ユニバーサルステージによる光軸角測定の さいの補正計算

Calculation for correction in the measurement of the
optic axial angle with the universal stage

宮 川 邦 彦 (Kunihiko Miyakawa)*

Because of the difference in index between crystal and hemisphere, corrections for rotations must be made in measuring the optic axial angle with the universal stage. The conventional methods require to use correction diagrams for the inclination angle and to evaluate the corrected value of the optic axial angle graphically by means of stereographic projection. Such graphical procedures, however, are troublesome and time-consuming as well as lower in accuracy, and many workers wish to make the collection more conveniently.

The present author recommends the correction of the optic axial angle by calculation when the points of emergence of both optic axes can be determined directly with the five-axes universal stage. The method proposed here is of a mathematical treatment of the Emmons' graphical method and remarkably facilitates the procedure for correction by using a computer. It is also applicable to the correction in the measurement of the optic axial angle with the four-axes universal stage. Programs in the BASIC language are exemplified for both the five- and four-axes universal stages.

1. 序

薄片を用いた光軸角の測定にはユニバーサルステージが広く使用されている。この場合、一般に屈折率がガラス半球と鉱物とで異なるため、薄片の傾斜角に対する補正が必要である。このため、傾斜角、ガラス半球及び鉱物の屈折率、補正值との間の関係を示す傾斜角補正図表が用いられる。この種の図表としては、Fedorow (1896) の図 (小川・春本, 1931 や Emmons, 1943 などに再録) や Suwa and Nagasawa (1961) の図 (黒田・諏訪, 1983 その他にも再録) がよく用いられている。しかし、これらの図表を光軸角の測定に適用するさいには、しばしば補正が簡略化されて補正本来の意味が薄れてしまったり、あるいは傾斜角の取り扱いが必ずしも正しくなされていなかったりするものが実状のようである。

光軸角測定のさいの補正法は、5 軸ユニバーサルステージに関して、傾斜角補正図表を併用してステレオ投影による作図で行なう方法が Emmons (1943) に

よって提唱されている。しかし、この方法は、4 軸ユニバーサルステージにも適用できるにもかかわらず、あまり普及していないようである。その原因は、主として (1) 本来 5 軸ユニバーサルステージ用として述べられていること、(2) 5 軸ユニバーサルステージは種々の光学的測定に優れているが、4 軸ユニバーサルステージほど普及していないこと、(3) 補正法が繁雑であると共に作図による誤差が大きいことなどにあるようである。

筆者は、Emmons の補正法の基本的考え方にもとづいて、光軸角の補正に計算機 (ステップ数の多い関数付プログラム電卓や、パソコン) を用いて計算させているが、この計算による方法は従来のやり方に比べ手間と時間が格段に少なく大変便利である。特にパソコンならば、瞬時にして結果がえられる。このような計算による補正はほとんど実用に供されていないようであるが、近年パソコンが著しく普及してきたので、本稿でその方法を述べるのも意味があることと思う。まず、取り扱い上一般性のある 5 軸ユニバーサルステー

* 名古屋工業大学地学教室

ジに関して詳しく述べ、次にその特殊な場合とみなせる4軸ユニバーサルステージに関しても言及する。

2. 5軸ユニバーサルステージによる光軸角の測定と補正の方法

(1) 測定操作

光軸角 $2V$ の測定にはいくつかの方法があるが、もっとも普通に用いられているのは、ユニバーサルステージによって二つの光軸の方向をそれぞれ鏡筒軸方向に一致させて測定するいわゆる直接測定である。Fairbairn and Podolsky (1951) によると、直接測定は他の方法に比べて測定精度がよい。ここでは、直接測定の場合について述べることにする。

5軸ユニバーサルステージには、回転軸として内側から内側垂直軸、内側東西軸、南北軸、外側垂直軸、外側東西軸がある。それらの軸のまわりの回転をそれぞれ I.V 軸回転、I.EW 軸回転、NS 軸回転、O.V 軸回転、O.EW 軸回転と呼ぶことにする。また、顕微鏡のステージの回転すなわち鏡筒軸のまわりの回転を M 軸回転と呼ぶ。

