双晶の分類 III ——双晶のジョイントについて*——

Classification of twins III

——twinning joints——

高 野 幸 雄 (Yukio Takano)**
河 原 昭 (Akira Kawahara)***
西 田 孝 (Takashi Nishida)**

Abstract: The so called parallel growth and co-axial twin are described on the basis of newly proposed 'twin point groups'. It is shown that the composition methods of these twins can be consistently classified in accordance with the new description law of twin morphology.

As examples of parallel growth, orthorhombic sulfur and co-axial parallel growth between zircon and xenotime are given. Their symmetries are expressed respectively as $tm\ 2.4/mtm$ by Hermann-Mauguin's nomenclature. As to the co-axial twin, calcite and quartz are mentioned as examples.

In the case of quartz twins with parallel axes, which consist of both left and right hand quartz, the 'twinned point groups' can not rule their symmetries.

An expression, 'twin joint' is proposed to describe the domains at the twin boundary and the types of twin joints are classified systematically using alphabetical representations.

The essential difference between twins and single crystals is discussed.

1. 序 論

筆者らはさきに双晶の定義について再検討を試ろみ、これまで単結晶における有理指数の法則から記載していた表現に代えて、双晶体全体の対称性に注目して、双晶体を 28 の通常双晶と 7 点群の第 2 次双晶とに分類した。また通常双晶における対称要素としての双晶面とふつうの対称面との組み合わせの関係から、Hermann-Mauguin 式の記載法により、主軸に垂直な双晶面を 1 つだけ有する E タイプ (接触双晶) 1 種で 2 枚以上の輪座式の双晶面を有する D タイプ (交叉双晶)、主双晶軸または 2 等分双晶軸に平行な 2 種以上の双晶

* 本稿の内容の一部は 1968 年 2 月本会講演会 (仙台)、同年 4 月日本地質学会第 75 周年記念大会討論会、(東京)および 1971 年 6 月日本鉱物学会年会 (名古屋)において講演した。

** 東京大学教養学部基礎科学科

*** 岡山大学理学部地学教室

(昭和 46 年 10 月 3 日受理)

面よりなる B タイプ (重交双晶), 主双晶軸に垂直および平行な双晶面の組み合わせよりなる A タイプ (透入双晶) などに分類した (Takano・Sakurai:1971, Takano・Nishida:1972)。

筆者らの目的は双晶を狭く定義することから出発したもので, 狭義の双晶の通常双晶は双晶面とこの面内に含まれる 2 等分双晶軸を併せてもつことを条件とした。ところがこのようにきびしく定義した眼で, 結晶の結合状態をあらためて観察すると, 平行連晶とか共軸双晶と呼ばれているものにも, この双晶の記述方法で表現されるものが多いことが判明した。一方, 結晶の代表の 1 つとも称せられる水晶における双晶では逆にこの記述方法では表現し得ない要素をもつものがある。しかしこれも入念に検討した結果, それなりの理由を見出し得ることが判った。また水晶におけるこのような性格が, 筆者らの定義した双晶の記述がこれまで行われなかった最大の原因とも言えると思う。

本報告では双晶の定義と平行連晶・共軸双晶との関係, 水晶の双晶方式について論ずる。また双晶のジョイントなる術語を提唱し, これをアルファベット表現によって種々の型に分類した。双晶が単結晶と異なるところは双晶のジョイントの存在によるものとした。

自然科学の一分科としての鉱物学が始まったとき, 我々の先輩である鉱物学者はまず鉱物の結晶の規則正しさに眼をみはった。デンマークの物理学者 Nicolaus Steno の発見した面角一定の法則 (1669) をはじめとして, R. J. Haüy の有理指数の法則 (1801), C. S. Weiss の晶帯の法則は鉱物の結晶の形態における規則性を見出したものであった。ついで J. F. Hassel (1831) は 32 晶族を結晶系に配属し, A. Bravais (1842) は前年に M. L. Frankenheim が 15 として発表した空間格子のうち重複するもの 1 つを減じて 14 空間格子を体系化した。さらに M. V. Laue (1912) および W. H. Bragg, W. L. Bragg 父子 (1913) によって結晶が格子構造をもつことを実験的に証明される以前に, E. V. Fedrov (1891) A. Schoenflies (1891). および W. Barlow (1894) によってそれぞれ独立に 230 の空間群が導き出された。

