

天文学分光観測装置および分散光学素子

海老塚 昇

〈理化学研究所 光量子工学研究センター 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: noboru.ebizuka@riken.jp



本稿において、分光学の黎明期からの天文学者等の貢献を紹介し、主に分光計や検出器、分散光学素子について解説する。また、筆者らが開発した8.2 m すばる望遠鏡の観測装置等に搭載されている各種回折格子について紹介する。

1. はじめに

天文学分光観測は、一般の分光計測と異なり、光源の強度を調節することができず、主に望遠鏡の口径と分光計の分解能によって天体の観測限界等級が決まる。天文学者は、より暗い天体をより高い波長分解能で観測するために、大口径の望遠鏡とともに、分散が大きく高効率の分散光学素子を求め続けた結果として、分光学の発展には黎明期から現在に至るまで天文学者や天文学観測装置開発者の貢献が大きい。

1666年にニュートン (Sir Isaac Newton) が行った「太陽光の分光実験」および「色に関する考察」以降、近代までの天文学分光観測の進歩に関して著名な方々が丁寧にレビューされている¹⁾⁻³⁾。これらは第5章において簡単に紹介することとし、本稿においては主に近紫外線から可視光、赤外線分光観測装置や検出器、分散光学素子の進歩を中心に紹介する。特に回折格子については、その発明から現在に至るまで、第4章において少し詳しく紹介する。

なお、分光計測機器の一般的総称を日本語では分光器とする場合が多いが、分光器とは spectroscope の訳であり、本来は肉眼で観察する分光装置のこ

とを指す⁴⁾。一方、spectrometer は分光計と訳され、スペクトルの強度よりも波長測定に重点が置かれた装置のことを指すが、英語の spectrometer は分光計測機器全体の一般的総称としても用いられる⁴⁾⁻⁶⁾。本稿においては分光計測機器の一般的総称として日本語では分光計を用いることとする。

2. 天文学観測用の分光計

地上において、単素子の光検出器を用いた波長走査型の分光光度計 (spectrophotometer)⁴⁾ は、大気揺らぎにより光量に変化して SN 比や測定精度が著しく低下してしまう。そのために地上の近紫外線から可視光、赤外線の波長領域の天文学観測装置は、写真や撮像 (マルチチャンネル) 検出器を用いて測定帯域を同時に計測する分光写真器 (spectrograph)⁴⁾ が主流である。なお、CCD (charge coupled device) 等の撮像検出器を搭載した分光計はマルチチャンネル分光計 (multichannel spectrometer)⁷⁾ とも呼ばれる。同様の理由で、汎用の赤外線分光計として普及している走査型のフーリエ変換分光計は、地上の天文学分光観測装置に不向きである*1。本章ではプリズムと回折格子の分光観測装置について紹介し、天文学観測装

*1 赤外線天文衛星「あかり」等の宇宙望遠鏡には走査型のフーリエ分光計が搭載されている。

置としては少々特殊なフーリエ変換分光計やファブリ・ペロ干渉計等については割愛する。

2.1 プリズム分光計

分光器や分光計というと図1のようなプリズム分光計を思い浮かべる方が多いのではないだろうか。しかし、プリズムの媒質の屈折率の波長分散を利用するため、可視光から赤外線においては波長分散が小さく、さらにスペクトルが波長に対して線形ではないために、現在では多くの分光計には分散光学素子として回折格子が用いられている。

歴史的には、1813年にフォン・フラウンホーファー (Joseph Von Fraunhofer) が、プリズムの“分光器” (Spectroscope) を用いて、太陽光に多数の吸収線があることを眼視観測によって発見した¹⁾。それ以降、高効率でゴーストが少ない回折格子が開発される20世紀中頃までは、太陽や月、明るい恒星や惑星以外の暗い天体の分光観測にはプリズム分光計が主流であった。しかし、プリズムを用いて高い分解能の天体観測を行うためには、2-6個の正三角形のプリズムを直列（直線上ではない）に配置した分光観測装置が必要であった⁸⁾。天文学以外にも、アルミ蒸着が実用化される1930年代までは、紫外線において高効率の回折格子の製作が困難であったために、波長400 nm以下において屈折率の波長分散が大きくなる石英（160 nmまで透過）や水晶（146 nmまで透過）のプリズム分光計が使用されていた。なお、水晶には旋光性があるために、同一形状の右水晶と左水晶のプリズムを組み合わせて旋光性を相殺するコルニュ (Cornu) プリズムが使用される⁹⁾。

プリズムは回折格子より波長帯域が広く、効率が低いという利点もあり、現在でも暗い天体用の広波長帯域の分光観測装置等に使われている。例えば、シュミットカメラの補正板の前に数度のくさび型プリズムを置いた対物プリズム分光計が分光捜天観測用として使用されている。また、1990年頃までは赤外線の2次元撮像検出器の入手

