カルクアルカリ火山岩の石基における斜方・単斜
両輝石の鉱物比を推定する方法

A Procedure for estimation of the mineral ratio of
orthopyroxene to sum of both clinopyroxene
and orthopyroxene in the groundmass of
calc-alkali volcanic rocks

竹 下 寿 (Hisasi Takesita)*

Abstract: The estimation is essentially made by construction of frequency distribution of the extinction angle, $c \wedge Z'$, in random orientations of any pyroxenes which are extracted arbitrarily out of good prismatic crystals in the groundmass of a calc-alkali volcanic rock. By the writer's opinion, the cumulative frequency of $c \wedge Z'$ from 0° to 20° , y (%), is expressed as a linear function of x (%), the mineral ratio of orthopyroxene to sum of both clinopyroxene and orthopyroxene, the formula being

$$y = a x + m$$

where $a = (r - m)/100$, and r and m represent the cumulative percentages of $c \wedge Z'$ from 0° to 20° ; r is referred to orthopyroxene (in case of hypersthene, $2V (-) = 60^\circ$, $r = 97\%$, and r is nearly 100% for bronzite or enstatite), while m to clinopyroxene ($m = 16\%$ for a clinopyroxene of which $2V (+) = 45^\circ$ and $c \wedge Z = 45^\circ$, and $m = 24\%$ when $V = 0^\circ$, $c \wedge Z = 40^\circ$). To give an account of these considerations, the writer has obtained the frequency distribution of $c \wedge Z'$ of clinopyroxene and orthopyroxene, respectively, and has ascertained that the practical frequency distribution is well coincide with the theoretical distribution constructed by areal measurement among equiextinction angle lines in the Schmidt net. The equi-extinction angle lines are drawn by interpolation among several projected points, which indicate respective values of $c \wedge Z'$ calculated from the formula for the extinction angle in an arbitrary orientation (Takesita 1957).

The petrologic significance of the mineral ratio of orthopyroxene to sum of both pyroxenes ($Rh \times 100 / (Rh + Mo)$) has also been taken into account as an illustration of consolidation process of some calc-alkali magmas.

1. ま え が き

火山岩を顕微鏡下で、カルクアルカリ岩系列であるか、ソレアイト系列であるかを判定する基本的な方法は、石基斜方輝石が存在するか否かをしらべることである (久野 1954)。もし斜方輝石斑晶または微斑晶のまわりに、単斜輝石 (ビジオン輝石であることが多い)

* 福岡県立門司東高等学校

(昭和 38 年 5 月 27 日受理)

の反応縁があれば、もつともよく区別ができる。しかしながら、同一薄片において、斜方輝石微晶と石基単斜輝石との反応関係および石基両輝石の平行共生（平行連晶や石基両輝石の単独晶出によつてみとめられる）が観察できるばあいがある。これは Vd→c 型（岩石型の記号は久野（1954）による）とは区別すべきで、さらに別の見地よりカルクアルカリ岩、ソレアイト両系列の中間型（Vc—Vd型）とした（竹下・八木 1961）。カルクアルカリ質火山岩の石基輝石は、斜方輝石がごくわずかにみだされるもの（玄武岩質安山岩に多い）から、石基輝石がすべて斜方輝石であるもの（珪長質安山岩や石英安山岩に多い）にいたるまで、種々の段階がある。また、同ような化学組成でありながら、石基両輝石の相対量だけは大きな変化をしめす例がある（竹下・八木前出）。カルクアルカリ質火山岩の石基両輝石の鉱物比は、岩石成因とくにマグマ噴出期の冷却過程において重要であると考えられる。

鏡下で、単斜・斜方両輝石をみわけするには、まず消光角を測ることである。任意断面でみる斜方輝石の大部分は直消光またはそれに近い値をしめし、同じく単斜輝石の大部分は $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ の斜消光をしめす。このばあい、単斜輝石は一般に複屈折度が高く、斜方輝石は低いので、干渉色を参考にする。石基が粗粒ならば多色性も役だつ。しかし細粒組織の石基では、多色性を参考にすることはむずかしく、一方干渉色と消光角とを考慮にいれるには、つぎのような困難点がある。

1) 単斜輝石でも切断方向によつては（b 軸に平行またはそれに近い方向）、直消光またはそれに近い消光をしめす。とくに光軸角の小さいビジオン輝石は、他の単斜輝石にくらべ、直消光の割合が高いが、そのばあいの干渉色は、ビジオン輝石の方が、光軸角の大きい普通輝石にくらべ、比較的高いばあいが多い。また光軸角の大きい普通輝石のなかには、光軸に垂直またはそれに近い方向でみる柱状結晶もあるので、干渉色があらわれないかまたはきわめて低いものがある。このことは、筆者（1957）がかつてしめした等消光角線のステレオ投影からも判断できる。

