

花山天文台太陽館モザイクエッセル分光器

牧田 貢（京大理・花山天文台）

久保田 諄（大阪経済大）

文部省科学研究費補助金試験研究（A）で試作したモザイク回折格子（牧田他 1992a, b）を実験観測及び学生実習用に花山天文台太陽館分光器室に組み込んだので報告する。新分光系ではF比を望遠鏡と合わせることによって光量を今までより有効に使うと共に、波長分解能の格段の向上を目指している。

構成

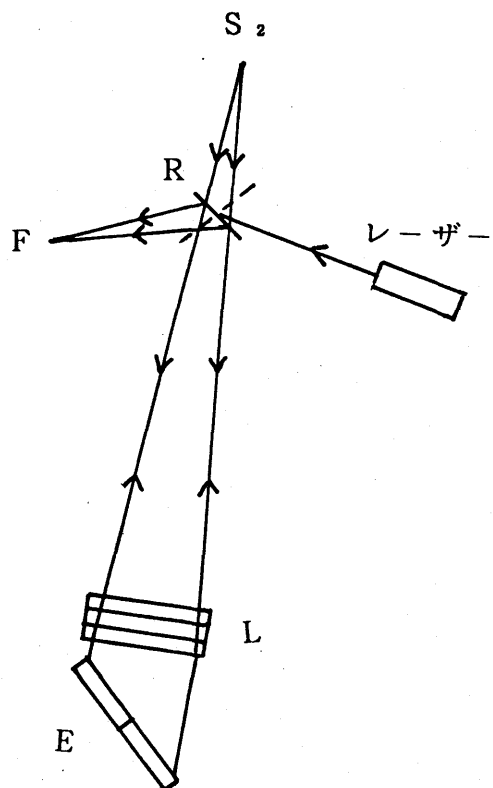
太陽館分光暗室に新たに組み込んだ分光器の平面図は第1図の通りである。モノクロメーター（Nakai and Kubota 1964）の第2スリット（ S_2 ）から入った光は焦点距離6 mのレンズ（L）で平行光となり、2枚からなるモザイクエッセル（E）に当たる。そこで分散した光は再びLを通して来た方向に戻り、途中の反射鏡（R）で曲げられ、Fにスペクトルをつくる。往復の光路の重複を避けるため入射光は下から上向きにEに当たり、分散光は入射光の上を通してFに至る。別に緑のHe-Neレーザーが用意され主光束と僅か異なる向きからEを照射しFの近くに結像するようにしてある。

焦点像はCCDカメラ或いはルーペによる眼視（危険なためレーザー光では行わない）で観察する。

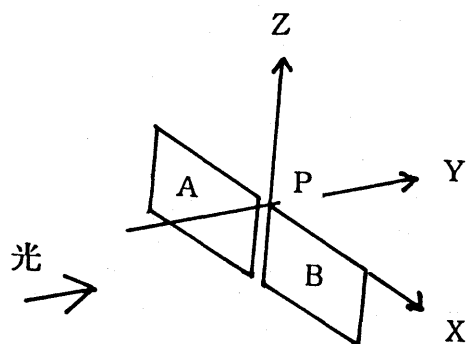
①モザイクエッセル

ミルトンロイ社のエッセル（刻線面積 20cm×10cm、分類番号 35-13-25-402）2枚を並べて使用している。同じマザーから作った通し番号のレプリカであり、基盤の材料にはゼロデュアを用いている。第2図に示すように、エッセルAに対してエッセルBはPを支点としてX-, Y-, Z-軸のまわりに回転するほか、X-及びY-方向に平行移動する。エッセルの刻線密度は79本/mm、ブレイズ角は $75^{\circ}58'$ であるので、リトロ条件でブレイズ角に分散される波長とその次数及び焦点面での分散は第1表のようになる。エッセルをブレイズ角で使った時、光束に対する有効面積は10cm×10cmで分光器のF比は60となる。これは太陽像結像系のF比55とマッチしている。エッセルA, Bは第3図のように一体として回転台の上にあり、丸ハンドルの操作で垂直軸のまわりに回転し、焦点面に所定の波長を送ることができる。エッセルの

