

# X線を“絞る”

金 沢 康 夫 (鉱床部)・中 沢 弘 基 (無機材質研究所)  
Yasuo KANAZAWA Hiromoto NAKAZAWA

## 1. はじめに

近年 筑波の高エネルギー物理学研究所におけるSOR (シンクロトロン軌道放射光) という強力なX線が得られるようになり その利用分野が拡大してきた。また 実験室内においても従来の密閉管球型よりも出力の大きな回転対陰極型X線発生装置あるいは高輝度の微小焦点X線発生装置が定着してきた。より強力なX線を望む声は 筆者らのように微小鉱物結晶を扱う分野のみならず 他の多くの分野から聞えてくるようである。

筆者らは最近 X線導管なるものを中心にして 安価で強力なX線を得ることを検討してきた。また 地質調査に重要な岩石薄片に対してX線用“絞り”を利用した微小領域X線回折実験も行ってきた。粘土鉱物等を含め10  $\mu\text{m}$  以下のサイズを有する微小結晶のX線解析が可能かどうかはひとえにより強いX線を“絞り出す”ことができるかどうかにかかっている。現時点での研究状況を含めてX線を“絞る”ためにどのような技術が利用されているかを紹介してみたいと思う。

本小論は いかに輝度の高いX線束を得るか およびいかに微小な領域の情報を得るか の観点からX線回折の光学系を検討するものであるが X線を無理にでも“絞り出したい”という願望の意味あいを含めて “X線を絞る”と題して以下の2点を考察する。

1. 四方 八方に広がったX線をかき集め 一点あるいは一方向に集中する方法 つまり“集光する”ことであるがここではこれを感覚的に“絞り出す”というイメージで考察する。
2. カメラ等で絞りを使って光量を絞る と同様の意味で X線用照射野絞りをを用いてX線を細くして 特定の微小領域内のみのX線回折を得る方法を考える。

いきなりX線を“絞る”前に 一般に光 (可視光) を“絞る”ことをまず考えてみよう。光の場合 集光するにはレンズを使うことができ 光線を細くしたり光量を調節するためには絞りを使うことができる。また集光に関しては凹面鏡等による反射を利用することもできる。すなわち カメラや光学顕微鏡では光の屈折・反

射・遮蔽という現象をうまく利用して鮮明な結像を得ているわけである。電子線についても電磁レンズがあるおかげで 電子顕微鏡が存在する。金属絞りを利用すれば電子線を細くでき像の分解能を高めることができる。

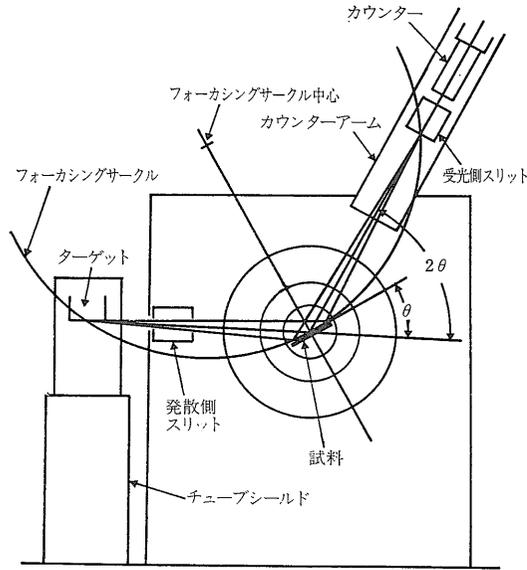
さて X線はどうかというと X線に対して上述のようなレンズの働きをするものはない。しかしながら X線は結晶物質により回折 (ブラッグ反射) を起こし 非常に小角ではあるが全反射も起こす。そして 原子番号の大きい金属等の材質を使えばX線用“絞り”も作れる。これらをうまく利用してX線を絞ってみようというわけである。

## 2. 回折を利用した集光

### 2.1 粉末結晶による集光

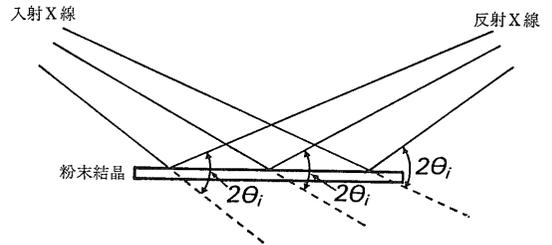
結晶によるX線の回折を利用した集光のもっとも身近な例は粉末X線回折計にある。粉末X線回折計のゴニオメーターと光学系を第1図に示す。平板試料とカウンターは回転速度が1:2の割合で連動しているので 平板試料面に対するX線の入射角と反射角は等しくなっている。しかし この表現は厳密に言えば正しくなく 第1図のX線経路をよく見ると平面鏡とは違う反射経路になっていることに気が付く。もし試料表面が平面鏡のように作用するなら発散して入射するX線は反射後もやはり発散するはずである。それが図のようにカウンターに向かって集束する理由は 平面上に統計的にいろいろな方向で分布する結晶粒子がどれもブラッグの条件を満たす時だけ選択反射するところにある。すなわち第1図に示したように同一のフォーカシング・サークル上にあるX線源—試料—カウンターを考えた場合 平板試料表面のどの位置を通るX線経路をとってみてもX線源—結晶粒子—カウンターのなす角度は等しい (第2図)。ゴニオメーターは平板試料による回折X線が幾何学的にカウンターによく集光するように設計されているのである。

