

グリズムを用いた天体観測

海 老 塚 昇

Astronomical Observations with Grisms

Noboru EBIZUKA

Since array detectors such as a CCD imager and infrared imager became practically available, numerous grisms are used as dispersers for various astronomical imaging and spectroscopic instruments. The grism is a direct vision grating combined with a transmission grating and prism(s). Grisms are classified into two types, namely, a grism with a surface relief grating and a grism with a volume phase holographic (VPH) grating. According to establishment of large telescopes such as the 8.2 m Subaru Telescope, an instrument requires higher angular dispersion for grisms, and grism size became larger. Spectroscopic observations with grisms are good for conformation of distance of high z galaxies, studies of super novae mechanism and so on. Quasi-Bragg grating and immersion grating are under development as novel dispersers for instruments of next generation huge telescopes.

Key words: high diffraction efficiency, Bragg's condition, high dispersion spectroscopy, echelle spectroscopy

グリズムとはプリズムと透過型回折格子を組み合わせ、任意の次数、任意の波長の回折光を直進させる直視回折格子のことである(図1)。天文学観測装置のコリメート光(平行光束)部分にグリズムを挿入し、望遠鏡の焦点面にスリットを置くことにより、撮像観測から分光観測に素早く切り替えることができる。

グリズムの起源として、ハービッグ(G. H. Herbig)^{*1}の論文が引用されることが多い。彼は反射望遠鏡の主焦点あるいはニュートン焦点用銀塩写真乾板の直前に透過型回折格子を取り付けて天体のスリットレス分光観測を行う場合に、プリズムを組み合わせることによりスペクトルの収差が軽減されることを1954年に報告している¹⁾。また、カーペンター(E. F. Carpenter)はプリズムの斜面に透過型回折格子を貼り付けた直視分散光学素子について1963年に記述しており²⁾、グリズムのことをカーペンター・プリズムとよぶこともある。

1970年代にCCD(charge-coupled device)撮像検出器が実用化されると、雑音成分を差し引くことができる等の利

点によって天文学観測にも使われるようになった。しかし、当初のCCD撮像検出器は画素数が少なく面積が小さいうえ、電荷の転送効率が悪く、スミアやブルーミングといった電荷の漏れ出し等の問題があったため、依然として銀塩写真による撮像や分光観測が主流であった。それらの問題が徐々に改善され、1980年ごろにはCCD撮像検出器の感度(量子効率)が銀塩写真と比べて1桁ほど高くなった。このことは望遠鏡の口径を3倍程度大きくすることに匹敵したために、銀塩写真に代わってCCD撮像検出器が天文学観測装置に搭載されるようになった。とはいえ、CCD撮像検出器および周辺機器が高価であり、開発や保守に専門的な知識をもつ人材を必要とするために、1台で撮像と分光の機能を兼ね備えた分光撮像観測装置が開発されるようになり、その分散光学素子としてグリズムが搭載されるようになった。1990年代になるとCCD撮像検出器の大フォーマット化や背面照射による波長帯域の拡大と感度向上が進み、冷戦の終結によって大フォーマットで高性能な赤外線撮像検出器が天文学観測に利用できるよ

名古屋大学工学研究科附属プラズマナノ工学研究センター(〒464-8603 名古屋市千種区不老町1) E-mail: ebizuka@riken.jp

^{*1} ハービッグ・ハロー天体とよばれ、星形成領域において水素等の強い輝線を放つ星雲状の天体の観測・研究で有名。

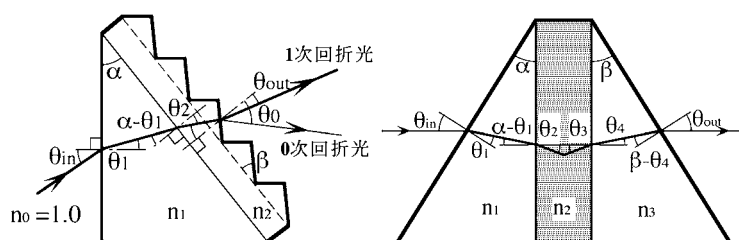


図1 表面刻線型グリズム (左) と VPH グリズム (右)⁶⁾.