ところがこのような結晶の規則正しさを追究し続けた 20 世紀の前半を終わる頃から, 結晶面といえども厳密には平面でないこともしばしば発見されるなどして, 結晶の規則にも不完全の要素が多いことが明らかにされるようになって来た。現在における一群の研究は結晶の不完全性のなかに存在する規則性を追究しているとも云えよう。

このような歴史的背景の中で双晶の記載方式も自ずと変遷して来る必然性をはらんでいた。すなわち結晶はその種によって固有の値を有すると決めて処理していた 19 世紀後半までは軸率はしばしば有効数字 5 桁以上で記載され, 新面の報告なども高く評価されて来た。したがって双晶体が擬六方や擬正方の対称性を示そうとそれはそれで擬対称という術語で表現して, 双晶関係の記述には, 一方の個体を鏡面によって反射させ, またはある軸のまわりに 180° 回転することによって, 有理指数の法則にかなう簡単な単結晶の面指数となし得る双晶面および双晶軸という術語が用いられて来た。当時の結晶体に対する認識から云えば至上の記載方法と云えよう。これに関連して伊藤貞市 (1938) は本誌において双晶空間群論を展開するに当たりつぎのように述べている。「……もちろん, 双晶の起原にこれら (双晶面・双晶軸) の操作があったわけではなく, 双晶論は双晶軸や双晶面が結晶の帯や面であるという事実を利用して双晶体の形態を幾何学的にまた簡単に記載する方法であるにすぎない。双晶をこの方法によらずに, たとえば結晶軸の相互の関係をしめす角度表でしめしても等しく合理的であって, 実際にも局部的に面または軸による双

晶記載に利用されているのである。方解石や石英の交叉双晶がその例である。」またこの文中で伊藤は「形態において双晶と称するとき、それを規定する双晶面や双晶軸にはかなり便宜的なことが多い。」とも述べている。

結晶の形態や構造が精密に解析され、またその有する不完全性が明らかになった現在では伊藤のいう双晶記載の別の方法も必要に迫られて来たと思われる。また前述の擬対称ないしは擬晶の擬でない値から外れている度合を調査するのも鉱物結晶における不完全性を追究するための一つの手段になったとも云えよう。

さきに砂川一郎 (1961) は「単結晶は果して Single なりや。」との問題提起を行なったが、筆者らもその回答の一つとして「双晶体もまた Single である。」または「双晶体も単結晶と同じく結晶系・晶族で表現し得る。たゞ結晶面 1 つだけの晶帯が存在しないのと同様に、双晶個体が 1 つだけしか存在しない三斜双晶系が存在しないことなどに単結晶における分類と異なるところがある。」という結論に達した。

2. 平行成長と平行連晶

双晶は 2 つの結晶が形態的要素の一部を共通するものと定義されている。一方、平行連晶には、2 つの同種の結晶が対応する結晶軸を平行にして配置する場合と、異種の結晶がその結晶軸の方向に簡単な関係を保って結合している場合とがある。後者の例としては柱状のジルコンと板状のゼノタイム、ルチルと黒雲母などがよく知られている (須藤俊男, 1963)。これら異種結晶間に認められる平行連晶は石英・雲母・石膏などの結晶表面に氷グリシン・カンファー・ビタミンなどの結晶の平行連晶することが認められるなど最近急激に注目されるようになって来た。またこれらの中には結晶連合体と称せられるべきものもあり、それぞれの単位胞の周期を超えた周期的な単位の認められるものもあるとされている (須藤俊男, 1971)。

さらに同種結晶間の平行連晶においても、両個体がそれぞれ閉形をなして接している、または平行に配置している場合と、それぞれの個体が閉形をなせずに開形部において平面または屈曲面をなして接触している場合とがある。後者の例としては斜方硫黄や水晶におけるブラジル双晶 (左水晶と右水晶を異種の結晶とみなせば双晶ではなく、また同種間ではなく異種結晶間の平行連晶となるが、このことについては後に論ずる) などに見られる。長石類における柱面双晶と呼ばれるものは前者の例といえよう。このように論じて来る中にも双晶という術語と平行連晶という術語が交錯してしまっている。結晶の 3 軸がいずれも平行に配置するものを平行連晶と呼ぶならば、3 軸のうちの 2 軸が平行に配置する石膏の矢羽根型双晶は準平行連晶とも云えよう。またスピネルや閃亜鉛鉱にみられる所謂スピネル式双晶においては、もともと立方晶系に属する結晶なので 2 軸が平行ということはあり得ないから、 $[111]$ という主要な晶帯軸を主双晶軸とするこのものが平行連晶にもつとも近い双晶であるとも云えよう。

