

## 透過型回折格子の精密測定への応用

日立製作所機械研究所\* 山 田 弥 彦

### 1. はし が き

回折格子本来の使用面である分光測光に用いる回折格子の製作法は前に述べた通りであり、ルーリングエンジンという特別の超精密機械によって作られる。このルーリングエンジンによる回折格子の刻線の等間隔精度は最も優秀なもので 0.003 というように非常に高いものである。このように高い精度の大きい回折格子は 5m あるいは 10m にもおよぶ大きな分光器に取り付けられ重元素の分析あるいはアイソトープの分析などに使用される。一方この高い精度の回折格子を標準尺として使用することを考えるのは当然の成行きであり、エレクトロニクスの発展にともないその濶度が増して来た。しかしこのような標準尺を使用する機械あるいは測定装置自身の機械的精度ははるかに悪いためにこのような回折格子を使用することは高価になるばかりではなくその取扱いが面倒になる。このために英国の National Physical Laboratory の Sir Merton によって提案された製作法による回折格子が標準尺として便利に使えるので推奨され使われている。この製作法の完成により幾多の簡易回折格子が世の中に出廻るようになり、精密測定への応用も容易になり、工作機械の自動制御も行なえるようになって来た。ここでは Merton の製作法を述べて、モアレ縞による工作機械の自動制御への応用にふれることにする。

### 2. Merton 法による回折格子

分光用に使われる回折格子はルーリングエンジンにより製作されるものでマスターあるいはオリジナル回折格子と呼ばれ、その供給はほとんどない。一般に使われるものはマスター回折格子からその複製をとったもので、これが市販されている。これをレプリカ回折格子あるいは単にレプリカと称される。このレプリカ技術はマスター回折格子自身が非常に細密なために極めて難しいもので、その技術は各メーカーの極秘になっている。しかしその大体は一般によく知られているのでこの方法を基礎と

して各自独特の開発した技術でレプリカを製作している。この技術の発展に裏付けされて考えられたのが N. P. L の Merton 法による回折格子である。

回折格子をルーリングエンジン以外の機械によって製作しようとする意図は以前からあったが、旋盤を用いる方法を考えたのが Merton である。精密旋盤に不銹鋼の丸棒を工作物として取付けて刃物台にはダイヤモンドポイントを取付け、丸棒に押し付けてその表面に塑性変形をおこさせてネジを切る要領で連続ルーリングを行なうものである。このルールされた丸棒の上から溶剤にかしたプラスチックの粘度の高いものを全面に一樣に塗る。プラスチック膜の乾燥後カミソリの刃で軸に平行に切り展開すればルーリングされた刻線の溝の形のブレード角をもったプラスチックの膜が得られる。この膜を溝のついた面を上向きにして光学平面上に貼り付け、これに向い合せて軟くされたゼラチン膜をもったガラス板を押し付けローラーを上からかけて一緒に乾燥させて、両者をはがせばゼラチン膜にそのブレード角をもった回折格子が転写（レプリカ）される。このゼラチン膜は最初の丸棒にルールされた溝と全く同じ形の溝をもつので最初の溝でブレード角を選定しておけばその角がそのまま転写されることになる。これにアルミニウムを真空蒸着すれば反射型の回折格子としても使用することができる。普通の回折格子のレプリカもこの方法とよく似ている。ここでこのレプリカ法も少し述べておく。ルーリングエンジンでルールされたマスター回折格子を真空ベルジャーの中に入れて真空中で拡散油をその面に数分子層の厚さに蒸着する。その上にアルミニウムを約  $0.1\mu$  の厚さに蒸着し、ベルジャーから取り出してこのアルミニウム層の上にエポキシ樹脂を薄く塗ってその上に裏打ちの硝子板を貼る。この貼り合せたままで重合させ、エポキシ樹脂が硬化すると拡散油の層を境にして両者をはがせばマスター格子を傷つけることなしにはがれ、レプリカが完成する。この方法が大体のレプリカ法で現在市販の分光用の回折格子は全部がこの方法でできたもので、その使用波長域によってその上に弗化マグネシウムあるいは白金などをもう一度真空蒸着する。Merton 法による回折格子ではこのレプリカ法が採用できないので

\* 東京都国分寺市東恋ヶ淵 1 の 280

ラチン膜でレプリカをとる方法になる。ゼラチン膜にレプリカされた回折格子は一般に透過型として使用される。Merton 法の最初の頃に1吋直径1呎長さの不銹鋼の丸棒に2000本/時のヘリックスの溝を切った実例があるが、この頃には不銹鋼の丸棒をいかに研磨するかということに最大の努力が払われたようである。ホーニング、ラッピング、ポーリッシングを注意深く行なってもよい結果が得られなかった。この難題も光学研磨技術の進歩ではほぼ解決されて来たが、最難関はルーリングされた溝間隔の週期誤差の除去にあった。この週期誤差は分光的使用時には Rowland ghost としてあらわれ、計測的使用時には計測値の週期誤差として直接あらわれる。このルーリングの週期誤差の発生する原因は旋盤の送りネジ、ナット、ヘッドストック、ベアリングなどにある。これらの諸要素を精密に加工調整を行なってもなお週期誤差（小さくても問題になる）が入って来る。この週期誤差を除くために種々の試みがなされたが、その一つに加工物のルーリングされた丸棒、すなはち最初にネジを切られたそのネジを送りネジとして、旋盤の送りネジに頼らず、これにナットをはめ、そのナットにダイヤモンドポイントを持たせる。このまま丸棒を回転し、まだルーリングしない所にダイヤモンドポイントを押し付ければ、ダイヤモンドポイントは丸棒の軸方向に走りその上に新しいヘリックスを切っていく。このときナットに回転止めを付加えるのはいうまでもない。この方法では旋盤のラストベアリングにより起る週期誤差が除去できる。その上最初にルーリングされたヘリックスのもっていたピッチの週期誤差はナットが数十山以上噛合っているので平均化されて第二のヘリックスにはその週期誤差があらわれない。図1はこの方法を実際に応用したもので、は長さの半分だけ元の精密旋盤でヘリックスをルーリングされた不銹鋼の丸棒である。これにナットが二つ割りにされかぶさって