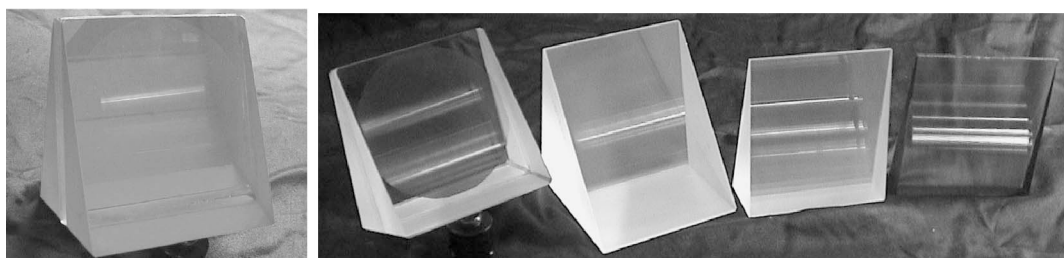


図2 FOCAS用各種グリズム. 右から 150 本/mm (直進波長 650 nm) と 300 本/mm 青用 (同 550 nm) レプリカ・グリズム, 175 本/mm エシエルタイプ・レプリカ・グリズム, 665 本/mm (同 650 nm) VPH グリズム, ZnSe プリズムの 1330 本/mm (同 800 nm) VPH グリズム³⁾.

うになった. 時を同じくして口径 10.4 m のケック望遠鏡や口径の 8.2 m すばる望遠鏡等の 8~10 m クラスの大型望遠鏡の建設が開始され, これらの大望遠鏡用にさまざまな分光撮像観測装置の開発が始まった. 望遠鏡の大口径化に伴って観測装置が大型化して, グリズムにも大口径化と大きい角分散 ($\Delta\theta/\Delta\lambda$) が求められるようになった.

本稿では, すばる望遠鏡の可視光と近赤外線の観測装置用等に開発されたグリズム, およびそれらによる観測例をいくつか紹介する. さらに, 次世代大型望遠鏡用の高分散分光観測装置を小型化することが可能な分散光学素子として期待されている, 新しい quasi-Bragg (QB) 回折格子やイメージング回折格子についても紹介する³⁾.

1. すばる望遠鏡に搭載されているグリズム

回折格子は, 幾何光学や波動光学によって各次数の回折光強度を求めることができる「薄い回折格子」と, 光波の電磁気学的な結合によって回折光強度を選択的に特定の次数に分配することができる「厚い回折格子」とに分類される. すばる望遠鏡の観測装置においては観測目的に応じて, 薄い回折格子である表面刻線型回折格子と, 厚い回折格子である VPH (volume phase holographic) 回折格子の 2 種類のグリズムを使い分けている.

1.1 表面刻線型グリズム

表面刻線型グリズムは, 図 1 左のようにプリズムの表面にのこぎり歯形状の回折格子 (エシレット格子) が形成されるのが一般的である. グリズムはプリズムの頂角と屈折率を大きくすると角分散も大きくなるが, 表面刻線型の透過型回折格子は幾何光学や波動光学によって求められた回折効率に対して, 実際には格子間隔が波長の 4 倍以下では一次回折光の効率が急激に低下してしまう^{4,5)}. さらにプリズムの斜面に樹脂の回折格子がレプリカ加工されたグリズム (以下, レプリカ・グリズム) の場合には, プリズムと樹脂との臨界角によってもグリズムの角分散が制限されてしまう⁵⁾. そのために表面刻線型グリズムは比較的低分散分光の用途に使用される.