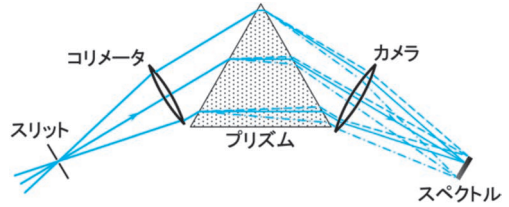


図1 プリズムの分光計。

が困難であったため、プリズムと十数素子の1次元撮像検出器を用いた、近赤外線低分散分光計が開発されている¹⁰⁾。

2.2 回折格子分光計

汎用分光計の分散光学素子として、反射型回折格子が多く使用されている。単素子検出器を用いた走査型の分光光度計あるいは、モノクロメータ（単色計）には一般的に平面回折格子が使用される。一方、撮像検出器を用いたマルチチャンネル分光計には、結像機能をもつ凹面回折格子も使用される。マルチチャンネル分光計は入射光を光ファイバと結合することによって、検出器を含めて手の平に乗る程度の小型化が進んでいる。

天文学観測においては前述のようにマルチチャンネル分光計が主流である。8.2 m すばる望遠鏡には、回折格子が搭載された共同利用観測装置として、現時点において可視光用が2台と近赤外線用が2台、中間赤外線用が1台稼働している。

3. 検出器

フォン・フラウンホーファー（1787-1826年）の時代の分光観測では眼視によるスケッチとマイクローメータを用いた波長計測が行われていた。その後、銀塩写真の発明から最新の撮像検出器に至るまで、天文学や分光学は、検出器の進歩とともに発展してきており、本章において、その経緯を紹介する。

3.1 銀塩写真

1825年に銀塩写真が発明されたが、当初は感度が低く、取り扱いが難しかったため、天文学分光観測には不向きであった。1851年に写真湿板

が発明され、感度が向上するとさまざまな元素の輝線光源を同時に撮影する方法により、波長校正の精度が格段に向上した。1861年には、キルヒホッフ (G. Kirchhoff) らによって太陽や恒星大気に存在するさまざまな元素が確認された。それを契機に原子の構造が解明されるようになり、量子力学が産声をあげることとなる²⁾。1871年に写真乾板が発明されると、さらなる感度向上によって、より暗い天体の観測が可能になるとともに、今まで紫外線から青までしか感光しなかった銀塩写真の感度が黄色や緑に広がり、観測対象も赤色巨星や矮星、惑星大気等に広がるようになった。

3.2 半導体単素子検出器、光電子増倍管

20世紀に入ると光電子増倍管やシリコンやゲルマニウム、硫化カドミウム等の半導体光検出器が発明された。しかし、前述のように単素子の光検出器は天体分光観測に適さないため、赤外線において単素子検出器を数十個程度並べた低分散分光計が開発された一方で、可視光においては依然として銀塩写真が主流であった。

3.3 イメージ増幅管、マルチチャンネルプレート

1950年頃に、光電面で生成された光電子を加速しつつ、電界レンズによって蛍光面に結像して画像の強度を数千倍に増幅するイメージ増幅管 (image intensifier) が発明された。しかし、ショット・ノイズが多く、光電面の面積が小さいために銀塩写真を凌駕することができなかった。その後、イメージ増幅管の光電子の焦点にマルチチャンネルプレートを置くことによって、光電子の画像を数百万倍に増幅する第二世代イメージ増幅管が開発された。マルチチャンネルプレートは、中空パイプ状の光電子増倍管を束にした素子である。光電面には、真空紫外線やエックス線にも感度があるタイプもある。また、数十万分の1秒の時間分解能を達成することも可能であり、高速現象の分光計測等にも利用される。

筆者らは独自に開発した明るい紫外線レンズと第二世代イメージ増幅管、放送局用のハイビジョ

ンカメラを組み合わせた、波長帯域が250–900 nmの紫外線–可視光高感度ハイビジョンシステムを開発し、反射型回折格子の対物分光計を取り付けて、2001年のしし座流星群の際に流星の紫外線観測を行った。その結果、大気吸収端の近くの307と310 nmにOHラジカルと同定される輝線バンドスペクトルの取得に成功した¹¹⁾。

3.4 CCD撮像検出器、CMOS撮像検出器

1969年にCCD撮像検出器 (以下CCD) が発明されると、1975年頃にはCCDの天文学撮像観測装置が開発されるようになった。当時は画素間の静電容量のばらつきが大きく、すべての電荷を転送することができなかったために、検出器の斜方から弱い光を照射して、信号の光電子を取り出す方式 (バイアス・ライト) が採用されることがあった。1980年代中頃にはカラーテレビカメラやビデオカメラ用に画素数が100×100–800×500程度で画素間の感度ムラが少ないCCDが実用化され¹²⁾、天文学観測用にも急速に普及した。さらにX線や紫外線、あるいは微弱光の計測用として裏面照射型のCCDが開発され、可視光線と近赤外線においては、量子効率が90%を超えるようになったために、銀塩写真に代わってCCDが天文学観測装置の主流になった。ただし、初期の裏面照射型CCDは素子の厚さが不均質であったために、高分散分光に使用すると表面とPN接合面との間で干渉縞が生じてしまい、データの整約に手間がかかるという難点があった。

CMOS撮像検出器 (以下CMOS) もCCDとほぼ同時期に発明されたが、当初は画素間の感度ムラが大きく、しばらくは低価格のデジタルカメラに搭載される程度であった。しかし、CCDより構造が簡単で低価格であるために、半導体の微細加工技術が高度化した1990年頃からCCDに代わってビデオカメラや高級デジタルカメラにもCMOSが搭載されるようになった。最近は数十枚のCMOSを搭載した広視野の高速撮像・天文学観測装置が開発されている¹³⁾。さらに裏面照射型のCMOS

