

偏光顕微鏡活用例： コンスコープ像による石英のc軸方位の求め方

高橋 裕平¹⁾・三宅 明²⁾

1. まえがき

変形岩中の鉱物の結晶学的方位の測定は、鉱物の結晶格子選択配向を調べるための基本作業である。このうちでも石英のc軸方位の測定は、顕微鏡構造解析の最も基本となっている。

偏光顕微鏡でc軸方位を測定するには自在回転台を使うのが常であったが、三宅ほか(2002)はコンスコープ像の観察から石英のような一軸性結晶のc軸方位を求める方法を報告した。この方法について、高橋はもっと注目され利用されてもいいのではと考えていた。そこで利用者の立場から高橋が紹介文を準備し、三宅がそれに加筆修正したのが小論である。

小論ではどのように測定を行うかに重点を置く。背景には厳密な理論的な裏付けがあるが、それについては、三宅ほか(2002)や坪井(1959)を参照願うことにする。また、偏光顕微鏡観察の基本操作や用語については一通り学んでいることとする。

2. 原理

コンスコープ観察の本質は、薄片に入射するさまざまな方向の光を同時に観察できる点にある。視野内の位置は、薄片に入射する光の方向を意味する。た

とえば、視野の中心点は薄片に垂直な方向であり、中心点から離れるほど、薄片に対して低角な方向になる。したがって、コンスコープ視野は光の方向をステレオ投影したものとみなすことができる。その投影は、顕微鏡では基本的に上方に進む光を観察することから、上半球投影となる。しかし、ベルTRANレンズと接眼レンズを用いてコンスコープ像を拡大して観察する場合、像は前後・左右が反転するので、実質的には下半球の投影像と等価になる。

石英のような一軸性結晶では、コンスコープでみると十字状のアイソジャイヤーが観察できる。アイソジャイヤーの交点はc軸方位に対応しており、c軸が薄片に垂直な場合は、交点は視野中心にあるが、c軸の方位が斜めになるにつれて、交点は視野中心から遠ざかっていく。交点が視野から外れてしまっても、アイソジャイヤーの延長上に想定できる(第1図、ならびに都城・久城, 1972の図5.5)。

薄片を載せた載物台を回転させると、アイソジャイヤーも回転する。その際に、アイソジャイヤーが、視野内にあらかじめ決めておいた複数の点をそれぞれ通ったとき、載物台の角度位置を記録すれば、これらの角度とc軸方位との幾何学的関係より、c軸方位を計算できる。

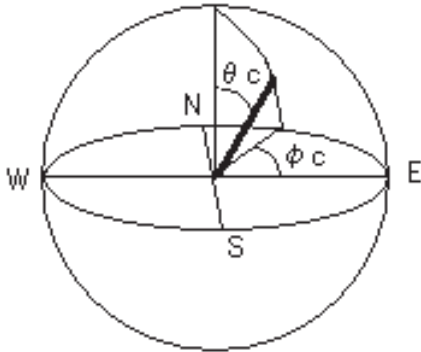
c軸方位は、薄片に垂直な方向となす角度(θ_c)と



第1図 c軸が薄片の垂直方向から傾いている場合の結晶とアイソジャイヤーの概念。ただし、実際には鏡下の像は結晶の向きと反転している。

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 愛知教育大学地学領域

キーワード: 偏光顕微鏡, コンスコープ, 石英, c軸, 一軸性, アイソジャイヤー



第2図 方位の表し方. 薄片に垂直な方向からの角度 (θ_c) と方位角 (ϕ_c) で表す. 方位角は3時 (E) の方向から反時計まわりに測る.

方位角 (ϕ_c) によって表すことができる (第2図). 方位角は3時の方向から反時計まわりに測る. また, 方位角は載物台を回転すると変化するので, 載物台の角度を 0° にしたときの方位角を採用する. ただし, 既に述べたように conoscope像をベルトランレンズと接眼レンズを用いて観察するので, c軸方位は実質的に下半球側への方位として計算される.

3. 測定と計算

3.1 準備

偏光顕微鏡標準付属の対物レンズ40倍または100倍を用いる. オルソスコープで測定する結晶を選び, conoscopeにして載物台の回転角を測定する. このオルソスコープと conoscope観察を繰り返すので, 使いやすさから言えば40倍の方が手軽である. 高橋が実際に測定したところ, 40倍の対物レンズでは短径

0.2mm以上の結晶であれば問題なく測定 (conoscope像を出すことが) 可能であった. その際利用した偏光顕微鏡は, ニコンのOPTIPHOT-POLである. 著しく細粒化していない花崗岩類であればもちろん40倍で充分であるし, 変成岩類でも測定結晶の粒度を揃えるということであれば, 40倍でも使うことができる.