これら相互の関係を論ずるために、本論において筆者らはこれらの術語を、平行成長・同種平行連晶・異種平行連晶および共軸双晶と分けて呼称させて頂く。そして平行成長では各個体がそれぞれ閉形をなし、平行連晶においては各個体は形態上の開口部において接合しているものとした。筆者らはこれら接合部に焦点を合わせて同種平行連晶と異種平行連晶について論議を進めて行きたいと思う。

第1図 斜方硫黄における同種平行連晶

第2図 方解石における共軸双晶

3. 同種平行連晶

同種平行連晶の例として二重または三重の塔状をなす斜方硫黄を挙げよう。この平行連晶においては形態的な長軸とも云うべき c 軸を共有し、他の2軸すなわち各個体の a 軸と b 軸はそれぞれ平行となっている。それぞれの個体は等価の不等辺三角形に囲まれた八面体を主とする図形であるが、 c 軸に垂直な斜方断面のうち a 軸・ b 軸を含む断面がそれぞれの個体において最大の面積を有するのは申すまでもない。またこの断面がこの結晶の対称面の1つである。平行連晶はふつう、この斜方断面に平行な斜方断面を接合面とする。接合面となる斜方断面はそれぞれの個体の a 軸・ b 軸を含む斜方断面より小さいので、接合部をはさんでくびれが生ずる。すなわち双晶の場合と同じく凹入角が存在する。逆に云えばこのくびれの数+1が連晶にあずかる斜方硫黄の個体の数となる。斜方硫黄の平行連晶の場合には、このくびれの斜方断面内に各個体の a 軸・ b 軸に平行な2本の2等分双晶軸が見出される。したがって筆者らがさきに分類した双晶の点群の表にあてはめると、斜方硫黄のこの種の平行連晶はタイプ F の二等分接触双晶に相当し、その晶族は $C_{2v1}-tm_2$ である。 C_{2v1} に属する双晶にはルチルや錫石のように3連晶をなすものも多い。すなわち同種平行連晶も双晶点群表での記載が可能であるということになる。逆に云えば双晶点群表は、骸晶やエピタキシーなどを含めて2個以上の結晶体の規則的結合関係の全部に適用し得ることとなる。方解石における平行連晶または共軸双晶と呼ばれるものについても全く同様の結論に達した。たゞ筆者らは結晶主軸に垂直な対称面をもたない結晶の3軸が平行関係にあるときは、図形は兩個体が倒立型に相対することになり、共軸双晶と呼ぶことが多いことを知った。しかしこれは重要な問題を含んでいる。すなわち結晶主軸に垂直な対称面をもつ斜方硫黄などの平行連晶においては、この対称面に平行な接合面(双晶面)をもつことになる。方解石では連晶することによって双晶面という対称面が加わっ

たのに対して、斜方硫黄ではもともと存在している対称面のほかにさらにこれに平行な双晶面という対称面が加わったことになる。一般に双晶面のあるところに対称面はなく、双晶軸のあるところに2回対称軸はないとされて来た。この考え方よりすれば斜方硫黄のは同種平行連晶、方解石のは共軸双晶というように呼び分けた方がよいようである。双晶面または連晶における接合面と対称面との関係については後に論じたい。

第3図 ジルコンとゼノタイムの異種平行連晶

4. 異種平行連晶

異種平行連晶の例としてよく知られている柱状のジルコンと板状のゼノタイムの連晶について述べよう。両個体とも正方晶系に属して、柱状のジルコンは軸面 (100) と錐面 (111), 板状のゼノタイムは底面 (001) と錐面 (111) および軸面 (100) より成っている (第3図)。この2つの結晶は結晶主軸 c 軸共有するのみならず、側軸 a_1 軸と a_2 軸も共有されている。そしてジルコンの (100) 面が、ゼノタイムの底面 (001) を貫ぬいているような観がある。理想形で云えばゼノタイムの正方形の底面が、正方形の各辺と 45° をなすジルコンの正方柱で切り抜かれた格好である。^{*} この連晶を双晶にみだてて分類するとタイプ D の交叉双晶 $D_{4h2}-4/mtm$ に属する。異種平行連晶の記載にも双晶点群の記述法をそのまま適用し得るという意外な事実到我々は眼を見はらなくてはならなかった。自然の摂理と表現しようかきわめて原始的なルールはそれが抱擁する範囲も自ずと広いと解してよいものであろうか。たゞ2つの異種の結晶体の結合によることによる双晶体のそれとの差異は接合面すなわち双晶面が図形の中心で交叉する一枚ずつのものでなく、これに平行な対をなす2枚ずつのものになることである。