直接測定では、まず起点位置 (zero position) から出発して、薄片中の目的の鉱物を定方向位置 (oriented position) に持ち来たす。起点位置とは、各回転軸の目盛りをすべて 0° に合せた位置をいう。ただし、正確に言えば、O.V 軸回転と M 軸回転については、あらかじめ南北軸と外側東西軸がそれぞれ正しく南北方向と東西方向になるように調整する必要があるから、一般的には 0° から少しずれた位置がゼロ点すなわち起点になる。また、定方向位置とは、光学的弾性軸 X, Y, Z のそれぞれが東西、南北、垂直方向のいずれかと一致した位置をいう。光軸角の直接測定では、Y を東西方向にする。なお、ここでは取り扱いの便宜上、O.V 軸回転は常にゼロ点に位置させておくものとする。定方向位置における I.EW 軸回転と NS 軸回転の回転角の読み取り値をそれぞれ $\theta_{I.EW}$, θ_{NS} とする。

次に、M 軸回転を 45° 行ない、つづいて南側及び北側へそれぞれ O.EW 軸回転を行なって消光させる。すると、鏡筒軸方向が光軸の見掛上の方向になる。この時の O.EW 軸回転の読み取り値を $\theta_{O.EW}$ (すなわち、 $\theta_{O.EW}-1S$ 及び $\theta_{O.EW}-2N$) とする。また、定方向位置における垂直方向の光学的弾性軸の種類 (X または Z) も観察しておく。

(2) 光軸角補正についての考え方

薄片にたてた垂線の方向を垂線方向と呼ぶことにする。ステレオ投影では、それは薄片に平行な大円の極

第1図 傾斜角と垂線方向。
矢印は光の進行方向を表わす。

第2図 定方向位置における垂線方向 (ステレオ投影図)。
矢印は垂線方向の移動経路を表わす (第3図～第5図も同様)。

で示される。起点位置での垂線方向は、光の進行方向であり、鏡筒軸方向と一致する。

薄片を傾けたとき、第1図に示されるように、垂線方向 P が鏡筒軸すなわち空気中での光の進行方向となす角を ρ とし、結晶内での光の進行方向が P とす角を ρ^* とする。すなわち、 ρ は薄片の傾斜角であり、 ρ に結晶とガラス半球との屈折率の違いに関して補正を

第3図 O.E.W 軸回転による垂線方向の移動（ステレオ投影図）。

施したときの値が ρ^* であり（以下、このような値は“補正された”という修飾語をつけて呼び、記号には * 印をつけて示すことにする）、そして P^* が補正された垂線方向である。

第2図には、光軸角を測ろうとする結晶を定方向位置においた時の垂線方向がステレオ投影され、 P_1 で示されている。このとき、薄片の傾斜角は O から P_1 までの距離 ρ_1 であり、 P_1^* は O から P_1 に向かって ρ_1^* の距離にある点である。ただし、AB, CD, O は、起点位置におけるそれぞれ内側及び外側東西軸、南北軸、内側及び外側垂直軸の方向であり、 P_0 はまず I.E.W 軸回転を行なった時の垂線方向である。

次に、定方向位置から M 軸回転と O.E.W 軸回転を行なって光軸方向を求めたが、このとき鏡筒軸方向が光軸の見掛上の方向になる。それで、M 軸回転をゼロ点に戻した状態でのステレオ投影を第3図に示す。すなわち、このときの垂線方向は P_2 であり、 P_1 から O.E.W 軸回転で $\theta_{O.E.W.-1S}$ 及び $\theta_{O.E.W.-2N}$ なる角度だけ小円に沿って南及び北に移動した位置にあるので、それぞれ P_{2S} 及び P_{2N} で示してある。このとき薄片の傾斜角は $\widehat{OP_{2S}}$ 及び $\widehat{OP_{2N}}$ で、補正された傾斜角は $\widehat{OP_{2S}^*}$ 及び $\widehat{OP_{2N}^*}$ で与えられる。そして、未補正の光軸角は $\theta_{O.E.W.-1} + \theta_{O.E.W.-2}$ すなわち小円上で $\widehat{P_1P_{2S}} + \widehat{P_1P_{2N}}$ であり、補正された光軸角は $\theta_{O.E.W.-1}^* + \theta_{O.E.W.-2}^*$ すなわち小円上で $\widehat{P_1^*P_{2S}^*} + \widehat{P_1^*P_{2N}^*}$ である。

