

斜長石双晶法再考—特にペリクリン双晶の重要性

高橋裕平¹

Yuhei Takahashi (2004) Plagioclase twinning method revisited with special reference to importance of pericline twinning. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 55(1/2), p.39 - 48, 4 figs.

Abstract: The author studied modes of occurrences on plagioclase twinning laws in various granitic and quartz-feldspathic metamorphic rocks, and revealed that frequencies of C twins (all twinning laws excluding albite and pericline laws) versus pericline twin are discriminative criteria of geological setting.

Plagioclase twinning law in the granitoids in Ryoke-Sanyo Belts shows wide range of C twin frequency (4-44%) with various pericline twin frequency (10-38%) (for short, RS type), and that in the granitoids in Hidaka Metamorphic Belt low to intermediate C twin frequency (0-20%) with wide pericline twin frequency (2-34%) (HD type). Range of these may be one discriminative area of plagioclase twinning laws for the granitic magmatism in subduction tectonics along continental margin or island arc. On the other hand, frequency of plagioclase twinning laws of some granitic rocks is out of this area. The area showing low frequency of pericline twinning law against various frequency of C twin has one possibility of relating to postorogenic or anorogenic magmatism within the continent.

Difference of these plagioclase twinning law frequencies, especially difference of frequency of pericline twinning law, is explained by various shear stress due to various viscosity of magma. The viscosity of magma is controlled by amounts of melt remaining during crystallization, and this difference of the melt amounts is caused from characteristic of magma related with various tectonics.

Low-grade metamorphic rocks (greenschist facies to low grade amphibolite facies) contain small amounts of pericline twinning law. High-grade metamorphic rocks (high-grade amphibolite facies to granulite facies) show low to moderate frequency of pericline twinning law. Sheared high-grade metamorphic rocks have abundant pericline twinning law. These results are conformable to the previous experimental results which show that pericline twinning law is mostly formed under shear stress and high-temperature conditions.

Keywords: plagioclase, twinning, C-twin, pericline, granitoids, metamorphic rocks

要 旨

さまざまな花崗岩類と石英長石質変成岩類について斜長石双晶を調べ、C双晶(アルバイト及びペリクリン双晶を除く双晶)とペリクリン双晶の頻度が地質学的な条件を識別するのに有効であることを論じた。

領家-山陽帯の花崗岩類の斜長石双晶頻度は、広い範囲のC双晶頻度(4~44%)に対して、ある程度(10~38%)のペリクリン双晶を含む(RS型)。日高変成帯の花崗岩類の斜長石双晶頻度は、低いし中程度のC双晶頻度(0~20%)に対して広い範囲のペリクリン双晶(2~34%)を含む(HD型)。これらの領域は大陸縁辺あるいは島弧の活動域における花崗岩類の斜長石双晶の特徴かもしれない。これに対して、これらの領域から外れるもののうち、さまざまなC双晶頻度にかかわらずペリクリン双晶をあまり含まない花崗岩類がある。一つの可能性として大陸内部の後-非造山性の火成活動を特徴づけるのかもしれない。

このような斜長石双晶頻度の違いのうち、特にペリクリン

ン双晶の頻度の違いは、マグマのさまざまな粘性によりもたらされた剪断応力の違いによって説明できる。マグマの粘性の違いは、結晶化作用時の残存メルトの量の違いからもたらされ、それはさまざまなテクトニクスに関係したマグマの特徴を反映している。

石英長石質の変成岩類のうち、低度の変成岩類(緑色片岩相から低度角閃岩相)では少量のペリクリン双晶を含む。これに対して高度の変成岩類(高度角閃岩相からグラニュライト相)では少量から中程度の量のペリクリン双晶を含む。剪断作用を受けた高度変成岩類は多量のペリクリン双晶を含む。これらは、高温下で剪断応力を受けるとペリクリン双晶を生じるという既存の実験結果から説明できる。

1. まえがき

斜長石双晶形式に関して約半世紀前に多くの研究が行なわれ、当時の地質学的諸問題、特に花崗岩成因論に寄与した(例えばGorai, 1951)。しかしながら、当時の花崗岩

¹地質情報研究部門(Institute of Geology and Geoinformation, GSJ)

成因論の主たる課題であった花崗岩化作用の議論が一段落つくとともに、斜長石双晶を詳細に検討することは少なくなってきた。一方で、天然にさまざまな斜長石双晶が存在するという厳然たる事実は依然としてあるわけで、近年における地質現象のグローバルな解析結果と絡めて斜長石双晶を新たな問題意識でとらえ直す意義がある。

筆者は国内外で深成岩や変成岩の地質調査を行うとともに、それらに含まれている斜長石の双晶を解析してきた。その一方、斜長石双晶同定手法の改良も行ってきた。小論ではこれまでに蓄積したデータに基づき、斜長石双晶と深成岩や変成岩の産状との関係をまとめた。

2. 斜長石双晶研究小史

既に斜長石双晶に関する岩石学的な研究史について高橋(1995)で略述した。今回はそれと一部重複するが、筆者が本論で提案しようとする内容に関する研究を振り返ってみる。

造岩鉱物としての斜長石についてその双晶を調べる研究は、1930年前後から行なわれている(例えば、Smith, 1974のTable 18-5)。深成岩類や変成岩類中の斜長石を対象とした系統的な研究は、1950年前後から1960年代にかけて盛んに行なわれた。

Gorai (1951)は自在回転台を用いない通常の観察、すなわち不定方位薄片上で斜長石双晶をA双晶(アルバイト双晶及びペリクリン双晶)とC双晶(A双晶以外の双晶、カールスバッド双晶など)に二分し、これにU(無双晶)を加えて岩型と斜長石双晶形式の関係を論じた。その結果によれば、A双晶は火成岩類と変成岩類の両者に普通に産する。一方、C双晶は火成岩類に産するが、変成岩類にはほとんどもしくは全く産出しない。

Suwa (1956)はGorai (1951)がC双晶と一括した双晶の中には変成岩に産するものがあることを指摘し、その上で新たな斜長石双晶形式のグループ分けを提案した。更に彼は領家変成岩類では(010)面を接合面とする斜長石双晶が圧倒的に多いことを指摘した。

Tobi (1962)は斜長石双晶を接合面が(010)のものとするでないもの、Gorai (1951)のA双晶のみを産するか、それともA双晶とC双晶の両者を産するかどうかを組合わせて、緑色片岩相の変成岩、角閃岩相の変成岩、火成岩類でそれらに特徴的に産出する斜長石双晶形式をまとめた。