計算から結晶の方位に換算するために, マラーの指数 K を求めておく必要がある. 対物レンズの空気に対する開口数 (対物レンズに記されている数値) NA と conoscope像の視野半径 (視野中の目盛りで読み取った値) D_{max} が与えられれば,

$$K = D_{max} / NA$$

である.

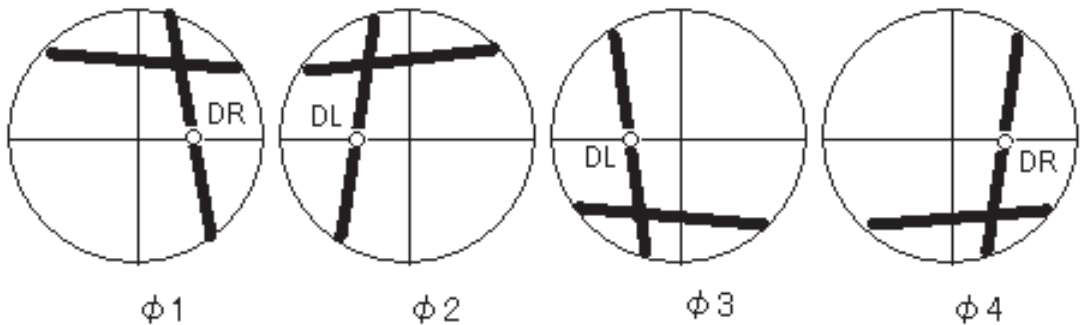
もし, NA が対物レンズに記されていない場合, あるいは NA の値に疑問がある場合, K を独自に測定で求めることができる. そのためには, あらかじめ薄片の垂直な方向からの光軸の方位の角度がわかっている試料を用意して, 以下に述べる c軸方位測定方法を用いて K を求める. これについては後述する.

3.2 測定と計算

接眼レンズ十字線交点から右側および左側に D だけ離れた E-W 線上の2つの点を定める. D は接眼レンズの微尺目盛りでの値である. それぞれ右側検査点 (DR), 左側検査点 (DL) と呼ぶ.

適度に c軸が薄片に斜めな場合 (第3図):

アイソジャイヤーの十字の交点が視野の上であり, 下方に伸びたアイソジャイヤーが右側検査点を通り



第3図 c軸が薄片に適度に傾いている場合のアイソジャイヤーと検査点の関係. $\phi_1 - \phi_4$ は載物台の角度.

たときと左側検査点を通過したときの載物台の角度の読みをそれぞれ ϕ_1 , ϕ_2 とする. さらに載物台を回転してアイソジャイヤーの十字の交点が視野の下にあり, 上方に延びたアイソジャイヤーが左側検査点を通過したときと右側検査点を通過したときの載物台の角度の読みをそれぞれ ϕ_3 , ϕ_4 とする.

ϕ_1 から ϕ_2 の位置までの回転量 $\Delta\phi$ は,

$$\phi_2 \geq \phi_1 \text{ のとき, } \Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 \quad (1)$$

$$\phi_2 < \phi_1 \text{ のとき, } \Delta\phi = 360 + \phi_2 - \phi_1 \quad (2)$$

後者の場合は ϕ_1 と ϕ_2 の間に載物台の角度に 0° がある場合である. 右側検査点と左側検査点が消光する条件を幾何学的に球面三角法から解くと, 薄片に垂直な方向からのc軸の角度 θ_c は,

$$\tan \theta_c = \tan [\arcsin \{D/(Kn)\}] / \sin (\Delta\phi/2) \quad (3)$$

によって計算できる. ここでnは屈折率であるが, 石英のように複屈折が小さな結晶では, 通常光の屈折率(ω)を用いれば十分である(石英の場合, $n = 1.544$).

3.1の準備の項で述べたマラーの指数Kを実際の測定から求めるには, あらかじめ θ_c がわかっている試料を使って(3)式を利用する. 例えば, 石英のr面(10 $\bar{1}$ 1面)をスライドガラスに貼り付けて作成した薄片($\theta_c = 51.78^\circ$)を用いる.