2) 斜方輝石は、柱状の良好な形の結晶の大部分が直消光またはそれに近い消光をしめし、少量のものは $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ の斜消光をしめす。斜方輝石は一般に干渉色は単斜輝石にくらべて低い、任意の方向でみる多くの結晶のなかには、屈折率の両極値（ α , γ ）がしめされる方向におかれたものがあつて、干渉色の比較的高いものがある。また単斜輝石は一般に干渉色は高いが、断面によつては比較的低い干渉色で、かつ小さな消光角（ときに直消光）をしめすものがある。斜方・単斜両輝石が混在するときには、上述の両方のばあいが種々の割合でおこり、個々の粒の消光角 $c\wedge Z'$ と干渉色とによる斜方・単斜両輝石の判定を困難ならしめる。もちろん自在回転台を使用すれば、この困難はとりのぞかれるが、それには多大の時間を要する。

斜方輝石は一般に単斜輝石より細柱状であるから晶癖による区別も考えられるが、細粒組織の石基ではいずれも同ような晶癖をしめすので、本論にのべる方法で、両輝石の鉱物比をもとめるのが安全であると考えられる。

通常 c 軸にたいし 30° 以内の傾きでおかれた結晶は、柱状の良好な形を呈する。柱状結晶を計数し、それらの消光角 $c\wedge Z'$ を測り、 $c\wedge Z'$ 頻度分布をもとめることにより、両輝石の存在する割合を求める方法をのべる。この方法は、自在回転台を用いないので、薄片の全域にわたり、迅速におこなえる。

2. 単斜輝石および斜方輝石の $c \wedge Z'$ 頻度分布

第1図は石基輝石が単斜輝石のみからなる岩石 (IIIb, Vc 型等) における $c \wedge Z'$ 頻度分布の例をしめす。アルカリ玄武岩類の透輝石質輝石, チタン輝石のばあい, $c \wedge Z'$ が 20° 以下であるようなばあいの割合が 5~16% とすくなく, またソレアイト質岩石 (IVb→c, Vc 型) のビジオン輝石やビジオン輝石質普通輝石のばあい, $c \wedge Z'$ が 20° 以

第1図 単斜輝石の $c \wedge Z'$ 百分率頻度分布図

(a) 高草山粗粒玄武岩中の赤紫色輝石, (b) 福岡県市室山粗粒玄武岩中のチタン輝石, (c) 下関市六連島粗面玄武岩中のチタン輝石, (d) 長野県上水内郡小川村飯綱山かんらん石普通輝石玄武岩 (IVb 型) 中の石基単斜輝石, $c \wedge Z = 40^\circ$, (e) 長野市 郷郷路山 安山岩 中心部 (No. M10, Vc 型) の石基単斜輝石, $2V(+) = 40^\circ$ の普通輝石と $2V = 0^\circ$ のビジオン輝石よりなる, (f) 十和田火山甲島, 第 II 期熔岩 (Vc 型) の石基単斜輝石 (ビジオン輝石)。

第2図 斜方輝石の $c \wedge Z'$ 百分率頻度分布図

(a) 香川県国府台讃岐岩 (Ve 型) の紫蘇輝石, (b) 北海道昭和新山石英安山岩 (Ve 型), (c) 十和田火山御倉山石英安山岩 (Ve 型)。

第1表

	(a)	(b)
$c \wedge Z'$	百分率	百分率
$0^\circ \sim 5^\circ$	4.0	59.6
$5^\circ \sim 10^\circ$	2.6	16.6
	6.6	76.2
$10^\circ \sim 15^\circ$	3.4	12.8
$15^\circ \sim 20^\circ$	3.2	8.0
	6.6	20.8
$20^\circ \sim 25^\circ$	5.1	2.3
$25^\circ \sim 30^\circ$	5.3	0.7
	10.4	3.0
$30^\circ \sim 35^\circ$	8.9	100.0
$35^\circ \sim 40^\circ$	12.1	
$40^\circ \sim 45^\circ$	17.6	$c \wedge Z = 45^\circ$, $2V(+) = 50^\circ$ の
$45^\circ \sim 50^\circ$	29.1	単斜輝石 (a) と, $2V(-) = 60^\circ$
	46.7	の斜方輝石 (b) の等消光角線か
$50^\circ \sim 55^\circ$	7.5	ら計算した任意断面における消
$55^\circ \sim 60^\circ$	1.2	光角 $c \wedge Z'$ の百分率頻度分布
	8.7	(第3図の等消光角線の実線部分
	100.0	について頻度分布をしらべる)。