第1図 モザイクエッシエル分光器の構成



第2図 エッシエル A, B の配置



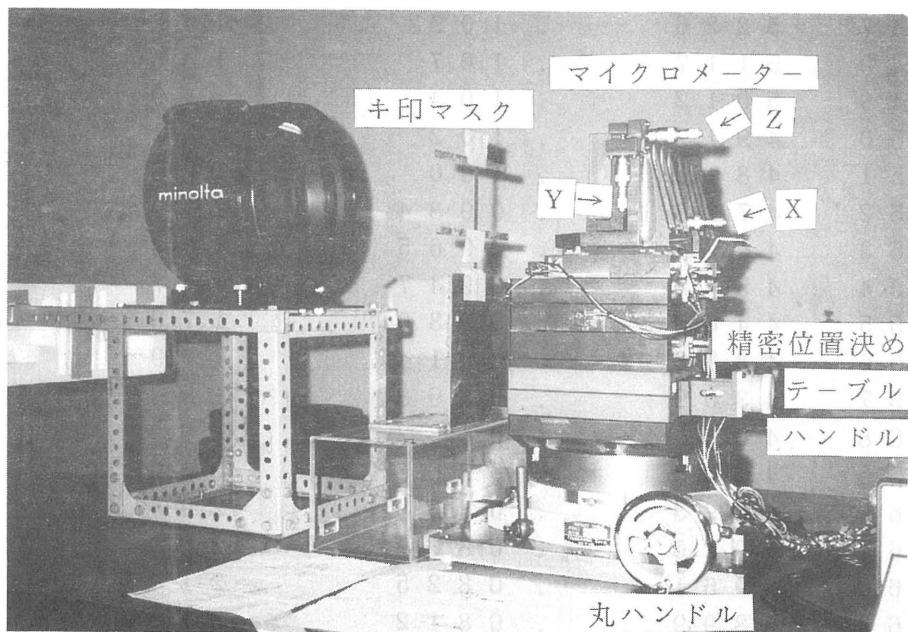
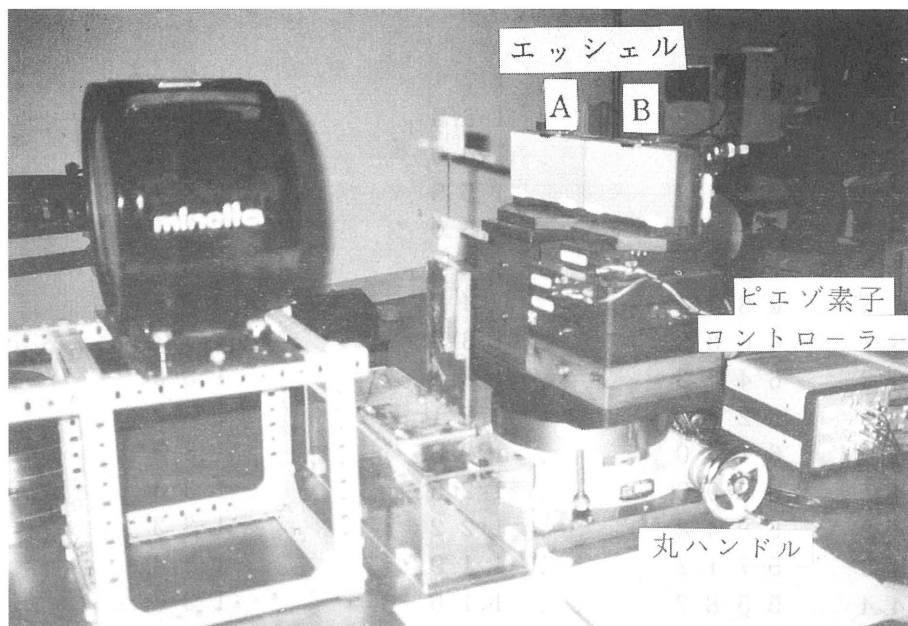
第1表 ブレーズ角における諸元

