

斜長石双晶法の再検討とその地質学的応用

高橋裕平*

TAKAHASHI Yuhei (1995) Petrological revision and geological application for plagioclase twinning method. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 46 (10), p. 527-536, 6figs.

Abstract: Feldspars are the most abundant minerals in the earth's crust and have often recorded important information on plutonism and metamorphism. In this paper, I show the method of determining the plagioclase twinning law and the usefulness of the law in geology and petrology.

The practical method of determining the twinning law is as follows. The composition plane should be firstly determined by referring to the optical relationship between the composition plane and the optical elastic axis. The twinning laws having the composition plane (010) can be determined by measuring the extinction angle in the zone perpendicular to (010). In the case of the plane being (001) or rhombic section, if twinned plagioclase is a simple twin and shows symmetrical extinction, the twinning is identified as Manebach law. Twinned plagioclase not showing symmetrical extinction is identified as pericline twin. The frequencies of the pericline twin and C twins (all the other laws except albite and pericline laws) are useful for discussing geological settings.

In the plagioclase twinning laws of Ryoke metamorphic rocks, the frequency of the pericline law is locally variable. This variation may have resulted from local variations in shear stress. The pericline law was mostly produced by forceful intrusion of the granitic body.

In the granitic rocks of Sør Rondane Mountains in East Antarctica, the frequency of C twins increases with order of the migmatitic granitic body, the concordant stock, the discordant stock, and small intrusive bodies such as dikes and sills.

Mode of plagioclase twinning is also examined in the Chilas complex and Kohistan batholith in Pakistan. Frequency of C twins is mostly 10 to 20% in tonalite and granodiorite of the Kohistan batholith. The frequency of C twins in the Chilas complex is low (0 to 5%) in the eastern and high (20 to 30%) in the central areas. This variation may have resulted from a difference in the erosion level of the complex.

要 旨

斜長石双晶の実用的な光学的同定法を紹介し、その上で変成岩深成岩地域で斜長石双晶の記載が地質学的に重要であることを示した。

従来から多くの斜長石双晶同定法があるが、それらを整理して実用的な手法を提案した。まず結晶面と光学的弾性軸との結晶学的方位関係を利用して双晶の接合面の

種類を決定する。その上で接合面の種類ごとに消光の変化を利用して双晶様式を決定する。このようにして決定された双晶種から変成岩や深成岩を地質学的に議論するために、従来から提案されているC双晶(アルバイト双晶及びペリクリン双晶以外の双晶)に加えてペリクリン双晶の頻度を用いた。

紀伊半島中央部の領家変成岩類ではペリクリン双晶の

Keywords: plagioclase, twinning, pericline twin, C twins, Ryoke belt, Antarctica, Kohistan

* 北海道支所

頻度に差がある。これは花崗岩類貫入時の運動による地域内の歪み速度の違いで説明できる。

東南極セールロンダーネ山地の花崗岩類は、変成岩類に調和的に貫入するものから非調和的なものへとC双晶が増加する。これはわが国の花崗岩類で指摘されたことが他の地域でも適用できることを示す。

パキスタン北部コヒスタン地域のコヒスタンバソリスのトータル岩及び花崗閃緑岩ではC双晶が多い。比較的浅所に貫入し、その後ほとんど変成作用を受けていないと考えられる。一方相接するチラス岩体の主体をなすガブロンライトではC双晶の頻度に幅がある。岩体貫入後に高度な変成作用を受けた部分と貫入岩としての性格を残す部分がともに現在地表に露出していると解釈できる。ペリクリン双晶の頻度は両者とも同程度であり、両岩体定置後の同一の変形作用によるものと解釈できる。

1. ま え が き

斜長石双晶様式と岩石学的性質との関係は、Gorai (1951) や Suwa (1956) などわが国の研究者を中心にして1950年代から1960年代にかけて多くの研究があった。現在では結晶光学的取扱いに関する研究はほぼ完成されているが、斜長石双晶と岩石の生成条件との関係については、双晶の成因が多岐にわたるために未解決の問題が多い。

Smith (1974) は、Gorai (1951) をはじめとしたいわば経験則というべきものを系統的に追試する必要性を指摘している。最近では様々な地域でテクトニクスの解析が進み、地殻断面を岩石学的にとらえることができるようになった。そこで新たな問題意識で斜長石双晶に着目する意義は深い。

小論では斜長石双晶の研究を略述し、岩石学的な視点を整理してみる。それに引続き筆者が用いている斜長石双晶決定法を示す。その上で実際の適用例として領家変成岩類、東南極の花崗岩類、コヒスタンの深成岩類における成果を紹介する。

2. 斜長石双晶の岩石学的研究略史

斜長石双晶様式を天然の岩石について調べる研究は、1930年前後から行われている(例えば、Smith, 1974のTable 18-5)。深成岩類や変成岩類を対象にした系統的な研究は1950年代から1960年代にかけて行われた。多くの研究の中、Gorai (1951) と Suwa (1956) の業績は世界的に評価されている。