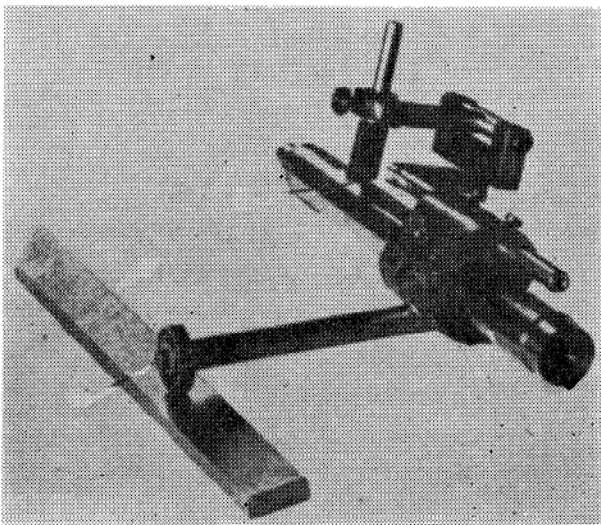


図1

いるが、その内径は丸棒の直径より $\frac{1}{8}$ 吋大きい普通の真鍮である。この内面に $120^\circ$ 間隔にコルク片をナットの長さいっぱい貼り付け、このコルクがルーリングされた丸棒に噛み合いナットの働きをする。ナットから棒が出ていてその先端にベアリングがつき、板の上にセットされてナットの回転止めとなっている。またナットから出ている棒の長さはNについている二本のビスで調整され固定される。棒の先端にダイヤモンドホルダーがあり、これにダイヤモンドポイントが取付いている。丸棒は元の旋盤のヘッドストックで回転されるのでナットは回転につれて移動し、新しい部分に週期誤差の少ないルーリングが行なわれる。このような chasing Lathe の原理によるルーリングは週期誤差を減少させるのに役立つが漸進誤差 (error of run) を減少させることは難しい。最初の旋盤の送りネジによるルーリングのヘリックスのピッチが端から端まで完全に均一に増加あるいは減少していれば、これによってでき上がった回折格子の回折波は均一曲率をもち実害はないが、普通の旋盤の送りネジのようにそのピッチが不規則であればそれによる回折格子の回折波面も不規則になり、スペクトル線としての像を結ばせることができなくなる。したがってこの error of run を取り除かなければならない。普通の精密旋盤では補正板を使って除いているようであるが、他の方法

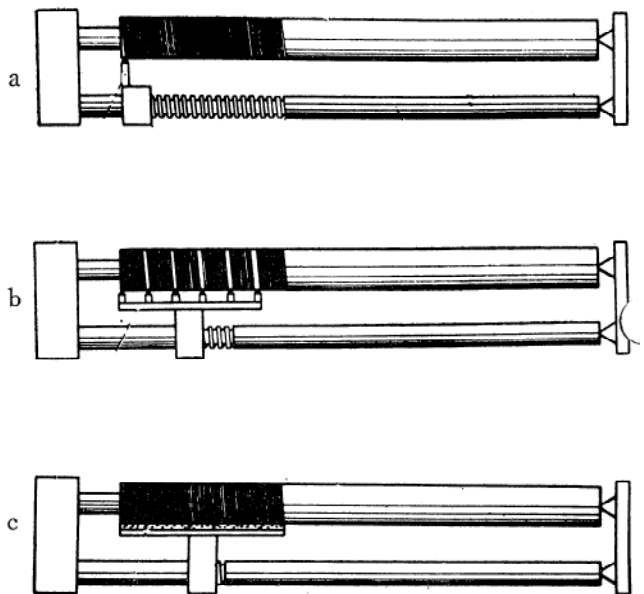


図2 error of run の補正 I

として二つばかり考えられる。図2(a)に示すものは普通の方法で送りネジによりヘリックスを切りこれにコルクナット (Merton nut と称する) を噛合せるもので前述のように週期誤差は除けるが error of run は除けない。(b)の方法はダイヤモンドポイントを6個間隔をあけて取付けてネジを切れば6吋のネジを切るには1吋の長さだ

け正確な送りネジあるいは部分を使えばよい。もちろんこの6個のダイヤモンドポイントの任意の相互位置ではルーリングされたネジの位相が完全に合わないが Merton nut をこれにかぶせれば問題はなくなる。これをもう少し拡張してダイヤモンドポイントの代りに木材などで6吋一杯の長さを取り、これにラップ材などを含ませて1~4回転位送りネジを回転させるだけで必要な長さの引掻き傷が丸棒に残る(図2(c))。これに Merton nut を噛み合せば週期誤差も error of run もないルーリングができるはずである。

しかしこの方法は実際的でなく、またよいヘリックスも期待できない。そこで第二の方法として図3に示すような装置が考えられる。精密旋盤により丸棒の中心附近

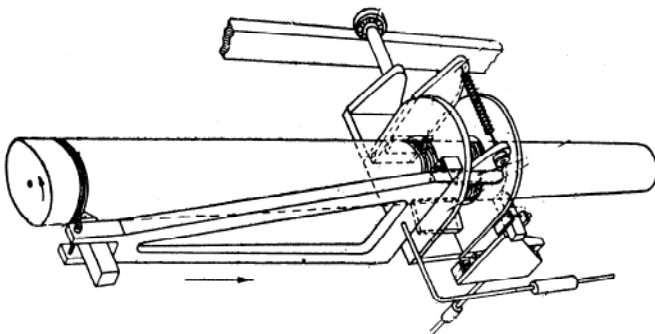


図3 error of run の補正II

に所要のピッチで Merton nut の長さだけのネジを切り、これに Merton nut を結合する。このナットから二つの腕が出ていて一つは長く、他方は短い。この二つの腕の先にダイヤモンドポイントが取付けられている。短い腕の方のダイヤモンドポイントにより、丸棒の回転にしたがって新しいネジが切られて行く。このとき長い腕のダイヤモンドポイントによってもネジが切られる。このダイヤモンドポイントを所要のブレース角にしておけばそのブレース角の回折格子が得られることになる。しかしこの方法では最初に切られたネジに Merton nut が従っているのでその質はよくない。Merton nut によって新しく切られたネジに更に Merton nut を噛み合せて新しいネジを切ればこのネジは週期誤差および error of run の少い精密なものになる。しかしこの方法では同時に二つのネジを切つて行かなければならない点に問題があり、実際的には矢張り先にネジを切った丸棒に Merton nut を噛み合せてルーリングを行なう方が良いでしょうで、これを実現したのが図4である。

