

学生・生徒実験において 回折格子を手作りする簡単な方法の開発

高 橋 成 和

Masakazu TAKAHASHI

Development of Simple Apparatus in which Slits and Diffraction Grating
are made by Hand for Students' Experiment.

Abstract : A simple method to make slits or diffraction grating by hand was developed. The first, coat plane glass surface with a few drops of drawing ink. Next, make a micrometer screw move up and down the glass in a vertical plane to keep the spacing of rulings constant. And then, single, double or more number of slits are made by ruling fine grooves on the drawing ink thin film with a safety razor or a snap-off cutter blade on a horizontal plane bed.

A high quality grating which has 100 lines per mm is made simply in several minutes by students in the classroom.

I はじめに

昨今世界的に、学生・生徒の理科ぎらいが問題視されている。この原因はともかく、理科に魅せられる動機に、先人達もよくその回顧録に述べているように⁽¹⁾、大変きれいなものに出合ったことを挙げているものが多々ある。

光の干渉・回折像は、物理現象の中でも視覚的に特に美しいもので、原子分子から星雲のスペクトルに至るまで、そのスケールの大きな話題にもかかわってきて、学生・生徒達の興味を引き出すにもってこいの題材である。

この学習場面では、多くの学校で実験が取り上げられていることは周知の通りだが、スリットや特に回折格子は市販のもの 或いは 教師が自作して準備したものである。これを使用することは生徒・学生にとって他人事であり、身近なものではない何か特別なものとして受けとめ、興味が半減するであろう。

そもそも実験とは条件を色々と設定し、自らの手と頭を働かせて行なうもので、この場合スリットの本数や幅、格子定数を自由に選択できるようにしたいのは当然であろう。

回折格子を自作する方法は数多く報告されているが、

これらは格子の原画を写真によりフィルム上に縮少して作るもので、その原画を作るところに色々な工夫がなされている⁽²⁻¹²⁾。この写真による方法は、多くの時間を必要とし、また人間の感覚を直接通して出来るものではなく、写真という技術を用いてのワンステップ置いて出来あがるもので親近感が薄いものとなるであろう。学生・生徒の直接的な手作業のみによる回折格子の製作、しかもありきたりの材料を用いて、短時間で行なうにはどうしたらよいであろうか。

例えば P.S.S.C. などに示されているダブルスリットを作る方法⁽¹³⁻¹⁵⁾を拡張して、何枚ものカミソリを重ねて一度に多数のスリットを引く方法があらう。ところが現実に行なって見ると2, 3本の線が引けるだけで失敗に終る。何枚もの刃先を一直線上に並べることは不可能に近いのである。

また、円筒側面にプラスチックシートなどを巻き、これを回転させ、この回転と連動して側面をなめて行く刃物でシートに溝を切る方法も考えられよう。しかし工作機械を持たずに、この仕掛けを作るとは至難の技である。

あるいは、モアレトポグラフィーの格子⁽¹⁶⁾のように、細い糸をわくに密に巻きつけ固定してのち1本おきに取り去り、残った部分で格子を作るという方法もある。し

かし、かなり困難な作業を伴うと同時に、格子間隔をさほど小さく出来ないことや自由に変えられない欠点がある。

二転・三転と発想の転換を迫られ、試行錯誤の結果、ガラス板にインキを塗布し、刃物で1本のスリットを切ってガラスを指定の距離だけずらし、また次の1本を切ってガラスを送るという繰り返しの原始的な方法で1mmの幅の中に100本のスリットをひき、いわゆる1000本/cmの回折格子を素朴な方法で作ることに成功したのである。

では、ガラス板にどんなインキをどのようにして塗布したらよいか、このガラス板の送りはどんな仕掛けでかけ、スリットを切る刃物には何を使ったらよいか、これらの事項について実験的に調べた結果を以下に述べよう。

II 装置の製作

スリット、格子を作るにあたって、まず二つの装置を作る必要がある。その一つはガラス板、ここでは顕微鏡用スライドガラスを用いるが、これにインキを塗布するもの、もう一方はガラス板上の塗布膜にスリットを切る道具である。ともに教師が或いはクラブ活動などで生徒が、日曜大工で一日かければ、簡単に製作出来るように配慮してある。

II-A インキを塗布する装置

ガラス板にインキを塗布する方法には、刷毛やタンポンあるいはスプレー、ディップコーティングがあるが、一様に塗るには練習が必要である。経験がなくても、ほぼ一様に適当な厚さに塗れる回転塗布法(スピナーコーティング)を用いることにした。

図1のような装置で、模型用モーターの軸に金属板を取り付け、この板が水平面内で回転するようにモーターを台に固定する。電源は1.5Vの乾電池1個でスイッチ付電池ホルダーを使用した。できるだけ素朴なものをということで特別な工夫はしていない。