Gorai (1951) はさまざまな岩石中の斜長石を検討した結果、斜長石双晶をU(無双晶)、A双晶(アルバイト双

晶及びペリクリン双晶)、C双晶(A双晶以外の双晶でカールスバド双晶がその代表)の3形式に分けた。この分け方を用いると変成岩中の斜長石はUとA双晶からなり、火成岩中の斜長石はC双晶を多量に含む。その後、Gorai (1965) はC双晶が溶液から結晶成長の過程で生じることを実験で明らかにして、C双晶が火成岩に多く含まれる(マグマから生じる)理由の一つとした。Gorai (1951) による分け方に基づき、多くの研究者が各地で深成岩や変成岩の斜長石双晶の研究を行い、当時の花崗岩成因論に大きな影響を与えた(例えば、外崎, 1956; 小倉, 1956)。一方、Suwa (1956) は紀伊半島中央部領家帯の変成岩類や花崗岩類を検討して、Gorai (1951) とはいくらか異なるが、やはり変成岩類と火成岩類を識別するのに有効な斜長石双晶様式のグループ分けを提案した。さらに領家変成岩では(010)面を接合面とする斜長石双晶が圧倒的に多いことも指摘している。接合面に関してはTobi (1961) も注目していて、接合面(010)面の頻度が岩石の生成条件により大いに变化する可能性を指摘している。その後、諏訪(1968)やSuwa *et al.* (1974) は、Tobi (1961), Naidu (1954), Suwa (1956, 1966) の成果から変成岩における斜長石双晶の接合面(010)面の頻度が、変成作用の温度の上昇とともに低くなると考えた。そのほか地球外物質の岩石についても斜長石双晶の研究が進められている(例えば、諏訪, 1980)。

一方、滑りにより生じる双晶に着目した研究が、主に構造地質学的側面から進められている。一般に双晶は成因的に結晶成長の過程で生じるものと変形作用に伴う滑りによるものに大きく分けられる。Smith (1974) によるとアルバイト双晶は成長過程でできる場合と機械的な変形によりできる場合があるが、ペリクリン双晶の多くは変形作用でできるらしい。例えばWenk (1969) の実験では、もともとアルバイト双晶だけからなる斜長石を高温高压(5-15 kbar, 800-1000°C)下におくとペリクリン双晶が新たに生じた。Borg and Heard (1970) は温度と封圧を制御した実験を行い、高温高压(800°C, 8-10 kbar)ではアルバイト双晶とペリクリン双晶を生じるが、それより低温低圧側ではカタクラスティックな変形構造か(010)面の滑りが観察されるに過ぎないことを報告した。Olsen and Kohlstedt (1985) はグリーンランドの高度成度のもとで変形した岩石の斜長石双晶を光学的な観察に加えて透過型電子顕微鏡観察も行い、アルバイト双晶の方がペリクリン双晶よりも小さい剪断応力下でできることを指摘した。このように現状ではペリクリン双晶はアルバイト双晶よりも高温で大きな剪断応力下でできるという考えが大勢である(Putnis, 1992)。

3. 光学的斜長石双晶決定法

3.1 概 説

斜長石双晶を光学的に決定する手法は、黒田・諏訪 (1983) に要領よくまとめられている。双晶片の光学的方位を丹念に求め接合面と双晶軸を決定する手法 (小川・春本, 1931), 通常の観察から U, A 双晶, C 双晶を分ける手法 (Gorai, 1951), 接合面を立て消光角の変化から双晶を決定する方法 (Suwa *et al.*, 1974), 任意面での消光角とその面と (010) 面の角度から双晶を決定する手法 (坪井ほか, 1977) がある。

小川・春本 (1931) の手法を要約すると、相接する双晶片の光学的弾性軸を求め、同名軸を通る 3 つの大円の交点で双晶軸を得る。その双晶軸と接合面や結晶軸との方位関係から双晶様式を決定する。この手法は双晶軸が接合面に平行なのか垂直なのかなど、各双晶様式の基本的な 3 次元的位置関係を理解する上でも有効である。しかしながら双晶様式決定に時間がかかり、筆者が目指しているような地域あるいは岩体ごとの傾向を知るような、ある程度数をこなさなければならない研究には不向きである。また、集片双晶では個々の双晶片が細かいため、複数の光学的弾性軸を正確に求めるなどの基本的な作業がしばしば困難となる。

Gorai (1951) の手法は、通常の観察で斜長石双晶の形態をいくつかのタイプにわけ、その上で C 双晶, A 双晶に区分する方法である。これは通常の観察で簡便に行えるため、岩石の傾向を見るのに有効である。この手法では具体的な個々の双晶の名称が決まらず、したがって接合面の情報を得にくい。また、無双晶の斜長石を多めに見積る可能性が高い。

Suwa *et al.* (1974) や坪井ほか (1977) の手法は、小川・春本 (1931) の手法のような多大な労力を必要とせず、少なくとも (010) 面を接合面とする双晶については個々の結晶について迅速かつ正確に双晶を決定できる。そのほかの接合面に関してはペリクリン双晶について消光角の変化から求める図が整理されている (Suwa, 1978)。

筆者は双晶様式決定にあたり、個々の結晶について双晶を決定でき、かつ、各試料ごとに統計的な議論ができる程度の迅速性を持たせるため、Suwa *et al.* (1974) を基本とした斜長石双晶決定法を用いた。以下に泥質変成岩や花崗岩類に含まれる斜長石を念頭に置き、低温型オリゴクレスーアンデシンの場合の決定法を紹介する。そのほかの斜長石を取り扱う場合、以下の解説に準じて接合面と光学的弾性軸との方位関係や Suwa *et al.* (1974)