諏訪(1968)はその当時までのデータに基づき、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。更にその頃までの研究で相対立あるいは矛盾するような結果について、ある種の斜長石双晶が化学組成や温度型によって光学的な同定が困難になることによると考えた。この斜長石双晶形式の光学的な同定法の問題点については、諏訪はその後共同研究者とともに系統的に説明した(Suwa *et al.*, 1974)。

このような天然の岩石を対象とするのみならず、斜長石双晶がどのような条件でできるかという実験も行なわれた。Gorai (1965)はC双晶が溶液から結晶成長する過程で生じることを明らかにして、C双晶が火成岩類に多く含まれる(マグマから晶出した斜長石に生じる)理由の一つとした。Wenk (1969)はアルバイト双晶だけからなる斜長石を5~15 kbarで840 °Cよりも高温条件下におくとペリクリン双晶も新たに生じることを示した。Borg and Heard (1970)はアルバイト双晶とペリクリン双晶が800 °C、8~10 kbar、歪み速度 $2 \times 10^{-5} \text{ sec}^{-1}$ で生じることを示した。

White (1975)の電子顕微鏡での斜長石結晶の観察によると、著しい変形で転位密度が大きな縁部にはアルバイト双晶及びペリクリン双晶が生じている。一方、変形が弱く転位密度の小さな核部には、アルバイト双晶は生じているがペリクリン双晶は認められない。Olsen and Kohlstedt (1985)は透過型電子顕微鏡観察から同様のことを認め、ペリクリン双晶がアルバイト双晶より大きな剪断応力下で形成したと解釈した。

以上のうちで実験で示された温度・圧力や歪み速度の値をそのまま天然に適用できないだろうが、ペリクリン双晶が変形でできる双晶の代表でかつアルバイト双晶形成よりも高温下の剪断応力下で形成されることは確からしい(Putnis, 1992)。

Tobi (1987)は長年の彼自身の蓄積や経験から天然に産する斜長石双晶や光学的同定法を整理するとともに、斜長石双晶と岩石型との関係をまとめた。このうち、小論の内容とは直接関係しないが、今後あらためて検証すべきと思われる内容が書かれているので参考のため略述する。すなわち、トロニエマイト、スピライト、ある種のはんれい岩ではアラA双晶が普通に産出すること、変成岩類に関して高压型のものではアクライン-ペリクリン双晶がアルバイト双晶の2倍かそれ以上の頻度で産するが、低压型の変成岩ではアルバイト双晶が圧倒的に産すること、弱変成の石灰岩やドロマイトでは自生鉱物としてアルバイト双晶が貫入関係を呈して産出する。

このように多くの先達の成果を踏まえた上で、高橋・西岡(1994)は地質図幅作成に伴う変成岩類の岩石記載の過程で、斜長石双晶に関して従来から言われてきたことと異なる結果を得た。それを端緒として、あらためて、高橋(1995)は地質学的背景が明らかになった地域で系統的に斜長石双晶を検討することを提案した。

3. 光学的斜長石双晶決定法

斜長石双晶決定法について高橋(1995)で解説したので本論では略述するにとどめ、その後筆者なりに改良した点を補足する。

斜長石双晶を光学的に決定する方法は、黒田・諏訪(1983)に要領よくまとめられている。すなわち、双晶片の光

学的方位を求め接合面と双晶軸を決定する手法(小川・春本, 1931), 通常の顕微鏡観察からU(無双晶), A双晶, C双晶に分ける方法(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方法(坪井ほか, 1977)がある。

筆者はこれらの手法を当初試行的に検討した。その結果, 個々の結晶について比較的迅速に双晶形式を決定するために, Suwa *et al.* (1974)を基本とした斜長石双晶決定法を用いることとした。この手法を利用するためにはあらかじめ両双晶片の消光角変化曲線を準備する必要がある。Suwa *et al.* (1974)には接合面が(010)の際の消光角変化曲線が示されているが, 筆者はさまざまな接合面についても利用できるように市販の表計算ソフト上で消光角変化曲線を求める手法を提案した(高橋, 2000a, 2001)。更にSmith (1974)やTobi (1987)を参考にして, 天然に産出する斜長石双晶を整理した上で実用的な斜長石双晶決定法を解説した(Takahashi, 2002)。

4. 花崗岩類及び変成岩類の斜長石双晶

4.1 対象と指標

筆者は各地の花崗岩類や変成岩類中の斜長石の双晶を記載してきた。斜長石の双晶形式の出現頻度は斜長石の化学組成にも依存するので, 変成岩類で対象としたのは花崗岩類に含まれるものと似たような斜長石からなる砂岩泥岩起源の岩石である。すなわち主に低温型のオリゴクレス及びアンデシンについて検討した。このような斜長石では, ペリクリン双晶とアクライン双晶の接合面がほぼ一致するため, 両双晶の区別は困難である。以下でペリクリン双晶として記述したものはアクライン双晶も含む。アルバイト双晶とアルバイト-アラB双晶の識別も困難であるが, アルバイト-アラB双晶は天然にはあまり産出しならしい(Tobi, 1987)。

以上を前提として, 花崗岩類や変成岩類の斜長石双晶に基づき地域間の比較を行ったりするために, どのような指標を用いるか述べる。

アルバイト双晶やペリクリン双晶(アクライン双晶を含む)を総称するA双晶は, 火成岩類及び変成岩類両者にごく普通に産する。このうちのペリクリン双晶は, 研究小史で触れたように, また後でたびたび論じるように高温下で剪断応力を受けたような条件で大量に生じている。そこで, ペリクリン双晶の産出頻度はある温度以上の変形条件の一つの指標となると考えることができる。

カールスバッド双晶やアルバイト-カールスバッド双晶などを総称するC双晶は, 火成岩類によく出現するが変成岩類には一般にほとんど出現しない(Gorai, 1951)。また, C双晶の出現頻度は斜長石のAn組成の増加とともに大きくなる(Gorai, 1951)。そこでさまざまな場所で得られた花崗岩類

を比較するのに, 化学組成の似た斜長石を含む花崗岩類で比較する必要がある。それは通常モード組成の似た花崗岩類で比較することになるが, 各地で同質の花崗岩類に限定していくのは比較する試料数に限界があり, あまり現実的ではない。そこである地域内で地質調査の折りに無作為に採集した試料の斜長石双晶頻度を求めた。この場合, 広く花崗岩類とするとトータル岩・花崗閃緑岩・狭義の花崗岩となり, 低温型のオリゴクレスとアンデシンが対象となる。Gorai (1951)によると, 例えば, An組成が30%と50%で斜長石のC双晶頻度は平均して15%程度の違いがあるが, それを理解の上, 各地(帯)を比較することとなる。