5. 水晶における双晶

石英における双晶は共軸双晶と呼ばれるドフィネ式・ブラジル式の2種と斜交軸双晶の日本式など15種がある。このほか高温型石英に9種の双晶がある (Fronde1, 1962)。さらに水晶には右水晶と左水晶があり、日本式双晶だけでもその組み合わせは7通りある。したがって水晶における双晶の方式の種類は他の鉱物に比して異常に多い。この原因は水晶は対称面をもたない D_3-32 の対掌半面像晶族に属し、したがって左右像のあること、3次元の骨格構造でたとえば劈開面など特長のある結晶学的な方位の乏しいことなどが挙げられよう。また左像と右像を別種の結晶と考えればブラジル式など双晶ではなく異種平行連晶や異種接合晶も多いと云えよう。どのような双晶則を樹てようと、これら水晶の双晶の全部を律することは至難の業である。双晶点群も他の有名双晶のほとんどすべてを包括するが、この水晶の双晶だけはその枠外にはみ出してしまいうものが多い。強いてあてはめるならば

^{*} 桜井欽一の私信によれば、両個体の見えない部分のそれぞれの領域は交叉型になっている。

日本式エステル式など斜交軸双晶は C_{2v1} -tm2, ブラジル式は第2種双晶点群の D_{3d1} -3t, ドフィネ式は枠外の第3種双晶点群の $D_{6,1}$ -622 となる。とくにドフィネ式に関しては 180° 回転の従来の双晶軸が却ってよく両個体の幾何学的関係を説明して呉れる。また水晶の双晶における接合面も平面をなさない場合がとくに多いように思われる。鉱物種全体から云えば比較的少ない数ではあるが、水晶と辰砂などどの個体が対称面をもたない対掌半面像の結晶の双晶については更に深く検討する必要がある。

6. 双晶のジョイントとその型

単結晶と双晶。少くともそれぞれの理想像には大きな差異がある。しかし、単結晶にもモザイク構造をもったものがあり、双晶体にも外形的には凹角ももたないものなどがあつたり、立方晶系の補充双晶をなす金属鉱物があつたりするので、その極端な場合には両者を識別するのはもちろんのこと、両者の差異を論ずることも難かしい場合が起つてこよう。現に筆者らの分類においても双晶面を対称面と見誤れば、双晶体を単結晶と誤認することになろう。

双晶体も $6 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2$ などの回転対称要素をもち、これらの組み合わせによる点群による表現が可能であるならば、これまで単結晶と考えられたものにも双晶体であったと結論づけられるものがないとも云えないであろう。もし双晶体でないと断言し得るものがあるとすれば、それは双晶点群にはない三斜晶系に属する諸結晶と云うことにもなる。

それでは現実の結晶における単結晶と双晶との違いは何か。これに対する回答は 35 双晶点群が属する通常双晶および異常双晶の双晶体は双晶面が存在するというで識別されるであろう。それでは双晶面とは何か、我々はこの問題を探究しなくてはならない。まず幼稚な解答として双晶面は対称面のようなもので、しばしば凹入角で囲まれると述べられるかも知れない。それではどこが対称面と異なるかと問われれば、筆者らは異なる結晶構造の方位をもつ 2 つ以上の結晶個体の規則的集合体において、各個体をマクロなオーダーで端から端まで仕切る境界面であると称えたい。双晶面は結晶構造における拠曲面であり、断層面である。それでは何故このような断層面が面として大きく発達するのであろうか。それは個々の結晶によって原因の異なる場合もあろう。しかし、一般的に云えることは通常双晶の 28 双晶点群においては、双晶面に垂直な方向に対称面がかならず存在することが一つの理由となろう。この場合かりに対称面にひきずられて双晶面も面を拡大するとしても、

第4図 (a) (b) X 型, Y 型および V 型の双晶のジョイント

結晶構造的に凹入角を有するので、その周縁に凹入角を伴ったまゝ成長を続けて行くことになり、双晶面の成長には大きなレターデーションを伴うのを常とする。すなわち結晶の成長に伴って2等分双晶軸の方向へ対称面が拡大されて行くときに、これにひきずられて垂直方向に延びて行く一種の亀裂が双晶面であるということにもなる。Buerger (1954) のいう過飽和度は双晶体形成の必要条件であるが、さらに2等分双晶軸とこの面内にある対称面とのひきずりにより、双晶体を大きな輪廓をもつものに発達させることとなろう。換言すれば2等分双晶軸とその面内にある対称面は、双晶体における結晶成長の重要なベクトルと云えよう。この点を凹入角の乏しいものの多い異常双晶・擬双晶と対比して考えるとさらに興味深い。