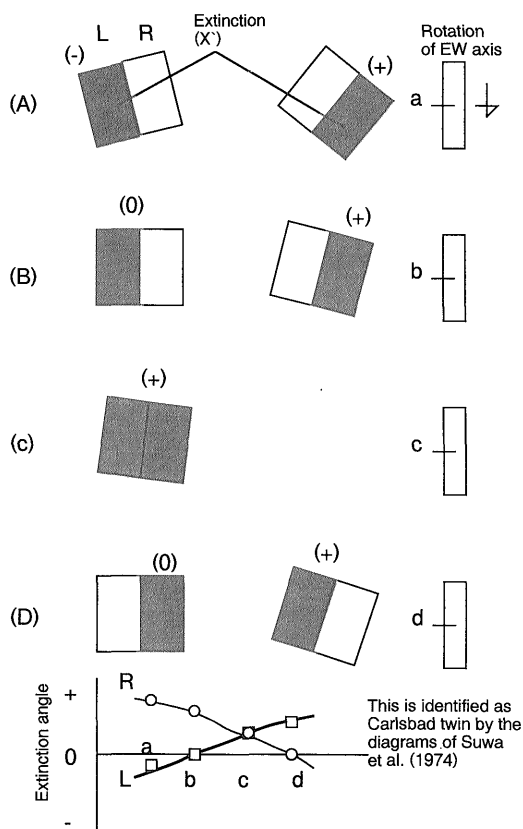
の図を適宜参照すればよい。

3.2 接合面の決定

接合面にほぼ直交する光学的弾性軸の種類により接合面の結晶学的方位が決定できる。Y 軸なら接合面は (001) 面か菱形断面, Z 軸なら (010) 面と判断できる。そのほかの接合面として (021) または (0 $\bar{2}$ 1) 面があるが、この場合、へき開面 (001) 及び (010) がともに薄片に垂直に交わってできたへき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 (Emmons, 1943)。

3.3 接合面が (010) の場合

Suwa *et al.* (1974) の手法を基本に双晶を決定する手法を述べる。この手法では、自在回転台を使い、(010) 面を視野の縦線に平行におき、南北軸回転で (010) 面を立てる。それから東西軸を回転しながら両双晶片の消光の変化を見ながら双晶を決定する。Suwa *et al.* (1974)



第1図 消光角の変化に基づく斜長石双晶決定の例
Fig. 1 Example of the method for determining plagioclase twinning based upon variation of extinction angles

はさまざまな組成について双晶様式ごとに両双晶片の消光の変化を図に示している。決定例を模式的に第1図に示した。実際の使用に際して対象とする組成範囲で消光の概略をまとめておくとうまい。低温型オリゴクレスーアンデシンの消光変化は次のようにまとめられる。この際視野の縦線を境にして消光位の符号を異なるものとする。

アルバイト双晶：東西軸を回転しても常に対称消光をする。

カールスバド双晶：An 15-20では2°位の違いはあるが、(010)のへき開線に関して対称消光をする。そのほかの低温型オリゴクレスーアンデシンでは双晶片の一方の消光角が0°になる位置から他方が0°になる範囲(2領域あるが90°未満の方)で両双晶片は同符号の消光位をし、その範囲を越えると異符号の消光をする。

アルバイト-カールスバド双晶：一方の消光角が0°になる位置から他方が0°になる範囲(2領域あるが90°未満の方)で両双晶片は異符号の消光位をし、その範囲を越えると同符号の消光をする。

アルバイト-アラB双晶：ほぼ対称消光をする。特にAn 25-35ではアルバイト双晶と区別は困難。そのほかの組成では、両双晶片が同時消光する位置がわずかに斜消光することでアルバイト双晶と区別がつく。Smith (1974)の解説によるとかつての論文(例えばSuwa, 1956)でアルバイト-アラB双晶とされているものの多くはアルバイト双晶と読み替えた方がいい。

アラB双晶：An 25-35では両双晶片は東西軸の回転の如何にかかわらず、常に同じ消光位にある。それ以外の組成でも消光位は大部分同符号側である。また同時消光する位置が最大消光角に近い。

3.4 接合面が(010)面でない双晶

接合面が(021)または(0 $\bar{2}$ 1)面であるときはバベノ双晶である。接合面が(001)面で単純双晶かつ接合面を立て自在回転軸の東西軸をどのように回転しても両双晶片が対称消光するとき、マネバツハ双晶と認定できる。接合面を立てたとき双晶の境界線がわずかな角度で(001)面の劈開線と斜交していれば、接合面を菱形断面と判断でき、ペリクリン双晶と認定できる。接合面(010)面の双晶と同じ様に接合面を立てて消光の変化から確認することもできる(Suwa, 1977)。ただし低温型アンデシンでは(001)面と菱形断面はほぼ一致するので(001)面を接合面とするアクライン双晶と菱形断面を接合面とするペリクリン双晶とは区別できない。

4. 応用例

今回用いた同定法で系統的に双晶の頻度を系統的に検討した研究はほとんど無く、従来の異なった手法や分類から得られている成果と比較しておく必要がある。またGorai (1951)の斜長石双晶様式の違いによる変成岩と火成岩の領域は、経験的な要素が強く異なる結果もある(Wenk, 1977)。ペリクリン双晶は室内実験では変形作用でできることが指摘されているが、天然では地質学的な状況から説明できるのかどうか。これらを踏まえて筆者は現在いくつかの地域で斜長石双晶様式を検討している。以下はそれらのうち一応成果としてまとめたものである。