も開発されており、今後は、CCDに代わって、CMOSが天文学観測用検出器の主流になると予想される。

3.5 赤外線撮像検出器

1980年代後半の冷戦の終結とともに、米国では軍事機密であった半導体の赤外線撮像検出器が入手可能になった。筆者らが1991年の夏にハワイ島・マウナケア山頂のNASA 3.2 m望遠鏡 (IRTF) の見学に訪れたときに、ハワイ大学のトクナガ (Alan Tokunaga) 教授に案内していただき、彼から、偶然にも、その日の夜にNICOMS 3 (256×256画素のMCT: 水銀カドミウム・テルル撮像検出器) を搭載したハワイ大学の近赤外線カメラ撮像装置^{*2}のファーストライト観測を行うと聞いた¹⁴⁾。NICOMS 3はハッブル宇宙望遠鏡の近赤外線多天体分光撮像観測装置 (NICMOS: Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrograph) 用に開発された波長1-5 μmの256×256画素の赤外線撮像検出器である。その当時、筆者は、まだ光工学専攻の修士の学生で、天文関連に進学するとは思ってもいなかったもので、その重要性がわからなかった。

翌年に総合研究大学院大学天文科学専攻 (国立天文台) の博士課程後期に進学して、その晩が赤外線天文学にとってエポックメイキングな出来事であったことを知って驚いた次第である。最近では4,000×4,000画素の赤外線撮像検出器も開発され、広視野の多天体分光・撮像観測装置や高分散分光観測装置が数多く開発、あるいは計画されている。

4. 回折格子

グレゴリー (James Gregory, グレゴリー式反射望遠鏡の発明者) はコリンズ (John Collins) に宛てた1673年5月13日付の手紙の中で、ニュートンの実験の1年後 (1667年) に「ニュートン氏

の実験と同じように、丸い小穴を開けた暗室に太陽光を導き、その小穴の位置に羽根を置く。小穴の反対の白壁に直接紙を置いて太陽光を投影すると、いくつもの小さな円や楕円が現れ、中心は円形で白色であるが、それ以外は着色している。」と記述している¹⁵⁾。しかし、1841年にこの手紙の内容が出版されるまでは一般に知られることはなかったと考えられ、教科書等の多くには、以下の二人の業績が回折格子の発明とされている。1785年にアメリカの天文学者リッテンハウス (David Rittenhouse) が2本のネジの間に毛髪を張って1/2インチ幅に53本の線をもつ回折格子らしきものをつくり、暗室にスリット状の穴を開けて観察したところ、スリットが何本にも分かれて見えてかつ中心から離れたスリットほど色が付いていることを報告した。また、青よりも赤いほうが中心より離れていることにも気づいていた。この発明も当時は世間から評価されず、30年以上後の1819年にドイツのフォン・フラウンホーファーが回折格子の原理を独立に再発見して、2本のネジの間に1 mmあたり13本の針金を張った透過型回折格子や金メッキしたガラス板に1 mmあたり20本の等間隔の溝を彫った反射型回折格子を製作して、脚光を浴びることになった。

スウェーデンのオングストローム (Anders Jonas Angstrom) はガラスに直接1 mmあたり200本の筋を引いた回折格子を製作して、1865年から太陽スペクトルの観測に使用した。また、ジョンズ・ホプキンス大学のローランド (Henry Augustus Rowland) らは1880年代に高性能なルーリングエンジン (刻線機) を開発して回折格子の製作技術の発展に大きく寄与した。ルーリングエンジンとはガラスや金属の表面にダイヤモンド工具を押しつけて、溝を削るか、素材の表面形状を変形させて、回折格子を製作する加工装置である。さらにローランドらは1882年に凹面回折格子を開発し

^{*2} ハワイ大学2.2 m望遠鏡の“可視光”クーデー焦点分光写真儀やIRTFの高分散分光装置CSHELL等にも共用された。

て、収差の少ない分光計を製作した。凹面回折格子はコリメータやカメラ（結像光学素子）が必要なく、高効率の分光計をつくることができる。そのため、透明なレンズ材料がなく、金属の反射率が低下してしまう真空紫外線や極端紫外線、軟X線において重要な分散素子である。

マイケルソン（Albert Abraham Michelson）は1892年頃から、シカゴ大学において自身が1881年に発明した干渉計からの信号によってルーリングエンジンの格子周期を自動制御する手法の開発に取り組んだ。1915年にはルーリングエンジンで製作される回折格子の高精度化（ゴーストの低減）かつ大型化（最大240×710 mm）が可能になった¹⁶⁾。1940年代後半から、自動制御技術が高度化され、数多くのルーリングエンジンが開発された。日本においても1955年頃から東京教育大学附属光学研究所と日本光学工業(株)(現(株)ニコン)との共同開発によって国産のルーリングエンジンが開発された。