上述の諸方向をステレオ投影して図上で補正された

第4図 定方向位置における垂線方向の球面座標。

光軸角を読み取ることは、作図的に繁雑で、しかも誤差を生じやすい。筆者は、それを避けるため、次節で述べるようにして計算することにした。

(3) 光軸角補正の数式的取り扱い

球面座標を用いれば、垂線方向は、薄片（したがってユニバーサルステージの内側ステージ）に平行な大円の極の座標で示すことができ便利である。第4図は第2図に対応する見取り図であって、AB, CD, NS がそれぞれ起点位置における東西軸、南北軸、垂直軸の方向である。結晶が定方向位置におかれた時の垂線方向の座標は $P_1(\rho_1, \phi_1)$ であるとする。ここで、 $\rho_1 = \angle NOP_1$ 、 $\phi_1 = \angle AOQ_1$ である。ただし、 Q_1 は大円 NP_1S と大円 $ACBD$ との交点である。次に大円 $NASB$ と大円 CP_1D との交点を F とすると、直角球面三角形 NP_1F において、次の関係が成り立つ。

$$\cos \rho_1 = \cos \theta_{LEW} \cos \theta_{NS} \quad (1)$$

$$\sin^2 \phi_1 = \frac{\sin^2 \theta_{LEW}}{1 - \cos^2 \theta_{LEW} \cos^2 \theta_{NS}} \quad (2)$$

次に定方向位置から一方の光軸を鏡筒軸方向に持ち来たとき、M 軸回転をゼロ点に戻した状態での垂線方向は第5図に示した OP_2 である（第3図参照）。その座標を $P_2(\rho_2, \phi_2)$ とする。二つの球面三角形 NP_1A 及び NP_2A において、回転角の間の関係から容易に次式がえられる。

第5図 O.EW 軸回転による垂線方向の移動と球面座標

$$\sin^2 \rho_2 = \cos^2 \theta_{LEW} \sin^2 \theta_{NS} + (\sin \theta_{LEW} \cos \theta_{0.EW} + \cos \theta_{LEW} \cos \theta_{NS} \sin \theta_{0.EW})^2 \quad (3)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{\tan \theta_{LEW} \cos \theta_{0.EW} + \cos \theta_{NS} \sin \theta_{0.EW}}{\sin \theta_{NS}} \quad (4)$$

また、式(3)は次のように変形できる。

$$\sin^2 \rho_2 \sin^2 \phi_2 = \sin \rho_1 \sin \phi_1 \cos \theta_{0.EW} + \cos \rho_1 \sin \theta_{0.EW} \quad (5)$$

次に、結晶とガラス半球との屈折率の違いによる補正を行なう。 n をガラス半球の屈折率、 β を結晶の主屈折率 β とすると、

$$\rho_1^* = \sin^{-1} \left(\frac{n}{\beta} \sin \rho_1 \right) \quad (6)$$

$$\rho_2^* = \sin^{-1} \left(\frac{n}{\beta} \sin \rho_2 \right) \quad (7)$$

である。したがって、 P_1 と P_2 の補正された位置は、それぞれ $P_1^*(\rho_1^*, \phi_1)$ と $P_2^*(\rho_2^*, \phi_2)$ で与えられる。

ここで、“補正された” 光軸角 $2V$ を求めるために直接必要な量は、O.EW 軸回転の補正された回転角 $\theta_{0.EW}^*$ である。 $\rho_1^*, \phi_1, \rho_2^*, \phi_2, \theta_{0.EW}^*$ の間には、式(5)と同様な関係が成り立つとして差し支えないから、

$$\begin{aligned} \sin^2 \rho_2^* \sin^2 \phi_2^* = \\ \sin \rho_1^* \sin \phi_1 \cos \theta_{0.EW}^* + \cos \rho_1^* \sin \theta_{0.EW}^* \end{aligned} \quad (8)$$

である。この式から $\theta_{0.EW}^*$ を求めればよい。ここでは、

計算の便宜上、式(8)を変形してえられる次式を用いることにする。

$$\sin^2(\theta_{0.EW}^* + \alpha) = \frac{\sin^2 \rho_2^* \sin^2 \phi_2^*}{\sin^2 \rho_1^* \sin^2 \phi_1 + \cos^2 \rho_1^*} \quad (9)$$