この方法が最終的に採用されたもので使用する丸棒は長さ300mm、直径25mmの不銹鋼で表面を切削し、滑かにグライインディングしてからピッチラップでラップ仕

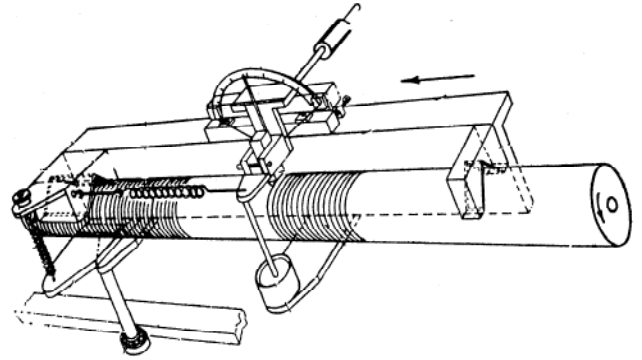


図4 Merton 法によるルーリングの原理

上したものである。旋盤は Bryant Symons 精密旋盤を使用し、この換歯車部を変更してウォーム、ウォーム歯車二段の減速を行ない、スラスト軸受を精密細心に調整し1吋当り1000ないし15000本のピッチのネジを切るようにした。この旋盤に丸棒を取付け第一次ヘリックスを切り、次で Merton nut をこれを噛み合わせるが、このナットは図でわかるように上部はV型をしていて下部は平面で長さは25mmで120°はなれた角で取付けられている。この二つの部分の Merton nut はクランプスプリングで丸棒に押付けられている。Merton nut の材料が最も重要な鍵でこれの選定によって所要のヘリックスを切るとき様子が変わって来る。ナットの材料が不適当であると摩擦によって熱を発生したり、スティックスリップによって機械的振動が起ったり、雑音を発したりする。この雑音はポリテトラクロロエチレンのコロイドを水中にサスペンドしたものでナットを処理すると抑制できる。最初ナット材料にはコルク、皮、軟質木材、紙などを使ったが1吋当り数千本のヘリックスの週期誤差は減少するが error of run はとれなかった。しかもその第二次ヘリックスと第一次ヘリックスの error of run が異なることがわかり、その原因を調べるとナットの軸方向の動きに関係することがわかった。これを除くには材料を薄くすればよいことがわかってきたが、コルクでは0.5mmにしても除くことができないようである。色々の材料の中で粗い回折格子5000本/吋までのものをルーリングするときにはネオプレンの1mm厚のものを油潤滑すればよいことがわかっている。しかし細かい15000本/吋のようなヘリックスの場合はニワトコの木ズイ(Sambucus nigra)を使うと最も良い結果が得られる。これを油潤滑で使うと第一次ヘリックスに相当大きな error of run があっても第二次ヘリックスには全くあらわれなくなる。このようにして第二次ヘリックスが得られるが、このヘリックスをルーリングするダイヤモンドポイントはルーリングエンジンのものと同じように丸棒表面に塑性変形を与えるので矢張り同じように研磨さ

れる。ただしルーリングエンジンのときのように尖端は船のキール状にしないでよいので研磨そのものは楽なように思われる。このダイヤモンドポイントの先端角を丸棒の半径方向に対して $15^\circ$ と $75^\circ$ をなすように直角に研磨して $75^\circ$ 方向にポイントが進むように取付ける。このポイントで塑性変形を受けた刻線の溝を干涉顕微鏡で観察すると、直角溝の両側に明かに盛り上がりが見られる。この盛り上りを両側均等に出るようにダイヤモンドポイントの取付角、荷重を調整する。

ヘリックスを切る材料としては最初是不锈钢を鏡面仕上をして使われていたが粗い回折格子のときには十分の荷重を与えても深くならない、また細かい回折格子では浅い溝にもかかわらずルーリング距離が長くなるのでポイントの鋭さがなくなつて来て途中からブレイズ角が変わつたような外観になる。このために材料を変えて種々検討された結果、アルミニウム青銅の hidurax が最も良い材料として選定された。この材料は軟くてしなやかではあるが適当なラップを使うと良い面に仕上る。また適当な金属丸棒上に錫あるいは金をメッキしたもので試みられた。電気メッキの錫は面が荒いが、最も粗い回折格子には使用できるようである。金を蒸着したものは $20\mu$ の厚さにつけてもなお鏡面を保っているが、厚くつけるとはげおちるために粗いものは適当ではないが、細かいものには十分使える。図5に実際の Bryant Symons の旋盤の写真を示してある。

