

斜長石双晶識別のための消光角変化曲線 —接合面が菱形断面及び(001)面の場合—

高橋裕平¹

Yuhei TAKAHASHI (2000) Variation curves of extinction angle, for determining the laws of plagioclase twinning with composition planes of rhombic section and (001). *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51(7), p309-315, 3 figs.

Abstract: Variation curves of extinction angle in the zone perpendicular to (010) were already proposed to determine the *c*-axis orientation and twinning laws in plagioclase. However, the twinning laws with composition planes other than (010) are common. In this study, variation curves of extinction angle in the zone perpendicular to rhombic section and (001) are newly proposed for low-temperature type plagioclase (An 10, 30, 50, 70, and 90). As a result, pericline, manebach, and acline-A twinning laws can be distinguished by use of these curves.

要 旨

斜長石の結晶軸 *c* の方位や双晶の種類を決定するために、(010)面に垂直な薄片上での消光角の変化曲線が既に提案されている。しかしながら、(010)面以外を接合面とする斜長石双晶が天然の岩石でごく普通に産出する。そこで、低温型斜長石 (An 10, An 30, An 50, An 70, An 90) について、菱形断面や (001)面に垂直な薄片上での消光角の変化曲線を新たに作成した。これらを利用すると、ペリクリン双晶、マネバツハ双晶、アクリン A 双晶を識別できる。

1. ま え が き

斜長石の双晶の種類は岩石の生成条件と密接な関係があるので、双晶の種類を決定するために、さまざまな光学的手法による迅速識別法が提案されてきた (例えば、Gorai, 1951; Tobi, 1961; Suwa *et al.*, 1974; 坪井ほか, 1977)。

このうち、Suwa *et al.* (1974) により提案された方法は、自在回転台を用いて双晶個体の接合面を垂直にして東西軸を回転しながら両双晶片の消光角の変化を調べ、双晶の種類ごとにあらかじめ準備した消光角変化曲線と比較して、双晶の種類を決定する方法である。この手法は集片双晶でも容易に双晶の種類を決定でき、加えて結

晶軸の方位も知りうるなどの長所がある。その上、自在回転台を用いるといっても、単に接合面を垂直にするだけの単純な操作である。この手法の為に、(010)面と菱形断面 (一部の組成のみ) を接合面とする双晶に関して、消光角変化曲線が準備されている (Suwa *et al.*, 1974; Suwa, 1978)。

天然の岩石、特に角閃岩相からグラニュライト相の変成岩類には、(010)面以外を接合面とする双晶 (多くの場合、ペリクリン双晶) が頻繁に出現する (例えば Takahashi *et al.*, 1997)。そこで小論では消光角の求め方を解説した後、菱形断面及び (001) 面を接合面とする斜長石双晶個体の両双晶片の消光角変化図を市販の表計算ソフトで求めてみた。

2. 消光角の求め方

薄片の面上に現れる結晶面の断面線に対する消光角を Biot-Fresnel の法則から計算で求めることができる (坪井, 1959)。

薄片の面を S, 結晶面を H, 2つの光軸を A, B とすると、消光角 δ は坪井 (1959) の 406.1 式から

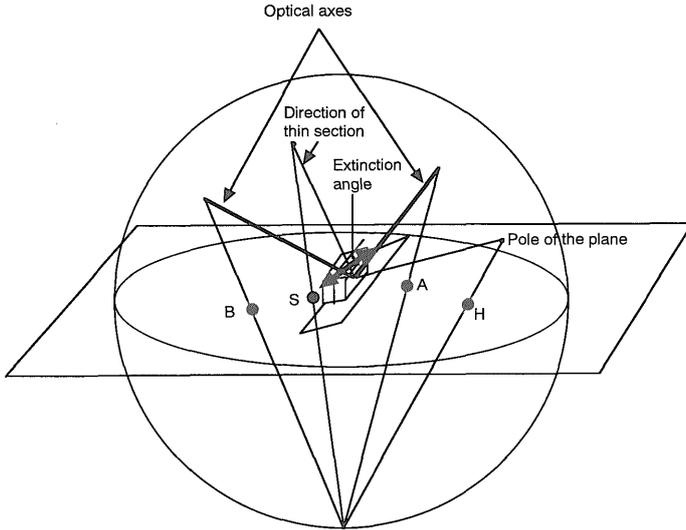
$$\delta = 90^\circ - (\angle ASH + \angle BSH) / 2 \quad \dots\dots(1)$$

