最近の回折格子製作技術

原 田 達 男*
Tatsuo HARADA

1. はじめに

回折格子は光学面上にきわめて多数の平行みぞを刻んだ分光分散子であり、プリズムと比較した場合、高分散、高分解能など分光装置における性能面での特長のほか、材料的制約が少なく、レプリカ技術により大量複製が可能であるといった製作面での利点もあり、最近の分光装置では、ほとんどが分散子に回折格子を使用するようになってきている。しかしながら回折格子の製作では、1 mm あたり数百本から数千本におよぶ微細みぞを $0.01 \mu\text{m}$ 以下の精度で配列する必要がある⁽¹⁾、回折格子の格子みぞを刻むルーリングエンジンには、精密工作機械の中でも最も高度なものとして、先進各国においても国家的プロジェクトでその開発が進められた。

本稿では、光波干渉制御技術の導入により、精密機構、光学、エレクトロニクス総合技術となった最近のルーリングエンジン技術と、ルーリングエンジンを使用しない新しい回折格子製法である、ホログラフィック回折格子製作技術に関し解説する。

2. 超大形回折格子の刻線

1950年代の後半、アメリカ MIT のハリソンらは、従来純機械的超精密加工技術であった回折格子用ルーリングエンジンに光波干渉制御技術を導入し、これにより、それまで回折格子の本質的欠点とされていた周期的みぞ間隔誤差に起因するスペクトル上のゴースト（偽スペクトル）を実用上無視し得るオーダーまで減少せしめ、回折格子の理論分解能をほぼ 100% 満足する、最大 250 mm 幅の回折格子の供給を可能にした⁽²⁾⁽³⁾。

1960年代の後半から、大形回折格子の開発は、天文学分野からの要求に基づき、天体望遠鏡と組み合わせる大口径分光器の集光効率向上を目的としたものに移行し⁽⁴⁾、アメリカにおいて最大幅 600 mm 以上の超大形回折格子の刻線为目标とした二つのルーリングエンジン開発が行われた。

MIT の C エンジン⁽⁵⁾は、1940 年代から同大学で続けられたルーリングエンジン開発の最後の装置である。このエンジンは、図 1 に示すように、原理的には水銀燈光源を使用して初めて光波干渉制御に成功した同大学の A エンジン⁽²⁾と同じ、アナログ式光波干渉制御を行うシェーパ形刻線機である。本装置では光学平面に案内されてダイヤモンドツールが往復動を行い、これと連動して格子素材移動台が送りねじにより無停止で連続的に送られる。格子素材の移動状態は、レーザ干渉計の周期的明暗信号によりモニタされ、一方格子素材の送りに機械的誤差がない場合の、理想的な送り状態における干渉計信号に相当する周波数の標準信号を設け、標準信号と干渉計信号の位相差変動により格子素材送り誤差を検出し、直ちに送りねじの回転を補正して正しい格子みぞ間隔の送りを作る。

回折格子に許容される格子みぞ位置誤差は、ス

図 1 MIT エンジン制御系

* 正員、日立製作所中央研究所 (〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280)。

ペクトル上のゴーストの原因となる周期的みぞ位置誤差と、分解能低下の原因となる累積のみぞ位置誤差およびみぞ平行度誤差に分類されるが、一般に前者に対しては $0.01\mu\text{m}$ 、後者に対しては $0.1\mu\text{m}$ が実用上の限界とされている。周期的みぞ位置誤差の除去に関しては、光波干渉制御技術の導入によりすでに技術的に解決済みであったが⁽³⁾、最大 600 mm に及ぶ超大形回折格子の刻線のためには、広範囲の測長が可能な干渉計光源と、格子素材を含め総重量 400 kg に及ぶ移動台を $1\mu\text{m/s}$ 以下の極低速で円滑に移動せしめる精密移動機構の開発が必要不可欠であった。この要求にこたえたのが、周波数安定化 He-Ne レーザの実用化と、三次元測長機用精密移動台の供給である。