変成岩類ではC双晶の頻度が問題とならないことが多いが, 後で論じるように, 変成岩類によっては無視できない位C双晶を含むことがある。

以上から花崗岩類と変成岩類の斜長石双晶を論じるために, ペリクリン双晶の頻度とC双晶の頻度を指標とした。なお, ここでペリクリン双晶としたものはペリクリン双晶を生じている結晶の総数で, ペリクリン双晶単独からなるもの, アルバイト双晶やアルバイト-カールスバッド双晶にペリクリン双晶が重なっているものを合わせた数である。

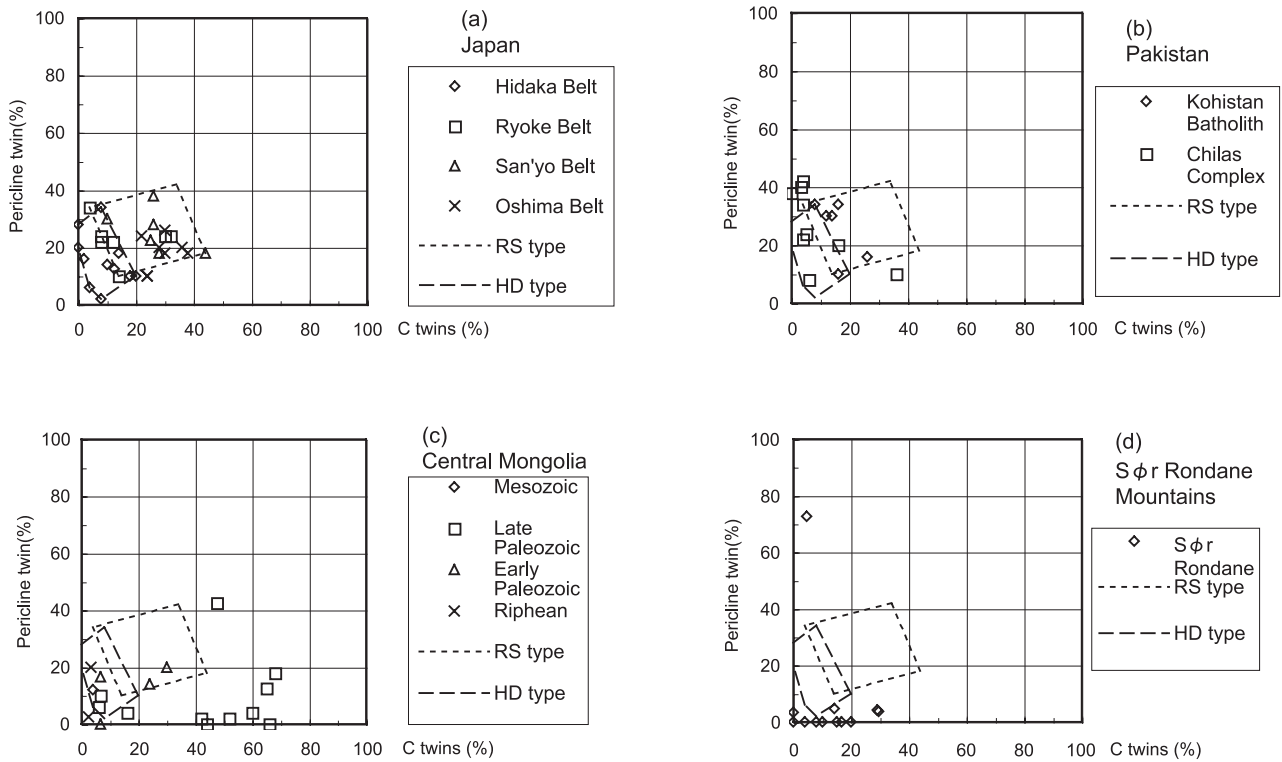
4.2 花崗岩類

4.2.1 領家-山陽帯の花崗岩類(高橋, 1999)

近畿地方中東部の後期白亜紀花崗岩類のうち, 領家帯の花崗岩類は領家変成岩類の構造に調和的な形態を呈して貫入しているもの("古期"花崗岩)及び変成岩類の構造を切って貫入している非調和的なもの("新期"花崗岩)からなる。山陽帯の花崗岩類は丹波帯の中生界に非調和的に貫入し, それらに明瞭な接触変成作用を及ぼしている。領家変成岩類から非変成の中生界及びそれらに貫入する白亜紀花崗岩類が分布する地域は, ユーラシア大陸縁辺の白亜紀地殻断面を表していて, 広域的な変成作用や火成活動は海嶺の沈み込みで説明されている(Nakajima, 1994)。

近畿地方中東部領家-山陽帯の花崗岩類の斜長石双晶は, C双晶の頻度が4%から44%, ペリクリン双晶の頻度が10%から38%である(第1図aの四角及び三角印)。高橋(1999)では領家帯のいわゆる古期と新期の花崗岩類の間で斜長石双晶に関して有意な違いが認められなかった。今回, 領家帯の花崗岩類を一括して示した。その一方, 古期と新期を一括した領家帯の花崗岩類と山陽帯の花崗岩類では違いが認められ, C双晶の頻度が20%未満のもの大半は領家帯の花崗岩類で, 20%を越えるものの過半は山陽帯の花崗岩類である。Nakajima (1994)に従えば, 白亜紀の地殻断面で領家帯から山陽帯にかけては地殻の下部から上部に当たるとされているので, 上記の花崗岩類中の斜長石双晶の変化は地殻下部から上部の変化を示していると言い換えることができる。

C双晶頻度(%)をX座標, ペリクリン双晶頻度(%)をY座標



第1図 花崗岩類の斜長石双晶頻度図

Fig. 1 Frequency diagrams of plagioclase twinning laws for the granitic rocks

で表した図中で(14,10), (44,18), (4,34), (34,42)を結んだ四辺形の領域に,ここで示した近畿地方中東部の領家-山陽帯花崗岩類の斜長石双晶が全て収まる(第1a図).これを領家-山陽帯花崗岩類斜長石双晶型(以下簡単のためにRS型)としてほかの地域との比較に使う。

4.2.2 日高変成帯の花崗岩類(高橋, 1999)