粉末結晶を用いてX線を集光させるもう一つの例はゴニオカメラの光学系に見られる (第3図)。わん曲形モ



第1図 粉末X線回折計の光学系

モノクロメーター（後述）でX線を集束させ、円筒フィルム上のF'位置に集まるようにする。この経路間S-S'に平板状の粉末試料を置くと、試料を透過するX線の中で、同じブラッグ角 $\theta_i$ をもつ回折線はすべてS-S'-F'の作る円周（フィルム）上の一点L<sub>i</sub>に集まる。このカメラは上述の粉末X線回折計と違って、集束しながら入射するX線を使うと、試料の透過側で回折X線も集光するという幾何学を利用している。なお、ギニエカメラでは、X線の回折角 $2\theta_i$ がフィルム上で $4r\theta_i$ の距離になるから、同じ半径のデバイーシェラーカメラの倍の分散をもつ。そして比較的多量の粉末試料により回折されるので、単位時間当りの強度も増し、単色化X線によりS/N比も向上するなどの長所がある。ギニエカメラには試料の透過側ではなく、反射側で回折X線を得る方法もあり、この場合だと粉末X線回折計と同様の集光幾何になる。



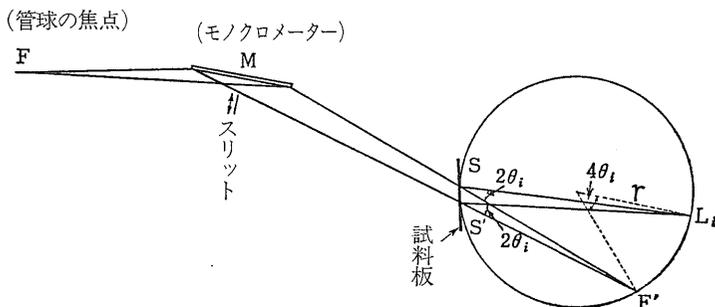
第2図 平板状粉末結晶によるX線の反射

### 2.2 モノクロメーターによる集光

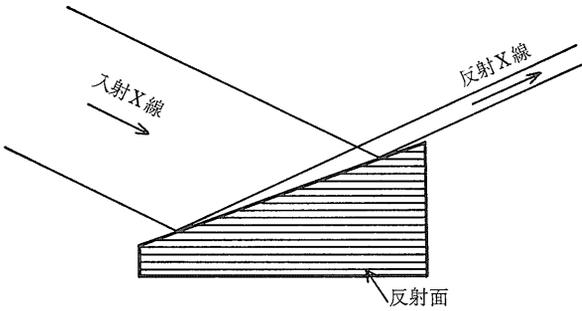
モノクロメーターは比較的大きくて良質の回折用単結晶を用いて、入射X線から単一波長を取り出す装置である。モノクロメーターには結晶表面の形からみて平面形とわん曲形の2種類があるが、いずれも回折結晶がもつ表面の形と反射面（回折面）を光学系の中でうまく配列すれば大きな集光効果が期待できる。モノクロメーター用の結晶としてはLiF、水晶、方解石、ほたる石、Si、Geなどいろいろ利用できる。

平面形モノクロメーターで反射強度を大きくするためには、第4図に示したファンカーヘン・カットが用いられる。これは結晶の反射面に対して適当な角度をつけて表面を研げば、入射X線より単位面積当たり強度の強い反射X線が得られる方法である。切りだし角度は波長により異なる。実際には平行平板に比べても高々2倍にしかならない。

わん曲形モノクロメーターはX線が反射する結晶表面にある曲率で曲げたり、研いたりしたもので、平板モノクロメーターに比べX線の強度はずっと上がる。わん曲形には平板形を単に曲げたものと、ある曲率で研いたものをさらに曲げたものの主に2種類がある。前者をヨハン型、後者をヨハンソン型といい、いずれもX線源—モノクロメーター用結晶—反射X線の焦点を同一の円（ローランド円、半径R）上にあるような光学系で配置



第3図 ギニエカメラの光学系（原図 細谷1966）



第4図 ファンカーヘンカット モノクロメーター

以上 一方向のみにわん曲したモノクロメーターをみてきたが これを縦と横の二方向について二重わん曲させてやれば 縦と横に広がったX線を同時に集光することが可能になる。