1960年にレーザーが発明されると銀塩写真等に二光束干渉露光によってゴーストが少ないホログラフィック回折格子が製作されるようになった。また、この頃から、矩形や格子が2のN乗段の階段形状の回折格子（バイナリ・オプティクス）をシリコンや石英等に微細加工する技術が発展し、コンピュータ・ホログラム（CGH: Computer Generated Hologram）や回折光学素子（DOE: Diffractive Optical Element）と呼ばれる光学素子が光ピックアップや光通信用等が開発されるようになった。

現在は、位置決め制御分解能が1 nm以下の超精密加工装置が開発され、ダイヤモンド工具の耐久性も格段に向上したため、レーザーの二光束干渉露光によるホログラフィック回折格子を凌駕するようなDOEの製作が可能になっている。一方、屈折率を正弦波状に変化させたVPH（Volume Phase Holographic）回折格子は従来の表面刻線型回折格子より高い効率を達成できるために、天文学観

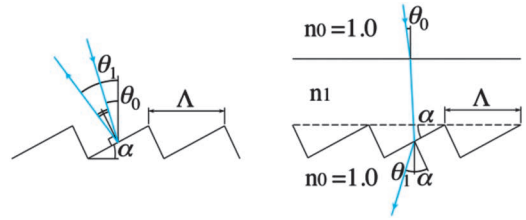


図2 反射型(左)と透過型(右) エシェレット回折格子の概念図。αはブレイズ角、Λは格子周期、 n_0 は空気(真空)の屈折率、 n_1 は格子の屈折率、 θ_0 は入射角、 θ_1 は回折角。

測用にも多く使われるようになった。

4.1 反射型回折格子

比較的簡単な光学系により波長走査ができるために、反射型回折格子は多くの走査型分光計に使用されている。天文学用には、高分解能の分光観測用として反射型回折格子が普及している。しかし、4.2節において述べるように、望遠鏡の大型化に伴って分光観測装置の巨大化が問題になっている。

4.1.1 エシェレット回折格子

ジョーンズ・ホプキンス大学のウッド（Robert Williams Wood）は回折格子の格子形状の研究を行い、1910年にエシェレット（echelette）あるいはブレイズド（blazed: 強く輝く）回折格子と呼ばれる高効率の回折格子を発明した。この回折格子の格子形状は、図2左のように、ある特定の次数と波長に光強度が集中するように、入射光と回折光が格子表面において鏡面反射する角度（ブレイズ角）に設定された非対称のV溝であり、ウッドらは、その製作のためのルーリングエンジンを開発した。1912年以降はカリフォルニア工科大学ウイルソン山天文台に回折格子の刻線部門が設立され、ウッドらの仕事を引き継ぎ、多くのエシェレット回折格子が製作された⁸⁾。

1970年代中頃には理化学研究所（以下、理研）の青柳克信や(株)島津製作所の佐野一雄らによって高効率のホログラフィック回折格子が実用化された。彼らが考案したホログラフィック回折格子

は、ガラス基板上的のアクリル樹脂の矩形回折格子を加熱して格子の断面を半円に変形させた後に、斜めイオンエッチングにより、非対称なV溝に近い格子形状に整形する方法によって高い効率を実現した¹⁷⁾。

今日、これらのエシェット格子は分光計測機器や天文分光観測装置に最も多く使用されている。なお、カタログ製品の回折格子はルーリングエンジンやホログラフィックに製作されたエシェット回折格子を金型として、樹脂に転写したレプリカ回折格子が一般的である。

4.1.2 エシェル回折格子

非対称なV溝の幅が広い側を使う回折格子をエシェット、狭い側を使う回折格子をエシェル(echelle)と呼ばれ¹⁸⁾、いずれもフランス語でそれぞれ、棚とハシゴを意味する。マイケルソンは1898年に厚さが等しくなるように精密に研磨した水晶を少しずつずらして階段状に並べたエシェロンと呼ばれる高分解能分光計用の回折格子を考案した¹⁹⁾。エシェロン(echelon)とは英語では階層や地位、フランス語ではハシゴの丸く削った横棒を意味する。エシェロンの表面に反射膜を塗布した表面反射型のエシェロン、すなわちエシェル回折格子は、水晶や光学ガラスの透過型エシェロンより約4倍の波長分散を達成することができる。マイケルソンはそのことに気づいていたが、当時の技術では製作が困難であり、初めてエシェル回折格子が製作されたのは1933年のことである²⁰⁾。

エシェル分光法は、高次回折光用のエシェル回折格子と、垂直分散素子としてプリズムあるいは1次の回折格子を組み合わせ、写真乾板や2次元検出器上にスペクトルを折り込むことによって同時に広い波長帯域を高分解能で観測する手法である。このため、本来、エシェル回折格子とは、前述のように格子形状を意味するが、高次回折光用の回折格子のことを指すこともある。また、エシェル分光計の高次の回折光が縞状に並んだスペクトルは、エシェルグラムまたはエシェルスペク

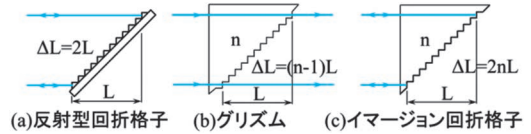


図3 各種回折格子の光路差 ΔL 。

トルとも呼ばれる。

望遠鏡の大型化に伴い、その集光力を生かして高分散分光観測を行うために、分光観測装置に対しても、より大きな分解能が求められる。そこで観測の効率が良いエシェル分光法は、観測時間の制限が厳しい大型望遠鏡にとって重要な観測手段である。