北海道中軸部に分布する日高変成帯は,オフィオライトからなる西帯と島弧もしくは大陸性地殻からなる主帯に分けられる。日高変成帯主帯に貫入している第三紀花崗岩類は,変成岩類の深度(変成度)に対応して細分されている(志村, 1992)。すなわちグラニュライト相から角閃岩相の変成岩類に貫入している下部花崗岩類(トータル岩が主),それよりもやや浅い場で中程度の変成度の変成岩類に貫入している中部花崗岩類(トータル岩-花崗閃緑岩),弱変成岩類ないし非変成堆積岩類に貫入している上部花崗岩類(花崗閃緑岩-花崗岩)に分けられる。下部-中部花崗岩類は調和的な貫入形態をなし,その不均質な岩相からミグマタイト(Kizaki, 1964)とも呼ばれていたものである。

日高変成帯の花崗岩類全般を通して, C双晶頻度は0~20%, ペリクリン双晶頻度は2~34%である(第1図aで菱形印)。今回の図では煩雑になるので一括した記号で示しているが, 高橋(1999)でC双晶頻度が5%未満の岩石は中-下部花崗岩類, 5%を越えるものは一部中-下部花崗岩類もある

が, 過半は上部花崗岩類であることを指摘した。対象試料では斜長石のAn組成はおおむね25~30モル%である。下部花崗岩類(トータル岩)では40モル%とAn組成が高くなるがC双晶をほとんど含まない。すなわち, 中-下部花崗岩類に対して上部花崗岩類では斜長石のC双晶は有意に多くなり, 領家-山陽帯で論じたと同様に, 地殻の下部から上部への花崗岩類中の斜長石双晶の変化と言える。ただし日高変成帯の花崗岩類は総じて領家-山陽帯の花崗岩類よりも斜長石のC双晶頻度は小さい。

図中の(0,28), (8,34), (20,10), (8,2), (4,6), (0,20)で囲まれた範囲を日高変成帯の花崗岩類斜長石双晶型(略してHD型)として, 領家-山陽帯花崗岩類と同様に他の地域との比較に使う。RS型とHD型の両者を併せたものは, 地質学的に大陸縁または島弧の活動域の地殻下部から上部に定置した花崗岩類の斜長石双晶の特徴と解釈できる。

4.2.3 渡島帯の花崗岩類(高橋, 2000b)

西南北海道渡島帯に分布する後期白亜紀花崗岩類の今金花崗岩類を扱った。今金花崗岩類は渡島帯の中古生界である泊川層群に非調和的に貫入して, それに接触変成作用を及ぼしている。一般に西南北海道の白亜紀花崗岩類は, 北上帯や阿武隈帯の白亜紀花崗岩類とともに西向きプレートの沈み込みに伴う大陸縁辺部の火成活動によるものと位置づけられている(土谷ほか, 1986)。

今金花崗岩類の斜長石双晶は, C双晶頻度が22%から38%, ペリクリン双晶頻度が10%から26%である(第1図aのx印). これらの値はRS型の範囲にほぼ収まり, 特にC双晶頻度が大きく山陽帯の花崗岩類とよく似た斜長石双晶頻度を示す.

4.2.4 コヒスタン地域深成岩類(Takahashi *et al.*, 1996)

パキスタン北部コヒスタン地域は, インド及びユーラシア両プレートの間にかつて存在した島弧や背弧盆の構成物と考えられている(Coward *et al.*, 1986). 本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(Tahirkheli *et al.*, 1979). このうち, チラス岩体は後期白亜紀から最前期古第三紀にかけた放射年代を示すはんれいノークライトを主として, 地殻下部を構成すると考えられている. コヒスタンバソリスは後期白亜紀から古第三紀に至る放射年代が得られていて, 変形の度合いなどから細分される(Petterson and Windley, 1985). はんれい岩から優白質花崗岩まで幅広い岩質を呈するが, 石英閃緑岩から花崗閃緑岩に至る岩質が卓越する.

チラス岩体の斜長石双晶は, C双晶頻度が0%から36%, ペリクリン双晶頻度が8%から42%である. おおむねRS型から外れるが, HD型に一部入る(第1図bで四角印). Takahashi *et al.* (1996)はこの岩体のC双晶頻度の多様性を岩体の侵食レベルの違いによると解釈した. グラニュライト相に達する変成作用を受けていてC双晶頻度が小さい(5%未満)地域は, 岩体の中央部にまとまっていて岩体の深部が露出していると考えた. 一方, 角閃岩に非調和的に貫入しているなどの貫入岩としての性質が残っている部分では, C双晶頻度が大きく岩体の上部が露出していると解釈できる.

コヒスタンバソリスのうち, 暁新世から始新世の弱変形から非変形の花崗閃緑岩を主とする岩体の斜長石双晶を調べた(第1図bで菱形印). C双晶頻度は8%から26%, ペリクリン双晶頻度は10%から34%の範囲で, RS型に収まる.

4.2.5 モンゴル中央部の花崗岩類(Takahashi *et al.*, 1998)

モンゴル中央部は, 先カンブリア時代の片麻岩類, 前-中期古生代の付加堆積物が帯状配列している. これらにリフェアン(中期原生代), 古生代, それに中生代の花崗岩類が貫入している. リフェアンの花崗岩類はロデイニア超大陸内部の火成活動と位置づけられる. 前期から中期古生代のモンゴルの花崗岩類は, 一般にシベリア地塊と北中国地塊の大陸縁辺あるいは両地塊間の当時の古アジア海に分布した島弧の火成活動である. その一方, 中生代の花崗岩類は海域が閉じる直前か閉じた後の大陸内部の火成活動である. 後期古生代は, 島弧の場合から両地塊間の海域(モンゴル-オホーツク海)が閉じていく時期で, 花崗岩類の地質学的位置付けの見解が分かれるところである. 例えば, Badarch *et al.* (2002)によると, 二畳紀から三畳紀にはそれ以前の島弧やその前面に形成された付加堆積物は一体

化して, 現在のモンゴルの原形が形成され, 北東部ではモンゴル-オホーツク海が閉じかかっている. これに従えばこの時期の花崗岩類は大陸内部の火成活動と言える. 一方, Dejidmaa and Naito (1998)はモンゴル北部の斑岩銅鉱床の関連火成岩を三畳紀と結論しており, 中生代に至ってもサブダクションに伴う火成活動を想定できる.