### 3. 全反射を利用した集光

#### 3.1 集光ミラー

電磁波はX線の波長領域においては物質に対する屈折率が1よりわずかに小さく X線を空气中あるいは真空中から物質平面に入射するとある小さな視射角以下ではX線が全反射される。この臨界角を $\theta_c$  ( $\theta_c$ は平面から測る)とすると

$$\theta_c = k \sqrt{\rho} / E$$

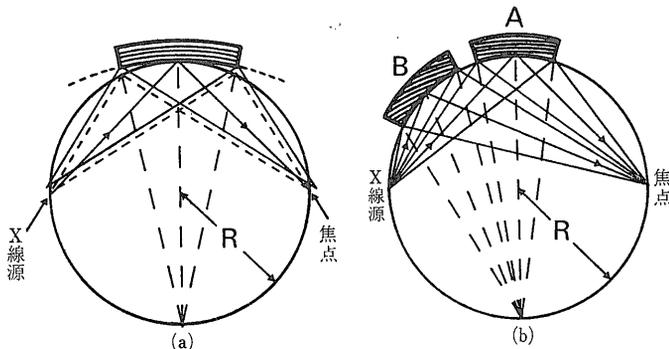
の関係がある。ここでkは定数で  $k=2.0 \times 10^{-2}$   $\rho$ は物質の密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) EはX線のエネルギー (keV) である。EはX線の波長 $\lambda$ と  $E=12.4/\lambda$  の関係があるので上式は

$$\theta_c = k \sqrt{\rho} \lambda / 12.4$$

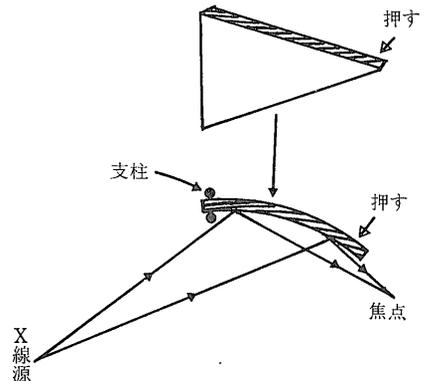
となる。例えば  $\lambda=1.54\text{\AA}$  (CuK $\alpha$ 線) の  $\text{SiO}_2$  ガラス ( $\rho \approx 2.5$ ) に対する臨界角は  $\theta_c=0.0039$  (rad) と極めて小さい角度になる。上式でわかるように波長が長くなるほどそして物質の密度が大きくなるほど  $\theta_c$  は大きくなる。このようなX線の全反射現象を利用して 金属等を凹面形に研磨し X線を集光できるようにした鏡を集光ミラーという。したがって集光ミラーの光学系には通常の幾何光学が適用できる。集光ミラーの曲面は全反射臨界角が極めて小さいので わん曲モノクロメーターに比べてずっと大きな曲率をもつ。集光ミラー

し モノクロメーター用結晶の反射面を半径2Rの曲率で曲げてある(第5図)。この図でわかるとおりヨハン型はローランド円に密着していないため幾何光学的に完全な焦点を結ばないが 実際上はこれでも充分強度がかせげる。ヨハン型の欠点を取り除いたのがヨハンソン型でこの型は結晶を半径2Rの曲率で研いたあと さらに半径Rの円筒面に接するように曲げたため 幾何光学的に一点に集光するようになっている。ヨハンソン型には第5図(b)Aの対称ヨハンソン型とBの非対称ヨハンソン型があり 装置の中でモノクロメーターとX線源の距離とモノクロメーターと焦点の距離が違う場合には非対称型が使われる。前述したギニエカメラのモノクロメーターにはこの型が使われている。

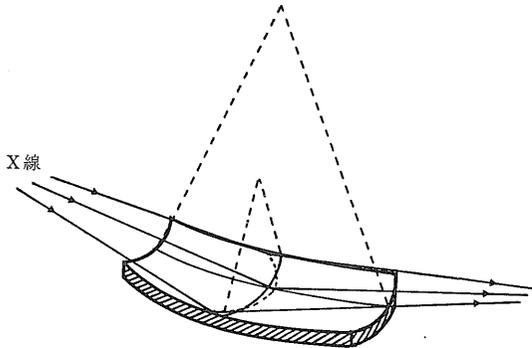
非対称ヨハンソン型の応用例として白色X線の任意波長を集光して取り出せる三角形のわん曲形モノクロメーターがある(第6図)。これは三角形平板結晶の一边を固定して他方の頂角近傍を押してやれば任意の曲率で結晶を曲げることができるため SOR のような白色X線から任意の波長のX線を得るのに適している。



第5図 (a) ヨハン型モノクロメーター (b) ヨハンソン型モノクロメーター A, 対称型 B, 非対称型



第6図 三角形のわん曲型モノクロメーター



第7図 トロイダル・ミラーによるX線の集光

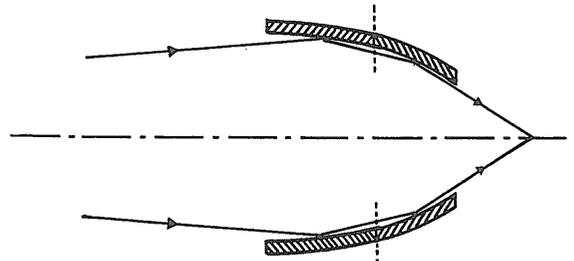
の作り方は 例えば熔融石英の面を精度よく研磨し 表面を白金や金で蒸着 ( $\sim 1000\text{\AA}$ 厚) する方法をとっている。