このようにしてできたヘリックスのついた丸棒にプラ

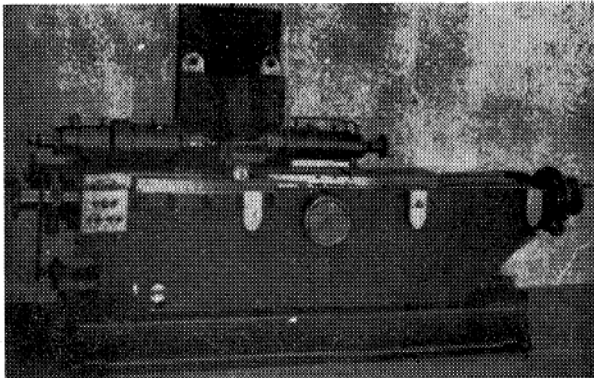


図5 Bryant Symons 旋盤

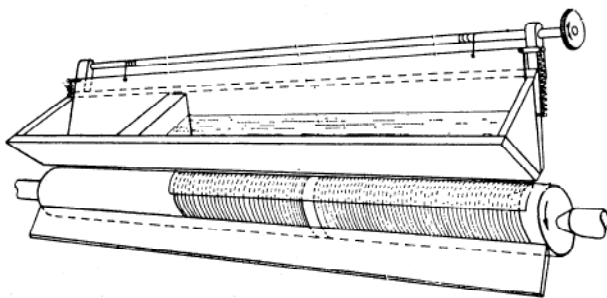


図6 プラスチック格子生成装置

スチック溶液を巻き塗りレプリカを作るには図6のような装置が使われている。これに使うプラスチック溶液は色々のもがあるが、ポリスチレン15グラム、オレイン酸0.15グラム、トルエン100ミリリットルの混液の粘度11Pのものを使用する。これを図6の狭いスリットから流してヘリックスに巻き塗り、ストレートエッジを調節してその厚さを0.008吋にする。この丸棒を溶媒が蒸発してから取り出して $120^\circ\text{C}$ で30分間アニーリングし、これをまた30分間冷水につけた後、カミソリの刃で軸に平行に切り目をつけて展開し重クロム酸アンモン溶液中にある光学平面上のゼラチン膜の上におく。これをマスターにしてゼラチン格子をレプリカ法でとるが、その過程は複雑なのでここでは省略する。ゼラチン格子は非常に弱いので、これをサブマスターとしてプラスチックのレプリカ格子をつくる。ゼラチン格子や元のマスター格子は硬化時に収縮する。これは元のヘリックスのピッチとでき上つた回折格子の格子定数が異なることを意味するので絶対値の測定に使うときには十分注意しなければならない。プラスチック格子はゼラチン格子からレプリカとしてとられるが、その素材はポリエステル樹脂でそのほとんどが透過型格子であるために散乱をおこす気泡を嫌う。したがってポリエステル樹脂の使用時には十分泡抜きを行なうことが必要である。

最近では写真法を使ってこの透過型回折格子の幅の広いものが製作されるようになった。これも矢張りマスター格子を必要とする。また普通のルーリングエンジンでルーリングされたマスター格子を使って、これからレプリカをとって透過型にできることはもちろんのことである。

### 3. モアレ縞

図7に示すように二枚の透過型回折格子を刻線が互に平行になるように重ねて、一枚を少し回転させると各刻線の交点は一直線上ならぶ。これは一見波紋のように見えるのでモアレ縞と呼ぶ。このモアレ縞はそれぞれの回折格子の格子定数が異なつてもあらわれるものであるが、一般に同種の回折格子を使用することが多い。そのときのモアレ縞の間隔 $W$ は

$$W = \frac{w}{\theta}$$

で示される。ここで $w$ は格子定数で、 $\theta$ は刻線間のなす角で非常に小さく $\sin\theta \approx \theta$ とおける範囲のものである。たとえば1mm 当り200本の回折格子で互に刻線を平行にして重ねてから一つを角度で1分回転させるとモアレ縞は1.47mmの間隔であらわれる。この縞の明るさを考

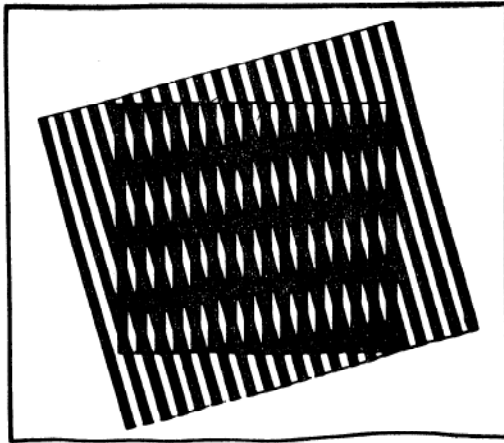


図7 モアレ縞

えると視野の平均の明るさを1としたとき、ある基準点から  $d$  の距離にある点の明るさは

$$B_d = 1 + B \cos \left\{ \frac{2\pi(d-d_0)}{W} \right\}$$

で示される。ここで  $d_0$  は最も明るい点から一定点までの距離で定数である。また  $W$  はモアレ縞の間隔で  $B$  は明るさの振幅を示す。したがって  $d-d_0=0, W, 2W, \dots$  で最も明るく  $1+B$  となり、 $d-d_0=W/2, 3W/2, \dots$  で最も暗くなる。両方の干渉光の強度が等しいと  $B=1$  になるが、等しくないときは  $2\sqrt{\alpha/(1+\alpha)}$  の値になる。 $\alpha$  は弱い干渉光の強いものに対する比である。二つの回折格子の一つを刻線と直角に格子面内を移動させると、その移動距離  $w$  (格子定数) につれて一つの新しい縞があらわれて来る。そこで図8のような光学系を使うと視野の中に常に一つの縞があるように  $\theta$  の値を定めることができる。もし  $S_2$  にスリットを設けて  $G_1$  あるいは  $G_2$  を移動させると上式に応じた明暗の縞が見られる。

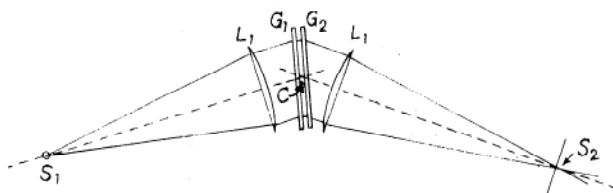


図8 モアレ縞観測光学系  $G_1, G_2$  回折格子

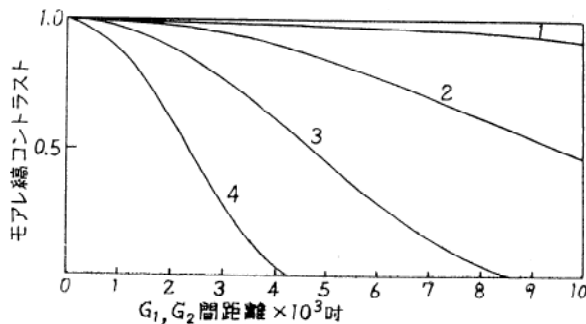


図9 モアレ縞のコントラスト

ここに光電管あるいはフォトトランジスタをおくとその縞の移動に応じた交流信号が得られることになる。この信号の大きさ、すなわちモアレ縞のコントラストは使用する入射スリット幅とコリメターレンズの焦点距離および図8の  $G_1, G_2$  の間の距離によって異なるが今一例としてスリット幅を焦点距離で割った値を 0.0235 とするとコントラストは図9のようになる。この図で1, 2, 3, 4の数字は異なる回折格子を使用した場合を示し、それぞれ1000, 2500, 5000, 10,000本/時のことである。粗い回折格子程  $G_1, G_2$  間の距離を大きくとっても余り信号の大きさにはいきようはない。