4.1.3 イマージョン回折格子

イマージョン(immersion)とは媒質に浸すという意味であり、イマージョン回折格子とは光路が高屈折率媒質で満たされた回折格子のことである。前述の反射型エシェロンも水晶や光学ガラス側から反射を利用した場合には、イマージョン回折格子といえる。図3は回折格子の傾きが等しい場合の(a)反射型回折格子、(b)プリズム(直視回折格子、4.3節)、(c)イマージョン回折格子の光路差を示す。ここでスリット幅やレンズ等の焦点距離が等しい場合に、分光計の分解能は回折格子によって生じる光路差 ΔL に比例する。イマージョン回折(図3c)は、反射型回折格子(図3a)に対して ΔL が屈折率 n 倍なので、 n 倍の分解能を達成できる。すなわち、同じ分解能の分光計では、容積を n のほぼ3乗分の1に劇的に縮小できる。例えば、シリコン(1.2–6.7 μm にて透明、2.0 μm において屈折率： $n=3.45$)・ウエハに異方性エッチングによってノコギリ歯形状の格子が加工されたシリコンの回折格子とシリコンのプリズムを接合した、シリコンのイマージョン回折格子が開発され、米国テキサス州のマクドナルド(McDonald)天文台2.7m望遠鏡の近赤外線高分散分光観測装置に搭載されている²¹⁾。

筆者らはサイズが30×30×72 [mm] のゲルマ

ニウム (1.95–14 μm にて透明, 10 μm において $n=4.0$) のプリズムの斜面上に, 理研の超精密加工装置とダイヤモンド砥石を用いて階段状の格子の研削加工を行い, 波長7–14 μm 用のゲルマニウムのイメージョン回折格子を開発した²²⁾. このイメージョン回折格子は, 名古屋大学において開発された中間赤外線高分散分光観測装置GIGMICSに搭載され, 東広島天文台の1.5 mかなた望遠鏡に取り付けて, 金星や惑星状星雲の高分散分光観測に使用された.

4.2 透過型回折格子

透過型回折格子は, 図4下のように近傍にレンズ等を置くことによって, コリメータやカメラレンズの口径を小さくすることができるために, 分光観測装置全体の小型化が可能である. また, 透過型は完全なリトロマウントの光学系(入射角と回折角が等しい)を組むことができるため, スペクトルの湾曲や収差が小さい. 一般的に望遠鏡の大型化に伴って分光観測装置も大型化してしまうため, TMT等の次世代30 m級巨大望遠鏡の分光観測装置用の分散光学素子として, 高分散の透過型回折格子の実用化が望まれており, 国内外の天文学者や技術者によってさまざまな透過型回折格子の開発が行われている.

筆者らも透過型の高分散回折格子として, ミラー面を鏡戸のように平行に等間隔に配列したQB (Quasi-Bragg) 回折格子や, 断面が鋭角なノコギリ歯形状の格子の一方の面から入射した光束をもう一方の面で内部反射させることによって, 大きな回折角(角度分散)を達成できるRFT (Reflector facet transmission) 回折格子等を考案して, 原理実証や実用化開発を行っている. しかし, 紙面の都合上, これらの新しい回折格子は別の機会に紹介することとし, 以下に数種類の透過型回折格子やグリズムについて説明する. V溝格子の表面刻

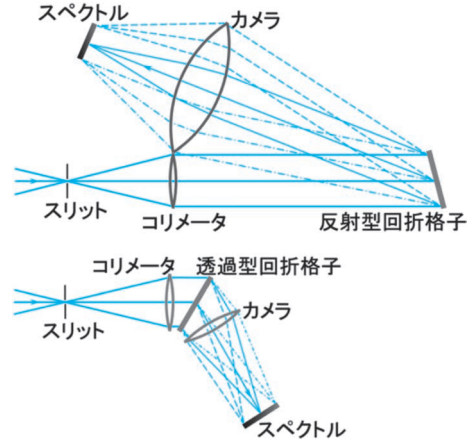


図4 反射型(上)および, 透過型(下)回折格子の分光計のサイズ.

線型回折格子は主に低分散分光用, VPH回折格子は1次回折光の主に中分散分光用に使用されている. ポリウム・バイナリ回折格子は中分散エシェル分光用として開発が行われているが, 現時点においては天文学観測装置には搭載されていない.

4.2.1 表面刻線型回折格子

V溝格子や溝が浅い矩形格子等の透過型回折格子は, 一般に表面刻線型(SR: surface relief)回折格子と呼ばれる. SR回折格子はレプリカ加工により量産が可能であるために比較的安価であり, 低分散グリズムとして多く使用されている. しかし, 図2右のような透過型V溝回折格子は, 1次回折光の高分散分光用には不向きである^{*3}. 一方, 高次回折光では, 1次回折光よりも分散を大きくできるが, 格子の表面における臨界面角によって波長分散が制限される. 例えば, 格子の屈折率が1.5の透過型V溝回折格子は, 入射角と回折角が 30° 以上で, 回折光を外に取り出すことができなくなる.