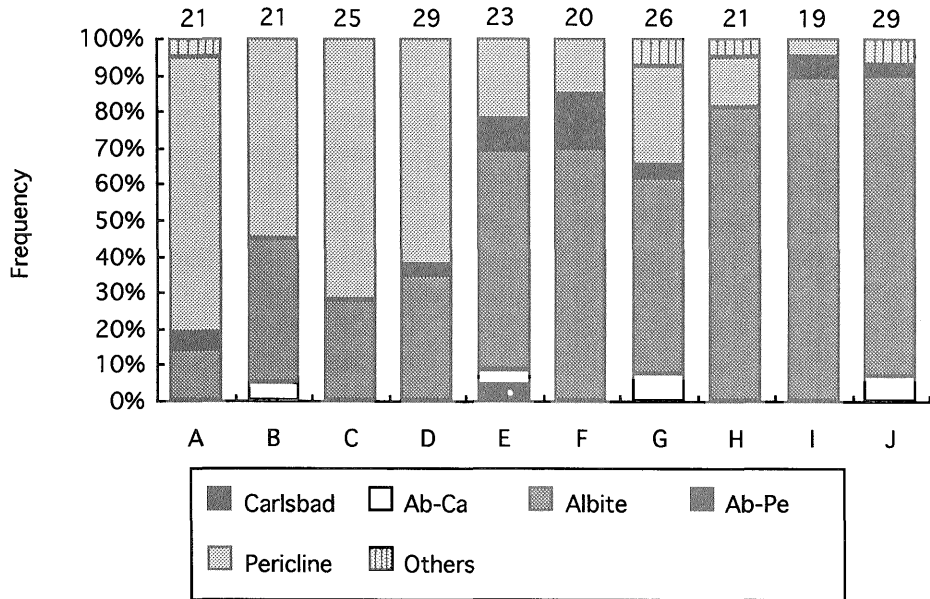
4.1 領家変成岩類におけるペリクリン双晶量の変化(高橋・西岡, 1994)

三重県津西部地域から上野地域にかけて分布する領家変成岩類を対象に斜長石双晶様式を検討した。この地域ではペリクリン双晶の頻度に多様性があり花崗岩類の貫入に伴う剪断応力の違いで説明できる。

本地域は砂岩泥岩起源の変成岩類を主としてチャート、石灰岩、塩基性火山岩を起源とする変成岩類を伴う(吉田ほか, 1995)。黒雲母やざくろ石をごく普通に含んでいて角閃岩相の変成作用を被っている。領家帯の新期花崗岩がこれらの変成岩類に貫入している。

変成岩類のうち、泥質(一部砂質)変成岩中の斜長石について双晶様式を検討した。その結果を第2図に示した。変成岩全体に言えるのはC双晶が双晶する斜長石中で5%以下でGorai (1951)やSuwa (1956)で指摘されている変成岩の特徴と大きくは矛盾しない。

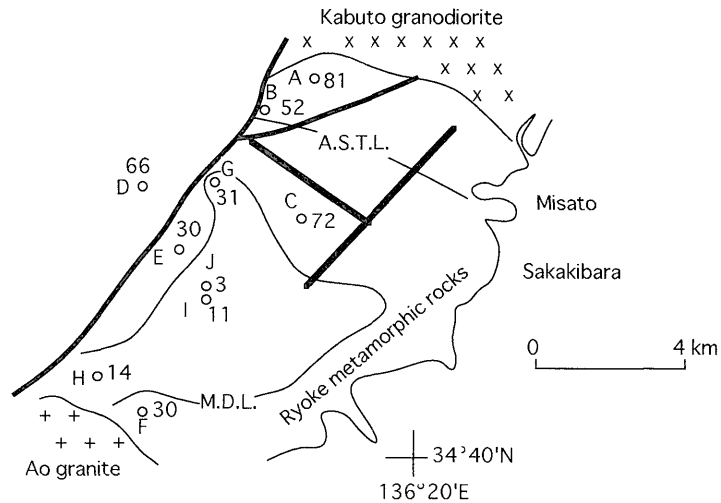
従来領家変成岩類では斜長石双晶の接合面は圧倒的に(010)面が多いとされていた。例えば紀伊半島の中央構造線近くの領家変成岩類における砂質及び泥質の変成岩中のAn 25-49の斜長石では、接合面(010)の双晶の頻度は89%である(Suwa, 1956; 諏訪, 1968)。言い換えると(010)面以外の双晶はほとんど含まれない。ところが本地域では、接合面が(010)ではないペリクリン双晶がしばしば産する。その量比は20%から80%と多様である。地域的には北側の花崗岩の近傍でペリクリン双晶の頻度が大きくなる(第3図)。この北側に分布する花崗岩体は、本地域では加太花崗閃緑岩と呼ばれているもので、Hara (1962)や桜井・原(1979)により、周辺の変成岩に変形作用を与えてそれ自身変形しながら貫入固結したとされている柳生花崗岩に連続するものである。すなわち対象とした変成岩類はこの花崗岩体の貫入により高温



第2図 三重県津西部地域の領家変成岩類中の斜長石双晶様式

Ab-Ca: アルバイト-カールスバド双晶, Ab-Pe: アルバイト-ペリクリン双晶. 各グラフの上の数字は測定試料数(第4, 5図も同様).

Fig. 2 Mode of plagioclase twinning law for the Ryoke metamorphic rocks in the west of Tsu, Mie prefecture
Ab-Ca: albite-carlsbad twin, Ab-Pe: albite-pericline twin. Numeral on each column is the number of measurements (the same also in Figs. 4 and 5).



第3図 津西部地域の領家変成岩類における斜長石双晶中のペリクリン双晶の頻度 (%)

A.S.T.L.; 紅柱石珪線石転移線, M.D.L.; 白雲母消失線. AからJは第2図のものに対応する.