方位角はポーラーの振動方向(W-E)を基準として3時の方向から反時計回り方向を正とする. c軸の方位角を求める. 載物台の回転によってc軸の方位角が 0° (3時の方向)となるとき載物台の角度の読みを ϕ_{s0} とすると, ϕ_1 と ϕ_2 のちょうど中間の載物台のちょうど中間のステージ位置から 90° だけ時計周りに回転した値として次のように計算できる.

$$\phi_2 \geq \phi_1 \text{ のとき, } \phi_{s0} = (\phi_2 + \phi_1) / 2 - 90 \quad (4)$$

$$\phi_2 < \phi_1 \text{ のとき, } \phi_{s0} = (360 + \phi_2 + \phi_1) / 2 - 90 \quad (5)$$

すると薄片を基準の方向に, すなわち載物台を 0° に戻したときのc軸の方位角 ϕ_c は,

$$\phi_c = 360 - \phi_{s0} \quad (6)$$

このようにして目的とする結晶のc軸の方位, すなわち薄片に垂直な方向からの角度 θ_c と載物台を 0° に戻したときに3時の方向から反時計周りの角度である方位角 ϕ_c を求めることができる.

理屈の上では ϕ_1 と ϕ_2 の測定だけでいいが, 余裕があれば測定誤差を小さくするために ϕ_3 と ϕ_4 を測定して方位を求め, ϕ_1 と ϕ_2 から求めた方位との平均をとる. その場合の $\Delta\phi$ と ϕ_{s0} は,

$$\phi_4 \geq \phi_3 \text{ のとき, } \Delta\phi = \phi_4 - \phi_3 \quad (7)$$

$$\phi_4 < \phi_3 \text{ のとき, } \Delta\phi = 360 + \phi_4 - \phi_3 \quad (8)$$

$$\phi_4 \geq \phi_3 \text{ のとき, } \phi_{s0} = (\phi_4 + \phi_3) / 2 + 90 \quad (9)$$

$$\phi_4 < \phi_3 \text{ のとき, } \phi_{s0} = (360 + \phi_4 + \phi_3) / 2 + 90 \quad (10)$$

である.

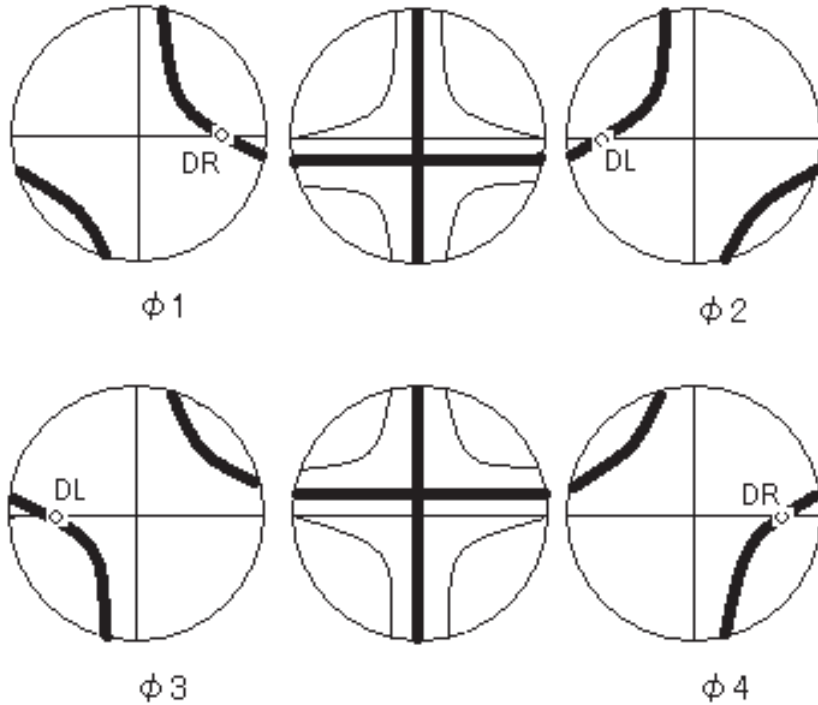
c軸が薄片に垂直な方向に近い場合:

この場合は, 全く上記の場合と同じであるが, あらかじめ定めておいた検査点を縦方向のアイソジャイヤーが通過しないことがある. その場合はD値を小さくして検査点の位置を視野の中心近くにする.

c軸が薄片に低角な場合:

c軸に低角な薄片では, アイソジャイヤーは十字状になり, わずかに載物台を回転させると, アイソジャイヤーは双曲線上に分離してすみやかに視野の外に出て行く. 慣れないうちはこの変化を見逃しやすいが, 充分明るい照明の下で載物台の回転をゆっくり行えばわかるようになる(第4図).