*3 透過型V溝回折格子は, 屈折率が1.5の場合に格子周期が波長の4倍以下において1次回折光の効率が急激に低下する. 一方, 反射型エシェル回折格子は, 格子周期が波長の2倍以下において1次回折光の回折効率が低下するために, 同一口径の透過型V溝回折格子より分解能を約2倍大きくすることができる.

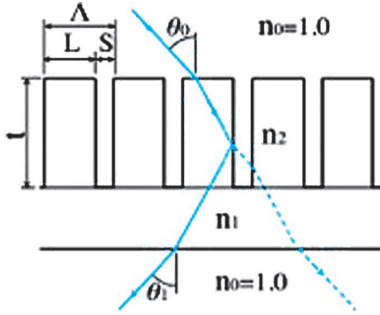


図5 VB回折格子の概念図。 n_0, n_1, n_2 は、それぞれ空気（真空）、基板、格子の屈折率、 t は格子の高さ（厚さ）、 L は畝の幅、 S は溝の幅、その他は図2と同じ。

4.2.2 VPH回折格子

VPH回折格子は、屈折率が正弦波状に変調された厚い透過型回折格子であり、結晶のX線ブラッグ回折と原理が似ているために、ブラッグ回折格子とも呼ばれる。VPH回折格子は、光波と周期格子の電磁気的なカップリングにより、1次回折光のS偏光（電界が格子と並行に振動する偏光）あるいはP偏光（電界がS偏光と垂直に振動する偏光）のいずれかの回折効率を最大100%まで達成することが可能であり、SR回折格子に対して数倍の大きな角度分散を達成できる。そのため、すばる望遠鏡をはじめ多くの天文学観測装置にVPH回折格子あるいはVPHグリズムが搭載されている²²⁾。

しかし、VPH回折格子は、SとP偏光の回折効率の特性が異なるために、回折角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くなるという欠点がある。また、高次回折光の効率が低く、エシエルタイプの回折格子としては利用できない。筆者らは、現在、自然偏光や円偏光に対しても最大100%の回折効率を達成することが可能な複屈折性のVPH回折格子の開発を行っている。そのホログラム記録材料として、紫外線硬化型の液晶と可視光硬化型の樹脂を混合し、液晶と樹脂の屈折率および厚さを調整することによって、SとP偏光の回折効率特性を一致させることを目指

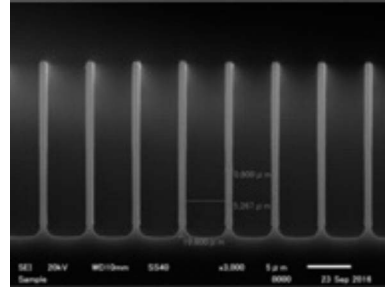


図6 シリコンの矩形格子。格子周期 $\Lambda=5.1 \mu\text{m}$ 、高さ $t=20 \mu\text{m}$ 、幅 $L=0.8 \mu\text{m}$ 。

している。

4.2.3 ホリウム・バイナリ回折格子

図5のような溝が深い矩形回折格子のことをホリウム・バイナリ (VB) 回折格子と呼ぶ。VB回折格子は、格子の畝と溝の幅(L&S: Line and space)を変えることによって、1次あるいは複数の高次回折光において、SとP偏光の回折効率特性をほぼ一致させることが可能である。これまで、紫外線や電子ビーム用のレジスト（樹脂）、石英の異方性エッチング等により、格子周期が0.3-数 μm 、溝のアスペクト比が1:10を超えるようなVB回折格子を試作した例が報告されているが、溝がテーパーになるなど、図5のような理想的な形状のVB回折格子を製作することが困難であった^{23), 24)}。

基板がシリコンである場合には、サイクルエッチングあるいはボッシュ法 (Bosch process) と呼ばれる手法によって、幅 $0.1 \mu\text{m}$ 、アスペクト比が1:50以上の溝加工も可能になった。筆者らは豊田工業大学との共同研究によって、高アスペクト比のVB回折格子の金型として使用するために、シリコンの高アスペクト比の回折格子を開発することになった。これまでの試作により、サイクルエッチングにより幅 $2 \mu\text{m}$ の畝を加工し、酸化処理によってシリコンの表面に厚さ約 $1 \mu\text{m}$ の酸化膜を形成させた後、酸化膜のエッチングを行うと、シリコンの表面から酸素が拡散して酸化された部分の壁面の両側が約 $0.4 \mu\text{m}$ ずつ除去される。この工程を数回繰り返すことによって、可視光にお

いても散乱が少ない極めて滑らかな光学面を達成することができた。

具体的にはL & Sが2.0 : 3.1 μm のマスクを用いてシリコン基板上にレジストを形成し、サイクルエッチングによって深さ10と20 μm の溝を掘り、酸化膜形成と除去を2回行った。その結果、図6のように、それぞれ幅0.44と0.8 μm の側面が極めて滑らかな格子が得られている。