Fig. 3 Frequency of pericline twin in twinned plagioclase of the Ryoke metamorphic rocks in the west of Tsu City

A.S.T.L., andalusite-sillimanite transition line; M.D.L., muscovite disappearance line. A to J correspond to them of Fig. 2.

下で変形作用があったと考えられる。このことと変成岩中のペリクリン双晶が花崗岩の周辺で多産することは、Wenk (1969) や Borg and Heard (1970) の実験で高温のもとで強い剪断応力をかけるとペリクリン双晶が生成することと調和する。変成岩の南側に別の花崗岩体が貫入しているが、その周辺ではペリクリン双晶はごくわずかである。この花崗岩体 (阿保花崗岩) は変成岩に変形を加えず貫入したのだろう。

4.2 東南極セールロンダネ山地の花崗岩類における C 双晶の変化 (Takahashi *et al.*, 1994)

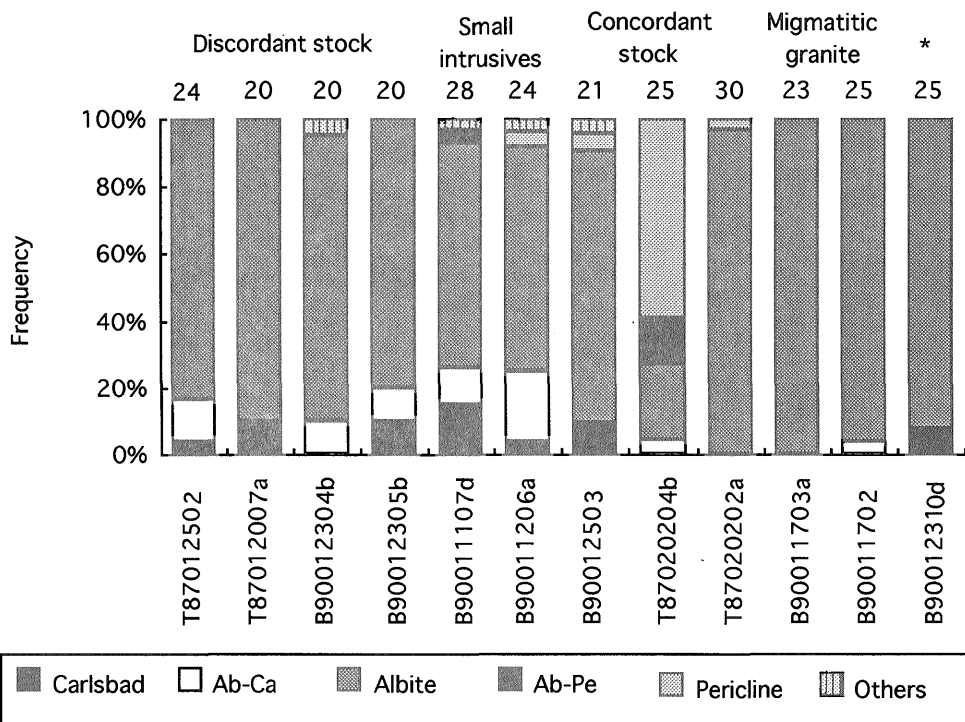
本山地は日本のあすか観測拠点の南側に四国ほどの面積にわたり露出する山塊である。9 億年前に変成作用のピークがあった上部角閃岩相からグラニュライト相にかけた片麻岩、9 億年前に貫入し現在は弱く変成しているトータル岩、そして 5 億年前これらに貫入した花崗岩類からなる (例えば, Shiraishi *et al.*, 1992)。このうち花崗岩類は様々な産状を呈するため、従来から斜長石双晶

について言われている経験則を再検討することも考慮して斜長石双晶の頻度を検討してみた。

対象とした花崗岩類は、産状からミグマタイト状花崗岩、調和的ストック、非調和的ストック、岩脈や岩床などの小規模貫入岩類からなる。このほか氷河に厚く覆われ僅かに露出するにすぎなくて産状がよくわからない岩体も対象とした。

第 4 図から C 双晶の頻度が、ミグマタイト状花崗岩 (0-4%)、調和的ストック (0-10%)、非調和的ストック (10-20%)、小規模貫入岩類 (25%) の順に高くなる。これは Gorai (1951) や Suwa (1956) の変成岩と関係が深そうな花崗岩類で C 双晶が少なく、明らかな貫入性の花崗岩類で C 双晶が多くなるという指摘とよく一致する。

ただし調和的ストックはやや説明が必要である。この岩体は石英モンゾニ岩と花崗閃緑岩を主として石英閃緑岩岩脈を伴う複合岩体である。このほか貫入性のチャーノカイトの報告もある (大和田ほか, 1992)。周囲の変成



第 4 図 東南極セールロンダネ山地の花崗岩類中の斜長石の双晶様式

* : 氷河におおわれていて産状不明の岩体

Fig. 4 Mode of plagioclase twinning law for the granitic rocks in the Sørlundane Mountains, east Antarctica

*: its geological setting is unclear due to glacier covering

岩との関係は観察される限り、変成岩の片麻面に調和的に分枝状花崗岩類が貫入している。石英モンゾニ岩のC双晶の頻度は10%、花崗閃緑岩のそれは4%、石英閃緑岩では全くC双晶を含まない。また花崗閃緑岩は片麻状構造を有するもので、本山地の花崗岩類の中で唯一ペリクリン双晶の頻度が74%と大きく、一連の花崗岩類とは異質のものかもしれない。

4.3 パキスタン北部コヒスタン地域の深成岩類 (Takahashi *et al.* 1994 and unpublished data)