これらのモアレ縞の性質を利用して長さ、角度、移動距離などの測定に種々工夫を加えて使われている。反射型回折格子も透過型と組合せてもモアレ縞は発生する。

#### 4. モアレ縞による長さの測定

上に述べたようにモアレ縞は二つの回折格子の組合せにより発生し、その一つを刻線と直角方向に移動させることによって縞も移動するので、この縞数も計数すれば格子定数のほぼ整数倍の移動距離が直読できる。図10はこれの様子を示している。この図のように光源と検知器

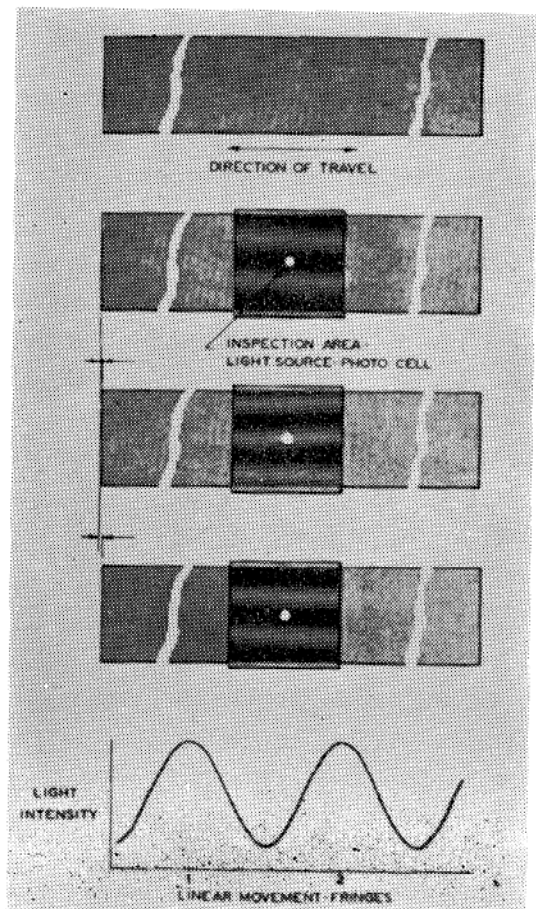


図10 モアレ縞とその信号

への口が小さいと回折格子自体の小部分の誤差が直接読み取り誤差になって来るので、これを防ぐためには固定格子の幅の長さをもったスリットを使用し局部誤差を平均すればよい。これだけの装置では移動格子(Moving grating)が左右いずれに移動しても最下図のような正弦波が得られるので、ある方向に常に動かす場合はよいが、左右の動きを測定する位置ぎめなどにはこのままでは使えない。このために図11に示すような方法が考えられる。光源からの光を二つの回折格子に入れモアレ縞を得てから直角鏡で二つに分けてそれぞれを二つの光電管に入れる。この二つの光電管に入るモアレ縞の像は互に $180^\circ$ 位相を異にするようになっている。このために移動格子の

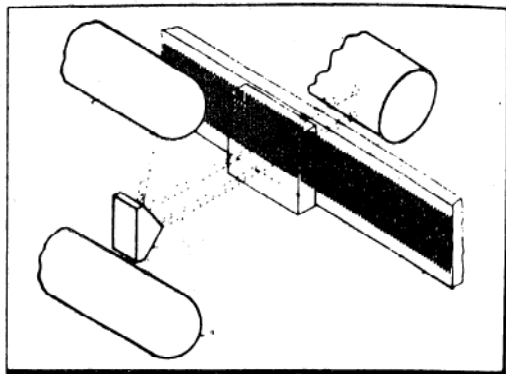


図11 モアレ縞の方向検知法

動きに従ってその二つの信号は位相で進み遅れが逆になるのでこれを電気的に観測すれば移動の方向がわかり、一方いずれかの光電管によってモアレ縞の計数を行なえば移動距離もわかる。

この方法のモアレ縞の計数による長さの測定は格子定数の整数倍の移動長さを測定することができる。コントラストを移動の蛇行により変えないようにするために比較的粗い回折格子を使うがその場合たとえば300本/mmのものでは $3.3\mu$ が格子定数になり、その何分の一かの精度で長さを測定したいときが多い。最近の精密測定装置の精度は大体 $1\mu$ を標準としているようであるので $3.3\mu$ を基準尺とすると精度が足りなくなる。もちろんこの回折格子の代りにmm当り1000本の回折格子をもって来れば話は簡単であるが、このようなものはなかなか入手し難い上に格子定数が小さくなると信号を一定のコントラストで得るために必要な両回折格子の間隔の保持がむづかしくなってくる。そのために比較的粗い回折格子を使ってモアレ縞の端数まで読取ることのできるような工夫がなされている。図12にこの装置を示してある。この方法は二つの回折格子の代りに三つの回折格子を使用するものである。これによってフォトセルの温度変化によるドリフト、非直線性によるえいきようを除いてある。