双晶面が撓曲面である場合には双晶体ははるかに形成をされ易くなる。結晶構造の周期性も方位だけが変わられるだけで、原子間距離など連続的個体である場合と変らぬことも多い。このように原子配列の方向だけが変化する双晶を筆者らはつぎのようにアルファベットを用いて分類した(第4図)

V 型 2つの個体が任意の角度をなして1つの双晶接合部で接するもの。アラレ石・石膏・水晶における日本式双晶・方解石における双犬牙状双晶。

Y 型 3つの個体がたがいいに夾角約 120° をなして1つの双晶接合部で接するもの。アラレ石・雲母類・脆雲母類。

X 型 4つの個体がたがいいに夾角約 90° をなして1つの双晶接合部で接するもの。十字

第5図 (a) (b) MNO型, GHI型
およびABC型の双晶の
ジョイント

第6図 スピネルの双晶構造の(110)面への投影図。太田多禾夫の原図による

第7図 アラレ石の双晶における V 型の双晶のジョイントの走査電顕写真

第8図 SiC の双晶における X 型の双晶のジョイントの走査電顕写真
(航空写真による地形図観察用の立体鏡で御覧下さい)

石・車骨鉾・灰十字沸石・燕尾十字双晶。

二重 Y 型 6つの個体がたがい夹角約 60° をなして1つの双晶接合部で接するもの。
クリソベリル・金紅石・雪の結晶。

V. Y. Z. の各枝はその典型的な場合においては双晶にあずかる結晶個体の単位胞の $1/n$ の容積をもち、この部分が両方の個体に共通した団地における共有部分となる（高野・西田, 1964）。筆者らはこのような共有部分を双晶のジョイント Twinning Joint と呼称することを提案したい。第8図に筆者らが走査電顕によって SiC の双晶において観察した X 型の双晶のジョイントをしめす。最近 Pabst (1971) が同じく走査電顕によって観測した黄鉄鉱の双晶における双晶接合部は Y 型の双晶のジョイントを彷彿させる。

いま述べて来たのは交叉する個体の数や角度による双晶のジョイントの分類であるが、もう一つの分類方法として結晶による双晶形成の難易の程度による分類を掲げよう。これも単位胞またはこれと等容積の結晶格子を一般に n 区分 (表現では 3 区分) して、双晶のジョイントとなり得るサブ・セルがいくつあるかによって、アルファベット中の連続した 3 文字を用いて分類した (第 5 図)。

PQR 型 双晶のジョイントとなり得るサブ・セルを 1 つも含まない結晶格子。

ABC 型 双晶のジョイントとなり得るサブ・セルを 1 つ含む結晶格子。双晶のジョイントは A で表現される。

GHI 型 双晶のジョイントとなり得るサブ・セルを 2 つ以上含む結晶格子。H および I は双晶のジョイントとなり得るサブ・セルを表現する。

MNO 型 結晶格子中のどのサブ・セルも双晶のジョイントとなり得る要素をもつもの。

これらサブ・セルはアラレ石 (高野・西田, 1964) における場合のよに原子の座標値の移動を全く行なわずに双方の個体の延長部分となる場合もあるが、一般には原子または分子の座標値に多少の変位が行われた形のサブ・セルになるものと考えられる。また双晶のジョイントを挟む両側の結晶構造の対称関係は、双晶のジョイントを中心として対称面または映進面で解釈される場合も、対称軸または螺旋軸として解釈される場合も考えられるものと思う。双晶のジョイント周辺の結晶構造を考察して実際の結晶に適應させてみると、SiC・閃亜鉛鉱・方鉛鉱・砒四面銅鉱は MNO 型、ザクロ石・黄鉄鉱・自然銅は GHI 型、石膏・普通輝石などの双晶は ABC 型ということが出来よう。ABC 型の具体例として太田多禾夫がスピネルについて画いた双晶のジョイントの周辺の結晶構造を第 6 図にしめす。スピネルにおいて O は立方稠密充填構造をなし、金属原子中、8 配位の Al (図中の中円) はその八面体間隙の $1/4$ を、4 配位の Mg (図中の小円) は四面体間隙の $1/8$ を占める。この鉱物の焦電性などの物性に關連してこれら金属原子が間隙を規則的にみたしていないことが判明しており、スピネルが双晶構造をとり易いことも類推される。この図は (110) 面に投影したもので、その双晶形態における凹入角と一致する 141° の凹角の輪廓が図に見られる。