金属板にインキを塗布するガラス板をビニールテープで裏からとめる。これで十分しっかりとまる。これを回転させインキを2~3滴たらし10秒程度で止める。回転数は800R. P. M. であった。インキが飛散するガードに紙筒を図のようにかぶせておくがよい。

II-B スリットを切る道具

図2にインキを塗布したガラス板を少しずつ移動させスリットを切る装置を示す。設計図は図3の通りである。

ガラス板は板Aに鉛直にビニールテープでとめる。こ

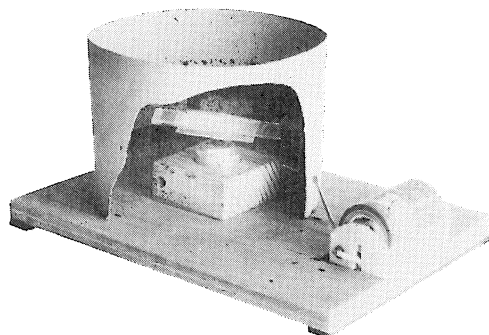


図 1 回転塗布装置 (回転数 800R. P. M.)

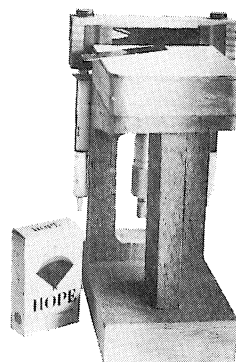


図 2 スリットを切る装置

の板をマイクロメーターで、指定した寸法にしたがって押し上げる。押し上げる点は直径10mmのボール接点を用い、板Aの上下動のガイドは左右にある注射器で行なう。ここで注射器を平行に取り付けることが肝心である。まず板Aの両端にピストンと同じ直径の孔をボール盤を使って平行に明け、これにピストンを通し接着する。次にピストンにシリンダーをはめた状態で、板Aに埋めたスチールボールがマイクロメーターの先端にのるようにして、支柱の側面とシリンダーを接着剤で留める。これで自動的に注射器の平行度が保たれ、板Aは上下に滑らかに移動できる。特別な工作機械を用いないで大変よいガイドを得たのである。

このようにマイクロメーターのネジで押し上げられるガラス板の塗布したインキの膜を、水平な台Bの上に寝かせた剃刀の刃で台の上をすべらせて切り、スリットをつくる。刃を水平な台にねかせ、すべらせて切る方法をとったことが、細かいスリットを作り出せた鍵の一つである。

この装置は主に木工細工で出来るが、特に水平な台Bが、がっしりしていることと平面であることが格子、ひいては干渉・回折像の出来ばえに大きく影響してくる。平面Bは厚さ5mmの亚克力板を張ることで得られ

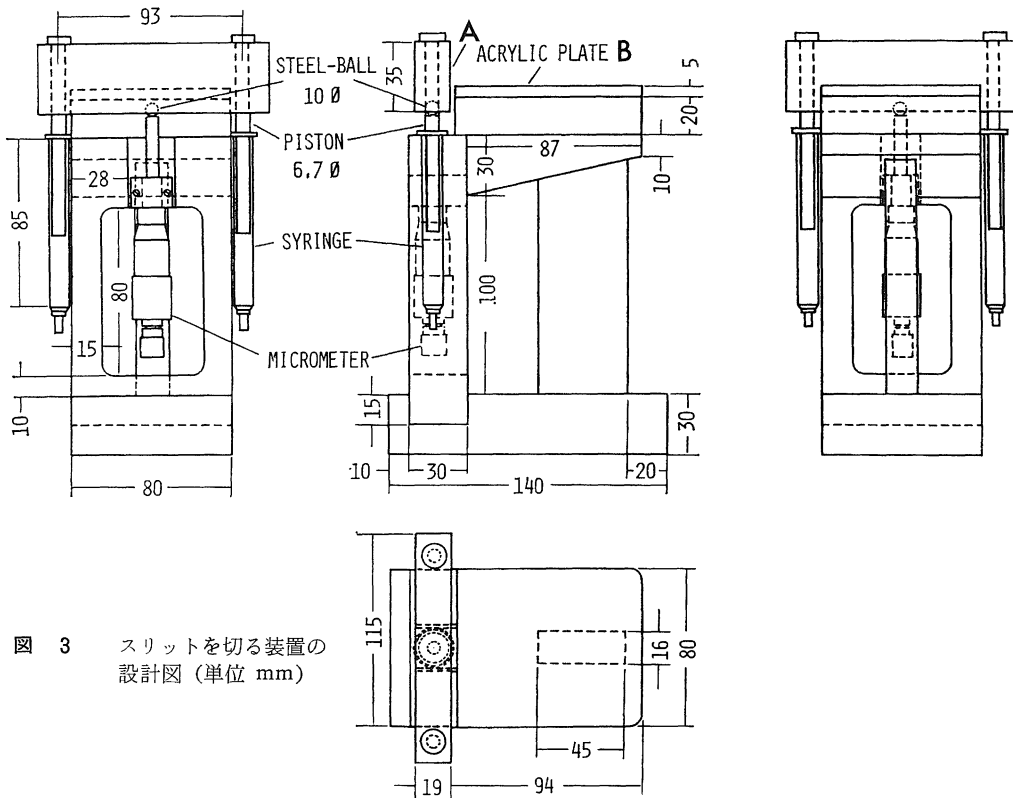


図 3 スリットを切る装置の設計図 (単位 mm)