すばる望遠鏡の可視光微光天体分光撮像観測装置 FOCAS (Faint Object Camera and Spectrograph)^{*2}には, 口径が 110×106 mm, 格子密度が 75~300 本/mm の 4 種類の一次回折光のレプリカ・グリズム, および, 175 本/mm の高次回折光を利用するエシエルタイプのレプリカ・グリズム (二次回折光直進波長 972 nm, 三次回折光 655 nm, 四次回折光 498 nm) が搭載されている⁵⁾ (図 2). これらのレプリカ・グリズムには光学ガラス (n_d : 1.49 と 1.52) のプリズムが使用されている.

*2 天文学においては CCD 撮像検出器の感度があり, 地球大気が透明な 300~1000 nm を, 可視光線とよぶことがある.

1.2 Volume phase holographic (VPH) グリズム

VPH 回折格子は設計波長の 10 倍程度以上の厚さの回折格子層を、厚さ方向とは垂直方向（透過型の場合）の屈折率を正弦波状に変調させた位相格子であり、厚さと屈折率の変調量を調整してブラッグの回折条件を満足させることによって、P または S 偏光に対して回折効率 100% を達成することができる⁴⁾。VPH グリズムは図 1 右のように VPH グリズムを 2 枚のプリズムで挟み、任意の次数の任意の波長を直進させる直視分散素子である。2 枚の高屈折プリズムで挟まれた VPH 回折格子はレプリカ・グリズムより臨界角の制限が大幅に緩やかになるために、比較的大きい角分散を達成することができる^{5,6)}。

筆者らは記録材料として、日本ペイント製のホログラム樹脂⁷⁾を用いて VPH 回折格子の開発を行った。このホログラム樹脂は、可視光と紫外線の両方によって重合する屈折率が高い樹脂のモノマー（RPM: radically polymerized monomer）や紫外線によって重合する屈折率が低い樹脂のモノマー（CPM: cationically polymerized monomer）、溶剤、色素、光開始剤等が含まれており、可視光レーザーの干渉露光によって干渉縞の明部の RPM が重合すると明部と暗部との間で CPM と RPM の濃度勾配が生じるため、それを解消するために明部から暗部に CPM が移動し、暗部から明部に RPM が移動する。その後、均質な紫外線照射を行うことによって残った RPM と CPM が重合して屈折率変調が定着される。すなわち、このホログラム樹脂の現象と定着工程は乾式である⁵⁾。一方、別の VPH 回折格子の記録材料である重クロム酸ゼラチンは銀塩写真と同様に湿式の現象や定着、漂白工程であり、乾燥工程を経て、均質で目的の波長において高い回折効率のホログラムを得るためには技術と経験を要する。また、重クロム酸ゼラチンは高温多湿の環境では格子の屈折率変調が消滅したり、失透してしまうことがある。

FOCAS には現時点において口径が 110×106 mm の 8 種類の VPH グリズムが搭載されている（図 2）。そのうち 5 種類が光学ガラス（ n_d : 1.49～1.72）のプリズムを組み合わせた格子密度が 360～1000 本/mm の VPH グリズム、そして 3 種類が ZnSe（ n_d : 2.62）のプリズムを組み合わせた格子密度が 1111～1580 本/mm の VPH グリズムである³⁾。合計 8 種類の VPH グリズムのうち、3 種類は米国 RALCON 社製の重クロム酸ゼラチンの VPH 回折格子を使用し、5 種類はホログラム樹脂の VPH グリズムを開発した。

近赤外線多天体分光撮像観測装置 MOIRCS (Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph) には、Y バンド（中心波長 1020 nm）、J バンド（同 1250 nm）、H バンド

（同 1650 nm）、K バンド（同 2200 nm）の計 4 種類の VPH グリズムが 2 個ずつ搭載されている。これらの VPH グリズムは口径が 70×70 mm で ZnSe プリズムが使用され、記録材料はホログラム樹脂である⁸⁾。