集光ミラーで比較的作りやすいのは単に円筒面の形状をもつ鏡で 一方向の集光にはこれでよい。 もう一つSOR等によく利用される鏡にトロイダル・ミラーがある。 この鏡は 円弧を直径以外の弦を軸として回転したときにできる面(トロイダル面という)からできている。 これを目的に応じて環状あるいはわん曲面の一部として切り出した形で使用する。 第7図に示したトロイダル・ミラーの例では発散してくるX線を水平と垂直の二方向で同時に集束させることができる。 トロイダル・ミラーは曲率が大きくなるほど研磨による製作が困難になるため その場合には曲率の小さな半径をもつ円筒内面の形状を用意し これを円筒母線にそってわん曲させて近似する方法が取られている。 筑波の高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリーの放射光は水平方向に $\sim 10^{-8}\text{rad}$  垂直方向に $\sim 3 \times 10^{-4}\text{rad}$  発散しているが 通常 線源から10m以上離れた所で実験するので ビームの水平幅は10mm程度と広がってしまい微小試料 ( $100\ \mu\text{m}\phi$ 以下) に対してはビーム断面のごく一部のみを使うことになり無駄が多い。 今述べた近似的なトロイダル・ミラーを用いれば光子密度を10倍以上に高めることができるということである。

その他の形状としては楕円の一部を利用することが考えられる。 線源を楕円の一方の焦点に置くとX線はもう一方の焦点に集光する。 しかし楕円形状の鏡はトロイダル・ミラーより製作がむずかしいので 近似的には小さな平面鏡を楕円面にそって並べて利用する。

X線による結像やX線分析顕微鏡などの収差のない精度の高い実験をするにはX線を $\sim 1\ \mu\text{m}$ あるいはそれ以下に絞ることが必要になってくる。 このためには曲率の違う2つのトロイダル・ミラーを直列に並べてつない

1986年2月号



第8図 タンデム集光鏡の断面概念図

だり 回転楕円面と回転放物面または回転双曲面を組み合わせて2段階の全反射集光鏡を利用する光学系(タンデム集光鏡という(第8図))が報告されている(例えば 坂柳 1982)。

### 3.2 X線導管

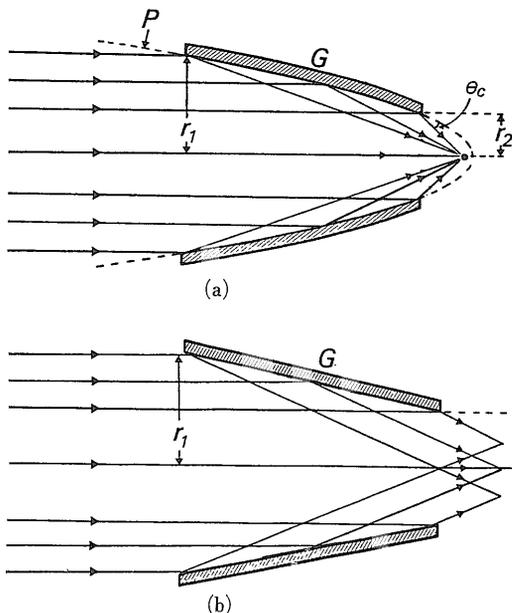
これまでに述べてきたわん曲モノクロメーターや集光ミラーよりずっと簡便で安価な集光装置がX線導管(X-ray Guide Tube 以下XGT)である。 ここに述べるXGTの技術はガラス細管内壁でのX線全反射を利用してX線を遠方まで導く方法である。 著者等の最近の実験とシミュレーションから SORあるいは事によると実験室規模の高輝度X線発生源でもXGTの利用により $10\ \mu\text{m}\phi$ 以下の微小結晶X線回折が可能であろうと予測されている。 XGTの有効性は簡単な実験により証明されている(NAKAZAWA 1983 中沢 1983)。  $0.1 \times 0.1\ \text{mm}^2$ のX線源を用いて715 mm離れた位置でのX線強度は内径 $0.5\ \text{mm}\phi$  長さ630 mmのXGTを用いれば それを用いない場合に比べて30~40倍( $\lambda < 1.15\ \text{\AA}$ )であった。 この実験では市販の化学実験用のパイレックス・ガラス細管を用いたが もし細管内壁の形状を自由に変えることができればもっと高密度の集光も可能であろう。 ガラス細管を微小X線束コリメーターとして用いることは1930~40年頃すでに試みられていたが(PEISER et al. 1960) 細孔を作る技術として金属よりむしろガラスの方が容易であったことにもよる。 ガラス細管の形状を制御して作ることはなかなか難しいが 最近の技術的進歩をもってすれば克服できない問題ではなからう。