た。これを参考に読者が製作されるならば、台の幅を1.5倍程度広げた方が使いやすいと思われる。

このような装置を用いることによって、マイクロメーターの最小目盛 $1/100\text{mm}$ 、あわよくば半目盛 $1/200\text{mm}$ ずつの送りをかけてスリットの線引きが出来るのである。

III 塗布するインキは何かよいか

次に、ガラス板に塗布するインキの種類について考察する。従来よいと云われている石墨のコロイド溶液(墨)やマジックインキは単または複スリットには適しているが、 1mm に100本ものスリットを切るのだから、そのまま適用できるとはかぎらない。インキのガラスとの濡れ、付着性、粒子の大きさ、切り屑の出方など多々問題点を含んでいる。身近にあり、しかも安価に入手できるもの11種の中から最も適したものは何かを捜し求め次の実験を行なった。

これらインキの顕微鏡用スライドガラス板への塗布の状況を図4に示す。上から2行はマジックインキ類、次の3行は製図用インキ類2種とロットリング用インキ、つづいて3行が墨類、絵の具につづき最後の2行が水性

と油性塗料である。また縦に見て左2列は原液のまま、右2列は体積2倍に稀釈して塗布したものである。この各2列の左側はモーターと電池を直結して得られる高速回転 800R. P. M. 、右側は固定抵抗器(ニクロム線)を挿入して半分低速回転 400R. P. M. で回転塗布したものである。

膜面の一様性と黒さの点から見ると、原液を高速回転塗布したものがよい。稀釈したものからうかがえるが、製図用インキ類、墨類及び絵の具は液の中に粒状のものが混在している。ロットリング用インキはこれが比較的少ない。ガラスへの付着力はマジックインキ、ラッカー類がよく、他は指などで触れるととれてしまう。

次に、これらの膜面にスリットをあけるとどうであろうか。 0.05mm 間隔で10本のスリットを大型カッターで切った状態を示す顕微鏡写真を図5にあげる。各々の配置は図4と対応している。