これらの花崗岩類及びそれらに伴う閃緑岩中の斜長石双晶を第1図cに示した. さまざまな地質時代と地質学的な背景の花崗岩類が混在している上, 試料数も決して多くないので十分な議論に至らずに概略を述べるに留める.

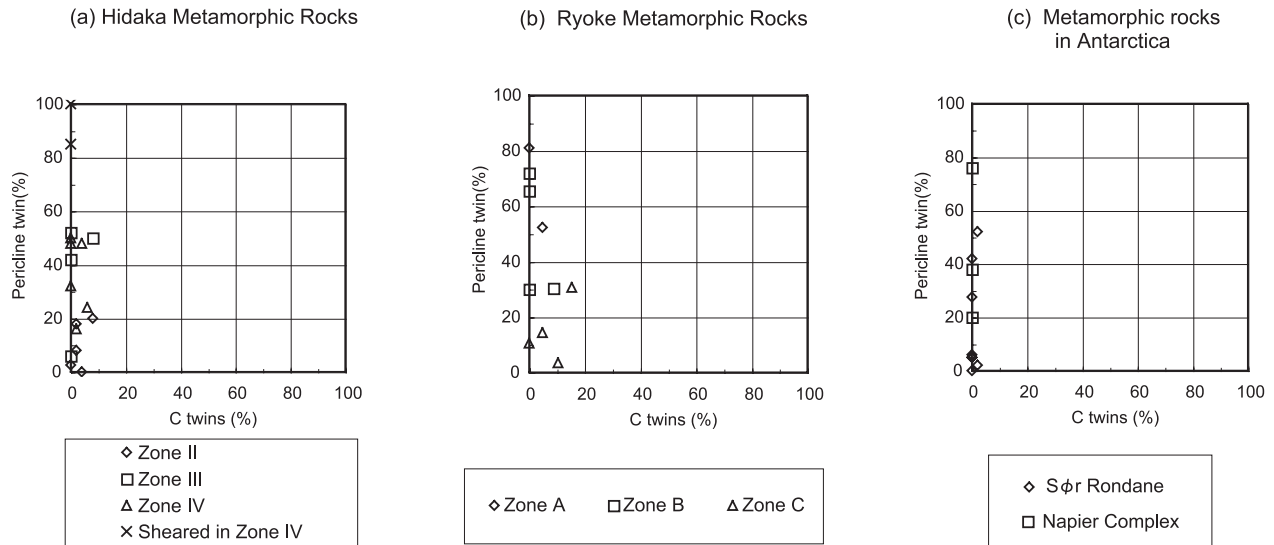
C双晶頻度は, 花崗岩類の地質時代がリフェアン, 前期古生代, 後期古生代と新しくなるにつれて大きくなる. しかしながらわずかに1個しかないが, この地域で最も新しい中生代の花崗岩類では小さな値である. ペリクリン双晶の頻度は多くのものが20%以下である. モンゴル中央部の花崗岩類の斜長石双晶形式は, 前期古生代にはRS型かHD型の領域に収まる. 一方後期古生代の花崗岩類では多くが両領域から外れ, C双晶が増えてもペリクリン双晶の頻度は概して増えない.

4.2.6 東南極セールロンダーネ山地の花崗岩類(Takahashi *et al.*, 1997)

本山地には900 Maに変成作用のピークがある角閃岩相からグラニュライト相に至る変成岩類が分布し, それらにさまざまな産状の花崗岩質岩体が貫入している. すなわち, ミグマタイト状を呈する花崗岩体, 変成岩類の構造に調和的なシート状岩体及び非調和的な貫入形態を呈するストック状岩体などである. これらの花崗岩類の放射年代は500 Ma前後で前期古生代を示す(Tainosho *et al.*, 1992). 当時の Gondwana ランド内陸部の後造山性か非造山性の火成活動と一般に位置づけられている(Unrug, 1996のFig.5)が, その一方, 花崗岩類の岩石学的な性質からは, プレート内火成活動及び火山弧火成活動の両者が示唆されている(Li *et al.*, 2003).

花崗岩類中の斜長石双晶は, C双晶頻度が0%から30%, ペリクリン双晶頻度が1試料(73%)を除くと0%から5%である(第1図d). Takahashi *et al.* (1997)で述べたように, C双晶頻度は花崗岩類の産状とよく対応していて, 変成岩類の構造に調和的な貫入形態を呈するもので0~10%, 非調和的なもので10~30%である. ちなみにペリクリン双晶を異様に含む例外的な1試料は, 変成岩類の片麻状構造に調和的に分枝状に貫入する花崗閃緑岩で, この岩石自身も片麻状構造を有している.

RS型とHD型の両領域から外れ, C双晶の頻度のいかに関わらず, ペリクリン双晶の頻度が小さく, RSとHD型の両領域と独立している. Li *et al.* (2003)の指摘のように火成活動の場が必ずしも一義的ではないので余り言及できないが, 後で簡単に論じるように大陸内部の後-非造山性花崗岩類という可能性が依然としてあることは興味深い.



第2図 変成岩類の斜長石双晶頻度図

Fig. 2 Frequency diagrams of plagioclase twinning laws for the metamorphic rocks

4.3 変成岩類中の斜長石双晶

4.3.1 日高変成岩類(高橋, 2002)

日高変成岩類は4.2.2で述べたように、北海道日高山脈中央部を構成する変成岩類で、そのうちここで対象とする日高変成帯主部では、島弧のさまざまな層準が地表に現れている。Osanai *et al.* (1991)は主部の変成岩類を變成度の低いものから高いものへ順に I から IV の変成分帯を行った。このうち筆者は II 帯から IV 帯の砂泥質変成岩類中の斜長石双晶形式を解析した(高橋, 2002)。変成相で言えば、II 帯は緑色片岩相から低度角閃岩相、III 帯は高度角閃岩相、IV 帯はグラニュライト相である。これらに加えて IV 帯に分布し、剪断作用を受けた変成岩とトーナル岩起源のマイロナイトも解析した。

第2図aで示すように、斜長石双晶形式は II 帯ではペリクリン双晶頻度が20%以下であるが、III - IV 帯では約50%に達するものがある。IV 帯で剪断作用を受けた変成岩及びトーナル岩起源のマイロナイトでは斜長石双晶形式がそのほとんどあるいは全てがペリクリン双晶である。

4.3.2 領家変成岩類(高橋・西岡, 1994)