次数 中心波長 (Å) 分散 (Å/mm) 第2スリット幅 (μm)

3 0	8 1 4 7	. 1 7 1	1 2 8 #
3 1	7 9 2 3	. 1 6 5	1 2 7
3 2	7 6 7 5	. 1 6 0	1 2 3
3 3	7 4 4 3	. 1 5 5	1 2 4
3 4	7 2 2 4	. 1 5 0	1 2 1
3 5	7 0 1 7	. 1 4 6	1 2 3
3 6	6 8 2 2	. 1 4 2	1 2 6
3 7	6 6 3 8	. 1 3 8	1 2 7
3 8	6 4 6 3	. 1 3 5	1 3 0
3 9	6 2 9 8	. 1 3 1	1 3 2
4 0	6 1 4 0	. 1 2 8	1 3 3
4 1	5 9 9 0	. 1 2 5	1 3 3
4 2	5 8 4 8	. 1 2 2	1 3 3
4 3	5 7 1 2	. 1 1 9	1 3 4
4 4	5 5 8 2	. 1 1 6	1 3 6
4 5	5 4 5 8	. 1 1 4	1 3 8
4 6	5 3 3 9	. 1 1 1	1 4 0
4 7	5 2 2 6	. 1 0 9	1 4 2
4 8	5 1 1 7	. 1 0 7	1 4 6
4 9	5 0 1 2	. 1 0 4	1 4 9
5 0	4 9 1 2	. 1 0 2	1 5 2
5 1	4 8 1 6	. 1 0 0	1 5 8
5 2	4 7 2 3	. 0 9 8 4	1 5 9
5 3	4 6 3 4	. 0 9 6 5	1 6 2
5 4	4 5 4 8	. 0 9 4 7	1 6 7
5 5	4 4 6 6	. 0 9 3 0	1 7 8
5 6	4 3 8 6	. 0 9 1 4	1 7 9
5 7	4 3 0 9	. 0 8 9 8	1 8 0
5 8	4 2 3 5	. 0 8 8 2	1 8 9
5 9	4 1 6 3	. 0 8 6 7	2 0 0
6 0	4 0 9 3	. 0 8 5 3	2 0 3
6 1	4 0 2 6	. 0 8 3 9	2 0 3
6 2	3 9 6 1	. 0 8 2 5	2 1 4
6 3	3 8 9 9	. 0 8 1 2	2 1 8
6 4	3 8 3 8	. 0 7 9 9	2 1 9

#実際の第2スリット幅はこれより第1スリット幅を差し引く。

第3図 モザイクエッセル分光器



緑が散乱光の源となるのでキ印のマスクをエッセルの前面に置いている。

② コリメータ兼カメラレンズ

ミノルタ製の3枚玉25cm ϕ のレンズである。焦点距離の基準となる主平面はレンズケースの外であり、レンズとエッセルの間に位する。レンズ面の反射光(白色光)が(弱い)分散光に混入するのを防ぐためにレンズの光軸を僅かに振って、表面反射光が第1図でRから外れてS₂の右側に来るようにしてあり、S₂横の壁にはぼんやり広がった円板光と反射像が1個映し出されている。また、レンズ近傍にレンズ凹面の反射によって出来た二つの像があり小さなマスクを使って遮断している。こうしてレンズ6面のうち少なくとも4面の反射光は完全に取り除けたと考えている。あと2面の反射光は円板光の中に含まれているのか目で見える限り顕著ではない。