載物台を1回転する間にアイソジャイヤーが十字になる状態が4回あるが, そのうち, 視野の十字線のN-S線に縦方向のアイソジャイヤーが一致するように載物台を回転する. 横方向のアイソジャイヤーがE-W線の下側にある場合, その位置から載物台を両側にわずかに回転させ, 右側及び左側検査点を消光させる(アイソジャイヤーが横切る)ときの載物台の角度の読みが, それぞれ ϕ_1 と ϕ_2 である. 横方向のアイソジャイヤーがE-W線の上側にある場合, 左側及び右側検査



第4図 c軸が薄片に低角な場合のアイソジャイヤーと検査点の関係. $\phi 1$ – $\phi 4$ は載物台の角度.

査点が消光，すなわちアイソジャイヤーが横切るときの載物台の角度の読みがそれぞれ $\phi 3$ と $\phi 4$ である. c軸の方位は，上記の(1)から(10)式を使って全く同様に求めることができる.

の交点から検査点までの距離D，検査点をアイソジャイヤーが横切ったときの載物台の角度の読み $\phi 1$ ， $\phi 2$ ， $\phi 3$ ， $\phi 4$ を入力して，その後の結晶の方位を求めること，そこからステレオ投影を行うまで，どのような流れで計算を行ったらいいか紹介する.

4. 付録：方位の計算からステレオ投影までの流れ

求められた方位について，ステレオ投影を行ってそのパターンからさまざまな議論を行う. ステレオ投影を行うのに，従来はステレオ網の上にトレーシングペーパーを重ねて回転しながら方位を記していたが，最近は数値を入力してパーソナルコンピュータ上で処理を行うようになってきた. そのための無料のソフトウェアも公開されている.

ソフトウェアのあるものは，地層の走向傾斜で入力するので今回の方位角を換算する必要がある. また，ステレオ投影の原理を理解するために，自分なりに3次元の方位を2次元に変換することは，決して無駄ではないであろう. 加えて，載物台の角度の読みから方位に換算する計算も必要である. 接眼レンズ十字線

4.1 測定値から方位を求めるまでの流れ

例えば， $K=18.00$ で， $D=6$ を検査点として，ある石英結晶について $\phi 1=349.5$ ， $\phi 2=2.4$ ， $\phi 3=171.1$ ， $\phi 4=184.2$ を得たとする.

- K ， ω を入力. 例では， $K=18.00$ ，石英なので $\omega=1.544$.
- $\phi 1$ ， $\phi 2$ を入力. 例では， $\phi 1=349.5$ ， $\phi 2=2.4$.
- $\phi 2 \geq \phi 1$ なら(1)式と(4)式を， $\phi 2 < \phi 1$ なら(2)式と(5)式を計算して $\Delta\phi$ と $\phi s0$ を求める. 例では $\phi 2 < \phi 1$ なので， $\Delta\phi=360+2.4-349.5=12.9$ ， $\phi s0=(360+2.4+349.5)/2-90=265.95$
- 同様に $\phi 3$ ， $\phi 4$ を入力して(7)から(10)式で， $\Delta\phi$ と $\phi s0$ を求める. 例では， $\phi 4 > \phi 3$ なので， $\Delta\phi=184.2-171.1=13.1$ ， $\phi s0=(184.2+171.1)/2+90=267.65$ である. もし， $\phi 3$ と $\phi 4$ を入力するよう

なプログラムになっていて、都合で ϕ_3 と ϕ_4 を測定しなかった場合は、 ϕ_1 と ϕ_2 の値を 0° から 360° の範囲に入るよう 180° を加減した値を、それぞれ ϕ_3 と ϕ_4 とする。