三重県津西部地域から上野地域にかけて領家変成岩類が分布する。領家変成岩類は丹波帯の中生層が白亜紀に広域的な変成作用を被って形成されたもので、4.2.1で述べたように白亜紀のユーラシア大陸の地殻断面の一部を構成していた。津西部から上野地域に分布する変成岩類は、泥質変成岩類がごく普通に珪線石を含む。広域変成作用は白雲母を含むB帯と白雲母を欠くC帯に分けられる。花崗岩体の周辺には接触変成作用による紅柱石を含むA帯を識別できる(高橋・西岡, 1994)。なおこの地域の変成分帯

については、このほかに最近Kawakami (2001)により精緻な報告がなされた。

斜長石双晶形式を第2図bに示す。C双晶はB帯やC帯の変成岩に10%前後含まれることがある。議論の項で簡単に触れるが、本地域では高變成度側にミグマタイトが発達していること(Kawakami, 2001)は示唆的である。

ペリクリン双晶頻度は、變成度の高いC帯で30%以下であるが、A帯及びB帯北側の花崗岩体と変成岩の境界までの水平距離4 km未満の変成岩類でペリクリン双晶頻度が50%を越える(高橋, 1995のFig.3)。以上をまとめると、本地域では、高度角閃岩相に達する広域的な変成作用を受けた変成岩類ではペリクリン双晶の産出頻度は小さいが、花崗岩体周辺の接触変成作用を明らかに被っている砂泥質岩類ではペリクリン双晶の頻度が大きい。

4.3.3 南極大陸の変成岩類(Takahashi *et al.*, 1997; 高橋, 2002)

東南極セールロンダーネ山地及びエンダビーランドのナピア岩体の高度変成岩類の斜長石双晶形式について述べる。セールロンダーネ山地については4.2.6で述べたとおり、900 Maに變成作用のピークがある上部角閃岩相からグラニュライト相の片麻岩が分布している。ナピア岩体は始生代の高度変成岩類で輝石グラニュライト相に達している。

斜長石双晶形式の頻度を第2図cに示す。セールロンダーネ山地及びナピア岩体とも変成岩類中の斜長石にはC双晶はないかあってもごくわずかである。ペリクリン双晶頻度は、セールロンダーネ山地では0から52%、ナピア岩体では20から76%といずれも値の範囲が広い。

5. 議 論

5.1 花崗岩類中の斜長石双晶

5.1.1 C双晶頻度と花崗岩質マグマ定置の場

花崗岩類の斜長石双晶のうち,ある地域内で似たような岩質(トータル岩から花崗岩程度)の場合,C双晶頻度は花崗岩類の貫入形態あるいは花崗岩類が変成作用とほぼ同時期に貫入したか,あるいは変成作用の後に貫入したかの違いを反映する.すなわちセールロンダーネ山地や日高変成帯の花崗岩類において,調和的な貫入形態の花崗岩類ではC双晶頻度は小さく,非調和的なものでは大きくなる.領家-山陽帯では変成岩に貫入する花崗岩類(領家帯の花崗岩類)はC双晶頻度が小さく,非変成中生界に貫入する花崗岩類(山陽帯の花崗岩類)はその頻度が大きくなる.領家帯から山陽帯にかけてはNakajima (1994)やNakajima (1997)が,日高変成帯の花崗岩類については志村(1992)が指摘したように地殻のさまざまな定置深度の花崗岩類が現在露出していると考えられている.領家-山陽帯と日高変成帯の例のように異なる地域(帯)の間では,花崗岩類中の斜長石のC双晶頻度に違いがあるが,それぞれの地域(帯)内でのC双晶の頻度の変化は花崗岩類の産状の違い(定置深度の違い)を反映していると考えられる.

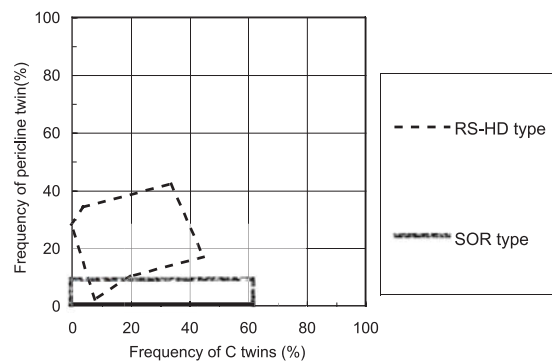
5.1.2 ペリクリン双晶生成の条件

ペリクリン双晶は研究小史で触れたWenk (1969)などの高温下で剪断応力を受けると生じるという実験結果をよりどころにすると,花崗岩類中の斜長石は固結直前の高温の環境下で応力を受けるとペリクリン双晶が生じると考えられる.筆者は,以前に,テクトニクスの違いが地殻内の応力の違いに反映され,その結果地域間の斜長石双晶とりわけペリクリン双晶の産出頻度の違いに表われると考えた(Takahashi et al., 1996).花崗岩質マグマの定置機構の一つには,断層に沿って圧縮応力から開放された通路を使ってマグマが上昇する考えがある(例えばHutton, 1996).その間に結晶が晶出するとすると,広域的な応力の違いだけでペリクリン双晶頻度の多様性を説明するのは無理がある.

結晶とメルトの比の違いはマグマの粘性を変化させ,マグマの流体としての振る舞いが異なるようになる(Ingram and Hutton, 1994のFig.3).マグマ中で結晶が多くなると斜長石結晶に歪みが生じやすくなり,その結果,ペリクリン双晶が形成されることがあるかもしれない.マグマが固結する直前まで充分メルトがあれば,結晶に歪みを生じることすら少なく,ペリクリン双晶を形成する機会が少なくなるかもしれない.

5.1.3 斜長石双晶とテクトニクスの関連

RS型とHD型で括った花崗岩類は大陸縁辺あるいは島弧の活動域が想定され,その一方セールロンダーネ山地で代表されるC双晶が変化してもペリクリン双晶がRS型やHD型よりも少ない花崗岩類も認められる.このような地域毎の



第3図 斜長石双晶に基づく花崗岩類識別図

Fig. 3 Discriminative diagram for granitic rocks based on plagioclase twinning laws

巨視的なペリクリン双晶産出頻度の違いを上記のマグマの性質の違いで説明できる.