③ 防振台

モザイクエッセル及びレンズを載せた台であるが、防振の必要な環境でなく圧搾空気の設備もないので、ただの実験台として使用している。キャスター付きなので台ごと移動して光路から外せば元の分光光学系を使用することが出来る(但し、望遠鏡内の最後の2枚の平面鏡を調整して入射光の向きを再調整する必要がある)。台復元のためには1'精度の水準器で台上面を水平にすればよい。エッセルAの面が十分な精度で台上面と相対的に固定されている。観測中に台に触れることは禁物で像の揺れの原因となる。

④ レーザー

He-Neの緑(543.5nm)レーザーが主光線にほぼ沿ってエッセルに投射され焦点面の近くに結像する。エッセル全面を照射するために、レーザー出射孔近くに $f = 16\text{ mm}$ のレンズを置いてレーザー光を一旦結像させた後広げている。その際、像位置に円孔マスク(スペイシャルフィルター)を入れてレーザーの高次回折光を遮っている。

⑤ ピエゾ素子コントローラー

エッセルA, Bの位相を合わせる時にのみ必要な装置である。操作は2個のコントローラー上に表示してあるが、電源 on乃至 offを常に piezo素子の電圧がゼロの状態で行うことが肝要である。こうすることにより急激な電圧変化による piezo素子の破壊を防いでいる。piezo素子の働きについては牧田他(1992a)で検討してある。

調整

モザイクエッセル分光器を使う際には事前に次の3つの調整が必要である。

① エッセル A, B の向きを揃える。

この調整にはレーザーを用いる。まず回転台を廻して0次光を入れる（現在のセットでは 311.5° 付近でエッセルは入射光に正対する）。エッセル A, B の0次光が分かれて並んだ状態で焦点を十分に合わせる。焦点位置は0次光が重なってしまうと分からなくなるので必ず分離した状態で調整する。次いで、エッセル B の0次光がエッセル A の0次光と重なるようにエッセル B のマイクロメーターねじを動かす。その時、X軸及びZ軸まわりの回転だけで合わせるのが肝要である。次いで、回転台を廻してブレイズ角に近づけ（回転角が増す方向、現在のセットで 27° 付近）その高次の単色像についてエッセル B の像がエッセル A の像に一致するようにY軸まわりの回転のマイクロメーターねじを動かす。間違ってもX軸まわりの回転で合わせてはいけない（牧田他 1992b）。この時、Z軸まわりの回転が必要になることがある。これは回転台の丸ハンドルが固いために回転操作の途中でショックが起こってZ軸まわりの回転が生ずるためと思われる。他の軸まわりの回転は重力で押さえられているのに対して、Z軸まわりの回転には重力が働かずショックに弱いバネだけで押さえられているためであろう。