参考の為に、S, H, A, B のステレオ投影を第 1 図に模式的に示した。

消光角を得るために、 $\angle ASH$ と $\angle BSH$ を求める必要

¹ 北海道支所 (Hokkaido Branch, GSJ)

Keywords: Plagioclase, Twinning, Rhombic section, (001), Extinction angle



第1図 模式的な薄片(S), 結晶面(H), 光軸(A, B)のステレオ投影
 Fig. 1 Schematic stereographic projection for thin section (S), crystal plane (H) and optic axes (A and B)

がある。ステレオ投影面上での座標(角)は、第2図aのように、ステレオ投影図の中心を原点として、中心(原点)を通る上下軸と左右軸からの角度 ϕ と λ でそれぞれ表す。S, H, A, Bの座標をそれぞれ $(\phi S, \lambda S)$, $(\phi H, \lambda H)$, $(\phi A, \lambda A)$, $(\phi B, \lambda B)$ とする。坪井(1959)の406.2式から

$$\cos AH = \sin \phi A \cdot \sin \phi H + \cos \phi A \cdot \cos \phi H \cdot \cos (\lambda A - \lambda H)$$

$$\cos AS = \sin \phi A \cdot \sin \phi S + \cos \phi A \cdot \cos \phi S \cdot \cos (\lambda A - \lambda S)$$

$$\cos SH = \sin \phi S \cdot \sin \phi H + \cos \phi S \cdot \cos \phi H \cdot \cos (\lambda S - \lambda H)$$

$$\cos BH = \sin \phi B \cdot \sin \phi H + \cos \phi B \cdot \cos \phi H \cdot \cos (\lambda B - \lambda H)$$

$$\cos BS = \sin \phi B \cdot \sin \phi S + \cos \phi B \cdot \cos \phi S \cdot \cos (\lambda B - \lambda S)$$

以上の5式をまとめて(2)とする。

これらを求めて坪井(1959)の(406.3)式から

$$\cos \angle ASH = (\cos AH - \cos AS \cdot \cos SH) / (\sin AS \cdot \sin SH)$$

$$\cos \angle BSH = (\cos BH - \cos BS \cdot \cos SH) / (\sin BS \cdot \sin SH)$$

これらの2式をまとめて(3)とする。

そうすると $\angle ASH$ と $\angle BSH$ が求まり、(1)から消光角 δ を得ることができる。

3. 消光角変化曲線作成の実際

3.1 結晶学的方位データの投影(第2図a)

光軸、光学的弾性軸、結晶軸などの方位は、偏光顕微鏡に関する教科書中の図から読み取るなどして得ることができる。例えばWinchell and Winchell (1951)には、結晶軸a, b, cにそれぞれ垂直な投影面上における結晶

学的な方位関係が記されているので、次の3.2の回転などの操作を経ず、直ちに消光角の計算に利用できる。

ここでは、Burri *et al.* (1967)の結晶学的データに基づいて編集された坪井ほか(1977)の結晶軸cと(010)面に垂直な投影面での座標角を利用してステレオ投影した(第2図a)。その上で、ここで問題とする結晶面(双晶の接合面)を投影する。(001)の座標は坪井ほか(1977)に与えられているのでそのまま使える。

菱形断面は結晶軸bを含む平面で、結晶軸bを極とする大円と(010)面との交点を求め、その点とb軸を通る大円として求められる(黒田・諏訪, 1983)。組成によって結晶軸bの方位が異なるため、菱形断面の方位は組成依存性がある。小論では、坪井ほか(1977)の結晶学データを利用したが、利用する結晶学データの違いで、理論上の菱形断面の方位が異なることには注意すべきである。