周波数安定化 He-Ne レーザは、1日あたり $\pm 1\text{ MHz}$ 以下の発振周波数安定度が保証され、これにより回折格子製作用干渉計光源として十分な安定性と干渉距離が得られるようになった。ただし、光波干渉測長を大気中で行う場合、気温や気圧の変動に対し空気の屈折率が変化し使用波長が変化する。気温、気圧の変化に対する空気屈折率の変化量はそれぞれ約 $0.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.4 \times 10^{-6}/\text{Torr}$ となり、温度変化の影響は一般の金属材料の熱膨張係数より1けた小さい。それゆえ MIT の装置をはじめ一般のルーリングエンジンでは、気温に関してはエンジン室の温度変化を 0.01°C 以下に制御し、気圧の変動はこれを常時計測して波長変動の影響を補正する方式が取られている。

一方ルーリングエンジン機構部としては、精密工作機メーカーとして有名なムーア社の三次元測長機 (No. 4) がベースになっており (図2)、これにより最大 813 mm の格子素材送りと 460 mm の

ツール往復動が可能になった。この装置では、刻線する格子みぞの平行精度を得るため、格子素材移動台上にヨーイング補正用テーブルを設け、レーザ干渉計により格子素材移動の直進性を常時計測し、平行度誤差を補正している。

MIT の C エンジンでは、最大 $614 \times 410\text{ mm}^2$ の 158 本/mm 平面回折格子、 $350 \times 175\text{ mm}^2$ の 632 本/mm 平面回折格子など従来のルーリングエンジンでは不可能であった超大形回折格子を刻線し⁽⁶⁾、現在アリゾナ州のキットピーク国立天文台に移管されている。

もう一つの大形ルーリングエンジンの開発は、ニューヨーク州立大学のストロークらによるものであり、格子素材をテーブル上に固定し、ツールに刻線用往復動と格子みぞ間隔割出し用送りの両方を行わせるきわめてユニークな構成に基づくものである⁽⁷⁾⁽⁸⁾。図3に示すこの装置では、格子素材テーブルをまたいで門形のツール移動台が2本のねじで送られ、これと平行移動するツール駆動台からツール用往復動が伝達される。ツール移動台の送りはレーザ干渉計を使用して制御され、ツール移動台上の光学平面に案内されたダイヤモンドツールの往復動により、常に平行で等間隔の格子みぞが刻線される。

本装置は、比較的小形の移動台で大形回折格子の刻線が可能であり、また大形のシェーパー形ルーリングエンジンで必要不可欠な、移動台のヨーイング補正機構が不要であるなど超大形回折格子の刻線に有利な多くの特長を有しており、その成果が注目されたが、回折格子の刻線実績については明らかでなく、現在は NASA のゴダード宇宙航空センターに移管されている。

図2 MIT エンジン機構部⁽⁸⁾

図3 ニューヨーク州立大学エンジン外観⁽⁸⁾

3. 送りねじを使用しないルーリングエンジン

光波干渉制御以前のルーリングエンジンや、格子素材を連続移動して光波干渉制御により速度制御を行うルーリングエンジンの場合、精密送りねじは必要不可欠であり、送りねじの絶対精度あるいは送りの円滑性が製作される回折格子の性能を支配していた。しかしながら光の波長を物指しにして位置計測を行い、格子みぞ間隔を間欠送りで割出すルーリングエンジンの場合、高精度の送りねじは必ずしも必要ではなく、ねじに代わる微動アクチュエータを使用した新形式のルーリングエンジンが製作されるようになった。