経験によれば、向きを揃えるのにはマイクロメーターねじで充分でピエゾ素子を用いる必要はない。

② エッセル A, B の位相を合わせる。

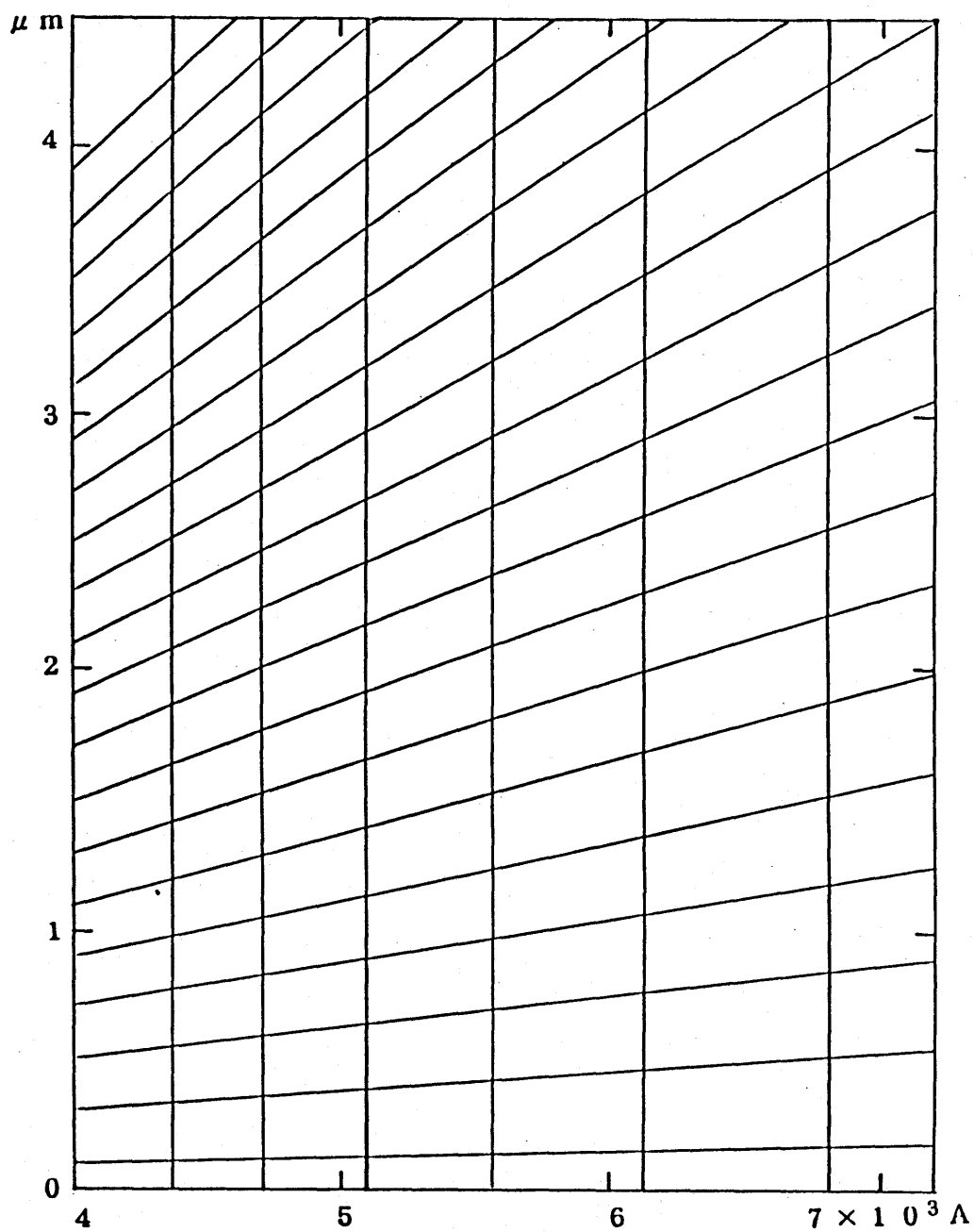
調整①の後更に位相を合わせるためには、まずエッセル A, B 面を同一平面上にもって来なければならぬ（牧田他 1992b）。そのために太陽スペクトルの0次光と低分散分光器を組み合わせることを試みた。これは北大の馬場氏の提言（国立天文台安藤氏より間接的に伝え聞いた）に従ったものである。太陽館分光器はモノクロメーターを前分散系としているのでこの実験が可能であった。