3.2 回転後の新たな座標の読み取り(第2図b)

接合面が形成する大円をステレオ投影面の基円の左右軸と交わるように、全体を回転する(第2図b)。接合面に垂直な薄片上で、菱形断面や(001)面を接合面とする双晶を識別する消光角変化曲線を作成するために、次の値をあらためて得ておく必要がある。

$$\begin{aligned} & \text{光軸 A } (\phi A, \lambda A), \text{ 光軸 B } (\phi B, \lambda B), \text{ b 軸 } (\phi b, \lambda b), \\ & \text{薄片 S } (\phi S, \lambda S), \text{ 接合面の極 H } (\phi H, \lambda H) \\ & \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

菱形断面や(001)面はb軸を通り、Sは接合面上にある。さらに接合面とその極の関係から

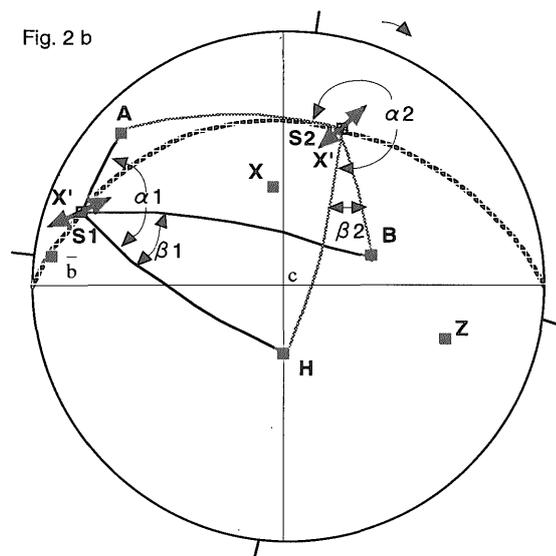
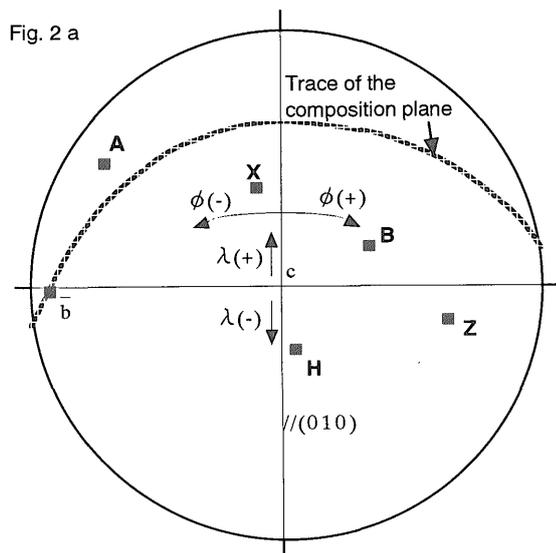
$$\lambda b = \lambda S$$

$$\phi H = 0$$

Hは接合面の極であるから

$$\lambda H = \lambda S - 90$$

ϕS が変数で他は一定の値である。菱形断面や(001)面



第2図 光学方位関係を示すステレオ投影図
 (a): 光軸(A, B), 光学的弾性軸(X, Z), 結晶軸 b を坪井ほか (1977) のデータから結晶軸 c に垂直な面に投影。H は接合面の極。座標の取り方を ϕ と λ で示した。
 (b): 接合面が基円の左右軸と交わるように回転。S1 における消光角は $90 - (\alpha_1 + \beta_1)/2$, S2 における消光角は $90 - (\alpha_2 + \beta_2)/2$ である。X' は早いほうの偏光波の振動方向。
 Fig. 2 Stereogram showing the optical orientations
 (a): The optic axes (A and B), optic elasticity axes (X and Z), and crystallographic b axis are projected on the plane perpendicular to the c axis, based upon data of Tsuboi *et al.* (1977). H is the pole of composition plane. The ways of ϕ and λ coordinate angles are shown.
 (b): Stereogram after rotation to put the pole on the vertical great circle. The extinction angle at S1 is $90 - (\alpha_1 + \beta_1)/2$ and that at S2 is $90 - (\alpha_2 + \beta_2)/2$. X' indicates the vibration direction of the faster light-wave.