ただし、

$$\cos \alpha = \frac{\cos \rho_1^*}{\sqrt{\sin^2 \rho_1^* \sin^2 \phi_1 + \cos^2 \rho_1^*}} \quad (10)$$

$$\sin \alpha = \frac{\sin \rho_1^* \sin \phi_1}{\sqrt{\sin^2 \rho_1^* \sin^2 \phi_1 + \cos^2 \rho_1^*}} \quad (11)$$

それで、式(2)、(4)、(6)、(7)を用いて $(\theta_{0.EW}^* + \alpha)$ と α を上式からそれぞれ計算すれば、 $\theta_{0.EW}^*$ が求まることになる。

ここで、 $\theta_{0.EW}^*$ は、一方の光軸について例えば南側へ回転したとすれば $\theta_{0.EW}^* - 1^*S$ であり、他方の光軸については北側への回転になるから $\theta_{0.EW}^* - 1^*N$ である。すると、定方向位置で鏡筒軸方向に位置する光学的弾性軸に関して、その両側にある二つの光軸の間の角すなわち暫定的な光軸角 $\text{prov. } 2V$ は、 $(\theta_{0.EW}^* - 1^* + \theta_{0.EW}^* - 2^*)$ として与えられる。鋭等分線の方向が決まれば、光学性と光軸角 $2V$ が求まる。もし一方の光軸しか出現しない場合には、 $\theta_{0.EW}^* - 2^* = \theta_{0.EW}^* - 1^*$ とすればよい。

(4) 計算で取り扱う角度の範囲と符号の定め方

前節で述べた数式的取扱いにもとづいて計算機で計算させる場合には、特に次の点を考慮する必要がある。

i) LEW 軸回転、NS 軸回転、O.EW 軸回転の向き
の符号(正負)の定め方

ii) ρ と ϕ の範囲と符号(正負)の定め方

ここでは、取扱い上の便宜から、以下に述べるように定めることにする。

LEW 軸回転と O.EW 軸回転は、南方向への回転(すなわち、薄片にたてた垂線がステレオ投影図上で南へ移動する場合の回転。以下同様の意味で用いることにする)を正とし、北方向への回転を負とする。NS 軸回転では、東方向への回転を正とし、西方向への回転を負とする。また、 θ_{LEW} 、 θ_{NS} 、 $\theta_{0.EW}$ の範囲は、いずれも -90° から $+90^\circ$ までとする。実際上は、これらの回転では $\pm 50^\circ$ を越すことはほとんどない。

ρ と ϕ については、 ρ の符号は常に正とし、 ϕ の符号は、第2図または第4図において、NS 軸回転を東方向へ行なう場合には基円上でAを起点として時計回りに正、反時計回りに負とする。そして西方向へ回転する場合にはBを起点として反時計回りに正、時計回りに負とする。とりうる範囲は、 $0^\circ \leq \rho \leq 90^\circ$ 及び $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ とする。このように ρ と ϕ の符号と範囲を定

第1表 変数名一覧表

入力に必要な変数

	変数名	内容
屈折率	NHMSPH	n
	BETA	β
回転角	IEW	$\theta_{1,EW}$
	NS	θ_{NS}
	OEW1	$\theta_{0,EW-1}$
	OEW2	$\theta_{0,EW-2}$
垂直方向の 光学的弾性軸	VERTBX	vert. BX (XまたはZ)

計算過程及び出力に必要な変数

変数名	内容	変数名	内容
IEWR	$\theta_{1,EW}$	OEWCORR	$\theta_{0,EW}^*$
NSR	θ_{NS}	OEW1COR	$\theta_{0,EW-1}^*$
OEW1R	$\theta_{0,EW-1}$	OEW2COR	$\theta_{0,EW-2}^*$
OEW2R	$\theta_{0,EW-2}$	PTWICEV	prov. 2V
OEW	$\theta_{0,EW}$	TWICEV	2 V
RHO1R	ρ_1	RADIAN	角度単位変換用
SP1	$\sin \phi_1$	DEGREE	同上
SR1COR	$\sin \rho_1^*$	J	関数の置換用
PHI2R	ϕ_2	K	同上
SR2	$\sin \rho_2$	L	同上
SR2COR	$\sin \rho_2^*$	U	同上
ALPHAR	α		