XGTは前述のモノクロメーターや集光ミラーに比べて微小束のX線を受け入れるため 一般にXGTを取り付ける装置が線源から遠く離れるほど平行線状のX線を受け入れ 線源にずっと近づければ発散角の大きいX線を受け入れることができる。 以下にX線が平行線に近しい場合と 点光源状の線源から発散してくる場合に分け

て XGT の形状効果について述べる。

入射 X 線が SOR 等のように線源から遠く離れていて極めて平行性が良い場合には 天体望遠鏡と同原理の回転放物面型 XGT (第9図(a)) の適用がその一つの考えである。 X 線全反射臨界面角 ( $\theta_c$ ) の制限があるので集光できる X 線の最大角度は  $4\theta_c$  であり 放物線の形状は  $y^2=4fx$  である。 ただし 焦点  $f$  は  $f \approx (r_2 \cdot \theta_c) / 2$   $r_2$  は XGT の出射口の半径で与えられる。 この XGT で得られる強度利得は 出射口の断面積で測ると 入射口と出射口の断面積の比 ( $r_1^2/r_2^2$ ) にほぼ相当する。 実際の XGT の設計にあたっては実験系のいろいろの制約があり その中で同面積比の最大になる形状を選択する必要がある。 回転放物面で焦点に集光される X 線は原理的に平行成分だけであるため光学系の調整が難しいものと思われる。 理想的な回転放物面の XGT は  $f$  値が極端に小さく 管径も小さいことから 製作はなかなか容易ではない。 現在 実験に供している XGT はむしろ単純円錐型 (第9図(b)) に近い形状を有している。 円錐型の場合には焦点を結ばないわけだが 出射口での強度利得は回転放物面の場合と同様になる。 しかし XGT 内壁形状に歪みや凹凸があるので 実験では予想以上の焦点取差が観察されている。 技術的に解決されなければならない難点も多いが X 線強度の高利得が期待されるので開発の努力は続行されるべきと考える。

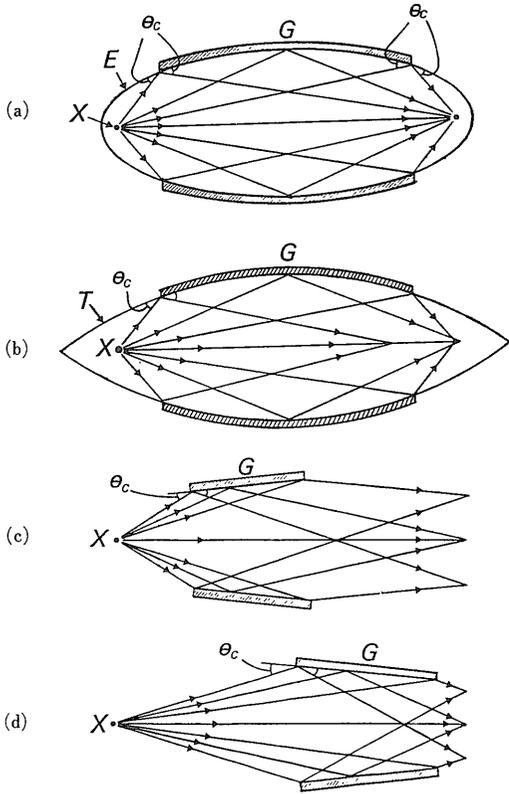
次に X 線源が点光源に近く そこから出る発散 X 線を集光することを考えよう。 発散する X 線に対しては集光ミラーの項で述べた集光幾何学が XGT にも成り立つ。 すなわち 回転楕円体・トロイダル型 XGT (第10図(a)(b)) は良好な集光を示すであろう。 特に回転楕円体の場合 一方の焦点に線源を置けば他方の一点 (焦点) に集光する。 しかし両者の XGT は現実にはまだ存在せず この実験系をとにかく言うことは無意味であるかも知れないが 上記の形状に近い曲面をもつ XGT を作ることは可能であろうと思われる。 回転楕円体やトロイダル型より技術的には多少容易に製作できる円錐型で近似した XGT (第10図(c)(d)) を用いて現在は X 線の集光実験を行っている。 その一つの実験結果 (第10図(c)の場合) によれば 現有の実験室規模の実験系で  $20 \mu\text{m}\phi$  程度の結晶での回折強度測定が可能であろうと推定される。 正確な強度利得の推定は X 線発生源のサイズ (半径  $r_x$ ) 結晶のサイズ (半径  $r_c$ ) XGT 入・出射口の口径 (半径  $r_1, r_2$ ) と長さ ( $l_g$ ) X 線源—XGT 入口間距離 ( $l_1$ ) および XGT 出口—結晶間距離 ( $l_2$ ) にもとづいて計算されねばならないが パラメーターが多く シミュレーションに依らねばならない (第11図)。



第9図 XGT による平行 X 線の集光  
 (a) 回転放物面の形状をもつ XGT  
 (b) 円錐面の形状をもつ XGT  
 図中の記号 G : XGT P : 放物面  $\theta_c$  : X 線全反射臨界面角  $r_1$  : XGT 入射口半径  $r_2$  : XGT 出射口半径