を接合面とする双晶を問題としている場合、b 軸からの回転角 R で消光角を与えておくと便利である。すると

$$\phi S = R + \phi b \dots\dots\dots(5)$$

3.3 消光角の計算

任意の R の値について、表計算ソフトの同じ列で順に入力、計算、選択して消光角を求めた後、R と消光角の関係をグラフ機能を利用して消光角変化曲線を求めてみる。

(a) 入力

(4)の光学的方位データの入力。R の入力、例えば、 0° から 180° を 5° おきにあらかじめ入力しておく。 ϕS を (5) から求める。

(b) 計算

(2)及び(3)式をあらかじめ入力しておく、表計算ソフト上で計算して、 $\cos \angle ASH$ と $\cos \angle BSH$ を求める。なお、通常の表計算ソフトでは三角関数にラジアンを用いるので、(a)で入力された角度をラジアンに直して計算することに注意する。

acos 関数で $\angle ASH$ と $\angle BSH$ を求める。acos 関数は 0 から π (0° から 180°) の範囲で値を与えるので、 $(360^\circ - \angle ASH)$ と $(360^\circ - \angle BSH)$ も同時に求めておく。それは第2図 b の S2 の例からわかるように、角度が連続的に変化するようにすると、 0° から 180° の範囲では表現できないからである。このように投影図などを参照しながら、 $\angle ASH$ か $(360^\circ - \angle ASH)$ を選択したものを α , $\angle BSH$ または $(360^\circ - \angle BSH)$ を β とする。

(c) 消光角の決定

(b)で得た結果から消光角 δ は(1)式により

$$\delta = 90 - (\alpha + \beta)/2$$

この消光角が X' か Z' なのかは、光軸 A と B の間に光学的弾性軸の X があるのか Z があるのかによる(第2図 b 参照)。通常の観察では、消光角は 90° 未満をとるが、計算で求めた消光角は 90° を超えることがある。そこで δ の他に、 $\delta + 180$, $\delta - 180$, $\delta + 90$, $\delta - 90$ も表示して選択できるようにする。これまで使われている消光角変化曲線にない、X' で 90° 未満の消光角 D を選ぶ。

以上のようにして、b 軸からの角度 R における消光角 D を得ることができる。表計算ソフトのグラフ機能を利用して、R を横軸に、D を縦軸にとった散布図が菱形断面や (001) 面に垂直な薄片での消光角変化曲線である。なお、今回筆者はマッキントシュ (Mac Os 8.6) 上にて表計算ソフト Microsoft Excel 98 を用いた。

3.4 両双晶片の消光角変化曲線

3.3で結晶単体の消光角変化を求めることができた。双晶の種類により、双晶個体の両結晶片がどのような方位関係で接しているかが決まるので、他方の双晶片の消光角の変化が一義的に決まる。

(a) ペリクリン双晶

接合面が菱形断面、双晶軸は b 軸でこの場合双晶軸は接合面上にある(平行双晶)。そのために、上で求めた b 軸からの角度 R における双晶片(1)の消光角 D に対して、