マジックインキ類、製図用インキ類、すった墨液は液自身に粘着性があるため切り屑が出る*。これは粘着性が強いと長く、弱いと細かい。ロットリング用インキや墨

* 図5の顕微鏡写真では、切り屑が持ちあがっているためにピントからずれて少ししか見られない。

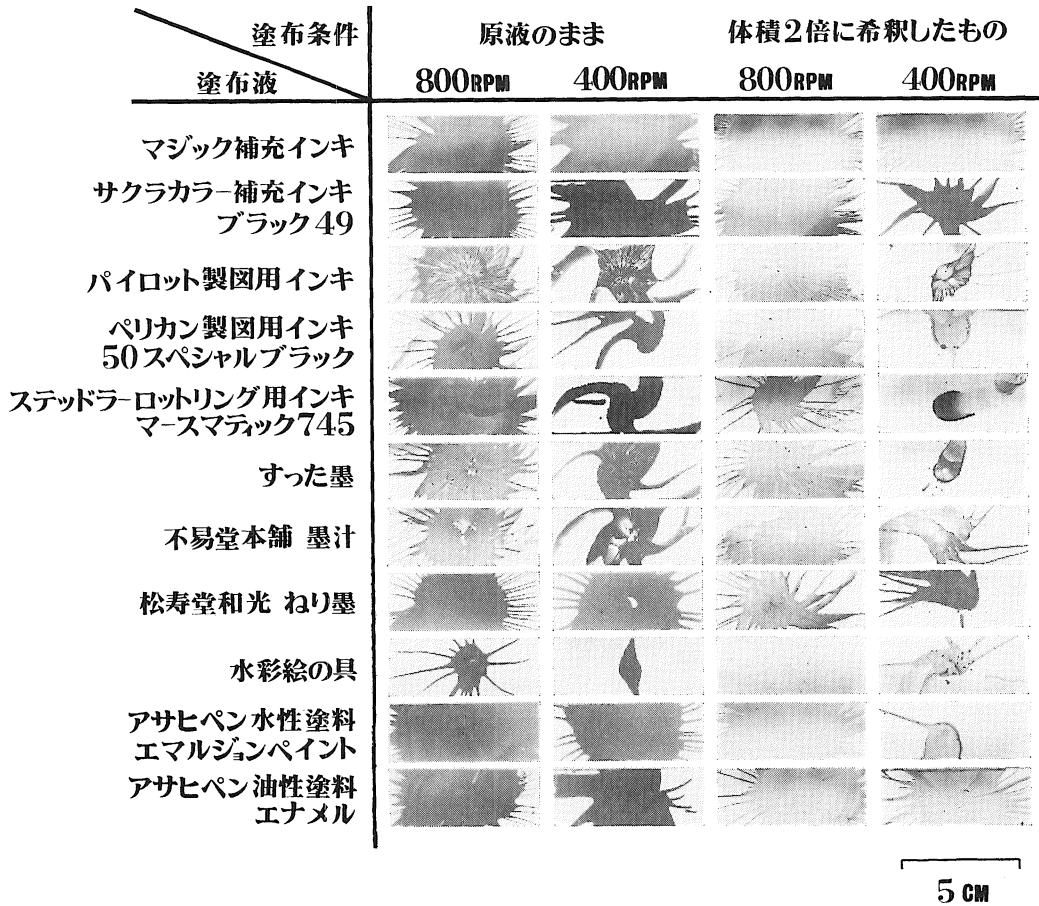


図 4 回転塗布膜表面の接写写真：顕微鏡用スライドガラス（75mm×25mm）を水平面で回転させ、油性インキ、製図用インキ、ロットリング用インキ、墨、絵の具、塗料の原液または溶媒で体積を2倍に希釈した液を2～3滴たらし10秒後に回転をとめたときのガラス表面に塗布された被膜の模様である。これらの写真は透過光で撮影した。放射状あるいはうず巻状のものなどの特徴ある模様はいつでもきまって得られる。高速で回転塗布したものは、絵の具の原液を除き、一様に広がる。膜の黒さの点から原液を使用した方がよい。真黒なものは練墨、絵の具、塗料、次いで黒いものはロットリング用インキ、製図用インキ、サクラカラーインキ、他は少々うすく、マジックインキは青味がかかった膜ができる。付着力の点から見ると、油性インキ類と塗料が強く、他は指などで触れるととれてしまう。

汁にはこれが少ない。これらは常時湿気を帯びていて、刃がインキや墨の粒子をかき、側面に積み上げる状態をつくり、きれいなスリットができる。しかし厚く塗り、十分乾燥させると切屑ができるようになる。

ペイントやエナメルは、乾燥が充分でない状態で切るとロットリング用インキの場合と同様になるが、時間とともに溝の両側に積み上げられた部分がスリットに流れ込み、これを隠してしまう。また乾燥させてから切るとひび割れて溝の縁が荒れる。希釈してガラス板への付着力が弱くなると同様になる。この現象はマジックインキ類でも見られ、隣のスリットとの間に残るべき黒い部

分を剝離しながら切る状況が生じる。

以上のことより総合的に見て、最もきれいなスリットが作れるのは、ロットリング用インキ又はマジックインキ類の原液を高速回転塗布したものである。欠点をあげれば、前者はガラスへの付着力が弱いこと、後者は青味がかかっており干涉・回折を見るとき透過光によって全体が青味がかかって見えることである。