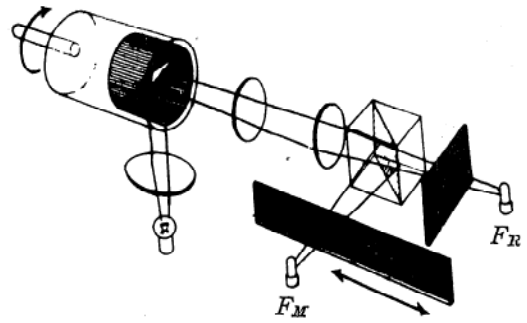


図12 三格子系の測定系

原理的には第三の回折格子は図の Comparison drum grating と示してある円筒に他の二つの回折格子と同じ格子定数の回折格子を貼り付けたかっこうになっている。光源からの光はレンズ系およびビームスプリッターによって円筒格子の像を固定格子および移動格子上に結びせて二つのフォトトランジスタ  $F_R, F_M$  上に円筒格子とそれぞれの格子によるモアレ縞を得ることができる。今この円筒格子を定速回転させると  $F_R$  にはモアレ縞による一定周波数の信号が発生する。一方  $F_M$  には移動格子が動かなければ  $F_R$  に発生する信号と同一周波数の信号が一定位相差を保って発生する。これを両信号をパルス化しておくとも移動格子が動いたときには  $F_M$  には格子定数に応じた動きに相当する所のみパルスが発生するので  $F_R, F_M$  の両信号の元の位相位置にあるパルス数を計数すればまず格子定数の整数部がわかる。次に  $F_R$  に発生するパルスはその間隔がほぼ一定なので、この間隔を電気的に何等分することは可能であり、移動格子が格子定数の端数分で止ったときは元の移相位置からのパルスの間の何番目の等分の所にあるかを別々の計数表示をすれば端数分が読取れる。この方法のようにパルスを計数すると共に二つの信号の位相のずれを常に測定することにより移動量を格子定数の何分の一かの精度で読取ることができる。

このようにモアレ縞による長さの測定はエレクトロニクスの助けによって相当の精度で行なうことができるが、移動格子の移動方向は常に刻線と直角の方向で格子面内でなければならない。もしこの移動を両格子線の交差角が変るようにならせると前式からわかるようにモアレ縞の幅  $W$  が変化して来るので誤差が入ってくる。

## 5. 工作機械のモアレ縞による制御

工作機械の自動制御は色々の形で行われ近時その数値制御の技術も生れて来た。モアレ縞は前項のようにパルス化されることからデジタル技術の発展にともない数値制御の精度も飛躍的な進歩をとげるようになった。特

に航空機工業には生産量としては余り多くないものでも航空機としては同じ部品を何箇所かに使わなければならないことが多い。生産量が少いので大量生産の技法が使えず、その上形が複雑で精度が要求され、素材の工作機械への取付け、刃物の取付、調整、送りなどに多大の時間も必要とする。このために精密鑄造などの技術が開発されて来ているが、人手を余り要せず時間短縮もできる工作機械の自動制御をモアレ縞を使った形で行なうようになって来た。特に英国において透過型回折格子が容易に入手できることから非常に盛んである。ここに一挙を挙げるのはエジンバラの Farranti 社によってミリングマシンで行なわれたものである。上記の航空機の部品のような高精度で複雑な形のは図面から実際の形もって行くには相当時間考えなければならず、この時間は全生産時間に比べて無視できないものである。これを短縮するためにも自動制御は効果的である。

工作機械（フライス盤）の制御は次のような段階で行なわれる。第一に図面を機械用語を使って計画書に変更する。この計画書に基づいてコーディングを行なって紙テープにパンチする。この紙テープでコンピューターを働かせテーブル移動、刃物の上下、回転数などを計算しその出力を制御用の磁気テープに記録させる。これはコンピューターの計算速度が工作機械の切削速度よりはるかに高いために計算結果を磁気テープに記録し、これを制御系の読取装置に徐々にかけてテーブルの移動などの指令を出させ所要の形状寸法に切削して行くためである。またこれによって数台の機械を同時に働かせることも可能になる。この計算機はデジタル計算機であるために前述のパルス化されたモアレ縞がモニターとしての働きができる。工作機械の送りネジの回転によるテーブルの送りはネジの回転に完全に比例しないので、送りネジの回転を測定系とすると精度の点で不足する。また測定系は動力系に無関係であることが望ましい。モアレ縞を使用するとこの二つが満たされ十分な働きができる。ここに使用する回折格子の一端はフライス盤のテーブルの端に固定し、他端を固定せずフロートしている。2500あるいは5000本/時のものが使用されるが、この位のものが大抵の工作機械の切削精度に対して最も適当である。移動格子は2呎6時のものでメルトン方式のゼラチン格子を何枚かつぎ合せたもので、実際には5呎位が要求される。このように長い格子では連続ではなく途中を抜いてもよい。このときは両者の位相合せを確実にする必要がある。モアレ縞の測定には固定格子の幅一杯の長さのスリットを使い格子誤差の平均化を行ない、塵埃による不均一化を防ぐために、測定系の部分は完全にカバーして他の光の侵入も防いでいる。このアセンブリを図13、14に示す。

2個のフォトトランジスタをモアレ縞の位相で180°ずれたように調節して固定する。これで移動の方向を判定する。測定系に2500本/時の格子を使うと1時のテーブルの動きに対して5000のパルスを出し、長さにして0.0002時のモニターができる。これを Kearney & Trecker フライス盤に三次元的に取付ける。すなはちテーブルに2個で前後左右をカッタースピンドルに1個でカッターの上下を決定する。

磁気テープからの指令によってテーブルを移動させるサーボ回路は図15にブロックダイアグラムとして示してある。磁気テープは四チャンネルのもので  $x$ ,  $y$ ,  $z$  の三軸とチェックに使われる。このサーボ系は位置定めと同時に速度制御に使われる。今一軸例えばテーブルの左