Fig. 3 a

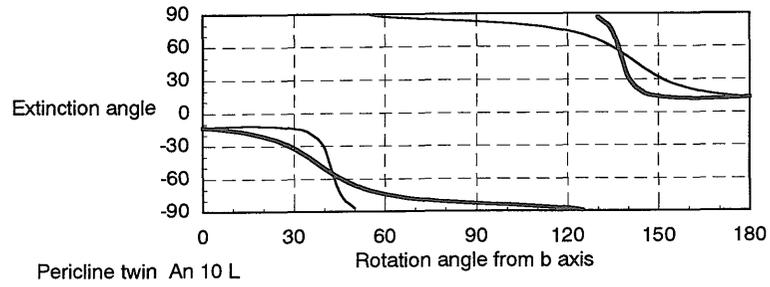
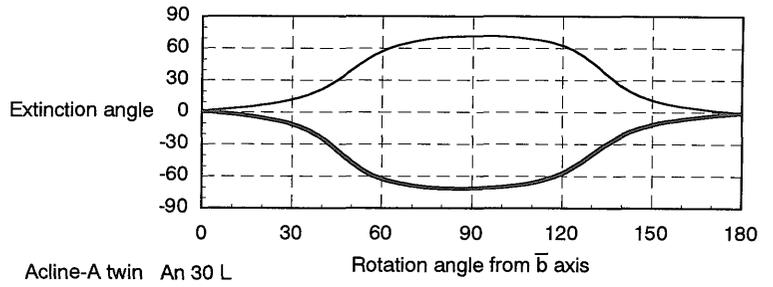
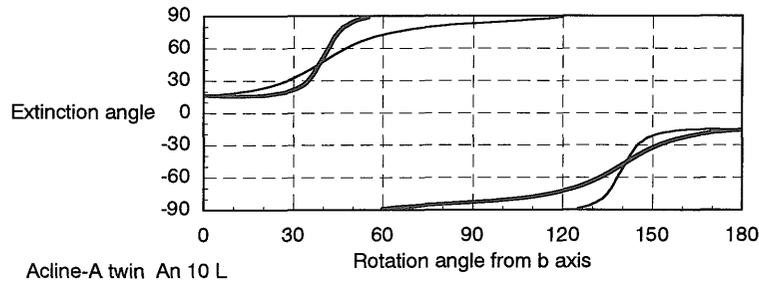
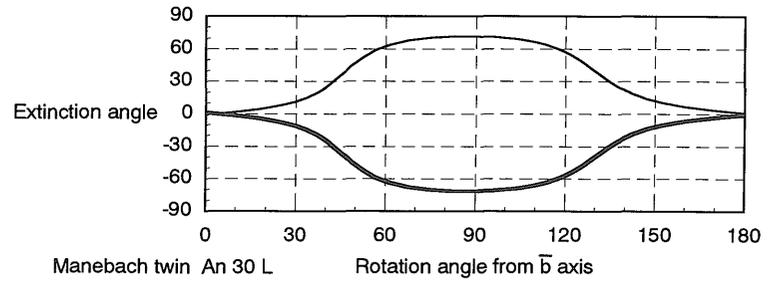
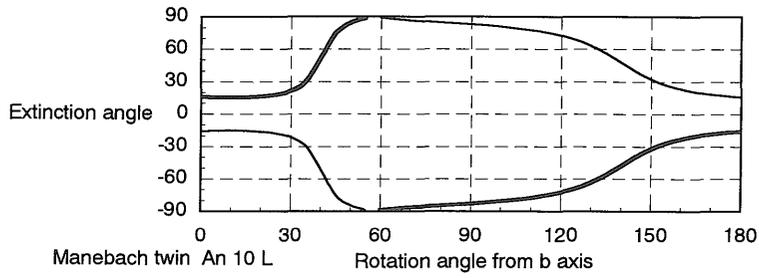
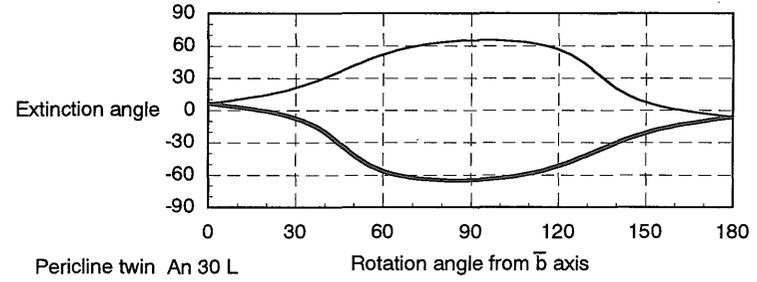


