズムを貼り合わせて, Fig. 11 のような 50mm 角の天体観測用高分散素子 VPH グリズムを作製した。

また, この作製した高分散 VPH グリズムを Fig. 4 の分光器に搭載し, 2005 年 8 月 12~14 日に長野県小川村でペルセウス座流星群の分光観測を行い, 取得データを解析した結果を Fig. 12 に示す。実線は我々が作製した

高分散タイプの VPH グリズム, 点線は既存の低分散タイプ (600 本/mm) で観測した結果である。この解析結果より高分散タイプはシャープなスペクトルが得られ, 波長 500~800nm の範囲で物質 (Ca, Mg, Fe, Na, 禁制線, SiII, N, O, N<sub>2</sub>) と多数の物質を検出することができた。さらに, 低分散タイプのグリズムでは難しかった O 線 (645 nm) と N 線 (648 nm) や 650 nm 付近の N (648.4nm) と N<sub>2</sub> (662.4nm) のスペクトルが分解でき, 作製した VPH グリズムが高精度な流星の観測にも有効な高性能を持つ事が確認できた。

## 5. ま と め

流星観測と月用の VPH グリズムの設計の最適化とそれに基づいて作製を行い, 設計波長において回折効率 83, 92% の高効率を実現した。

また, 作製した VPH グリズムを用いたペルセウス座流星群のスペクトル観測により, 作製した VPH グリズムは流星観測にも有効な高効率・高分解能を持つ事を実証した。高性能な VPH グリズムの作製プロセスの確立により, 今後さらに高精度な天体分光観測データの取得が可能となり, 宇宙の謎解明に貢献できると考えている。

謝辞: 記録材料を提供していただいた日本ペイント (株) の川畑政巳氏と寺西卓氏に感謝致します。

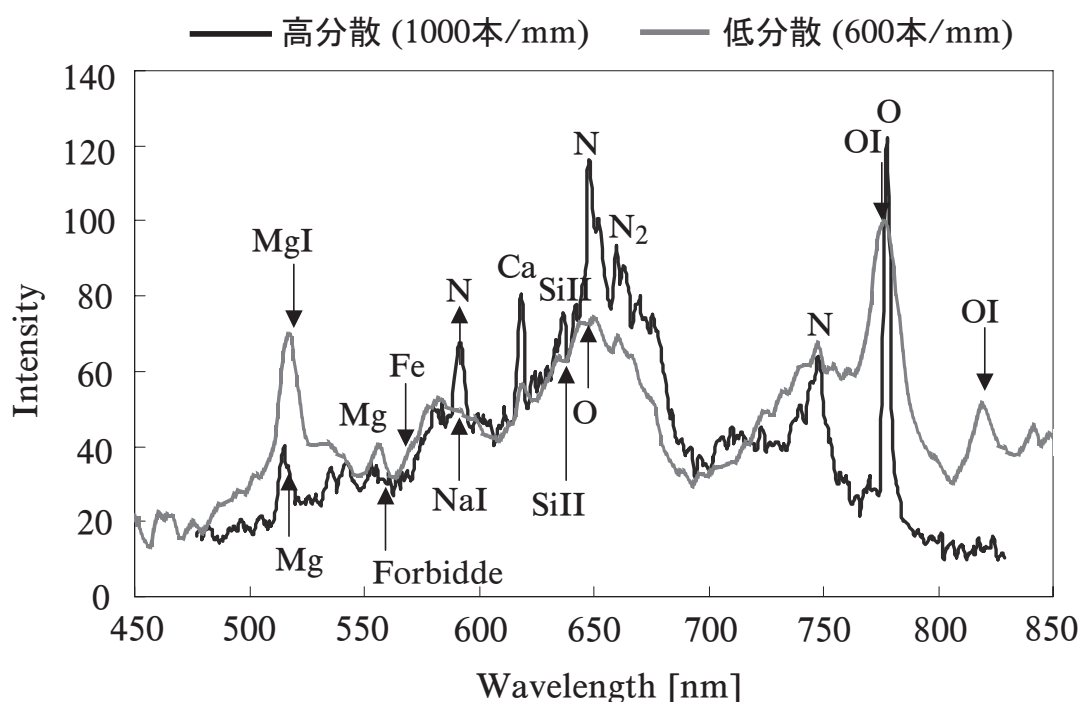


Fig. 12. Analytical result of peruseus spectrum observation.