2. グリズムによる天文学観測

最も有名な天文学分光観測のひとつは 1920 年代にハッブル (E. P. Hubble) らが行った銀河の赤方偏移（ドップラーシフト）の観測ではないだろうか。分光計測によって物質の存在量や物理状態などを知るばかりでなく、天文学においてはドップラーシフト量から天体の速度を知るための手段としても分光観測が重要である。ハッブルらは当時世界最大であった口径 2.5 m の望遠鏡を利用して、数多くの銀河について変光周期と光度との関係がわかっているセファイド型変光星を観測し、それらの銀河から地球までの距離を求め、それらの銀河の分光観測によって得られた赤方偏移との関係、いわゆる「ハッブルの法則」を発表した。光速を c (300,000 km/s)、ドップラーシフト量を $\delta\lambda$ 、静止波長を λ_0 とすると、天体の速度 v は

$$v = c \delta\lambda / \lambda_0 = cz \quad (1)$$

によって求められる。ここで、 $z = \delta\lambda / \lambda_0$ は赤方偏移量である。この速度 v をハッブル定数 H で割ると天体までの距離が求められる。また、分解能 $R = \lambda / \Delta\lambda$ であり、分光器によって測定可能な天体の速度分解能 Δv は

$$\Delta v = c/R \quad (2)$$

によって与えられる。

分解能が高いほど、より精密な速度分布を求めることができるようになり、例えば銀河同士の衝突の痕跡や原始星円盤の中で惑星が誕生する様子なども分光観測から推定することができる。また、グリズムと偏光観測ユニット（二分の一波長板と偏光板あるいは偏光プリズム）と組み合わせることによって、超新星爆発の中心星近傍や活動銀河核などの、望遠鏡の空間分解能より何桁も細かい天体の立体構造等を推定することもできる。

2.1 最遠方銀河の発見と同定

今日でも、より遠方の銀河についてハッブルらと同様の観測が行われており、宇宙膨張の歴史から宇宙誕生まで遡る理論研究や、宇宙の未来の姿を予測する理論研究等に拘束条件を与えている。

すばる望遠鏡には、他の 8～10 メートル級望遠鏡にはない、主焦点広視野カメラ (Suprime-cam) があり、最遠方銀河等の探索には現在最強の観測装置である。2010 年 7 月時点においての最遠方銀河の上位 20 傑はすべてがすばる望遠鏡と Suprime-cam による発見^{*3)}であり、その多くが

FOCASのエシエルタイプ・グリズム(二次回折光, 分解能 $R=1250$)によって距離が確定されている。距離が確定されている最も遠い銀河は赤方偏移 $z=6.96$ であり, 銀河を発した光の波長が約8倍に引き延ばされている。この銀河から地球までの宇宙論的に求められる距離は129億光年, すなわちビッグバンから8億年後の銀河である⁹⁾。

なお, 最近開発された, FOCAS用の格子密度が557本/mmのVPHグリズム(直進波長900nm)および, MOIRCS用のYバンドVPHグリズムは, 最遠方銀河の距離の確定がおもな目的である。さらに, MOIRCS用のVPHグリズムはJ, H, Kバンドの順に, より遠くの銀河の距離の確定に利用される。

2.2 γ 線バースト

γ 線バーストとは大気圏外においてきわめて短い時間に強烈な γ 線を発する現象であり, 衛星によって1960年ごろから発見されていたが, その正体は長いこと未知のままであった。1990年代の後半になって γ 線バースト観測衛星が打ち上げられ, その衛星が割り出した γ 線バーストの位置に地上の光学望遠鏡等を数分から数時間後に向けたところ, 超新星と同様の減衰特性を示す残光(after glow)が観測された。その後の観測の蓄積によって, 遠方銀河に付随する通常の超新星爆発の10倍程度の明るさの極超新星爆発と関連しているという説が最も有力になった。日米仏共同で開発された γ 線バースト観測衛星HETE-2によって2003年3月29日に発見された γ 線バーストGRB030329の残光をFOCASの偏光観測ユニットと300本/mmの青用と赤用グリズムを組み合わせ, 分解能 R が380~930の偏光分光観測を行ったところ, スペクトルの特徴から太陽光の10倍を超える質量の赤色超巨星が重力崩壊を起こしたIc型の極超新星爆発(SN2003dh)であることが確認された¹⁰⁾。