その一つの例が、電歪(歪)素子による微小送り機構を備えたルーリングエンジンである。図4はオーストラリアのバリアン社が開発したシェーパ形ルーリングエンジンの概要であり、格子素材の駆動部にピエゾリニアモータを使用している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。このピエゾリニアモータは電歪素子の両端に電磁クランプを固定したものであり、図において、Aクランプ ON→Bクランプ OFF→電歪素子電圧印加→Bクランプ ON→Aクランプ OFF→電歪素子電圧印加除去→Aクランプ ON、を一つのサイクルとして電歪素子のひずみ量に相当する移動量のいわゆる尺取虫運動を行う。この装置では、製作する回折格子のみぞ間隔を、レーザ干渉計の整数フリンジ送り量、すなわち半波長の整数倍に限定し、干渉計信号の同一位相位置で格子素材移動台が停止するよう、リニアモータの印加電圧を制御している。

図4 電歪素子駆動ルーリングエンジン⁽¹⁰⁾

この種のルーリングエンジンとしては、バリアン社の装置のほか、バーミューダのホースフィールドによる油圧駆動エンジン⁽¹¹⁾、わが国東北大学科学計測研究所のプレーナ形電歪素子駆動エンジン⁽¹²⁾などがあり、いずれも比較的小形の回折格子を毎分40本から70本といった極めて高速で刻線することを特長としている。送りねじのないルーリングエンジンで製作された回折格子は、周期的格子みぞ位置誤差がないためスペクトル上にゴーストがない利点があるが、格子みぞの単一的間隔誤差が連続送り式ルーリングエンジンで製作された回折格子より大きく、分光器に使用した場合散乱光が多くなる欠点があるといわれている。

4. 数値制御ルーリングエンジンによる無収差凹面回折格子の刻線

凹面回折格子は凹形球面上に回折格子みぞを刻んだものであり、回折格子の光分散機能と凹面鏡の集光機能を合わせ持つため、回折格子とスリットのみで分光器が構成でき、金属表面での反射率が低い真空紫外領域用の分光器に必要不可欠であるほか、広範囲の波長域での自己収束効果を利用した多波長光度計など広い応用分野を持っている。

19世紀末、アメリカ・ジョンズホプキンス大学のローランドにより発明された凹面回折格子は、球面上に等間隔の平行直線みぞを刻んだものであり、補助光学系を不要とする利点に対し、得られるスペクトル像に本質的に大きな収差を伴い、これが凹面回折格子分光器の解像度の悪さ、集光効率の低さといった欠点になっていた。

日立製作所中央研究所において筆者らは、従来形凹面回折格子の欠点である各種収差を格子みぞ間隔の任意可変技術とだ円状曲線みぞの刻線によって大幅に低減ないしは完全除去する、新しいルーリングエンジン技術の開発を行い⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、凹面回折格子の応用範囲を著しく拡大した。

図5は日立製作所で開発した数値制御ルーリングエンジンの制御システムを示したものである。光波干渉制御系は、基本的にはMITのアナログ式制御方式を踏襲しているが、干渉計による位置検出感度を高めるため、図6のような繰返し反射形レーザ干渉計とし、通常のマイケルソン干渉計と比較して検出感度を4倍に拡大している。この

装置では、回折格子の使用条件によって定まる最適格子みぞ間隔変化量を大型電子計算機を使用して計算し、この結果に基づき格子みぞ間隔制御用紙テープを作成する。格子みぞ間隔の変化は、格子素材送り用歯車装置にあるパルスモータを、上記紙テープの指示により回転せしめ、この回転量を差動歯車装置により平均的送りに加算して行うものであり、パルスモータの1パルス回転が格子みぞ間隔変化の最小単位である0.02nm送りに対応している。具体例として中心格子みぞ本数600本/mm、曲率半径1mで、水銀の546.1nmスペクトルを完全無収差で結像させる凹面回折格子の場合、総計30000本(約50mm幅)の刻線に対し最大みぞ間隔と最小みぞ間隔の差は約0.028 μ mであり、この間を0.02nmを単位として約1400段階にみぞ間隔を変化させて刻線を行っている。