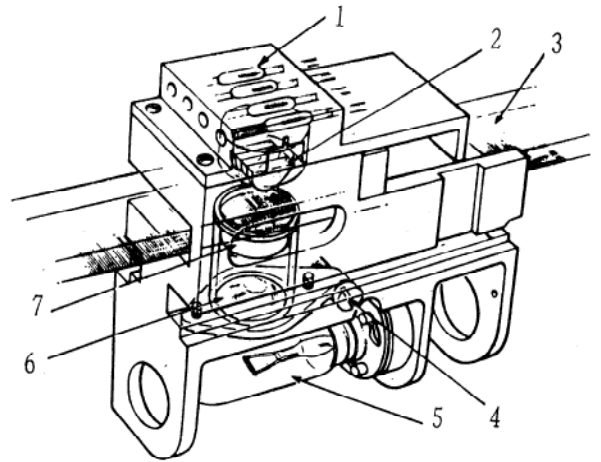


図13 モアレ縞を使ったモニター

1. フォトトランジスタ 2. レンズ系 3. 移動格子
4. 調節ノブ 5. 光源 6. コンデンサーレンズ 7. 固定格子

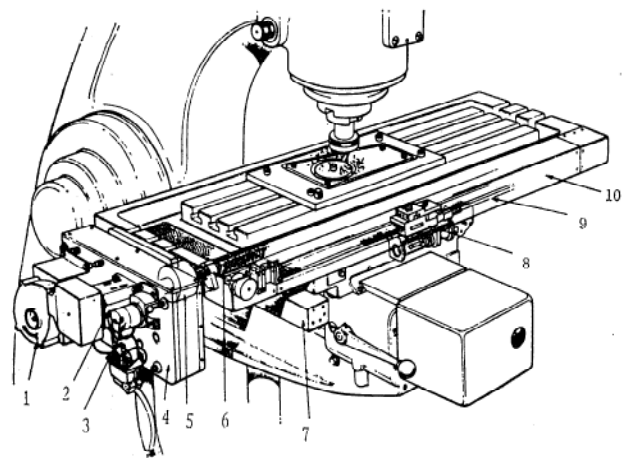


図14 モアレ縞により制御されるフライス盤

1. ブローワー 2. サーボモーター 3. タコメーター
4. ギヤボックス 5. クラッチ 6. 送りネジ 7. モアレ縞発生装置 8. 検知器 9. 回折格子 10. テーブル

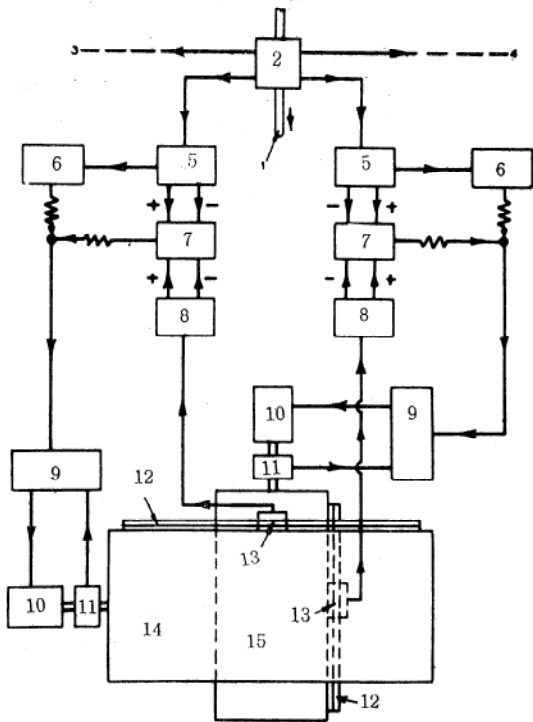


図15 ブロックダイアグラム

1. 磁気テープ 2. 4チャンネルテープリーダ 3. Z軸信号 4. チェック信号 5. 方向指示回路 6. レートメーター 7. デジタルレジスター 8. 方向ディスクリミネーター 9. 磁気増幅器 10. サーボモーター 11. タコメーター 12. 回折格子 13. モアレ縞検知器 14. 主テーブル 15. サブテーブル

右の移動を考えてみる。磁気テープから計画書に基づいて計算された移動量の指令がパルスとしてプレイバックされる。このパルスの和は基準点から0.0002吋を単位としたテーブルの移動量になる。パルスの周波数はテーブル移動のその点に至る速度を示すものになる。この指令パルスは方向指示回路5(図15)に送られ、その符号によって方向が定る。ここから信号は二つに分けられ一つはレートメーター6に入る。6はパルス周波数に比例した電圧およびテーブル移動速度に比例した電圧を発生する。この電圧は磁気増幅器9に与えられ、9がテーブル送りネジにつけられたサーボモーター(図13の2)をコントロールする。この回転速度は指令パルスの周波数によって決定される velocity control となる。この速度は±2%の精度で制御される。テーブルの移動によって回折格子から発生するモアレ縞パルス信号は方向ディスクリミネーター8を通してデジタルレジスター7に入り方向指示回路5からの信号と比較される。両パルス信号に差があると、これに相当する電圧を発生し磁気増幅器によってサーボモーターの速度を変えてこの誤差電圧を0にする。この二つの制御法によって精密位置定めができる。最初の磁気テープによる指令は送りネジを基準としたも