2.3 超新星爆発の「こだま」

デンマークのティコ・ブラーエ(Tycho Brahe)が1572年に発見した超新星爆発の光が, 暗黒星雲に反射して436年遅れて地球に到着した。この超新星爆発の「こだま」をFOCASの300本/mmの青用と赤用グリズムによって分解能 R が160~380の分光観測を行ったところ, スペクトルの特徴からIa型の超新星爆発であることが確認された。Ia型の超新星とは白色矮星と超巨星の連星系において白色矮星の表面に超巨星のガスが降り積もり, その重みで圧縮され臨界に達すると暴走的な核融合反応を起こす現象で

ある。さらにこの観測により, 超新星までの正確な距離が求められた¹¹⁾。また, 1680年ごろに起きた超新星爆発(カシオペアA)についても, 約300年の時を経てFOCASによる同様の観測が行われ, 赤色超巨星が重力崩壊型のIIb型超新星爆発を起こして, その生涯を閉じていたことが確認された¹²⁾。

2.4 流星観測

流星は出現時刻や位置を予測することができないために, スペクトルの取得が困難であった。銀塩写真や蓄積型CCD等は露光中に夜光や市街光等が蓄積されて流星スペクトルが埋もれてしまうため, きわめて明るい流星でなければ分光データを取得できない。また, 幸運にも流星が視野を横切ったとしても, 銀塩写真や蓄積型CCD等の場合には分光器の分散方向と流星の軌跡が一致してしまうとスペクトルを得ることができない。一方, イメージ・インテンシファイアー(II)とビデオカメラを組み合わせた高感度ビデオ(II-CCTV)カメラは時間分解データを取得することが可能であり, 流星や大気発光現象等の過渡現象観測用カメラとして有効である。また, グリズムはカメラレンズの前に置くだけで容易に対物分光観測を行うことができる。1999年のしし座流星群以来, われわれは独自に開発したII-CCTVカメラや高感度ハイビジョン(II-HDTV)カメラとグリズムの対物分光器によって, 流星および流星痕の分光観測を行っている¹³⁾。また, 2006年1月のスターダストミッションや, 2010年6月の「はやぶさ」のサンプルリターンカプセルの大気再突入の際にも, II-HDTVカメラとグリズムによって分光観測が行われた。

3. 次世代大型望遠鏡用の新しい回折格子

分光観測装置の体積は, 補償光学を使用しない地上望遠鏡の場合には望遠鏡の口径の3乗にほぼ比例し, 宇宙望遠鏡の場合には観測波長の3乗にほぼ比例する³⁾。現在, 国際協力によってハワイに30メートル望遠鏡を建設する計画が進行している。また, 太陽系外地球型惑星探索のための3.5~10メートル級の宇宙望遠鏡計画も検討されている。これらの次世代大型望遠鏡用の分散光学素子には, 小型で高い効率と大きな角分散が求められる。筆者らは, する望遠鏡の次世代観測装置や次世代大型望遠鏡用の分散光学素子として, QB回折格子や新しいイメージン回折格子を考案して実用化を目指している。

^{*3} 2009年5月に改修されたハッブル望遠鏡によって発見された赤方偏移 z が8~9の22個の最遠方銀河候補が同年12月に発表され, 分光観測によって距離が確定された天体については, すばる望遠鏡の記録を超える。