いままで述べてきたのは双晶のジョイントが理想に近い状態で存在する場合の限られた例であると云える。いわば地層に対応させると層内褶曲や、層内断層のようなもので、変位した先の診断が近くに見出されるスケールの小さなものであろう。地層における断層がしばしば大規模な破碎帯や入江によって境されるように、結晶形態における双晶のジョイントも結晶個体の階段的な中盤の配列や破碎帯を伴なうことが多い。これまで双晶体における結晶構造の関係を解明しようと多くの試ろみがなされたのにもかかわらず、個々の結晶の双晶については解かれても、双晶全般についての統一的なルールが見出し難かった原因もここにひそんでいるものと解される。

一言にして云うならば双晶体の大部分は、断層または節理・亀裂によって結晶構造が仕切られたものであり、少くとも今そこにある段階では結晶構造における結びつきは全くないものと断言し得よう。またしかるが故に単結晶とははっきりと分別されるとも云えよう。双晶のジョイントもこの兩岸を距てる川である場合が多いのであろう。双晶体における薬晶の原因もその川が昔なかったことに起因することもある。また原子・分子またはその配置がもつ 2・3・4・6 の対称性に起因することもある。筆者らはさらに実験的に双晶のジ

ポイントの本質を究明して、あらためて報告する機会に期したいと思う。

謝 辞： 本稿を終えるにあたり、各種の鉱物の双晶の形態につき懇切な御教示を賜った九州大学理学部片山信夫教授並びに国立科学博物館榎井欽一博士に対して深甚の敬意を表する。本研究に関しては東北大学選鉱製錬研究所長南部松夫教授並びに東北大学理学部岩石鉱物鉱床学教室砂川一郎教授より終始熱心な討論と激励を賜った。また双晶体の結晶構造の研究に当っては東芝総合研究所太田多禾夫博士の御協力を得た。なお、本研究に要した費用の一部は昭和46年度文部省科学研究費によった。記して深い謝意を表する。

引 用 文 献

- Buerger, M. J. (1954), The genesis of twin crystals, *Am. Min.*, **30**, 469~482.
 Cahn, R. W. (1954), Twinned crystals. *Advances in Physics*, **3**, 363~445.
 Frondel, C. (1962), The system of mineralogy, John Wiley, III, 75~109.
 原田 準平 (1957), 鉱物概論, 岩波書店, 46~57.
 Hartman, P. (1956), On the morphology of growth twins, *Zeit. Krist.*, **107**, 225~237.
 伊藤 貞市 (1937), 日本鉱物資料, 鉱物会, 続2, 1~5.
 伊藤 貞市 (1938), 双空間群論, 岩鉱, **20**, 201~210.
 小松 啓 (1970), 極性結晶の双晶, 鉱物雑, **6**, 441~450.
 Nambu, M. et al (1970), Introduction to Japanese minerals, *Geological Survey of Japan*, 159~202.
 Pabst, A. (1971), Pyrite of unusual habit simulating twinning from the Green river formation of Wyoming, *Am. Min.*, **56**, 133~145.
 定永 両一 (1959), 双晶空間群論, 鉱物雑, **4**, 1~14.
 須藤 俊男 (1963), 鉱物学本論, 朝倉書店, 265~271.
 須藤 俊男 (1971), 地質学と鉱物学の境界領域に関する課題, 地質雑, **77**, 109~114.
 砂川 一郎 (1962), 単結晶は果して Single か? 鉱物雑, **5**, 347.
 砂川 一郎 (1970), 結晶成長研究上の問題点, 鉱物雑, **9**, 507~516.
 高野 幸雄, 西田 孝 (1966), アラレ石における双晶の機構, 鉱物雑, **8**, 94~104.
 高野 幸雄・西田 孝・太田多禾夫 (1971), 双晶における六方対称と正方対称について, 岩鉱, **66**, 55~61.
 Takano, Y. and Sakurai, K. (1971), Classification of twins I — Bisecting twin axis and the principal twin axis, *Min. Jour.*, **6**, 370~378.
 Takano, Y. and Nishida, T. (1971), Classification of twins II — Twin point groups, and twin space groups, *Min. Jour.*, **7**, 投稿中.