4.3 グリズム

グリズムとは図3bのように透過型回折格子とプリズムを組み合わせた直視回折格子のことである²²⁾。ハービグ (G. H. Herbig) は1954年に反射望遠鏡の主焦点あるいはニュートン焦点に置かれた銀塩写真乾板の直前に透過型回折格子を取付けて、スリットレス分光観測を行った際に、プリズムを組み合わせることによって、スペクトルの収差が軽減されることを発見した²⁵⁾。また、カーペンター (E. F. Carpenter) は透過型SR回折格子をプリズムの斜面に貼付けた分散光学素子を1963年に報告しており、グリズムのことをカーペンター・プリズムと呼ぶこともある²⁶⁾。

CCDや赤外線撮像検出器等を天文学観測用に使用するためには、専用読み出し回路の開発等の専門知識と莫大な費用がかかり、撮像観測と分光観測用それぞれに撮像検出器を用意するのは困難であった。また、CCD等を用いた撮像観測装置の多くは、多層膜干渉フィルタやリオ・ストップ (迷光を除去するための絞) 等の光学素子を置くために、天体からの光束をいったん、平行光束 (コリメート光) にする。このような撮像観測装置に分光機能を付加するために、焦点面にスリットが置かれ、グリズムがフィルタ・ホイールに組み込まれるようになった。

4.3.1 SRグリズム

光学ガラスのプリズムとレプリカのSR回折格子を組み合わせたSRグリズムは、近年開発された大半の撮像観測装置に低分散の分光観測機能を追加するために搭載されている。筆者も、すばる望

遠鏡の可視分光撮像装置FOCAS²⁷⁾や名古屋大学の可視光近赤外線3色同時分光撮像観測装置Trispec用のSRグリズムを開発する機会を得た。また、筆者らは、すばる望遠鏡の近赤外線コロナグラフCIAO用にサイトップという赤外線透過率が高いフッ素系樹脂のプリズムをダイヤモンド切削により階段形状のSRグリズムも開発した²⁸⁾。

現在は、すばる望遠鏡の近赤外線広視野撮像分光装置MOIRCS用に図7左のような硫化亜鉛 (ZnSe, 波長1.5 μm において屈折率 $n=2.45$) の高屈折率プリズムとレプリカのSR回折格子を組み合わせたハイブリッド・グリズムを開発している。このグリズムは、屈折によって直進方向に光強度を導くために格子の頂角が $\gamma=61.8^\circ$ の鋭角である。理研の超精密加工装置に先端が 61.8° の単結晶ダイヤモンドバイトを取り付けて、シェーパー加工 (鋭利な刃物でカンナのように削る加工) によってレプリカ実験用の金型 (50×50 [mm]) を試作した。さらに、この金型を使用してレプリカ実験を行った結果、金型が忠実に転写され、回折光は可視光用としても十分満足できる波面精度を達成した。筆者らは近日中に実機 (70×70 [mm]) の加工を行う予定である。

4.3.2 VPHグリズム

図7左のように高屈折率プリズムとSR回折格子を組み合わせたグリズムは、高屈折率プリズムと低屈折率のSR回折格子の境界における臨界角のために分散が制限されてしまう。一方、VPHグ

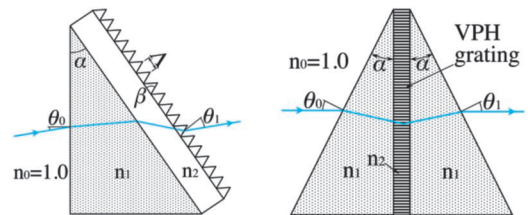


図7 ハイブリッド・グリズム (左) とVPHグリズム (右) の概念図。αはプリズム頂角、βはブレイズ角、 n_1 はプリズムの屈折率、 n_2 は格子の屈折率、その他は図2と同じ。

リズムは、図7右のように2枚のプリズムにVPH回折格子を挟む構造である。この構造は臨界角による制限が緩やかであるために、ZnSe等の高屈折率プリズムと組み合わせて、大きな分散を達成できる。

FOCASやMOIRCS、岡山天体物理観測所の可視光観測装置KOOLS (Kyoto Okayama Optical Low-dispersion Spectrograph)、名古屋大学の可視光観測装置WFGS II (Wide Field Grism Spectrograph)には筆者らが製作したVPHグリズムが搭載されている^{27), 29)}。なお、FOCAS用VPHグリズムの一部は日本女子大学の学生、MOIRCS用は東北大学と日本女子大学の学生および相馬光学の技術者、WFGS II用は名古屋大学の学生と研究員が開発を行った。

FOCASに最初に搭載されたVPHグリズムは、開発開始から約2年半経ったころの、ハワイに持ち込む1週間前に高効率のVPH回折格子が出来上がった。このVPH回折格子は回折光の波面誤差が上限の2倍程度であったが、筆者は他の光学素子の波面誤差が小さいので、この程度の波面誤差は許容できると判断した。しかし、学生は規格を満足するVPHグリズムを作りたいと頑張り、出発の2日前に、回折効率も波面精度もようやく規格を満足するVPHグリズムが完成し、無事にハワイに持ち込んでFOCASに搭載することができた。また、MOIRCS用やWFGS II用のVPHグリズムも学生や研究員、技術者が理研や国立天文台に長期滞在して開発を行った。