IV 刃物は何がよいか

ガラス板に塗布したロットリング用インキの膜に、刃

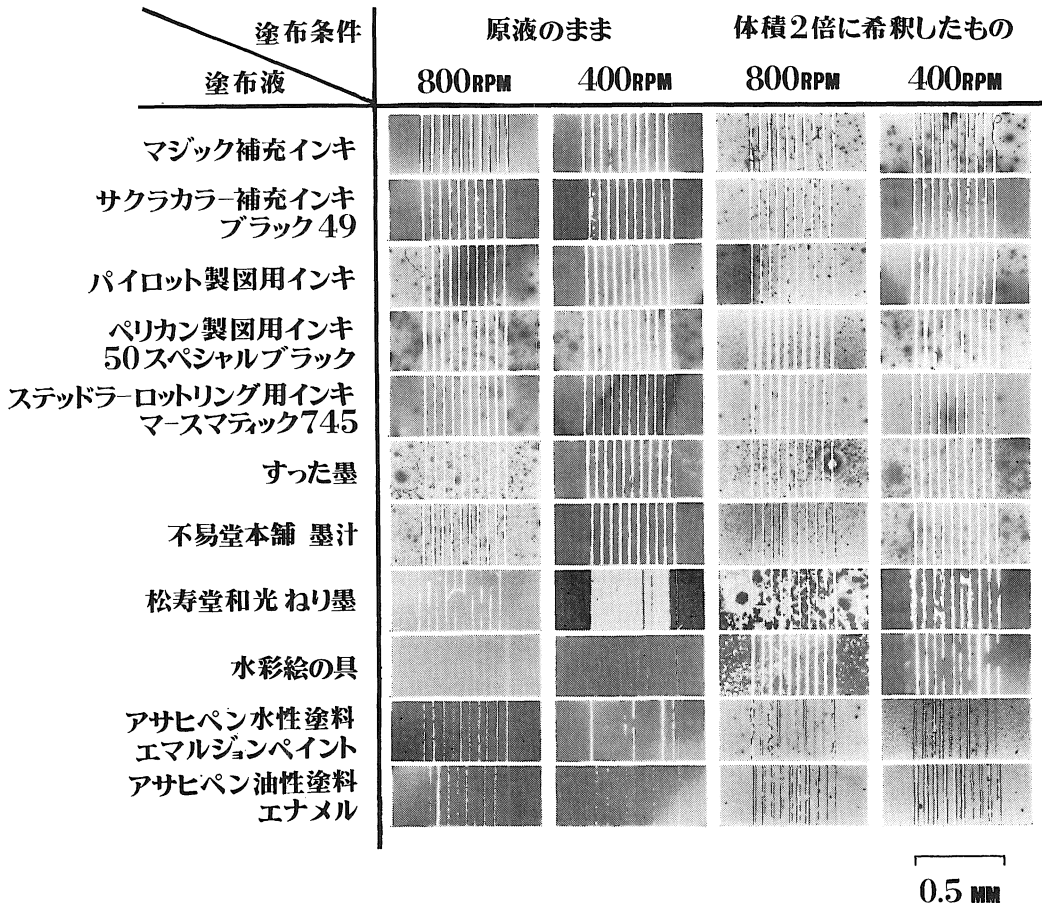


図 5 塗布膜へのカッター大による刻線の状態の顕微鏡写真：左頁の写真にある塗布膜にカッター（刃先を折って新しい部分を出して使うもの）で 0.05mm 間隔に10本のスリットをひき、この溝を透過光により顕微鏡下で写真撮影した。油性インキはシャープな線が引けるが、大きな切り屑が出る。希釈すると、これが細かく多くなり、膜の表面に粘着してしまう。製図用インキは細かい切り屑が出る。また、刃先の両側にインキの粒子がたまり溝の側面を荒らす。ロットリング用インキは層が出にくい。特に原液を用い高速回転塗布した膜については全く出ず、しかもシャープな線がひける。墨液、墨汁もシャープな線が引けるが、小さな切り屑が出る。また墨の粒子が大きな穴を作り下地を荒らすことがある。ねり墨、絵の具、塗料は刻線しにくく、溝の線が荒れる。塗料の場合希釈するとよいが、数日後にひび割れてくる。

物をかえての刻線の状態を、0.01~0.10mm 間隔のスリットについて、図 6 の顕微鏡写真に示す。

ここで検討した刃物は日常的なもので、大小二種のカッター、両刃と片刃の剃刀、レコード針である。これらの刃先の側面と断面の顕微鏡写真を次頁の一番上に示す。

スリットの幅が小さい格子を切るためには刃先が鋭利なものを使えばよいが、柔らかすぎて曲がるものでは役に立たない。

片刃の剃刀が最もシャープであり、比較的しっかりし

ており、最もきれいな、また格子定数の小さいスリットが引ける。これにより、ガラスへの刃先のあたり具合を手先で調整しながら行なえば、マイクロメーターの最小目盛の半分ずつの送りをかけ 0.005mm 間隔の刻線も可能であった。

次に刃先がシャープなものは両刃の剃刀であるが、薄いため、このまま使うと刃先が曲がりスリットが真直ぐに切れず、しばしば隣のスリットへはみ出す。刃先のごくそばまで堅い物をはり補強する必要がある。0.03mm より広い間隔のスリットを引くのならカッターで十分