5. ホログラフィック回折格子

ホログラフィック回折格子⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾は、レーザ光

図5 数値制御ルーリングエンジン制御系⁽¹⁴⁾

図6 繰返し反射形レーザ干渉計⁽¹⁴⁾

の干渉じまを写真的に処理してこれを格子みぞとする、光学的手法により製作される、新しい回折格子である。

光の干渉を利用した回折格子の製法に関しては、今世紀の前半にすでにマイケルソンによりその可能性が示唆されていたが、その実用には干渉性にすぐれた光源と高分解能の感光材料が必要不可欠であり、近年大出力イオンレーザと感光性樹脂材料の開発により急速にその実用化が進んだものである。

ホログラフィック回折格子は、一般に図7に示す工程により製作される。まずガラス基板上にホトレジスト(感光性樹脂)材料の薄膜を回転塗布法により形成する。このホトレジスト膜上に同一光源から発したレーザの二光束を投射して干渉せしめ、干渉じまパターンを露光、現像してホトレジスト材料の凹凸による平行じまを得る。これに高反射金属を蒸着したものがホログラフィック回折格子である。ここでレーザ二光束の入射角を γ, δ とし、レーザ波長を λ とすると、得られる格子みぞ間隔 σ は次式のようになり、入射角の選択により任意の格子みぞ間隔が得られる。

$$\sigma = \frac{\lambda}{\sin \gamma - \sin \delta} \quad \dots\dots\dots (1)$$

通常、光源にはアルゴンイオンレーザの457.9nm光が使用され、最高3600本/mmの平面回折格子が実用に供されている。

ホログラフィック回折格子の製作技術上の特長

図7 ホログラフィック回折格子製作工程

は、大面積あるいは超微細みぞ間隔の極めてみぞ本数の多い回折格子を、レーザ光の一照射（通常数分から数十分）により短時間に製作できることである。ちなみに3600本/mm、50mm幅の回折格子を機械刻線するには10日～10数日の連続刻線が必要である。他方ホログラフィック回折格子の性能上の特長は、格子みぞ間隔に周期的誤差がなく、累積的みぞ位置誤差も少ない回折格子が得やすいため、ゴーストのない分解能の高い分光器が形成できる。また回折格子面から発する散乱光の総量は、機械刻線回折格子と比較して必ずしも少なくないが、散乱光が文字どおり方向性なく散乱し、一方機械刻線回折格子の場合、散乱光が格子みぞと直角方向に集中する傾向があるため、分光器で得られるスリット上のノイズはホログラフィック回折格子のほうが小さくなると一般に言われている。

これに対しホログラフィック回折格子の欠点はみぞ形状の制御が困難なことである。ホログラフィック回折格子は干渉じまを写真的に処理したものであるため、そのみぞ断面形状は基本的には正弦波形状であり、機械刻線回折格子のように、みぞ断面を任意角の三角形状に形成して特定の波長域に高い回折効率を得る（ブレードする）ことが困難である（図8）。

最近、ホログラフィック回折格子の回折効率を

(a) 機械刻線回折格子（ブレード角5度）

(b) ホログラフィック回折格子

図8 回折格子みぞ断面形状比較（干渉顕微鏡写真）（600本/mm）

高めるため、みぞ断面形状を機械刻線回折格子のような三角断面にする、いわゆるブレードホログラフィック回折格子製作技術の開発が各所で行われるようになった。

一つは光学的方法により直接三角断面みぞを形成する方法である。図9はゼロックス社のシェリドンにより提案され、イギリスNPLやわが国の日本光学などで試みられている、干渉じまをホトレジスト膜上に斜めに形成し、露光現像後に干渉じま傾斜角に対応したみぞ角の三角断面みぞを得る方法である⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。