- ϕ_1 と ϕ_2 , ϕ_3 と ϕ_4 それぞれから求めた $\Delta\phi$ と ϕs_0 を平均する。例では平均の $\Delta\phi = (12.9 + 13.1) / 2 = 13.0$, $\phi s_0 = (265.95 + 267.65) / 2 = 266.8$ 。以後はこの値を使う。
- Dを入力。例では、 $D = 6$ 。
- (3)式にすでに得ているD, K, $\Delta\phi$ を代入する。nには ω を代入する。ソフトウェアによっては角度にラジアンを使う。そのような場合、 $\Delta\phi$ をラジアンに換算しておく。例に従うと、 $\tan \theta c = \tan [\arcsin \{6 / (18.00 \times 1.544)\}] / \sin ((13.1 \times 180 / 3.1416) / 2) = 1.9532$, すると $\theta c = \arctan (1.9532) = 1.0976$ 。
- θc がラジアンで求めた場合、必要なら $180 / \pi (3.1416)$ を乗じて度に直す。例では、 $1.0976 \times 180 / 3.1416 = 62.9$ 。
- $\phi c = 360 - \phi s_0$ 。例では $\phi c = 360 - 266.8 = 93.2$ 。これで方位角 θc と ϕc を得ることができた。

4.2 ステレオ投影

薄片に垂直な方向からの角度が θ の場合、その方向をステレオ投影すると、基円(半径R)の中心からの距離dは、等角投影(ウルフネット)で $d = R \tan(\theta/2)$ 、等積投影(シュミットネット)で $d = R \sqrt{2} \sin(\theta/2)$ である(例えば、Hobbs *et al.*, 1976)。

ここでXY座標グラフ上にステレオ投影図を得ることを考える。基円を(0, 0)を中心とする半径1の円とする。ここでは等積投影で行う。

- 利用するソフトウェアにより、方位角 θc と ϕc をラジアンにするか度にするかに注意する。
- 目的とする投影点は、 $X = \sqrt{2} \sin(\theta c/2) \cdot \cos \phi c$, $Y = \sqrt{2} \sin(\theta c/2) \cdot \sin \phi c$ となる。例では、 $\theta c = 62.8^\circ (1.0966 \text{rad})$, $\phi c = 93.2^\circ (1.6266 \text{rad})$ なので、 $X = -0.0411$, $Y = 0.7359$ を得る。
- XY(直交)座標グラフにこの点を記す。縦横比を同じにして半径1の円を描いて基円とすれば、例とした結晶をステレオ投影した図となる。

ここで得たステレオ投影図は θc と ϕc を上半球投

影したものであるが、すでに原理の章で述べたようにコンスコープ像は反転した像である。したがって、ここで得たステレオ投影図は、実際の薄片について等積下半球投影となる。

5. あとがき

多くの結晶の方位を記したステレオ投影図が得られたら、卓越した方位があるかどうか、卓越した方位がある場合、一極に集中するのか、それともガードルを形成するのか、等々を検討して、試料の変形物理条件を推定する。このような議論を行うのに、例えば中島ほか(2004)が手取り早い入門書である。Passchier and Trouw(鳥海・金川訳, 1999)は、やや詳しい解説書である。同書には、最近の結晶の方位測定法の紹介もある。

今回紹介した手法は、偏光顕微鏡の通常の観察の延長にあるので、十分な機材がないような環境で役立つ。あるいは、調査後に本格的な室内作業を行える場合でも、野外調査期間中にある程度の解釈が必要なことがある。そのような際にも、調査の合間に本手法により予察的な解釈を得ることができる。

謝辞：青木正博地質標本館長からは、石英の結晶面について御教示いただきました。ここに謝意を表します。

文 献

- Hobbs, B.E., Means, W.D. and Williams, P.F. (1976) : An outline of structural geology. John Wiley & Sons, Inc., 571p.
- 三宅 明・大西由夏・奥語節生(2002) : コンスコープによる光学的一軸性結晶c軸方位の新測定法。地質雑, 108, p.176-185.
- 都城秋穂・久城育夫(1972) : 岩石学I。共立出版, 219p.
- 中島 隆・高木秀雄・石井和彦・竹下 徹(2004) : フィールドジョージ-7 変成・変形作用。共立出版, 194p.
- Passchier, C. and Trouw, R.; 鳥海光弘・金川久一訳(1999) : マイクロナノテクニクス-微細構造地質学。シュプリンガー・フェアラーク東京, 277p.
- 坪井誠太郎(1959) : 偏光顕微鏡。第1刷。岩波書店, 293p.

TAKAHASHI Yuhei and MIYAKE Akira (2005) : Advanced polarization-microscopic observation: A method for measuring c-axis orientations of quartz with conoscopic figures.

<受付：2005年2月4日>