めれば、NS 軸回転に関しては左右対称となり、西方向への回転はすべて東方向への回転として取り扱え、計算に好都合である。

以上のような角度の取扱い方をすれば、式 (2), (3), (4), (9) の代りに、次の諸式を用いることができる：

$$\sin \phi_1 = \frac{\sin \theta_{1,EW}}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_{1,EW} \cos^2 \theta_{NS}}} \quad (12)$$

$$\sin \rho_2 = \frac{\sqrt{\cos^2 \theta_{1,EW} \sin^2 \theta_{NS} + (\sin \theta_{1,EW} \cos \theta_{0,EW} + \cos \theta_{1,EW} \cos \theta_{NS} \sin \theta_{0,EW})^2}}{\sin |\theta_{NS}|} \quad (13)$$

$$\tan \phi_2 = \frac{\tan \theta_{1,EW} \cos \theta_{0,EW} + \cos \theta_{NS} \sin \theta_{0,EW}}{\sin |\theta_{NS}|} \quad (14)$$

$$\sin(\theta_{0,EW}^* + \alpha) = \frac{\sin \rho_2^* \sin \phi_2}{\sqrt{\sin^2 \rho_1^* \sin^2 \phi_1 + \cos^2 \rho_1^*}} \quad (15)$$

このとき、

$$\text{prov. 2V} = |\theta_{0,EW-1}^* - \theta_{0,EW-2}^*| \quad (16)$$

である。

(5) 光軸角計算用プログラム

ここでは、計算機を用いる場合のプログラムの一例を示すことにする。屈折率として n と β を、回転角(単位は度)として $\theta_{1,EW}$, θ_{NS} , $\theta_{0,EW}$ ($\theta_{0,EW S}$ 及び $\theta_{0,EW N}$) を、鏡筒軸方向の光学的弾性軸(vertical bisectrix, 記号は vert. BX)として X または Z を入力し、 $\theta_{0,EW}^*$ ($\theta_{0,EW S}^*$ 及び $\theta_{0,EW N}^*$), $2V_X$ または $2V_Z$, (+) $2V$ または (-) $2V$ を出力させることにする。プログラム作製の便宜上、 $\theta_{0,EW S}$ と $\theta_{0,EW N}$ のうち、先に測定した方を $\theta_{0,EW-1}$, 2番目に測定した方を $\theta_{0,EW-2}$ と記すことにする。そして、光学的正負と補正された光軸角 $2V$ は、

prov. 2V の大きさと vert. BX の種類から判断して出力させるようにした。プログラムは、パソコン用に BASIC 言語で書いてみた。変数名とその内容は第1表に、プログラムは第2表に示される。

次に、使用の便宜を考えて、測定データの記載及び入出力についての具体例を第三表に示しておく。データの記載には、 $\theta_{1,EW}$, θ_{NS} はそれぞれ I.EW, NS と略記し、 $\theta_{0,EW}$ の二つの値は O.EW-1 及び O.EW-2 で示した。なお、I.V 軸回転及び O.V 軸回転による回転角の読み取り値 $\theta_{1,V}$ 及び $\theta_{0,V}$ は、補正計算には必要ないが、データには I.V 及び O.V として併記しておく。また、O.V 軸回転と M 軸回転のゼロ点も記しておく必要がある。

3. 4 軸ユニバーサルステージの場合の光軸角補正

(1) 補正の方法

4 軸ユニバーサルステージでは、回転軸は内側から内側垂直軸、南北軸、外側垂直軸、東西軸があり、それらはそれぞれ N 軸、H 軸、M 軸、J 軸と呼ばれることが多い。これらの回転軸は、5 軸ユニバーサルステージのそれぞれ内側垂直軸、南北軸、外側垂直軸、外側東西軸に対応する。なお、顕微鏡のステージの回転軸は、この場合には、T 軸と呼ぶ。要するに、4 軸ユニバーサルステージは、5 軸ユニバーサルステージの特別な場合、すなわち I.EW 軸回転が常に 0° のままであると考えればよい。