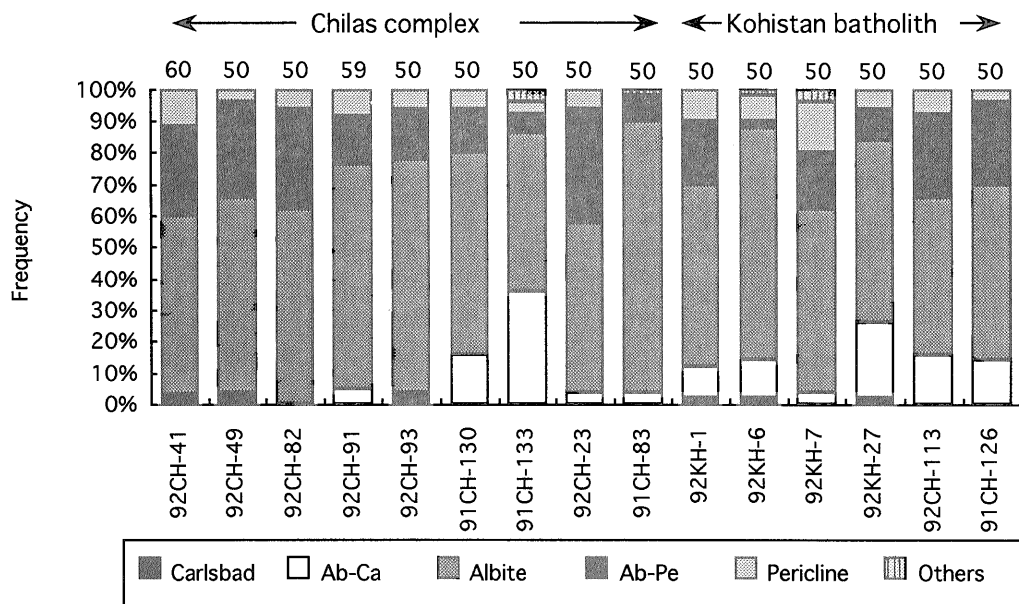
パキスタン北部コヒスタン地域は、地質学的に南縁をメインマントル衝上断層でインドプレートと接し、北縁をメインカラコラム衝上断層でユーラシアプレートと接する。したがってこの地域の岩石は、インド及びユーラシア両プレートの間にかけて存在した島弧や背弧盆の構成物と考えられている (例えば Coward *et al.*, 1982; Petterson and Windley, 1985)。

コヒスタン地域は、南側から北側へと巨視的には地殻の下部から上部が順に露出していると考えられている。すなわち、本地域は、南から順に高度に変成した苦鉄質-超苦鉄質岩類(ジジャール岩体)、しばしば剪断した角閃岩(カミーラ角閃岩)、超苦鉄質岩を伴う斑れい岩体(チ

ラス岩体)、花崗岩質バソリス(コヒスタンバソリス)、弱く変成した火山岩類(チャルト火山岩)、白亜紀の化石を産する地層(ヤシン層群)に区分できる。このうち筆者とその共同研究者はチラス岩体について地質学的岩石学的な調査研究を進めている (Kubo *et al.*, 1992)。

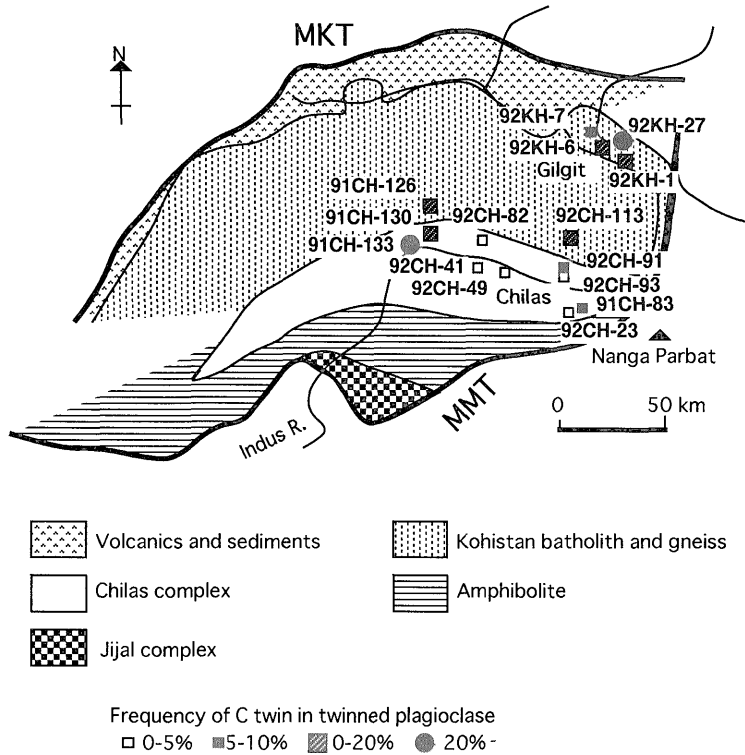
チラス岩体は白亜紀後期から古第三紀最前期にかけて放射年代を示す斑れい岩類(主にガプロノーライト)を主岩相として超苦鉄質-苦鉄質深成岩類を包有している。本岩体はカミーラ角閃岩に貫入して接触変成作用を与える火成岩的な産状を示す一方、グラニュライト相に達する変成作用を受けているという解析 (Jan and Howie, 1980)もある。ここで従来全く行われていなかった斜長石双晶の解析からこれらの解釈を検討してみた。