エッセル B がエッセル A と同じ向きであるがY方向に間隔 d だけ離れていると、波長 λ の光は

$$2d = (m + 1/2) \lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

の条件を満たすところで焦点面に暗い干渉縞を生ずるはずである。第4図はエッセル A, B の間隔 d と干渉する波長との関係を表し

第4図 2枚のエッセルの間隔（縦軸）と干渉縞の生ずる波長（横軸）。縦線はエッセル固有の干渉縞、斜線は2枚のエッセルによる干渉縞を表す。



たものである。図にはエッシェル固有の干渉縞（付録参照）の位置も示してある。0次光では普通波長分散は無いので、このような干渉が起こっていることに気づかないのであるが、モノクロメーターによる分散がこれらの干渉縞を見せてくれるはずである。第4図からdが小さくなって来るにつれ、エッシェル固有の縞は動かないが、2枚のエッシェルで生ずる干渉縞は短波長側に移動し且つ縞の数が減少してくると期待される。dが大きくなる場合にはこれと逆の現象が起こるはずである。実験は「精密位置決めテーブル」のハンドル（非常に軽い）を廻してエッシェルBをY方向に移動（最小目盛 $20\mu\text{m}$ ）させて行った。その結果、Y軸の正側にエッシェルBがあるとした時の縞は認められるが、負側の縞は認められない。しかし、目で見たところエッシェルA、B両面が一致しているあたりで干渉縞が生じ、且つA或いはBへの光を遮ることによって縞が見えなくなる。縞の見られる範囲（ ΔY ）は $30\mu\text{m}$ （第1スリット巾 $50\mu\text{m}$ とモノクロメーターの分散から期待される可干渉距離にほぼ対応している）より狭く、エッシェル固有の縞の間に入ってくる縞数の変化（第4図参照）もそれらしく見えるが、片側しか見えないのでは違ったものを見ている可能性を否定できない。このように現状ではエッシェルA、Bが同一平面になったことを検出できないのであるが、もし検出できたとすると、次にはピエゾ素子を使ってエッシェルBをX方向に微移動させながらレーザーの干渉像が最善となるところを見いだせばよい。

以上のような事情で、現在この2番目の調整は行うことができず、従って波長分解能はエッシェル1枚分相当に留まっている。

③波長の設定

所定の波長を焦点面に持ってくるには、計算によってその波長でのエッシェルの反射角を求め、回転台の角度に引き直して（現在のセットで0次は 311.5° 付近）回転台目盛りに頼って始めるのがよい。次数重なりを除くには S_2 の幅選びと横移動で行う。 S_2 の幅の0点は $16.5\mu\text{m}$ であるので Nakai and Kubota (1964) に与えられたモノクロメーターの分散とエッシェルのフリースpektralレンジから適当な S_2 の幅を選び、次いで S_2 の横移動で所定波長が最も明るく見える場所を選ぶ。第1表には第1スリットの幅を0とした時の各次数での S_2 幅が示してある。従って、実際の S_2 幅はこれより第1スリットの幅を差し引いたものである。

新分光器は今までのところ、上述の位相合わせ実験と、太陽大気運動（5分振動等）の絶対測定（課題研究S2）に用いられている。

終わりに、この報告を纏めるに当たって、北大の馬場直志氏には原稿を読んで頂き、且つ、助言を頂いた。また、国立天文台の安藤裕康氏にもいろいろと議論して頂いた。記して感謝する次第である。

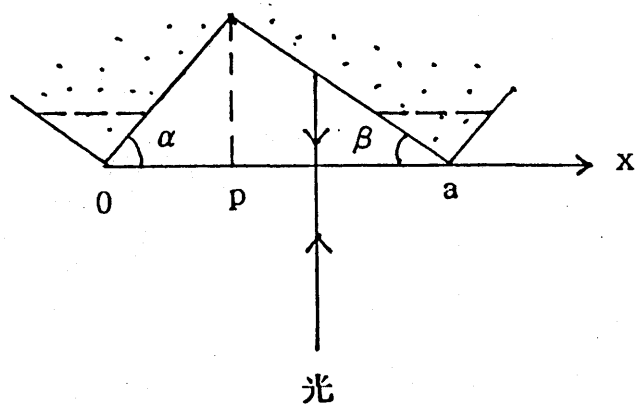
参考文献

牧田貢、松川英二、宮野英治、上床真司, 1992a, 京大理天文台技報 第4号 1-8.