4 軸ユニバーサルステージによる光軸角の直接測定は、周知のことであるから、ここでは触れない。勿論、この場合には定方向位置という状態を考慮する必要は

第2表 光軸角2Vの補正プログラム (5軸ユニバーサルステージ用)

```

10 REM " 2Vの補正 : 5軸ユニバーサルステージ用 "
20 REM [4軸ユニバーサルステージの場合には、IEWに0と入力せよ]
100 WIDTH 80
110 ' テータの入力
120 PRINT "回転方向EとSは、プラス"
130 PRINT "回転方向WとNは、マイナス"
140 INPUT "n      : ", NHMSPH : INPUT "β      : ", BETA
150 INPUT "I. EW   : ", IEW : INPUT "NS      : ", NS
160 INPUT "O. EW-1 : ", OEW1 : INPUT "O. EW-2 : ", OEW2
170 INPUT "vert. BX : ", VERTBX$
180 ' 角度変換係数
190 RADIAN=4*ATN(1)/180 : DEGREE=1/RADIAN
200 ' 弧度に変換
210 IEWR=IEW*RADIAN : NSR=NS*RADIAN
220 OEWR1=OEW1*RADIAN : OEWR2=OEW2*RADIAN
230 ' O. EW* の計算
240 FOR I=1 TO 2
250 IF I>1 THEN GOTO 270
260 OEWR=OEWR1 : GOTO 280
270 OEWR=OEWR2
280 DEF FNARCSIN(U)=ATN(U/SQR(1-U^2))
290 U=COS(IEWR)*COS(NSR) : RHO1R=2*ATN(1)-FNARCSIN(U)
300 SP1=SIN(IEWR)/SIN(RHO1R)
310 SR1COR=NHMSPH/BETA*SIN(RHO1R)
320 J=SIN(IEWR)*COS(OEWR)+COS(IEWR)*COS(NSR)*SIN(OEWR)
330 K=COS(IEWR)*SIN(ABS(NSR))
340 PHI2R=ATN(J/K) : SR2=SQR(J^2+K^2)
350 SR2COR=NHMSPH/BETA*SR2
360 L=SQR((SR1COR*SP1)^2+1-SR1COR^2)
370 U=SR1COR*SP1/L : ALPHAR=FNARCSIN(U)
380 U=SR2COR*SIN(PHI2R)/L : OEWCORR=FNARCSIN(U)-ALPHAR
390 IF I=2 THEN GOTO 410
400 OEWR1COR=CINT(OEWCORR*DEGREE*100)/100 : GOTO 420
410 OEWR2COR=CINT(OEWCORR*DEGREE*100)/100
420 NEXT I
430 PRINT "O. EW-1* : "; USING "###.##_"; OEWR1COR;
440 PRINT TAB(21); "O. EW-2* : "; USING "###.##_"; OEWR2COR
450 ' 2Vと光学性
460 PTWICEV=ABS(OEWR1COR-OEWR2COR)
470 IF PTWICEV>90 THEN GOTO 550
480 TWICEV=PTWICEV
490 IF VERTBX$="z" OR VERTBX$="Z" THEN GOTO 510
500 IF VERTBX$="x" OR VERTBX$="X" THEN GOTO 530
510 PRINT "2Vz="; USING "###.##_"; TWICEV;
520 PRINT TAB(14); "(+)2V="; USING "###.##_"; TWICEV : GOTO 600
530 PRINT "2Vx="; USING "###.##_"; TWICEV;
540 PRINT TAB(14); "(-)2V="; USING "###.##_"; TWICEV : GOTO 600
550 TWICEV=180-PTWICEV
560 IF VERTBX$="z" OR VERTBX$="Z" THEN GOTO 580
570 IF VERTBX$="x" OR VERTBX$="X" THEN GOTO 590
580 PRINT "2Vz="; USING "###.##_"; PTWICEV; : GOTO 540
590 PRINT "2Vx="; USING "###.##_"; PTWICEV; : GOTO 520
600 END

```

第3表 5軸ユニバーサルステージによる光軸角測定の実例

ゼロ点		測定データ		入力		出力	
O.V	0.2°	I.V	115.7°	n	1.649	O. EW-1*	49.35°
M	-0.4°	I. EW	5.2°N	β	1.638	O. EW-2*	-50.29°
		NS	19.4°E	I. EW	-5.2		
		O.V	0.2°	NS	19.4	2Vx=	99.6°
屈折率		X	⊥	O. EW-1	48.9		
n	1.649	Y	EW	O. EW-2	-49.7	(+)2V=	80.4°
β	1.638	Z	NS	vert. BX	X		
		O. EW-1	48.9°S				
		O. EW-2	49.7°N				