チラス岩体の主岩相(ガプロノーライト-閃緑岩)とトーナル岩及びコヒスタンバソリスの主岩相(非-弱変形のトーナル岩-花崗閃緑岩)についての解析結果を第5図に示す。コヒスタンバソリスでは大部分C双晶が10%以上で火成岩的性格を示す。これに対してチラス岩体は双晶の頻度に差がある。そこで地質図上でC双晶の頻度がわかるようにした(第6図)。岩体の東半分では主岩相であるガプロノーライト(一部閃緑岩質)とそれを貫く斜方輝石含有トーナル岩ともに、アルバイト双晶が



第5図 パキスタン北部、チラス岩体とコヒスタンバソリス中の斜長石の双晶様式
双晶の略号は第2図と同じ

Fig. 5 Mode of plagioclase twinning law for the Chilas complex and Kohistan batholith, northern Pakistan
Abbreviations are the same as in Fig.2



第6図 パキスタン北部, チラス岩体とコヒスタンバソリスの斜長石中のC双晶の頻度
 Fig. 6 Frequency of C twins in twinned plagioclase in the Chilas complex and Kohistan batholith, northern Pakistan

もっとも多く, アルバイトペリクリン複合双晶がこれに続く。カールスバド双晶やアルバイトカールスバド双晶はごく僅かである。すなわち, C双晶の頻度は3-5%と少なく変成岩的な性格を示す。一方, 岩体中央部では主岩相の閃緑岩及びガプロノライトには, アルバイトカールスバド双晶が多く含まれる。C双晶の頻度は20-30%と典型的な火成岩的な性格を示す。

このようにチラス岩体の斜長石双晶は, C双晶の頻度に違いがある。それは岩質の違いよりも場所による違いが反映していて, 貫入後高度な変成作用を受けた部分やまだ貫入岩としての性質を残している部分など, 様々な部分が現在露出していることで説明できるかもしれない。事実チラス岩体は初生構造から褶曲していて岩体の様々な部分が露出しているという指摘がある(Khan and Coward, 1990)。斜長石双晶の結果から解釈すると岩体の東側は比較的深部が露出しているが中央部は岩体上部が露出していて貫入岩的な性質が残っているのであろう。

このように斜長石双晶は, 野外の産状や鉱物化学から得られた平衡温度の意味付けに大いに有効であることがわかる。

5. あとがき

斜長石双晶の光学的同定法を解説し, 天然の深成岩や変成岩への応用例を紹介した。それらのまとめと波及効果や課題を以下に記す。

- (1) 光学的同定法として接合面が(010)や菱形断面の場合 Suwa *et al.* (1974) や Suwa (1978) による消光角の変化をみながら決定する方法が簡便でかつ信頼度が高い。
- (2) 領家変成岩では, 花崗岩体の周辺でペリクリン双晶の頻度が高くなることもある。これは別に構造地質学的に解析された結果や室内実験で双晶を形成した際の条件などから, 高温下で剪断応力が働いたためと解釈できる。
- (3) 南極の花崗岩類では変成岩に密接な産状を示す花崗岩体から非調和的に貫入する岩体へとアルバイト双晶及

びペリクリン双晶以外の双晶 (C双晶) の頻度が大きくなる。これはかつて牛来正夫やその共同研究者により指摘されていたことが他の地域でも適用できることを示す。

(4) これらを踏まえてパキスタン北部の深成岩類に適用した。このうちチラス岩体というグラニュライト相の变成作用を受けていると解釈されている一方、明らかに周囲の岩石に非調和的な貫入をなすガプロノーライトの岩体ではC双晶の頻度に幅が有り、变成岩的な性格と火成岩的な性格を示す地域に分けられる。この地域の地質構造の複雑さから岩体の中でも貫入岩としての性格を残している部分や貫入後变成作用を受けた部分など岩体の様々な部分が現在地表に露出していると解釈できる。

このように斜長石双晶は今日でも岩石学的解釈に有効な情報を与える。手法や機器の簡便さを考え併せると、筆者のような野外地質を拠り所とする者が、地殻断面と言われている様々な地域で变成岩や深成岩の産状を確認しつつ双晶データを体系的に整える価値はありそうである。また、このほか透過型電子顕微鏡などを応用するなどして、双晶が結晶成長の過程でできたものか変形によりできたものかなどもっと実証的な議論も必要であろう。

謝辞 本論文で対象とした岩石は、1/5万地質図幅「津西部」の調査研究、第28及び31次南極観測隊における地質調査、それにJICAパキスタン地質科学研究所プロジェクトの野外調査プログラムのそれぞれの過程で得られたものである。これらのプロジェクトで筆者と調査を共にされた皆様に御礼申し上げます。また多くの貴重な文献を紹介して下さった日本福祉大学諏訪兼位教授に感謝します。