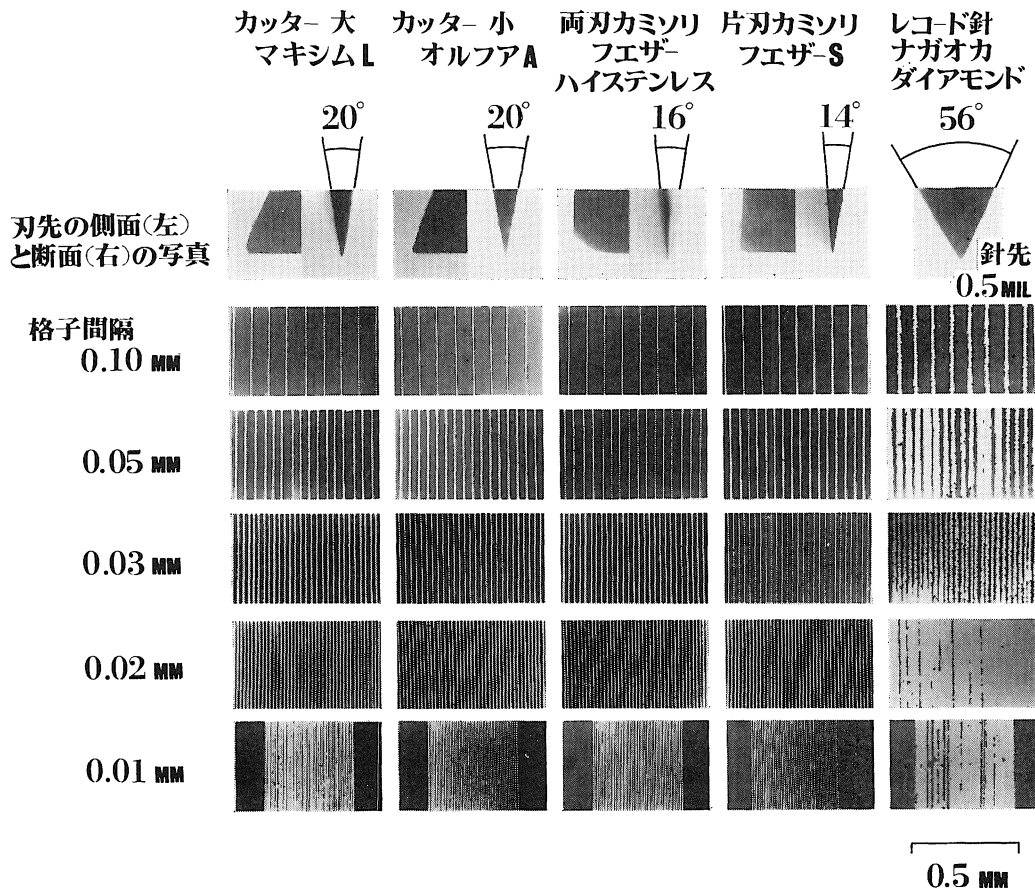


図 6 カッターの種類による刻線の相違：ガラス面上のロットリング用インキ膜に50本のスリットを引き、透過光により顕微鏡写真撮影を行なったもの。ここで、線引きに用いたカッターは厚さと幅が 0.50mm \times 18mm の大型のもの、0.35mm \times 9mm の小型のもの2種である。剃刀の両刃と片刃の厚さは 0.10, 0.25mm である。これらの表面に塗ってあるろうを、完全に取り去ってから使用しないと、等間隔で真直な線が引けない。レコード針の先端の曲率半径は 0.013mm で、膜に埋まり込む部分の幅を考慮すると 0.02mm 間隔以下の線引きは無理なようである。また、薄く積った雪をかくとき、かかれた雪が、雪かきの側面にまわり、これが雪をかき、ある程度たまると縁に置いて行く雪かき現象と同じことが起っている。溝の幅は膜の厚さにも関係するが、刃先の頂角から見て片刃が細く引けるのは当然である。

である。

レコード針は針先に切りかすが溜り、これが針先の側面にまわり、スリットの縁を荒らす。また少しでも力を入れすぎるとガラスをも切ってしまう、一度切れるとその溝にいつも刃先が落ちこみ、手作業では大変むずかしく使用にたえない。

V 保存について

以上の実験から、ロットリング用インキを高速回転塗布して、片刃のカミソリでスリットを切るのがよい結果を生むことが判った。しかしこのインキは触れると取れ

てしまう。このガードのために格子の部分に窓をあけた黒い紙を置き、その上から別のガラスを重ね、周りをテープや接着剤でとめておくと、気軽に取り扱える。この黒紙はスペーサーと下地が薄いとき透過光を遮る役割をはたす。

VI 干渉・回折像の写真撮影

スリットの幅が異なる単スリット並びに間隔 0.03mm のスリットの数 1, 2, ..., 10本とかえた時の単色光のフラウンホーファー回折像とここで使用したスリットの顕微鏡写真を図 7 に示す。