第4表 光軸角2Vの補正プログラム(4軸ユニバーサルステージ用)

```

10 REM " 2Vの補正 : 4軸ユニバーサルステージ用 "
100 WIDTH 80
110 ' テータの入力
120 PRINT "回転方向EとSは、プラス"
130 PRINT "回転方向WとNは、マイナス"
140 INPUT "n      : ",NHMSPH : INPUT "β      : ",BETA
150 INPUT "H      : ",NS
160 INPUT "J1      : ",OEW1 : INPUT "J2      : ",OEW2
170 INPUT "BX'     : ",VERTBX$
180 ' 角度変換係数
190 RADIEN=4*ATN(1)/180 : DEGREE=1/RADIEN
200 ' 弧度に変換
210 IEWR=IEWR*RADIEN : NSR=NS*RADIEN
220 OEW1R=OEW1*RADIEN : OEW2R=OEW2*RADIEN
230 ' O. EWR* の計算
240 FOR I=1 TO 2
250 IF I>1 THEN GOTO 270
260 OEWR=OEW1R : GOTO 280
270 OEWR=OEW2R
280 U=COS(NSR)*SIN(OEWR)/SQR((BETA/NHMSPH)^2-(SIN(NSR))^2)
290 OEWCORR=ATN(U/SQR(1-U^2))
300 IF I=>2 THEN GOTO 320
310 OEW1COR=CINT(OEWCORR*DEGREE*100)/100 : GOTO 330
320 OEW2COR=CINT(OEWCORR*DEGREE*100)/100
330 NEXT I
340 PRINT "J1*      : ";USING "###.##_";OEW1COR;
350 PRINT TAB(21);"J2*      : ";USING "###.##_";OEW2COR
360 ' 2Vと光学性
370 PTWICEV=ABS(OEW1COR-OEW2COR)
380 IF PTWICEV>90 THEN GOTO 460
390 TWICEV=PTWICEV
400 IF VERTBX$="z" OR VERTBX$="Z" THEN GOTO 420
410 IF VERTBX$="x" OR VERTBX$="X" THEN GOTO 440
420 PRINT "2Vz=";USING "###.##_";TWICEV;
430 PRINT TAB(14);"(<+)2V=";USING "###.##_";TWICEV : GOTO 510
440 PRINT "2Vx=";USING "###.##_";TWICEV;
450 PRINT TAB(14);"(<-)2V=";USING "###.##_";TWICEV : GOTO 510
460 TWICEV=180-PTWICEV
470 IF VERTBX$="z" OR VERTBX$="Z" THEN GOTO 490
480 IF VERTBX$="x" OR VERTBX$="X" THEN GOTO 500
490 PRINT "2Vz=";USING "###.##_";PTWICEV; : GOTO 450
500 PRINT "2Vx=";USING "###.##_";PTWICEV; : GOTO 430
510 END

```

ない。以下では、計算式中の記号は、便宜上5軸ユニバーサルステージに関して用いた記号を用いることにする。

補正の仕方は、IEWR 軸回転を0°として、5軸ユニバーサルステージについて述べてきたことと同様な考え方を適用すればよい。すると、直ちに次式がえられる。

$$\sin \theta_{0,EW}^* = \frac{\cos \theta_{NS} \sin \theta_{0,EW}}{\sqrt{\frac{\beta^2}{n^2} - \sin^2 \theta_{NS}}} \quad (17)$$

したがって、光軸角2Vは式(17)と(16)のみを用いて計算すればよい。

(2) 光軸角補正のプログラム

まず、4軸ユニバーサルステージ専用のプログラムについて述べることにする。この場合に入力するのは、

屈折率としてnとβ、回転角としてθ_{NS}とθ_{0,EW}(θ_{0,EW}S及びθ_{0,EW}N)、測定した二つの光軸の間にある光学的弾性軸(記号はBX')としてXまたはZである。ただし、ディスプレイ上での表示及びデータの記載では、θ_{NS}、θ_{0,EW}-1、θ_{0,EW}-2の代りにそれぞれH、J1、J2とした。また、鏡筒軸方向は一般に光学的弾性軸の方向とは異なるので、記号としてvert. BXの代りにBX'を用いた。計算式としては、式(17)及び(16)を用いればよいので、第2表の5軸ユニバーサルステージ用のプログラムを若干手直しすることによって、第4表に示した4軸ユニバーサルステージ専用のプログラムが直ちにえられる。