# 参考文献

- 1) 小館香椎子, 岡 恵子, 海老塚 昇: 光学 **32** 483 (2003).
- 2) 小館香椎子: 回折光学素子の歴史と発展 光技術コンタクト **37** 461 (1999).
- 3) 岡 恵子, 山田亜希子, 海老塚 昇, 寺西 卓, 川畑政巳, 小館香椎子: 第28回光学シンポジウム (2003).
- 4) K. Oka, A. Yamada, Y. Komai, E. Watanabe, N. Ebizuka, T. Teranishi, M. Kawabata and K. Kodate: *Proceedings of SPIE* **5005** 8 (2003).
- 5) N. Ebizuka, K. Oka, A. Yamada, M. Watanabe, K. Shimizu, K. Kodate, M. Kawabata, T. Teranishi, K. Kawabata and M. Iye: *Proceedings of SPIE* **4842** 319 (2002).
- 6) A. Yamada, K. Oka, M. Ishikawa, M. Kashiwagi, N. Ebizuka, T. Teranishi and K. Kodate: *Diffraction Optics 2003* **25** (2003).
- 7) 岡 恵子, 山田亜希子, 駒井友紀, 渡邊恵理子, 海老塚 昇, 寺西 卓, 川畑政巳, 小館香椎子: 第28回光学シンポジウム **63** (2003).
- 8) M. Kashiwagi, K. Oka, M. Irisawa, N. Ebizuka, M. Iye, K. Kodate: *Proceedings of SPIE* **5494** 217 (2004).
- 9) 柏木正子, 岡 恵子, 入沢美佐子, 小館香椎子: 光計測シンポジウム **2005** 5 (2005).
- 10) 斎藤馨児, 長沢工 編: 流星 I アストラルシリーズ 2 恒星社厚生閣 東京 (1984).
- 11) 日本流星研究会 HP: <http://www.nms.gr.jp/index.html>
- 12) 岡 恵子, クラウス・ヴェルナー, 小館香椎子: 日本女子大学紀要理学部 **10** 99 (2002).
- 13) 岡 恵子, 山田亜希子, 石川麻美, 柏木正子, 小館香椎子: 日本女子大学紀要理学部 **12** 7 (2004).
- 14) Moharam GM, Grann BE and Pommet AD: *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1068 (1995).
- 15) Moharam GM, Pommet AD, Grann BE and Gaylord KT: *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 1077 (1995).
- 16) 辻内順平: ホログラフィー 裳華房 東京.
- 17) M. Kawabata, A. Sato, I. Sumiyoshi and T. Kubota: *Appl. Opt.* **33** 2152 (1994).

## Development and Evaluation of High Dispersion Elements for Meteor Stream Spectral Observation

Masako Kashiwagi<sup>1</sup>, Yoko Niiyama<sup>1</sup>, Noboru Ebizuka<sup>2</sup> and Kashiko Kodate<sup>1</sup>

The Graduate school of Science, Division of Mathematical and Material Structure Science,

<sup>1</sup>Japan Women's University, <sup>2</sup>RIKEN

(Received November 30, 2005)

**Abstract:** In order to obtain spectral information of high accuracy in the field of spectrographic analysis, efficient and high-dispersion elements are required. Volume Phase Holographic (VPH) grating as a type of refractive index grating achieves the nearly-perfect level (100%) of diffraction efficiency, where the incidence light meets the conditions for Bragg angle of this VPH grating. Moreover, construction of a VPH grating realized a smaller grating period by use of a two beam interferometry holographic. More attention has been paid to this method because high-quality resolution and higher efficiency than surface relief grating can be achieved. We have developed three kinds of high performance Volume Phase Holographic (VPH) grisms (size: 100mm<sup>2</sup>) that recorded efficiency level of more than 80%, resolution level of more than 2000, and less than half of the wavelength as the wavefront accuracy error for Subaru telescope. We fabricated these dispersion elements by the optimal design using Rigorous Couple Wave Analysis (RCWA) program which was developed in our laboratory and also through optimization of optical setup for recording holographic interference pattern. In June 2003, we completed the VPH grism (designed wavelength: 400nm, resolution: 2500) and installed it in Subaru telescope, in order to apply it to Faint Object Camera And Spectroscopic (FOCAS) for a test observation. As a result, we observed the increase of photons by about 3 times as much as those done by conventional grisms. This result proved that our optimal design and fabrication process were valid and applicable.

As our own VPH grism fabrication processes need to be tested further, we designed and fabricated two high-dispersion VPH grisms for Perseus meteor (prism apex angle  $\alpha=23^\circ$ , design wavelength  $\lambda=600\text{nm}$ , grating period  $\Lambda=1.0\mu\text{m}$ ) and the moon ( $\alpha=23^\circ$ ,  $\lambda=430\text{nm}$ ,  $\Lambda=0.72\mu\text{m}$ ) spectral observation. Here, this report provides the results from the Perseus meteor spectral observation as evaluation of the applicability of the fabricated VPH grism.

**Key words:** meteor spectral observation, high efficiency, high dispersion, VPH grating, VPH grism, spectral analysis