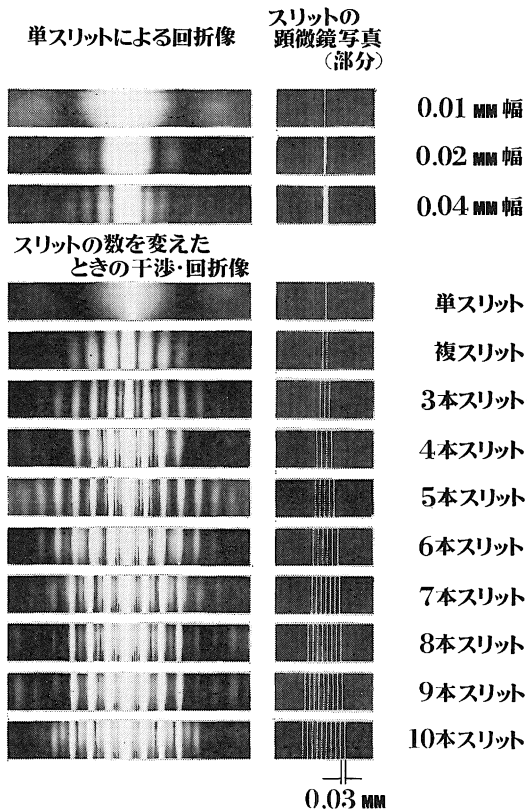


図7 単色光の干渉・回折像とスリット

光源は500W白熱電球で、2枚の赤セロハン紙を重ねたフィルターを通し赤色光を作った。平行光束は250mm望遠レンズを前後逆にして使うことで得た。即ちフィルム面(焦点)にコヒーレンスを得るためのナイフエッジで作った単スリットをもうけ、これに光を入射した。別のカメラのピントを無限遠に合せ、絞り開放で撮影した¹⁾。副極大の数や分解能の増加が見られよう。

製作した100本のスリットによる原子が発する光の干渉・回折像を図8に示す。各原子につき上から、格子定数が0.01, 0.03, 0.05, 0.10mmのものによる。

VII 教室での実践

0.03mm間隔で50本程度の格子ならば、初めてでも5分程度で製作でき、授業中に生徒に作らせることが出来る。0.01mm間隔は、刃先のガラスへのあたり具合を感覚的につかむのに数回の練習が必要であろう。回折像の次数が大きいものまで見えて、見ごたえのある点では格子定数が0.03mmより大きいものの方がよい。

この格子を目許に持って行き光源をのぞくP.S.S.C.の方法もよからう。図8のような像を見せるために、分

光計や上に述べた写真撮影のときのような方法を用いると一人一人がのぞくことになり、時間がかかりすぎて授業に取り入れにくい。写真機のかわりにカラーテレビカメラを用いてブラウン管上に撮し出せばよいのだが、これらの装置を持たない学校では、白色光や単色光ならばプロジェクターを用いて教室のスクリーンに回折像を直接大きく写し出すことができる。すなわち、まずプロジェクターのフィルムが入る位置に単スリットをもうけこの像をスクリーンに写し出す。次に、レンズの前か後に回折格子を単スリットと平行しておけばよいのである。同様にO.H.P.でも出来る。市販のガラス製のものやプラスチック製レプリカでは透明でバックグラウンドが明るくなりすぎ、このような回折像を見ることが出来ない。ここで製作した格子は白黒がはっきりしているため、このようなことが可能なのである。

大学初年級の学生実験で、学生自ら間隔や本数を自由にかえたスリットを作り、それによる干渉・回折像にかかわる学習を伴う実験や光の波長の測定を行なうことができる。これは当学部の理科教育法実験で取り上げ実践している。

VIII おわりに

学生・生徒自から作ったスリット・回折格子を使って非常にきれいな干渉・回折像を初めて見るときの感激、この一瞬を彼等に経験させたいと、これを追い求めミリ100本の線引きへの挑戦を行なった。簡単な方法で回折格子を手作りさせたいとの願いと教師にとっても日常的なもので手軽に製作できる装置を準備するのに止まるといふ条件のもとである。

インキや刃物をもっと捜し求めればより良いものがある。また、装置も木工細工や注射器などではなく、金属製にした方がくるいがなからう。しかし、どこでも誰にでも出来るという条件により、日常的なものの中から選び出すことにとどめた。万人が実践できることを求めたのである。

最後に、本研究の写真撮影は島根県立浜田商業高等学校教諭 江崎 操氏(現在、島根大学教育学部科学教育研究室に内地留学中)の協力を得た。ここに深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 久野 久: 続科学随筆全集(学生社) 4, 9がたとえばある。
- (2) 板屋源清: 日本物理教育学会誌 13, 18 (1965)

- (3) 山田盛夫：日本物理教育学会誌 **19**, 34 (1971)
- (4) 毛利勝郎・塚田 勇・藤田健一：科学の実験（共立出版）**23**, 1604 (1972)
- (5) 豊田博慈・林野俊彦：科学の実験（共立出版）**23**, 1687 (1972)
- (6) 那波信男：日本物理教育学会誌 **21**, 122 (1973)
- (7) 毛利勝郎：科学の実験（共立出版）**24**, 809(1973)
- (8) 財木頼行：科学の実験（共立出版）**26**, 118(1975)
- (9) 長沢 武：科学の実験（共立出版）**27**, 321 (1976), **27**, 625 (1976)
- (10) 高橋良夫：日本物理教育学会誌 **25**, 170 (1977)
- (11) 矢野淳滋：科学の実験（共立出版）**29**, 425 (1978)
- (12) 高橋成和：応用物理学会 応用物理教育研究会誌 **6**, 73 (1981)
- (13) P.S.S.C. 物理実験指導書（岩波書店）p.36 など
- (14) 芦葉浪久：日本物理教育学会誌 **11**, 30 (1963)
- (15) 生地富雄：科学の実験 臨時増刊（共立出版）p.110 (1965)
- (16) 高崎 宏：科学朝日 p.132, 7月号 (1970)
- (17) 山田盛夫：日本物理教育学会誌 **28**, 10 (1980) などにある方法も生徒には判りやすくてよかろう。