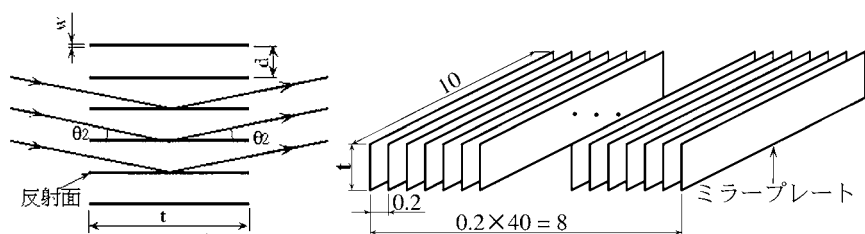


図3 QB (quasi-Bragg) 回折格子³⁾.

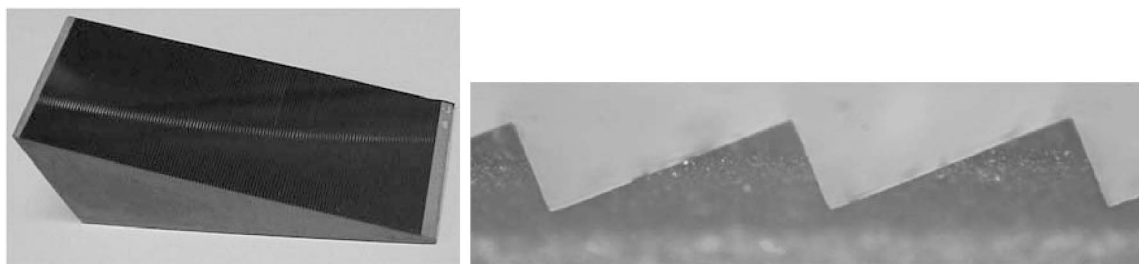


図4 ゲルマニウムのイメージン回折格子.

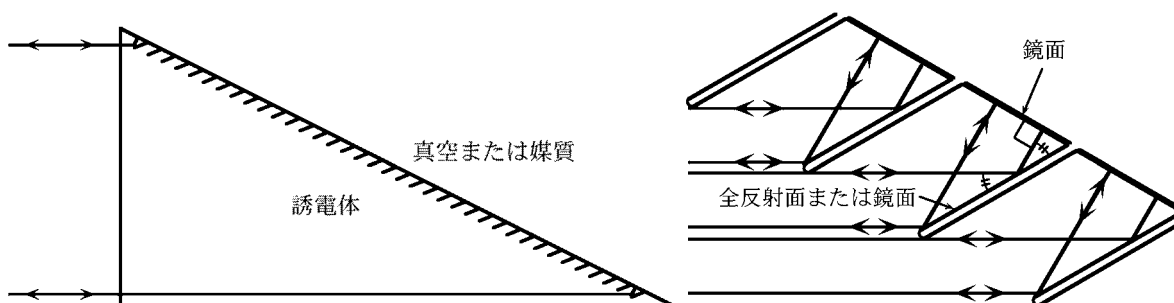


図5 新しいイメージン回折格子³⁾.

3.1 QB (quasi-Bragg) 回折格子のグリズム

一次の回折格子を利用した高分散分光装置では、撮像検出器の画素数によって計測波長帯域幅が制限されてしまう。エシェル分光法は高次の回折格子と垂直分散素子を組み合わせることでスペクトルを撮像検出器に折り込み、効率よく広い波長帯域を計測できる方法である。しかし、VPH 回折格子は次数が高くなると回折効率が低下してしまう。一方、高屈折率のプリズムに階段形状の回折格子を可視光領域で利用できる精度で一体加工することは困難である。

筆者らは高次回折光を利用する透過型回折格子として、ブラインドのように短冊状の鏡面が精度よく平行に配列された QB 回折格子を考案した (図3)¹⁴⁾。QB 回折格子は次数が高いほど高い回折効率を得られ¹⁵⁾、VPH 回折格子と同様に2個の高屈折率のプリズムの間に挟むことによって、臨界角による角分散の制限が緩やかになる³⁾。