ので送りネジピッチその他が理想的なものとして計算されたもので、もしこれに誤差があればモアレ縞からの信号との間に誤差電圧を発生して補正する形をとる。これがx, y, z三軸で行なわれ同期が完全にとれていなければならない。この制御法がうまくいくには刃物の切削速度に対するサーボ系の時定数と磁気テープに記録されているパルス密度のマッチングがとれていなければならない。磁気テープのパルス密度は重要な問題で、ここで使われているものではテープ1吋長さ当り100パルスでテープのプレイバック速度は1秒間15吋であるので最大パルス計数は1500/秒になる。1パルスは0.0002吋になるので一軸に沿った動きの最大速度は18吋/分になる。これが二軸に同時に要求されるとカッター速度は $\sqrt{2} \times 18$ 吋/分で25.5吋/分となる。磁気テープに記録されるものは図面を全部二次曲線におきかえられて計算されていて、カッター径が別に与えられカッターの中心の軌跡がテープに記録されている。x, y, z三軸の送りはテープのそれぞれのトラックに記録されているので、例えばxy面でx軸に対して26.5°をなすように切削するにはxトラックの2個のパルスに対してyトラックで1個のパルスが発生するように計算されている。曲線の切削では各トラックのパルスの周波数が連続的に変化することになる。初期条件として切削速度と基準点を与えられて計算を行なうが、この基準点は切削される工作物の外にとられ、このフライス盤ではテーブルの左隅を基準点とし二次基準点として工作物の形状大きさによって自由にとることができる。この二次基準点にカッターを持って行くのもプログラミングにより自動的に行なわれ精密位置定めされる。軸のカッターの上下方向に対しては個々のカッターの長さの違いがあるので人手によって基準点に持って行かれる。このフライス盤は機械的にも特別の工夫が施されていてギャボックスおよび送りネジ共にバックラッシュをできるだけ除いてある。サーボモーターは400 cpsの三相で0.5馬力10,000rpmのもので、それぞれに磁気ドラムブレーキがあり励磁されないときはロックされるようになっている。カッターの上げ下しは減速は1/30でテーブル移動は1/84で行なわれる。このフライス盤の制御によって切削された工作物を図16に示してあるが、これはribの断面で外側角の仕上は人手による普通の仕上と全く同様で全所要時間はただの16分である。

このFerranti社で上の経験を生かしてMark IIIというサーボコントロールのフライス盤が最近製作された。これは前のものを改良したものでエレクトロニクス系はトランジスタ化されサーボ系は油圧系が採用されている。図17の測定系には三つの回折格子が使用され、二つは今



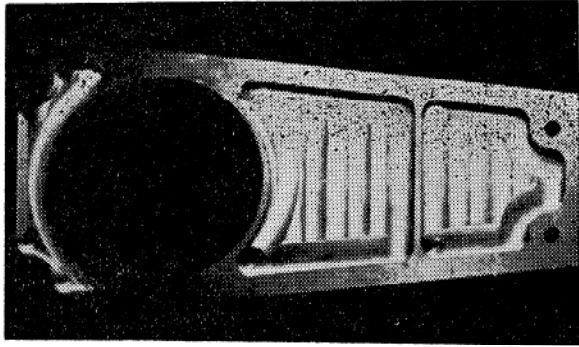


図16 モアレ縞制御による加工品

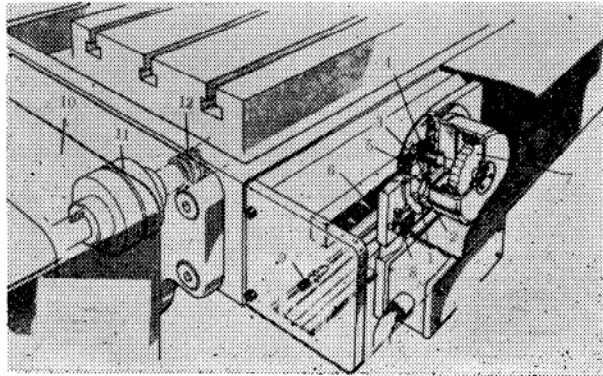


図17 Mark IIIの光学系

- 1.光源 2.光電管 3.レンズ 4.固定格子 5.走査格子 6.移動格子 7.周期電動機 8.スイッチ 9.ストッパ 10.ギヤボックス 11.カプリング 12.送りネジ

までのフライス盤と同じで、他の一つは硝子円板に累重渦線 (Multi-starts piral) が黒く画かれていて回折格子の働きをし、これを同期電動機で回収してモアレ縞を104cpsで走査するようになっている。テーブルが移動するとモアレ縞も当然動くがこの104cpsより早い周波数になるか遅い周波数になるかでテーブルの方向がわかるようになっている。このフライス盤では前のものより精度よく工作ができるようである。

## 6. 終りに

回折格子が精密測定の一つの基準尺として使用される

ことはその精度、格子定数から明かであり、その一例として5に工作機械の自動制御への応用を述べたが、他にもまだ種々の応用がある。精密長さ測定装置は最も手近なものであり、モアレ縞を使わないで直接格子定数で測定する方法また格子像を他の格子に結像し両方の格子を通過する光量の変化を測定して間接的に長さを知る方法などがある。これらはいずれも実用装置としてそれぞれの装置として販売されている。また微小振動振幅の測定や特殊な回折格子 (spiral grating あるいは coaxial circular grating など) で角度の精密測定や微小移動変化の検出などに使用されている。このように回折格子は分光用分散子の使用法はもちろんのこと、これら精密測定法にも広く使われその需要は増大する一方である。これら諸用途に関する論文も多く見かけられるが紙面の都合で割愛した。今後回折格子の精度の向上とともにますますその新しい用途の開けることを期待するのである。最後に本稿の参考とした諸文献をかかげておく。

## 文 献

- 1) T. Merton: Proc. Roy. Soc. A201(1950) 187
- 2) G. D.Dew & L.A.Sayce: Proc. Roy. Soc. A207 (1952) 278
- 3) G.D.Dew: J. Sci. Instr. 29(1952) 277
- 4) R.G.N. Hall & L.A.Sayce: Proc Roy. Soc. A215(1951) 536
- 5) G. D.Dew: J. Sci. Instr. 30 (1953) 229
- 6) G. D. Dew: J. Sci. Instr. 33(1956) 348
- 7) J. Dyson: Proc. Roy. Soc. A248 (1958) 93
- 8) G. N. Rassudova & F. M. Gerasimov: Opt. & Spect. 14(1963) 215
- 9) J. Guold: Interference System of the Crossed Diffraction Gratings, Clarendon Press, Oxford, 1956
- 10) J. Guild: Diffraction Gratings as Measuring Scales, Oxford University, Press, London, 1960
- 11) Machinery 84(1954) 36
- 12) D. T. N. Williamson: Machinery 84(1954) 1210
- 13) D.T.N. Williamson: Aircraft Prod. 17(1955) 267
- 14) P.J. Farmer: Aircraft Prod. 18(1956) 256
- 15) Aircraft Prod. 21(1959) 286
- 16) D. L. A. Barber: J. Sci. Instr. 36 (1959) 501