Fig. 3 b



第3図 低温型斜長石 (a; An 10, b; An 30, c; An 50, d; An 70, e; An 90) におけるペリクリン双晶, マネバツハ双晶, アクラリン A 双晶の接合面に垂直な薄片での両双晶片の消光角 (X') の変化曲線. 太線: オリジナル結晶 (結晶軸 b または \bar{b} からの回転角 R に対応する消光角を示す). 細線: 双晶関係にある結晶.
 Fig. 3 Variation curves of extinction angles X' of the adjoining twinning lamellae with composition planes perpendicular to the thin section. For low-temperature plagioclase (a; An 10, b; An 30, c; An 50, d; An 70, e; An 90) twinned after the pericline, manebach, and acline-A laws. Thick line: for original crystal, showing extinction angle at rotation angle from b or \bar{b} axis. Thin line: for twinned crystal.

Fig. 3 c

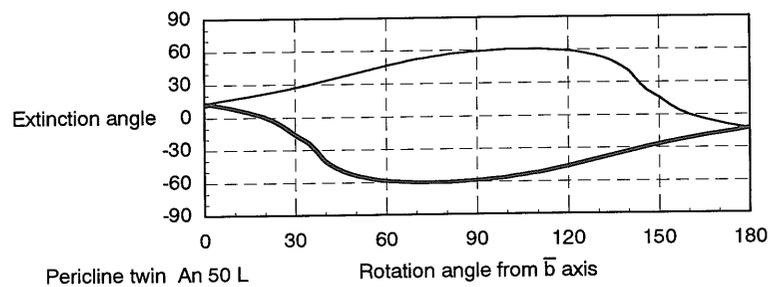
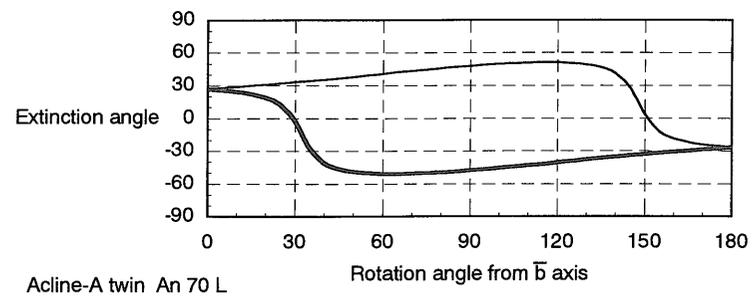
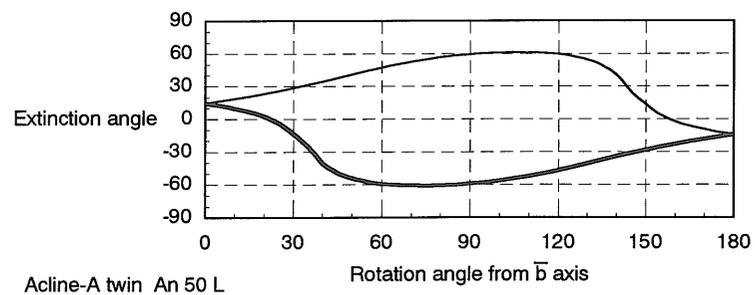
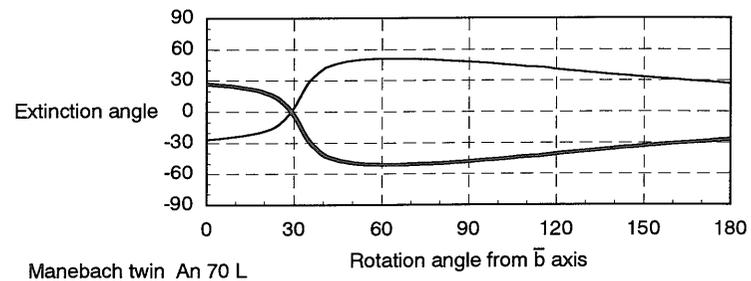
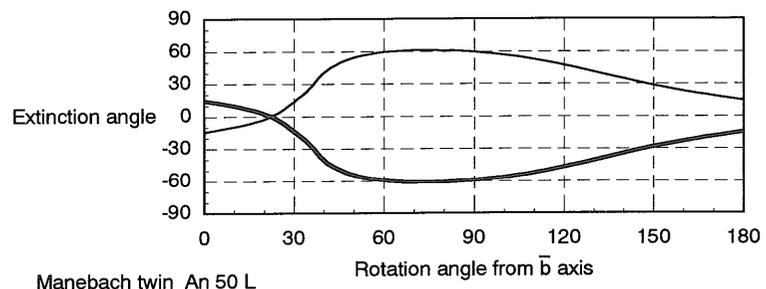
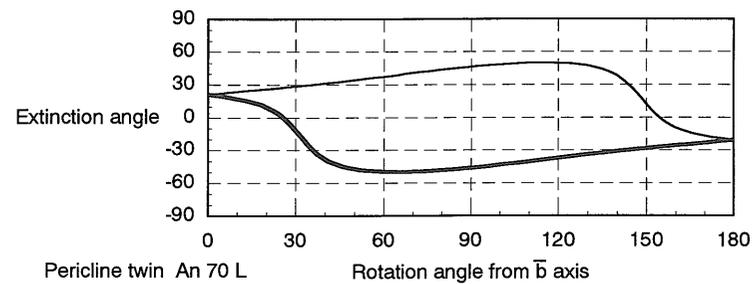
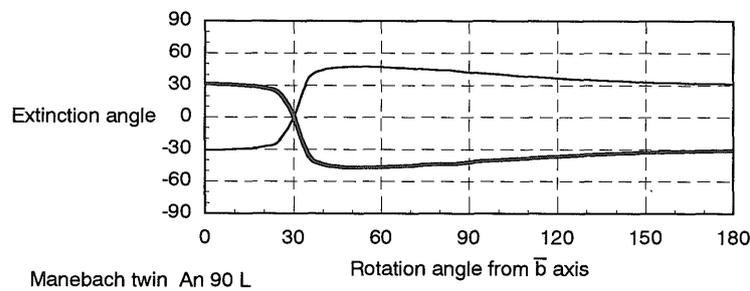
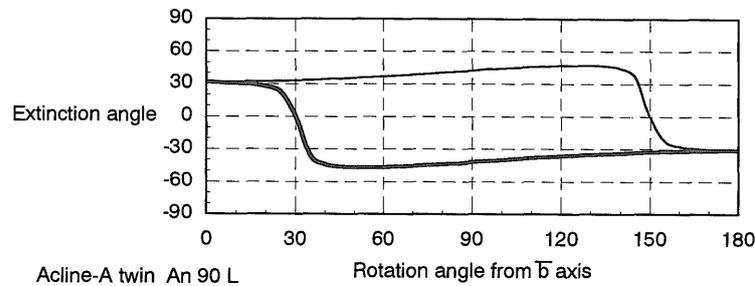
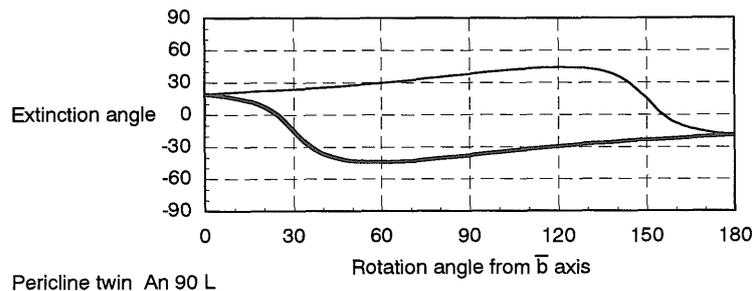