もう一つのブレードホログラフィック回折格子製作の試みは、いったんホトレジスト材料で製作した正弦波断面形状の回折格子に何らかの追加工を行うことにより、みぞ断面形状を三角形に変換するものである。わが国の理化学研究所と島津製作所のグループは、図10に示すようにホトレジスト回折格子に斜め方向からイオンビーム加工を行い⁽¹⁹⁾、みぞ形状を修正している⁽²⁰⁾。また筆者らは、日立製作所中央研究所において、シリコン単結晶の異方性エッチングを応用し、ホログラフィックな手法で製作したストライプ状パターンをマスクにして基板単結晶の異方性エッチングを行い、シリコン結晶の(1, 1, 1)面をみぞ面とする三角断面みぞの形成に成功している⁽²¹⁾。これらエッチング法によるブレード回折格子では機械刻線と同等の80%以上の回折効率を得られているが、今後の課題は大面積に一樣なみぞ形状を得るプロセス技術の改良と散乱光の低減である。

図9 光学的ブレードホログラフィック回折格子製作法⁽¹⁸⁾

図 10 イオンエッチングによるブレードホログラフィック回折格子製作法⁽²⁰⁾

6. む す び

かつて回折格子用ルーリングエンジン技術は精密機械加工の最先端技術として精密機械工業や最近の電子部品工業のけん引的役割を果たしてきた。しかしながら光波干渉制御用光源としてルーリングエンジンの性能向上に大きく貢献したレーザ技術が、今やルーリングエンジンそのものを否定する新しい回折格子製作技術を発展させている。

ホログラフィック回折格子は、かなりの分野で従来の機械刻線回折格子をしのぐ優れた性能を発揮し、実用的にも普及してきている。しかしながらこれに刺激され、機械刻線技術分野においても新しい技術導入により、機械刻線でのみ可能な独自の回折格子技術が形成されてきている。

当分の間、機械刻線回折格子とホログラフィック回折格子は、それぞれの特長を生かした応用開発と性能向上により共存していくものと筆者は考える。

(原稿受付 昭和54年3月13日)

文 献

- (1) Harrison, G.R., *J. Opt. Soc. Amer.*, 39-6 (1949), 413.
- (2) Harrison, G.R., ほか3名, *J. Opt. Soc. Amer.*, 47-1 (1957), 15.
- (3) Harrison, G.R., ほか3名, *J. Opt. Soc. Amer.*, 49-3 (1959), 205.
- (4) Harrison, G.R. and Thompson, S.W., *J. Opt. Soc. Amer.*, 60-5 (1970), 591.
- (5) Harrison, G.R., ほか3名, *J. Opt. Soc. Amer.*, 62-6 (1972), 751.
- (6) Harrison, G.R., *Appl. Opt.*, 12-9 (1973), 2039.
- (7) Stroke, G.W., *Handbuch der Physik*, (1967), 728, Springer-Verlag.
- (8) Moore, W.R., *Foundation of Mechanical Accuracy*, (1971), 335, Moore Special Tool Co.
- (9) Joyce, G.C. and Wilson, G.C., *J. Phys.*, Pt. E, 2-2 (1969), 661.
- (10) Bartlett, I.R. and Widly, P.C., *Appl. Opt.*, 14-1 (1975), 1.
- (11) Horsfield, W.R., *Appl. Opt.*, 4-2 (1965), 189.
- (12) Takashima, K. and Nawata, S., *Japan J. Appl. Phys.*, 17-8 (1978), 1145.
- (13) Harada, T., ほか3名, *Japan J. Appl. Phys.*, 14 (1971), Suppl. 14-1, 175.
- (14) 原田・ほか3名, 精密機械, 42-9 (昭51-9), 68.
- (15) Labeyrie, A. and Flamand, J., *Opt. Comm.*, 1-1 (1969), 5.
- (16) 三宅, 応用物理, 41-8 (昭52), 843.
- (17) Sheridan, N.K., *Appl. Phys. Letters*, 12-9 (1968), 316.
- (18) Nagata, H. and Kishi, M., *Japan J. Appl. Phys.*, 14 (1971), Suppl. 14-1, 181.
- (19) Aoyagi, Y. and Namba, S., *Optica Acta*, 23-9 (1976), 701.
- (20) 佐野・ほか2名, 分光研究, 26-6 (昭52), 327.
- (21) 原田・山口, 日本分光学会昭和53年度秋季講演会講演要旨集, (昭53-11), 29.