牧田貢、中井善寛、船越康宏、山下泰正、安藤裕康、今井英樹、森本二郎、三浦孝治、松川英二、山下信哉、勝沼淳, 1992b, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書「モザイク回折格子の試作研究」

Nakai, Y. and Kubota, J., 1964, Mem. College of Sci. Univ. Kyoto, Ser. A, 30, 323-332.

付録：エッセル0次光に現れる光干渉



上図に示したように回折格子の一つの刻線溝で0次の回折光を考える。 $0 \leq x \leq a$ に入射する0次光の位相 δ は

$$\begin{aligned} \delta = & \quad (2\pi/\lambda) 2x \tan \alpha & (0 \leq x \leq p) \\ & (2\pi/\lambda) 2(a-x) \tan \beta & (p \leq x \leq a) \end{aligned}$$

で与えられる。 $x = p$ で両者は等しいから

$$p = a \tan \beta / (\tan \alpha + \tan \beta)$$

となる。ここで $0 \leq x \leq a$ からくる 0 次光の振幅 E を計算すれば次のようになる。

$$\begin{aligned}
 E &= \int_0^p \exp(4\pi i x \tan \alpha / \lambda) dx \\
 &\quad + \int_p^a \exp(4\pi i (a-x) \tan \beta / \lambda) dx \\
 &= (\lambda / 4\pi i) \left((\exp(4\pi i p \tan \alpha / \lambda) - 1) / \tan \alpha \right. \\
 &\quad \left. + (\exp(4\pi i (a-p) \tan \beta / \lambda) - 1) / \tan \beta \right)
 \end{aligned}$$

前出の式を使い p を消去すれば

$$\begin{aligned}
 E &= (\lambda / 4\pi i) (\cot \alpha + \cot \beta) \\
 &\quad \times (\exp(4\pi i a / (\lambda (\cot \alpha + \cot \beta))) - 1)
 \end{aligned}$$

従って、0 次光の強度 I は

$$\begin{aligned}
 I &= E E^* \\
 &= (\lambda (\cot \alpha + \cot \beta) / 4\pi)^2 \\
 &\quad \times 2 (1 - \cos(4\pi a / (\lambda (\cot \alpha + \cot \beta))))
 \end{aligned}$$

となる。ここで $\alpha = 75^\circ 58'$, $\alpha + \beta = 90^\circ$ (実際には鈍角のようである) とおいて求めたのが第 4 図の干渉縞の位置である。上式の余弦の中を調べてみると $a / (\cot \alpha + \cot \beta)$ が $x = p$ における刻線溝の深さであることが分かる。使用しているエッセルについてこれは $3 \mu m$ ほどとなっている。強度の式は観測波長が深さの倍以上であれば干渉縞が生じないことを示している。エッセルの場合はブレイズ角が大きく刻線密度が少ないので溝が深くなり可視域に多くの干渉縞が現れるのである。ちなみにブレイズ角 30° 刻線密度 1200 本/mm の回折格子では溝の深さは $0.36 \mu m$ となり、干渉縞は $0.72 \mu m$ 以外は紫外域のみに現れる。

実験に用いたエッセルで観察してみると、エッセル B の干渉縞の間隔はエッセル A のそれより 25% ほど広い。強度の式から干渉縞の間隔は溝の開口 a に逆比例するので、エッセル B では図の鎖線のように溝の頭が無く、溝の開口が狭く浅くなっていると予想できる。そのせいかエッセル B の干渉縞はエッセル A のそれに比べて幾分明るいように感ずる (溝間の平らな部分からの反射があるため?)。このようにエッセル A, B はほぼ同じ物を用意したと考えてスタートしたのであるが、実際には異なるところがある。

よく理由は分からないが、これが「調整②」を阻んでいるのかもしれない。いずれにしてもモザイク回折格子の各格子は十分に吟味して出来るだけ同じ物を選ぶのが良さそうである。