現在の市販の装置に基づいて円錐型 XGT の最適形状を計算で求めた結果を第12図に示す。 ここでは上のパラメーターで  $r_x=15 \mu\text{m}$   $r_c=5 \mu\text{m}$   $l_g=23 \text{mm}$   $l_1=7 \text{mm}$   $l_2=10 \text{mm}$  と固定し入・出射口の口径 ( $r_1$  と  $r_2$ ) を求めることにする。 計算の要領は次のとおりである。 X 線源をできるだけ細かく分割し各分割域から周囲の方向に等しい割合で X 線フォトンが出射されるものとし そのうち XGT の全反射条件を満たして反射し かつそれが結晶に到達する個数を算出する。 これを全反射のない場合と比較して強度利得とする。 第12図は変数  $r_1$  と  $r_2$  に対する強度利得であり  $r_1=55$   $r_2=40 \mu\text{m}$  のとき約30倍の利得があることを示している。  $r_1 > r_2$  であるので表10(d)図の型に相当する。 この計算は特定の回折実験系に当てはめた場合の一例であるが 新たに装置を設計する場合 前もってシミュレーションにより最も理想的な実験系を求めておく必要があろう。

なお 全反射を用いるメリットとして 集光効果のほかにモノクロメーターで回折してきた波長 ( $1/n$ )  $\lambda$  の X 線のうち  $n=1$  以外の高調波を切る効果もある。 つまり低エネルギー X 線透過フィルターの役目をする事があげられる。 逆にデメリットとしては 試料から集光 X 線を臨むと高々  $4\theta_c$  ラジアン の角度幅をもつ X 線



第10図 種々のXGTの形状と点状X線源から発散するX線の経路 (a) 回転楕円体型 (b) トロイダル型 (c)(d) 円錐型  
記号の説明 G: XGT E: 回転楕円体 T: トロイダル  
X: X線源  $\theta_c$ : 全反射臨界面角

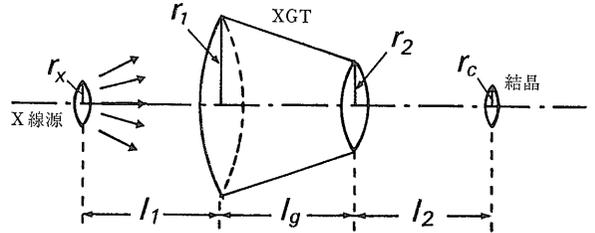
を受け入れるため それだけ回折の角度分解能が悪くなることがあげられる。したがって 実験の目的に応じた集光法を選ぶ必要がある。

#### 4. 制限照射野絞りの利用

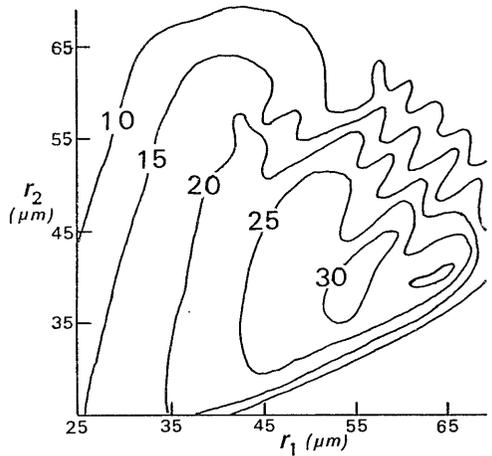
これまでの議論は X線の強度を上げる目的である一点にX線を集めることを中心に話を進めてきた。今度は“絞り”を用いた単純な方法でX線束を細くしてそれを応用することを考えてみる。

従来からもっとも簡便にX線を細くする(実際には発散角を小さくする)方法としてコリメーターが用いられてきた。コリメーターにはシングルピンホール・コリメーターとダブルピンホール・コリメーターがある(第13図)。X線源がコリメーターの口径に比べてあまり大きくない場合はシングルピンホールが使われ この方が光学系のセッティングが容易であるしエネルギーの損失が少ない。第13図(a)に示したX線源 コリメーター

1986年2月号



第11図 円錐型 XGT によるX線強度利得計算のためのパラメータ



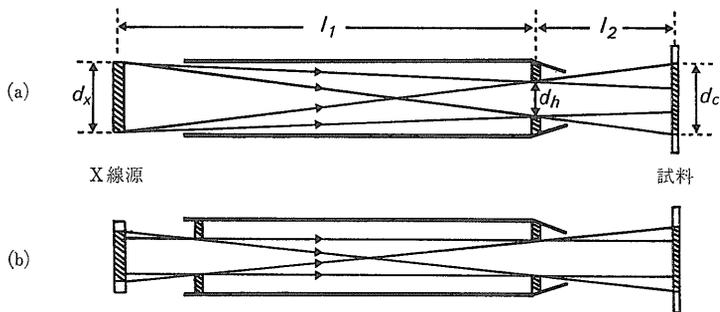
第12図 円錐型 XGTの強度利得(図中の等高線の)の口径依存性

試料との幾何学的関係から試料に照射されるX線束の幅  $d_c$  は

$$d_c = d_h + (d_h + d_x) l_2 / l_1$$

となる。この1穴絞りで特殊なケースは 上式で  $l_2 = 0$  とおいた時 つまり絞りを照射試料面に接触させた場合で この時は  $d_c = d_h$  となり 試料へのX線束の照射面積は絞りの口径だけに依存し 線源の大きさや試料までの距離には依存しなくなる。筆者らはこの単純な発想を岩石薄片中の微小領域X線回折に適用した。以下 この概要をコリメーターによるX線照射と比較しながら述べる。