5. 天文学分光に関するレビュー

本稿を締めくくるにあたり、最後に著名な研究者の方々の天文学分光に関するレビューを数編紹介する。小暮智一 京都大学名誉教授の「恒星天文学の源流」¹⁾と題する23回の連載のうち、分光の開幕期に関するレビューは、1-6回にわたり、合計60ページの大作である。このレビューにおいて、天文学と分光学に貢献された方々の生いた

ちから人物像に至るまで、詳しく紹介されている。岡武史 シカゴ大学教授のレビュー「分光学と天文学」²⁾には、ニュートン(1666)の仕事からシュワルツシド(Karl Schwarzschild, 1916)による一般相対論および分子分光の基礎となる仕事について、科学の進歩と結びつけて紹介されている。佐藤修二 名古屋大学名誉教授のレビュー「天体分光の歩み」³⁾には、ニュートンやフォン・フラウンホーファーの仕事、電波から γ 線に至るスペクトル域の拡大について紹介されており、佐藤さん独特の解釈が面白い。ニュージーランドのハーンショウ(J. Hearnshaw)カンタベリー大学教授の著書「Astronomical spectrographs and their history」⁸⁾の第1章には分光の歴史が詳しく書かれており、図や写真も多く、読み物としても面白い。

謝 辞

本研究は日本女子大学小館研究室、名古屋大学物理学教室Z研、同 平原研究室、東北大学市川研究室、同 島津研究室、豊田工業大学佐々木研究室、シチズン時計(株)研究開発センター、(株)相馬光学等との共同研究によって推進された。VPH回折格子用のホログラム記録材料は日本ペイント(株)より、無償提供していただいた。ハイブリッド・グリズムの試作品は(株)島津製作所において無償でレプリカ加工をしていただいた。回折効率の数値計算は理研の岡本隆之専任研究員が行った。回折格子等の試作や測定には、豊田工業大学ナノテクノロジープラットフォーム、国立天文台先端技術センターの設備を利用させていただいている。本研究は、国立天文台のすばる望遠鏡R&D経費およびTMT戦略的基礎開発研究経費、共同開発研究経費、理研の産業界連携予算、科学研究費 基盤研究Bと挑戦的萌芽研究、日本科学技術振興機構A-Step探索タイプ予算等の支援により推進された。最後に執筆の機会を与えてくださった諸隈智貴編集委員に感謝する。

参考文献

- 1) 小暮智一, 2009, 天文教育, 21(1), 43
- 2) 岡武史, 2013, 分光研究, 62, 3
- 3) 佐藤修二, 2017, 計測と制御, 56, 414
- 4) 南茂夫, 1992, オプトロニクス, 11(2), 55
- 5) <https://ja.wikipedia.org/wiki/分光器> (2017.11.12)
- 6) <https://en.wikipedia.org/wiki/Spectrometer> (2017.11.12)
- 7) 天文学大事典編集委員会編, 2007, 天文学大事典 (地人書館), 項目「分光」, 「回折格子」
- 8) Hearnshaw, J., 2009, *Astronomical spectrographs and their history* (Cambridge University Press)
- 9) 工藤恵栄, 1985, 分光の基礎と方法 (オーム社), 342
- 10) Takami, H., et al., 1992, PASP, 104, 949
- 11) 阿部新助ほか, 2002, 天文月報, 95, 515
- 12) 石橋謙三, 伏木薫, 1994, 日経エレクトロニクス, 12月7日号, 155
- 13) 酒向重行, 2017, 天文月報, 110, 42
- 14) Hodapp, K. & Tokunaga, A., 1992, ESO Conference on Progress in Telescope and Instrumentation Technologies, ed. Ulrich, M. H. (ESO Garching), 621
- 15) Barrow I., et al., 1841, *Correspondence of Scientific Men of the Seventeenth Century Vol. 2* (Oxford Univ. Press, Oxford), 254
- 16) Michelson, A. A., 1915, Proc National Academy of Science, USA, 1, 396
- 17) Aoyagi, Y., et al., 1979, Optics Communications, 29, 253
- 18) 遠山健次郎, 1973, 応用分光ハンドブック (朝倉書店), 299
- 19) Michelson, A. A., 1898, ApJ, 8, 37
- 20) Williams, W. E., 1933, Proc Physical Society, 45, 699
- 21) Kaplan, K. F., et al., 2017, ApJ, 838, 152
- 22) 海老塚昇, 2010, 光学, 39, 566
- 23) Gupta, M. C. & Peng, S. T., 1993, Applied Optics, 32, 2911
- 24) Jia, W., et al., 2008, Applied Optics, 47, 6058
- 25) Herbig, G. H., 1954, ApJ, 119, 483
- 26) Carpenter, E. F., 1963, AJ, 68, 275
- 27) Ebizuka, N., et al., 2011, PASJ, 63, S605
- 28) Ebizuka, N., et al., 2000, ASP Conf. Ser., 195, 564
- 29) Ebizuka, N., et al., 2011, PASJ, 63, S613

Astronomical Spectrometer and Dispersive Optical Elements

Noboru EBIZUKA

RIKEN Center for Advanced Photonics, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: In this article, the author will introduce the contribution of astronomers and astronomical engineers for spectroscopy from its dawn, and mainly explain spectrometers, detectors, and dispersive optical elements. In addition, the author will introduce various kinds of diffraction gratings installed in instruments of the 8.2 m Subaru telescope.