もし、5軸ユニバーサルステージ用のプログラムをそのまま4軸ユニバーサルステージに適用したいならば、IEWR=0°として入力すればよい。

次に、使用の便宜を考えて、測定データの記載及び

第5表 4軸ユニバーサルステージによる光軸角測定の場合

ゼロ点		〔4軸ユニバーサルステージ用プログラム〕		
		入力		出力
M	0.3°	n	1.554	J1* -24.22°
T	0.2°	β	1.527	J2* 44.42°
		H	-21.9	
屈折率		J1	-23.7	2V _z =68.6°
n	1.554	J2	43.3	
β	1.527	BX'	Z	(+)2V=68.6°

測定データ		〔5軸ユニバーサルステージ用プログラム〕		
		入力		出力
N	35.8°	n	1.554	0.EW-1* -24.22°
H	21.9° W	β	1.527	0.EW-2* 44.42°
M	0.3°	I.EW	0	
J ₁	23.7° N	NS	-21.9	2V _z =68.6°
J ₂	43.3° S	0.EW-1	-23.7	
BX'	Z	0.EW-2	43.3	(+)2V=68.6°
		vert. BX	Z	

入出力についての具体例を第5表に示す。

4. 結 語

結晶の光学的性質をユニバーサルステージで精密に測定するためには、当然のことながら、ユニバーサルステージを顕微鏡に取り付けた時の諸調整(回転中心、回転軸方向、薄片位置の上下方向などの調整)や照明の調整(光線の平行性、投射方向、光束の大きさなどの調整)を予め正しく行なっておく必要がある。また、測定精度は、薄片の厚さ、複屈折の大きさ、結晶と半球との屈折率の差の大小、薄片の傾斜角の大きさ、光軸角の大きさ、消光位置の認定などにも関係してくる。特に消光位置は、正確に決定するのが難しい場合がよくあり、個人差が大きいので、何回かの測定の平均値をとる必要がある。また、使用する対物レンズの倍率・開口数・絞り具合、ガラス円板の屈折率にも関係する(この点に関する誤差は、半球・薄片・ガラス円板から構成される中央組合せ部分と関連させてかんらん石とトパーズを例にして Munro (1963) が論じている)。これらの要因を念頭において、測定時の諸条件をできる限りよくしてこそ、補正は補正本来的意味をもつことになる。このような場合に、前章で述べてきた光軸角の補正計算は、精度の高い光軸角の値をうるために必要な一つの条件となる。

近年 EPMA など大型装置の使用が著しく増えてきて、光学的な観察や測定がともすればなおざりにされ勝ちである。しかし、光学的側面からのアプローチは、

測定精度を高めることによって、岩石学的研究の一つの基本的方法として今後も充分に存在意義があるといえる。このような面からの最近の研究として、例えば、Su *et al.* (1984) による光軸角と構造状態との関係についての研究がある。

終りに、草稿を閲読して有益な助言を頂いた名古屋大学理学部の諏訪兼位教授に深く感謝する。

引用文献

- Emmons, R.C. (1943), The universal stage (with five axes of rotation). *Geol. Soc. Amer. Memoir*, No. 8, pp. 205 (Reprinted 1959).
- Fairbairn, H.W. and Podolsky, T. (1951), Notes on precision and accuracy of optic angle determination with the universal stage. *Amer. Mineral.*, **36**, 823-832.
- Fedorow, E. von (1896), Universalmethode und Feldspathstudien. I. Methodische Verfahren. *Z. Kryst. u. Mineral.*, **26**, 225-261.
- 黒田吉益・諏訪兼位 (1983), 偏光顕微鏡と岩石鉱物, 第2版, pp. 343+xxv, 共立出版, 東京.
- Munro, M. (1963), Errors in the measurement of 2V with the universal stage. *Amer. Mineral.*, **48**, 308-323.
- 小川琢治・春本篤夫 (1931), 経緯鏡台に依る長石の識別法, pp. 75, 岩波講座: 地質学及び古生物学・鉱物学及び岩石学, 岩波書店, 東京.
- Su, S.C., Bloss, F.D., Ribbe, P.H. and Stewart, D.B. (1984), Optic axial angle, a precise measure of Al, Si ordering in the T₁ tetrahedral sites of K-

rich alkali feldspars. *Amer. Mineral.*, **69**, 440-448.
 Suwa, K. and Nagasawa, K. (1961), A correction

diagram for measuring an inclination angle with the universal stage. *J. Earth Sciences, Nagoya Univ.*, **9**, 29-32.