岩石薄片中の微小領域X線回折を従来のコリメーターを用いて行う場合 いくつかの困難がある。まず第1には測定領域と同等程度の微小口径をもつコリメーターを用意する必要がある。2つめには機械精度上の問題がある。測定領域が微小になればなるほどコリメーターと測定中心の光軸合わせが困難である。また 結晶を振動して回折X線を得る方法では振動軸の機械的交差



第13図 コリメータの光学系  
 (a) シングルピンホール・コリメーター  
 (b) ダブルピンホール・コリメーター

精度が問題となり 振った時に目的位置が光軸上に保たれている必要がある。3つめには岩石薄片中の測定したい位置をどのようにして確認するかという問題がある。造岩鉱物は透明結晶がほとんどであるから必然的に偏光顕微鏡をX線回折装置に組み込まなくては測定する鉱物結晶を認識できないことになる。偏光顕微鏡を組み込むと試料の自由空間が極めて少なくなる理由で現実の装置では取りつけが難しい。1と2番目の問題については既存の微小部X線回折装置がそれを解決しているのであるが 岩石薄片という形状と結晶の識別という点については依然未解決である。

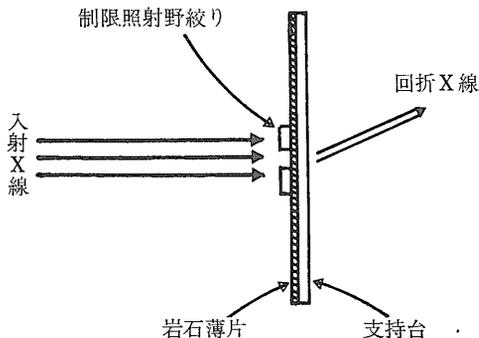
この問題を解決するために 岩石薄片用の試料ホルダーを作成して X線測定の前に偏光顕微鏡下で照射野絞りを目的位置に固定する方法をとった。絞りを薄片試料に密着固定すれば 絞りに露出している鉱物微小領域のみがX線によって照射・回折できることになる。また X線回折装置上において薄片を振動して回折X線を得る時も絞りを薄片上に固定しているので 振動のずれを容認するくらい少し大きめの入射X線を用意すれば 絞りに物質のみがX線に完浴することになり 正確に測定すべき領域のみの回折が得られることになる。すなわち 従来の方法に比べて 測定位置とコリメーターの光軸合わせ および振動軸と光軸の微小調整を厳密に行わなくとも 絞り穴を完浴するX線束を選ぶだけで測定すべき領域の回折情報が得られるという保証がある。

筆者らはこの方法を4軸型単結晶X線回折装置を使用して試みた(金沢・中沢 1985)。岩石薄片は通常 スライドガラスの上に固定するのであるが 1-2 mm 厚のガラスはX線をかなり吸収するので X線の透過性のよいアクリル樹脂を薄片の固定台に用いた。偏光顕微鏡下で手作りの白金または鉛の絞り(口径 $\sim 60 \mu\text{m}$ )を目的位置に固定して回折装置のゴニオメーターヘッド上に取りつけた。試料のセンターリングは絞り穴が目印になるので 備えつけの10倍程度の望遠鏡でも容易に行

える。岩石薄片のX線回折を模式的に第14図に示しておく。

岩石薄片としてスパー石の入ったスカルンを選び 2, 3の回折実験を行った。まず 振動写真の例を示す(第15図)。このa図の通常のコリメーター法ではいくつかの結晶集合としての回折パターンを表しているが同じ試料位置で制限照射野絞りを用いると b図のように単結晶領域のみの層線パターンが得られ 絞りの有効性が認められる。同時に 絞りの内壁からの弱い回折リングも観察されるので これを標準反射として利用することが考えられる。絞りに内領域が単結晶である場合には 4軸型回折装置のソフトウェアがそのまま利用できることになる。ピークサーチ(通称 盲捜し)法を適用すれば ピークの $2\theta$ 値を得られ 結晶の同定が可能になる。次に指数づけプログラムを用いると 結晶の方向が求まるので 薄片中で結晶配向が分かる。さらに格子定数を求めるには ピーク位置をリファインして 最小2乗法を適用すればよい。このようにして求めたスパー石の格子定数は以下のとおりである。