筆者らは図3右のように、厚さ 200 μm の合成石英基板にクロムを蒸着して 10×10 mm に切断したミラープレート 40 枚を積層したブロックを、外周刃切断機により切断

して切断面を研磨し、厚さ 1.61 mm と 0.37 mm の2種類の QB 回折格子を製作した¹⁶⁾。接着層の厚さは 10 μm のガラスビーズを混入することにより制御した。試作品は、ミラープレートの間隔が可視光においては不完全であるために回折光の次数分離が不明瞭であったが、理想的な光束の入射角においては期待どおりに高い回折効率を得られることが実証された³⁾。現在、半導体プロセス技術等によって QB 回折格子を試作する方法について検討中である。

3.2 イメージン回折格子

イメージン回折格子とは光路が媒質で満たされた反射型の回折格子のことであり、同一形状の反射型回折格子の角分散に媒質屈折率を乗じた角分散を得ることができる。例えば屈折率が 4.0 のゲルマニウムを素材に使用することによって、同一形状の反射型回折格子の4倍の角分散を得ることができる。逆に角分散が同じであれば、口径と長さを4分の1に縮小することができるために、分光器全体の体積を従来の50分の1程度まで小型化することが可能になる。筆者らが製作したサイズが 30×30×72 mm の

ゲルマニウムのイメージョン回折格子 (図 4) を使用して、名古屋大学理学研究科において、すばる望遠鏡の次世代観測装置候補の IRHS (infrared high dispersion spectrograph) のプロトタイプとして、波長 $10\ \mu\text{m}$ (430 次) において $R \sim 44,000$ を達成する中間赤外線高分散分光観測装置を開発した³⁾。また、すばる望遠鏡の近赤外線分光撮像装置 IRCS (infrared camera and spectrograph) の高分散分光モード用として、シリコン (波長 $2\ \mu\text{m}$ において $n=3.3$) や ZnSe 等のイメージョン回折格子の開発も行われている。

しかし、従来の階段形状の回折格子では理想的な形状と滑らかな表面粗さを得るためには膨大な加工時間と人手を要するために、筆者らは図 5 のようなスリット状の格子のイメージョン回折格子を考案した¹⁷⁾。このイメージョン回折格子は階段形状の回折格子と比べて散乱損失が少なく、加工時間は従来の十分の一程度であると見積もられている³⁾。

各種グリズムや QB 回折格子、イメージョン回折格子の分光器は天文学観測ばかりでなく、地球惑星科学、生体科学、環境計測、半導体や化学製品等の製造・品質管理等の分野においても有用である。例えば小惑星探査機「はやぶさ」の近赤外線分光器や大気夜光観測用分光器、生体の立体スペクトルデータ取得システム等にも表面刻線型グリズムが利用されている。

誌面の都合でごく限られた観測例しか紹介できなかったが、グリズムによる分光観測は多岐にわたるので、関心がある方は国立天文台や天文関連のホームページ等を参照していただきたい。

VPH 回折格子用のホログラム樹脂は日本ペイント (株) のご厚意により無償で提供いただいた。すばる望遠鏡の FOCAS や MOIRCS 用のグリズムおよびイメージョン回折格子は国立天文台の依頼により、通信総合研究所 (現・情報通信研究機構)、理化学研究所、日本女子大学理学部、東北大学理学研究科、名古屋大学理学研究科、(株) 相馬光学、甲南大学理工学部、東京大学理学研究科等との共同研究で開発された。VPH グリズムやイメージョン回折格子の製作および評価はおもに日本女子大学や理化学研究所、国立天文台先端技術センターの設備を利用した。本研究は国立天文台「すばる望遠鏡観測装置 R&D 経費」や理化学研究所「産業界連携制度予算」、日本学術振興会「科学研