Pitcher (田中・杳掛訳, 2002)のp.52に述べられているように,大陸縁辺活動域では花崗閃緑岩が卓越し,マグマ上昇過程の比較的早いうちに固相の比が大きくなり,臨界メルト残量を越え粘性が大きくなる.一方,大陸内部ではアルカリ花崗岩が主で,そのため,マグマは上昇定置後固結直前までメルトの比が大きく粘性が小さいためにニュートン流体として振る舞う.このようなPitcher (2002)の解説に基づけば,テクトニクスの場違いによる花崗岩質マグマの性質の違いを反映して,結果として大陸縁辺域のマグマ中の結晶は応力を受け剪断歪みを生じやすい.一方,大陸内部のマグマでは,結晶に剪断歪みを生じにくい.Gorai (1965)の実験結果に従えば,C双晶はマグマから斜長石が晶出する過程で形成されるだろうが,Bogd and Heard (1970)などの実験結果に基づけば,ペリクリン双晶は斜長石晶出後まだ高温時に剪断歪みを受け形成されると解釈できる.その結果,大陸縁辺活動域のマグマではペリクリン双晶を多く含むだろうが,大陸内部のマグマではそれをあまり含まないことが予想できる.

各地域の解析結果をまとめ,第3図にC双晶-ペリクリン双晶頻度図で既示したRS型とHD型の領域をRS-HD型としてやや模式的に示した.これは大陸縁辺-島弧型の典型と言えるだろう.コヒスタンバソリスやモンゴル中央部の前期古生代花崗岩の斜長石双晶もこの領域の範囲内である.これらと対照的なセールロンダーネ山地の花崗岩の斜長石双晶の範囲(ペリクリン双晶を異様に多く含む試料を除く)をやや広くとった領域をSOR型とした.一つの可能性として大陸内部の花崗岩類の例なのかかもしれない.ちなみにモンゴル中央部の後期古生代の花崗岩類の多くがこの領域に含まれる.

5.2 変成岩類中の斜長石双晶

変成岩類中のペリクリン双晶頻度の違いは,研究小史で既に触れたWenk (1969)やBorg and Heard (1970)の歪

みを加えた実験, White (1975)やOlsen and Kohlstedt (1985)の電子顕微鏡観察から説明できる。それらによれば, アルバイト双晶やペリクリン双晶は, 一般に歪みを生じるような条件下でできるが, ペリクリン双晶が生じるにはアルバイト双晶よりも高い温度が必要である。

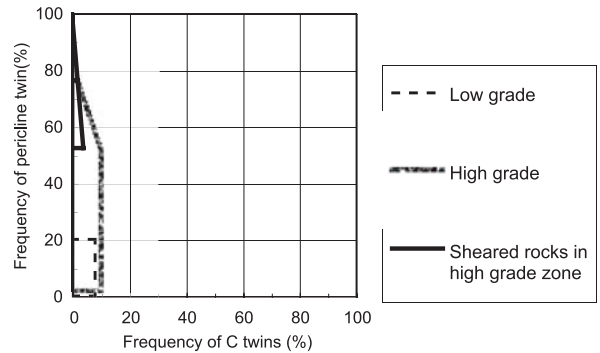
日高変成岩類中の緑色片岩相-低度角閃岩相でペリクリン双晶の頻度が小さいのは, 近傍の剪断帯の影響があっても温度が低いためにペリクリン双晶を多産するには至らなかったと解釈できる。Tobi (1962)や諏訪(1968)によると, 緑色片岩相では斜長石双晶は接合面を(010)とするものばかりであるという。つまりペリクリン双晶は全く産出しない。

日高変成岩類の高度角閃岩相からグラニュライト相に至る高度変成岩類ではペリクリン双晶頻度は小さな値から大きな値までさまざまである。そのうち強く変形作用を受けたと考えられる岩石ではペリクリン双晶頻度が著しく大きなことから, 前述の実験結果から支持されるように, 一般に高度変成岩類では(つまり高温下で)ある程度の剪断作用を被るとペリクリン双晶が容易に形成される。

領家変成岩類におけるペリクリン双晶頻度は, 広域的な領家変成作用では高度角閃岩相に至る高温下にあっても剪断応力が日高変成岩類形成の際よりも弱く, そのためペリクリン双晶を多く産出するに至らなかった。領家変成作用でペリクリン双晶頻度が小さいことは, 筆者が扱った地域と異なる地域の領家変成岩類でも確認されている(Suwa, 1956)。一方, 接触変成作用が明瞭な変成岩では, 桜井・原(1979)によれば, 広域的な変成作用のピーク後に非調和的花崗岩体が周辺の変成岩に変形作用を与えながら貫入している。このために変成岩類中にペリクリン双晶が多数生じていると解釈できる。

変成岩類では一般にC双晶をほとんど含まないとされている(Gorai, 1951)が, 領家変成岩類ではC双晶を無視できない程度含むことがある。上野地域の領家変成岩類は高度角閃岩相からグラニュライト相に至らず, 角閃岩相でミグマタイトがよく生じている(Kawakami, 2001)。このことはGorai(1965)の実験による溶液からC双晶を生じることで定性的に説明できるかもしれない。これに対して東南極の変成岩類ではC双晶をほとんどまたは全く含まない。高温になっても部分熔融することが少なく, グラニュライト相にまで達することと関係しているのかもしれない。

以上各地域の解析結果をまとめ, 第4図のC双晶-ペリクリン双晶頻度図で, 緑色片岩相-低度角閃岩相領域(図中凡例ではLow grade), 高度角閃岩相-グラニュライト相領域(High grade), 剪断作用を受けた高度角閃岩相-グラニュライト相領域(Sheared rocks in high grade zone)を区別した。この順に各領域は巨視的にペリクリン双晶を多く含むようになる。



第4図 斜長石双晶に基づく砂泥質(石英長石質)変成岩類識別図

Fig. 4 Discriminative diagram for psamitic to pelitic (quartz-feldspathic) metamorphic rocks based on plagioclase twinning laws

6. まとめ

各地の花崗岩類と変成岩類の斜長石双晶形式をC双晶頻度とペリクリン双晶頻度で比較検討した。

花崗岩類のうち, 領家帯-山陽帯と日高変成帯の花崗岩類中の斜長石双晶を大陸縁辺-島弧の活動域の代表としてほかの地域との比較に用いた(RS-HD型)。そのような比較をしていくとそれに含まれない比較的ペリクリン双晶の少ない花崗岩類がある。そこでセールロンダーネ山地の花崗岩類の斜長石双晶の領域をやや広くとったものをもう一つの代表とした(SOR型)。それらを模式的に第3図に示した。このような違い, 特にペリクリン双晶頻度の違いは花崗岩マグマが上昇から定置に至るまでの間の残存メルトの量の違いに起因するマグマの粘性の違いで説明できる。