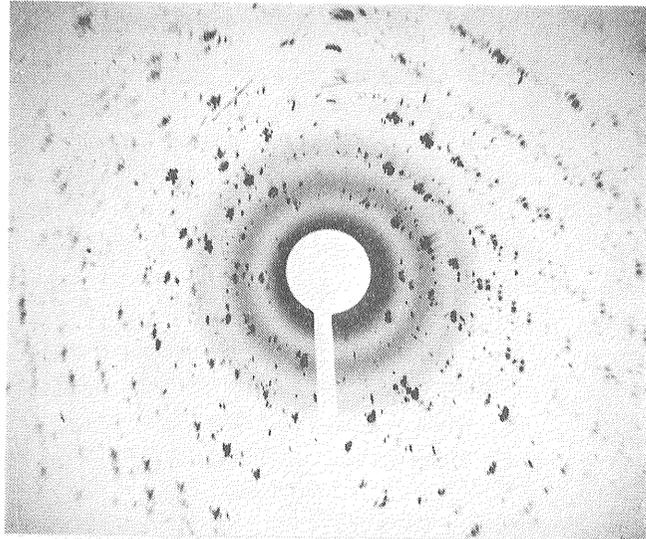
岩石薄片中 単結晶法(金沢ら 1983)  
 $a = 10.49(3) \text{ \AA}$   $a = 10.466(8) \text{ \AA}$



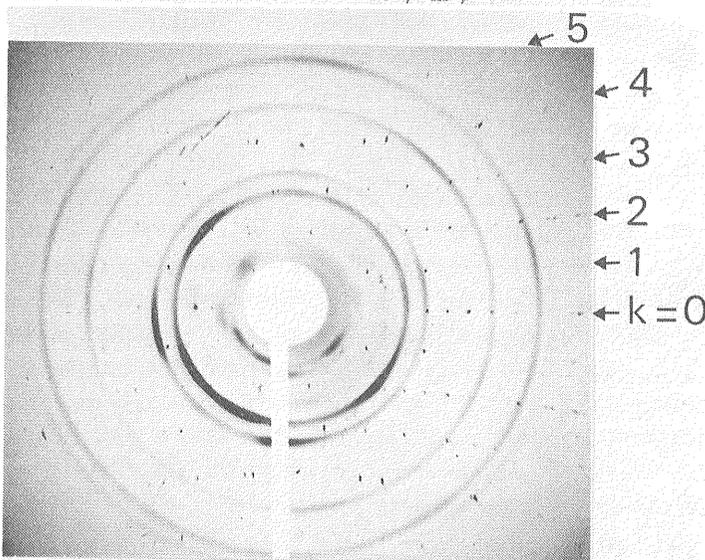
第14図 岩石薄片中微小鉱物のX線回折

$$\begin{array}{ll} b = 6.726(4) & b = 6.721(1) \\ c = 14.15(2) & c = 14.159(7) \\ \beta = 101.3(2)^\circ & \beta = 101.27(5)^\circ \end{array}$$

精度は単結晶法データより悪いが 値はよく一致している。ただし岩石薄片の場合 通常の単結晶法よりブラインド領域が大きくなるという欠点はあるにしても 非



コリメーター 500  $\mu\text{m}$   $\phi$



Pt絞りを 100  $\mu\text{m}$   $\phi$

第15図 コリメーター(a)と制限照射野絞り(b)を用いた場合の振動写真の比較。結晶は岩石薄片中のスパー石 X線の波長はMo K $\alpha$ 線

破壊状態で結晶の同定 対称性 結晶方位 格子定数の決定ができるということは実に大きいメリットである。

X線を“絞る”という本小文で X線回折技術の一断面を紹介してきたが 強いX線は地球科学 物質科学等からの時代的要求である。より強いX線を希求する理由は様々あり 高温/高圧下等での in-situ 動的構造の解析あるいは極端に小さな結晶の構造解析にとくに有効であると思われる。

より強いX線を得るために 現有装置に“絞り”機構を組み合わせることはその効果はあるにしても 必ずしも受光側で最強になる光学系を作れるわけではない。むしろ 1つのX線発生装置に対していろいろの測定装置を組み合わせるという汎用を捨て X線源—“絞り”—測定系を一体化した単能機を開発することが今後 より必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 細谷資明 (1966) : 結晶解析. 朝倉書店 1-120.
- 金沢康夫・竹田英夫・加藤甲壬 (1983) : メキシコケレタロ州ラネグラ鉱山に産する含ポロンスパー石. 日本鉱物学会年会 1983, 要旨集, 15.
- 金沢康夫・中沢弘基 (1985) : 岩石薄片中の微小部分X線回折. 日本鉱物学会年会 1985, 要旨集, 102.
- NAKAZAWA, H. (1983) : X-ray guide tube for diffraction experiments. *Jour. Appl. Cryst.* 16, 239-241.
- 中沢弘基 (1983) : X線回折実験へのX線導管の利用. *日本結晶学会誌* 25, 122-127.
- PEISER, H.S., ROOKSBY and WILSON, A.J.C. (1960) : X-ray diffraction by polycrystalline materials. *Institute of Physics*, 725.
- 坂柳義巳 (1982) : 全反射結像系. *日本結晶学会誌* 24, 248-251.