究費補助金」(研究課題番号 09559018, 14300059, 19035003, 19047003) 等の援助を受けて推進されている。

文 献

- 1) G. H. Herbig: "Emission-line stars associated with the nebulous cluster NGC 2264," *Astrophys. J.*, **119** (1954) 483-495.
- 2) E. F. Carpenter: "Nebular spectrograph of a new type," *Astron. J.*, **68** (1963) 275.
- 3) N. Ebizuka, K. Oka, A. Yamada, *et al.*: "Novel immersion grating, VPH grating, and quasi-Bragg grating," *Proc. SPIE*, **6273** (2006) 2G1-2G8.
- 4) I. K. Baldry, J. Bland-Hawthorn and J. G. Robertson: "Volume phase holographic gratings: Polarization properties and diffraction efficiency," *Publ. Astr. Soc. Pac.*, **116** (2004) 403-414.
- 5) N. Ebizuka, K. Oka, A. Yamada, M. Watanabe, K. Shimizu, K. Kodate, M. Kawabata, T. Teranishi, K. S. 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.
- 6) 海老塚昇, 家 正則, 杉岡幸次, 戎崎俊一: 特開 2002-14209, 米国特許番号 US 6,469,846 B2.
- 7) M. Kawabata, A. Sato, I. Sumiyoshi and T. Kubota: "Photopolymer system and its application to color hologram," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 2152-2156.
- 8) N. Ebizuka, K. Ichiyama, T. Yamada, C. Tokoku, M. Onodera, M. Hanesaka, K. Kodate, Y. K. Uchimoto, M. Maruyama, K. Shimasaku, I. Tanaka, T. Yoshikawa, N. Kashikawa, M. Iye and T. Ichikawa: "Cryogenic VPH grisms for MOIRCS," *Publ. Astr. Soc. Jpn.*, **63** (2011), in press.
- 9) M. Iye, K. Ota, N. Kashikawa, H. Furusawa, T. Hashimoto, T. Hattori, Y. Matsuda, T. Morokuma, M. Ouchi and K. Shimasaku: "A galaxy at a redshift $z=6.96$," *Nature*, **443** (2006) 186-188.
- 10) K. S. Kawabata, J. Deng, L. Wang, *et al.*: "On the spectrum and spectropolarimetry of type Ic hypernova SN 2003dh/GRB 030329," *Astrophys. J.*, **593** (2003) L19-L22.
- 11) O. Krause, M. Tanaka, T. Usuda, T. Hattori, M. Goto, S. M. Birkmann and K. Nomoto: "Tycho Brahe's 1572 supernova as a standard type Ia as revealed by its light echo spectrum," *Nature*, **456** (2008) 617-619.
- 12) O. Krause, S. M. Birkmann, T. Usuda, T. Hattori, M. Goto, G. H. Rieke and K. A. Misselt: "The Cassiopeia A supernova was of type IIb," *Science*, **320** (2008) 1195-1197.
- 13) S. Abe, N. Ebizuka, H. Murayama, K. Ohtsuka, S. Sugimoto, M. Yamamoto, H. Yano, J. Watanabe and J. Borovicka: "Video and photographic spectroscopy of 1998 and 2001 Leonid persistent trains from 300 to 930 nm," *Earth, Moon and Planets*, **95** (2004) 265-277.
- 14) 海老塚昇, 岡 恵子, 小館香椎子, 川端弘治, 家 正則: 特願 2005-506976 (国際出願 PTC/JP2007/8430 の国内移行).
- 15) K. Oka, N. Ebizuka and K. Kodate: "Optimal design of the grating with reflective plate of comb type for astronomical observation using RCWA," *Proc. SPIE*, **5290** (2004) 168-178.
- 16) 海老塚昇: 特開 2007-264109.
- 17) 海老塚昇: 特開 2007-164013.

(2010 年 7 月 26 日受理)