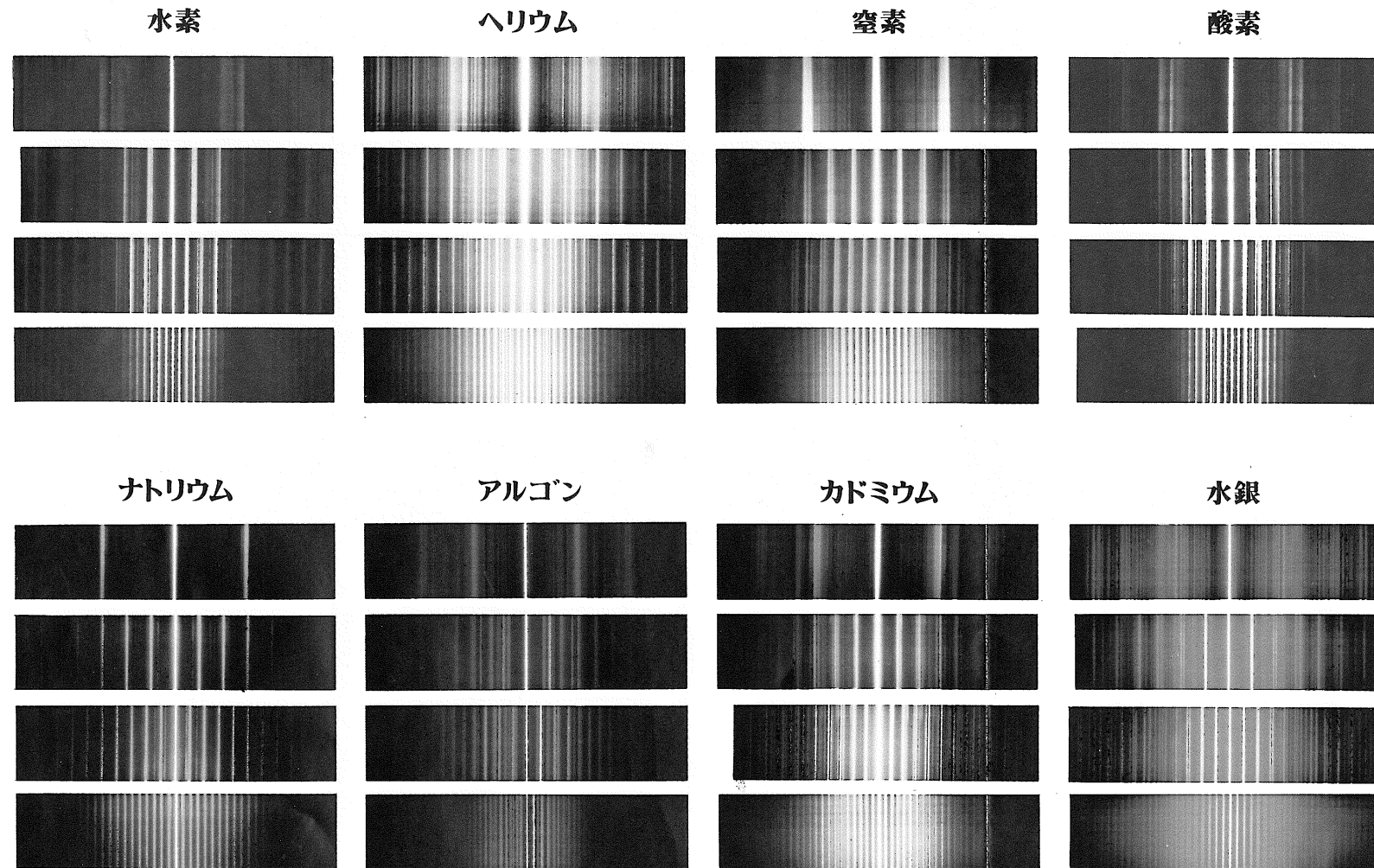


図 8 原子・分子が発する光の100本スリットによるフラウンホーファー回折像：各原子につき上から、格子定数 0.01, 0.03, 0.05, 0.10mm の格子による。フィルムはコダックエクタクロームポジ ASA 64 を使用。撮影条件はピント無限遠、絞り開放、露出時間 H-90, He-90, N-60, O-90, Na-30, Ar-240, Cd-90, Hg-2秒。