変成岩類(砂泥質)は, 斜長石双晶形式頻度の違いから緑色片岩相-低度角閃岩相, 高度角閃岩相-グラニュライト相, 剪断作用を受けた高度角閃岩相-グラニュライト相を区別でき, 巨視的にはこの順にペリクリン双晶頻度が大きくなる(第4図)。高温下で剪断作用を被るとペリクリン双晶が形成されるという従来の実験結果で説明できる。

謝辞: 奥村公男氏からは小論の構想や下書きの段階でご指導を賜った。佐脇貴幸氏と牧本 博氏からは論旨の展開や原稿の改良で有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝します。

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, 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.* **19**, 203-219.
- Gorai, M. (1951) Petrological studies on plagioclase twins. *Amer. Mineral.*, **36**, 884-901.
- Gorai, M. (1965) Twinning in some artificial plagioclases. *Indian Mineral.*, **6**, 51-54.
- Hutton, D.H.W. (1996) The 'space problem' in the emplacement of granite. *Episodes*, **19**, 114-119.
- Ingram, G.M. and Hutton, D.H.W. (1994) The Great Tonalite Sill: Emplacement into a contractional shear zone and implications for Late Cretaceous to early Eocene tectonics in southeastern Alaska and British Columbia. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **106**, 715-728.
- Kawakami, T. (2001) Tourmaline breakdown in the migmatite zone of the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **19**, 61-75.
- Kizaki, K. (1964) On migmatites of the Hidaka Metamorphic Belt. *Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, **12**, 111-169.
- 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, 343p.
- Li, Z., Tainosho, Y., Kimura, J., Shiraishi, K. and Owada, M. (2003) Pan-African alkali granitoids from the Sør Rondane mountains, East Antarctica. *Gondwana Research*, **6**, 595-605.
- Nakajima, T. (1994) The Ryoke plutonometamorphic belt: Cretaceous crustal section of the Eurasian continental margin. *Lithos*, **33**, 51-66.
- Nakajima, T. (1997) Regional metamorphic belts of the Japanese Islands. *The Island Arc*, **6**, 69-90.
- 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, 75p.
- Olsen, T.S. and Kohlstedt, D.L. (1985) Natural deformation and recrystallization of some intermediate plagioclase feldspars. *Tectonophysics*, **111**, 107-131.
- Osanai, Y., Komatsu, M. and Owada, M. (1991) Metamorphism and granite gneiss in the Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido, Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **9**, 111-124.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **74**, 45-57.
- Pitcher, W. S. (田中久雄・沓掛俊夫訳, 2002) 花崗岩の成り立ち—その性質と成因—第2版. 愛智出版, 東京, 390p.
- 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, 287-294.
- 志村俊昭 (1992) 花崗岩質マグマの進入と日高変成帯の衝上テクトニクス. 地質雑, **98**, 1-20.
- 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 Mitsue-mura area, Kii peninsula, central Japan. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **4**, 91-122.
- 諏訪兼位 (1968) 斜長石ノットーとくに斜長石双晶について—. 地球科学, **22**, 156-163.
- Suwa, K., Mizutani, S. and Tsuzuki, Y. (1974) Proposed optical method of determining the twinning laws of plagioclase. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no.11, 167-250.
- Tahirkheli, R.A.K., Mattaur, M., Proust, F. and Tapponnier, P. (1979) The India-Eurasia suture in northern Pakistan. Synthesis and interpretation of data on plate scale. In Farah, A. and Dejong, K. eds., *Geodynamics of Pakistan*. Geol. Surv. Pakistan, Quetta, 125-130.
- Tainosho, Y., Takahashi, Y., Arakawa, Y., Osanai, Y., Tsuchiya, N., Sakiyama, T. and Owada, M. (1992) Petrochemical character and Rb-Sr isotopic investigation of the granitic rocks from the Sør Rondane Mountains, East Antarctica. In Yoshida, Y. et al. eds., *Recent Progress in Antarctic Earth Science*, TERRAPUB, Tokyo, 45-54.
- 高橋裕平 (1995) 斜長石双晶法の再検討とその地質学的応用. 地調月報, **46**, 527-536.
- 高橋裕平 (1999) 領家帯-山陽帯白亜紀花崗岩類及び日高変成帯第三紀花崗岩類の斜長石双晶様式. 地調月報, **50**, 711-718.
- 高橋裕平 (2000a) 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—. 地調月報, **51**, 309-315.
- 高橋裕平 (2000b) 西南北海道, 今金花崗岩類の地質と岩石記載. 地調月報, **51**, 649-656.
- 高橋裕平 (2001) 表計算ソフトウェアを利用した消光角変化曲線の求め方. 岩石鉱物科学, **30**, 247-249.
- 高橋裕平 (2002) 日高変成岩類中の斜長石双晶型式. 地調研報, **53**, 37-41.
- Takahashi, Y. (2002) Practical method of determining plagioclase twinning laws under the microscope. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **53**, 795-800.
- Takahashi, Yuh., Khan, T., Takahashi, Yut., Kausar, A.B. and Kubo, K. (1996) Mode of plagioclase twinning of two plutonic bodies in Kohistan terrane, northern Pakistan. *Jour. Mineral. Petrol. Econ.*

- Geol.*, **91**, 242-249.
- 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, **89**, 261-268.
- Takahashi, Y., Oyungerel, S., Naito, K. and Delgertsogt, B. (1998) Mineralogical characteristics of feldspars of the granitoids in Bayankhongor area, central Mongolia. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **49**, 439-446.
- 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. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **48**, 305-312.
- Tobi, A.C. (1962) Characteristic patterns of plagioclase twinning. *Norsk geol. Tidsskr.*, **42**, 264-271.
- Tobi, A.C. (1987) A guide to plagioclase twinning, and an urge to further research on its petrological significance. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **67**, 127-136.
- 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.
- 土谷信高・三木 順・西川純一・橋元正彦 (1986) 西南北海道の白亜紀深成岩類—白亜紀沈み込みに伴う大陸縁辺部タイプ火成活動—. 地団研専報, no.31, 33-50.
- Unrug, R. (1996) The assembly of Gondwanaland. *Episodes*, **19**, 11-20.
- Wenk, H.R. (1969) Annealing of oligoclase at high pressure. *Amer. Mineral.*, **54**, 95-100.
- White, S. (1975) Tectonic deformation and recrystallisation of oligoclase. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **50**, 287-304.

(受付:2003年9月16日;受理:2004年4月28日)