文 献

- Borg, I. Y. and Heard, H. C. (1970) Experimental deformation of plagioclases. *In* Paulitsch, P. (ed.), *Experimental and Natural Rock Deformation*. Springer-Verlag, p. 375-403.
- Coward, M. P., Windley, B. F., Broughton, R. D., Luff, I. W., Petterson, M. G., Pudsey, C. J., Rex, D. C. and Khan, M. A. (1986) Collision tectonics in the NW Himalayas. *Geol. Soc. London, Spec. Pub.*, vol. 19, p. 203-219.
- Emmons, R. C. (1943) The Universal Stage. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, no. 8, 205p.
- Gorai, M. (1951) Petrological studies on plagioclase twins. *Amer. Mineral.*, vol. 36, p. 884-901.
- (1965) Twinning in some artificial plagioclases. *Indian Mineral.*, vol. 6, p. 51-54.
- Hara, I. (1962) Studies on the structure of the Ryoke metamorphic rocks of the Kasagi district, South-west Japan. *Jour. Sci. Hiroshima Univ.*, Ser. C, vol. 4, p. 163-224.
- Jan, M. Q. and Howie, R. A. (1980) Ortho- and clinopyroxene from pyroxene granulites of Swat, Kohistan, Northern Pakistan. *Mineral. Mag.*, vol. 43, p. 715-728.
- Khan, M. A. and Coward, M. P. (1990) Entrapment of an Intra-oceanic Island Arc in Collision Tectonics: A review of the structural history of the Kohistan arc, NW Himalaya. *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 17 (II), p. 1-8.
- Kubo, K., Sawada, Y., Takahashi, Y., Kausar, A. B. and Khan, T. (1992) Geological survey of the Chilas igneous complex in 1991 (Short Note). *Proc. Geosci. Colloquium*, vol. 3, p. 92-94.
- 黒田吉益・諏訪兼位(1983) 偏光顕微鏡と造岩鉱物 (第2版). 共立出版, 343 p.
- Naidu, P. R. J. (1954) Minerals of charnockites from India. *Diss. Basel und Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.*, vol. 34, p. 203-280.
- 小川琢治・春本篤夫(1931) 経緯鏡台に依る長石の識別法. 岩波講座, 75 p.
- 小倉義男(1956) 南部阿武隈山地竹貫地方にみられる角閃岩の花崗岩化作用. *地質雑*, vol. 62, p. 609-621.
- Olsen, T. S. and Kohlstedt, D. L. (1985) Natural deformation and recrystallization of some intermediate plagioclase feldspars. *Tectonophysics*, vol. 111, p. 107-131.
- 大和田正明・豊島剛志・白石和行・小山内康人・田結庄良昭・高橋裕平・先山徹・松本徂夫(1992) 東南極, セールロンダーネ山地中部の深成岩類. 松本徂夫教授記念論文集, p. 507-514.

- Petterson, M. G. and Windley, B. F. (1985) Rb-Sr dating of the Kohistan arc-batholith in the Trans-Himalaya of north Pakistan, and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 74, p. 45-57.
- Putnis, A. (1992) Introduction to mineral sciences. Cambridge Univ. Press, 457p.
- 桜井康博・原 郁夫(1979) 花崗岩組織の研究—とくに石英について—. 地質学論集, no.17, p.287-294.
- Shiraishi, K., Osanai, Y., Tainosho, Y., Takahashi, Y., Tsuchiya, N., Kojima, S., Yanai, K. and Moriwaki, K. (1992) Antarctic geological map series sheet 32 Widerøefjellet (1/100,000). NIPR.
- Smith, J. V. (1974) Feldspar Minerals 2 (Chemical and Textural Properties). Springer-Verlag, 690p.
- Suwa, K. (1956) Plagioclase twinning in Ryoke metamorphic rocks from the Mitsuemura area, Kii peninsula, central Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, vol. 4, p. 91-122.
- (1966) On plagioclases in metamorphic rocks from Lützow-Holmbukta Area, East Antarctica. *Proc. Japan Academy*, vol. 42, p. 1175-1180.
- 諏訪兼位(1968) 斜長石ノートーとくに斜長石双晶について—. 地球科学, vol.22, p.156-163.
- Suwa, K. (1978) Plagioclase twinning in Precambrian anorthosites. *The National Geographical Jour. India*, vol. 24, p. 107-120.
- 諏訪兼位(1980) 大和隕石および斜長岩のCa-斜長石. 岩鉱特別号, no.2, p.229-234.
- Suwa, K., Mizutani, S. and Tsuzuki, Y. (1974) Proposed optical method of determining the twinning laws of plagioclase. *Mem. Geol. Soc. Japan*. no. 11, p. 167-250.
- Takahashi, Y., Tainosho, Y., Osanai, Y. and Tsuchiya, N. (1994) Mode of plagioclase twin laws in the granitic rocks in the Sφr Rondane Mountains. *Proc. NIPR Sym. Antarct. Geosci.*, vol. 7, p. 180-182.
- , Takahashi, Yut., Kausar, A. B., Khan, T. and Kubo, K. (1994) Modes of plagioclase twinning in the Chilas Complex and Kohistan Batholith, northern Pakistan. *Proc. Geosci. Colloquium*, vol. 9, p. 51-58.
- 高橋裕平・西岡芳晴(1994) 三重県津西部地域, 領家変成岩の斜長石双晶様式. 岩鉱, vol.89, p.261-268.
- Tobi, A. C. (1961) Pattern of plagioclase twinning as a significant rock property. *Proc. Koninkl. Nederl. Akad. v. Wetenschap.*, Ser. B, vol. 64, p. 576-581.
- 外崎与之(1956) 日高帯猿留川流域における花崗岩質ミグマタイトについて. 地質雑, vol.62, p.449-463.
- 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, 175 p.
- Wenk, E. (1977) C-Zwillinge von Andesin in Cocco-Gneiss der Lepontinischen Alpen. *Schweiz. Mineral. Petrogr.*, vol. 57, p. 175-178.
- Wenk, H. R. (1969) Annealing of oligoclase at high pressure. *Amer. Mineral.*, vol. 54, p. 95-100.
- 吉田史郎・高橋裕平・西岡芳晴(1995) 津西部地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 136 p.

(受付:1995年9月6日;受理:1995年9月29日)