Fig. 3 d



第3図 つづき
Fig. 3 continued

Fig. 3 e



第3図 つづき
Fig. 3 continued

一方の双晶片(2)の消光角 D' は、双晶片(1)の180-Rにおける消光角と同じである。双晶片(1)の消光角 D の行で、 b 軸からの角度が180-Rにおけるセルが、Rにおける双晶片(2)の消光角 D' になるようにしておけばよい。このようにして、横軸をRとして消光角 D と D' の変化を表した図が、ペリクリン双晶の両双晶片の消光角変化曲線である。

(b) マネバッハ双晶

接合面が(001)面、双晶軸はこの面に垂直である(垂直双晶)。したがって双晶片同士は対称消光となる。そこで双晶片(1)の消光角が D なら、一方の双晶片(2)は $D' = (-1) \times D$ となる。

(c) アクライン A 双晶

接合面が(001)面、双晶軸は b 軸である。ペリクリン双晶と全く同様にしてもう一方の双晶片(2)の消光角 D' を求めればよい。

以上のようにして求めた低温型斜長石 An 10, 30, 50,

70, 90組成におけるペリクリン双晶、マネバッハ双晶、アクライン A 双晶の両双晶片の消光角変化を第3図に示した。

5. あとがき

今回提示した消光角変化曲線と Suwa *et al.* (1974) が示した(010)面を接合面とする双晶の消光角変化曲線は、天然の岩石、とりわけ深成岩や変成岩に出現するほとんどの双晶を網羅する。双晶を識別するだけでなく、組成によっては光学的な区別が困難な双晶型も知り得る。これらに含まれない双晶としてバベノ双晶があるが、その接合面が(021)か(0 $\bar{2}$ 1)であるため、接合面を垂直にすると(001)と(010)の劈開線の四角形に接合面が対角に交わることで識別できる。

今回の消光角変化曲線と Tobi (1961) が示した消光角の図を比較すると、An10組成における菱形断面に垂直な

面での消光角の変化に違いがある。これは小論の3.1で言及した利用する結晶データの違いによる。今後、実際の観察も加えて、曲線の妥当性を検討したい。

謝辞 小論をまとめるにあたり、多くの方々にお世話になりました。日本福祉大学諏訪兼位教授及び山形大学蟹澤聡史教授からは結晶光学的な御指導をいただきました。地質調査所北海道支所の太田英順支所長及び地質標本館の奥山康子博士からは、原稿の改善に御教示をいただきました。ここに記してお礼申し上げます。

文 献

- Burri, C., Parker, R. L., und Wenk, E. (1967) *Die optische Orientierung der Plagioklase*. Birkhauser Verlag, Basel, s. 334. (坪井ほか, 1977 から引用)
- Gorai, M. (1951) Petrological studies on plagioclase twins. *American Mineralogist*, **36**, 884-901.
- 黒田吉益・諏訪兼位 (1983) 偏光顕微鏡と岩石鉱物 第2版. 共立出版, 343p.
- Suwa, K. (1978) Plagioclase twinning in Precambrian anorthosites. *The National Geographical Journal of India*, **24**, 107-120.

- Suwa, K., Mizutani, S. and Tsuzuki, Y. (1974) Proposed optical method of determining the twinning laws of plagioclase. *Memories of the Geological Society of Japan*, no. 11, 167-250.
- Takahashi, Y., Tainosho, Y., Osanai, Y. and Tsuchiya, N. (1997) Relationship between geological occurrences and twinning laws of plagioclase in granitic and metamorphic rocks in the Sør Rondane Mountains, Antarctica. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **48**, 305-312.
- Tobi, A. C. (1961) The recognition of plagioclase twins in sections normal to the composition plane. *American Mineralogist*, **46**, 1470-1488.
- 坪井誠太郎 (1959) 偏光顕微鏡. 岩波書店, 294p.
- 坪井誠太郎・水谷伸治郎・諏訪兼位・都築芳郎 (1977) 斜長石光学図表. 岩波書店, 175p.
- Winchell, A. N. and Winchell, H. (1951) *Elements of Optical Mineralogy, part II Descriptions of Minerals (4th ed.)*. John Wiley and Sons, 551 p.

(受付: 2000年4月14日; 受理: 2000年5月29日)