下の出現頻度は、18~25%（ときに 30%）とかなり多い。 $c \wedge Z'$ の最頻値は $c \wedge Z$ の相異によつてことなる。第 2 図は石基輝石が斜方輝石のみからなる岩石（Ve, VIe, VIIe 型）における $c \wedge Z'$ の頻度分布をしめす。輝石の任意断面における消光角 $c \wedge Z'$ の式

第 3 図

$c \wedge Z = 45^\circ$, $2V(+) = 50^\circ$ の単斜輝石(上)と, $2V(-) = 60^\circ$ の斜方輝石(下)の $c \wedge Z'$ 等消光角線の等面積ステロ投影, 鎖線の小円は c 軸と 30° の傾きをなす面への法線の軌跡をあらわす。(Op. Ax. は光軸)

第 4 図 種々の単斜輝石の $c \wedge Z'$ 百分率頻度の理論的分布図

(竹下 1957) により, 数値計算をおこない, 等面積ステレオ網のうえに, 等消光角線をえがくことができる。第3図は, $2V(+)=50^\circ$, $c\wedge Z=45^\circ$ の単斜輝石と $2V(-)=60^\circ$ の紫蘇輝石の等消光角線の投影図である。結晶の断面が c 軸との傾き 30° 以内の範囲をと

第5図 種々の斜方輝石の $c\wedge Z'$ 百分率頻度の理論的分布図

り, また光軸ふきんでは, 断面と光軸との傾き $70^\circ \sim 90^\circ$ の範囲をのぞき, 各等消光角線の間の面積率を測ることによつて, 第1表のように, $c\wedge Z'$ の百分率頻度をうる。他の光学恒数をもつ輝石についても同じ方法で $c\wedge Z'$ 百分率頻度分布をえ, これを第4, 5図にしめした。その他の光学恒数のばあいには, 内挿・外挿によつて, 概略の頻度分布をうる。第6図は, この内挿と外挿に便である。第1, 2図を第4, 5図とくらべると, 実察の $c\wedge Z'$ 頻度分布は, 理論的な頻度分布(第4, 5図)とよく一致することがわかる。とくに, 第1図(a), (d), (g), 第2図(d)は文献(応地 1962, 杉 1938, 1951, 八木・八木 1958) から知りえた光学恒数から判断して, 実際と理論との一致がよくうかがわれる。

第6図 輝石の光軸角と $c\wedge Z'$ 累積百分率との関係図

3. カルクアルカリ質火山岩の石基輝石の $c\wedge Z'$ 頻度分布

斜方・単斜各輝石の $c\wedge Z'$ 頻度分布の相異により, 両輝石がともに存在するばあいには, 両者の存在する割合に応じて $c\wedge Z'$ が $0^\circ \sim 10^\circ$ および $30^\circ \sim 40^\circ$ または $40^\circ \sim 50^\circ$ と, 一般に2つの最頻値をもつ頻度分布がえられる。この分布の相異を数量的にあつかい, 斜方・単斜両輝石の鉱物比を推定することを試みる。

各輝石のそれぞれの光学恒数にたいし, $c\wedge Z'$ 頻度分布は前節のとおりであるから, 光学恒数の知られた斜方・単斜両輝石が特定の割合でまじりあつたばあいの $c\wedge Z'$ 理論的頻度分布がえられる。第7図はその代表例であるが, 実際の岩石薄片でしらべた $c\wedge Z'$ 分布(第8図)とその形がよく一致している。一般に 20° 付近に分布の明瞭な境界がみられる。ある岩石の石基単斜輝石のみの $0^\circ \sim 20^\circ$ 累積百分率を m , 石基斜方輝石のみのそれを r とすれば, この岩石薄片でしらべた $c\wedge Z'$ の $0^\circ \sim 20^\circ$ 累積頻度 y (%) は,

第7図 種々の斜方輝石量にたいする輝石の c/aZ' の理論的頻度分布図

第8図 種々の斜方輝石量をしめすカルクアルカリ岩石基輝石の c/aZ' 頻度分布の実例, (a)~(e) 長野市銘郷路安山岩, 岩体の周辺部をなすもの, (f)~(n) 萩市笠山下部熔岩の輝石の c/aZ' 頻度分布, 輝石の大きさ (c軸にそう長さ) ごとに分布をしらべた例, (f) 0.01~0.02mm, (g) 0.02~0.03mm, (h) 0.03~0.04mm, (i) 0.04~0.05mm, (j) 0.05~0.06mm, (k) 0.06~0.09mm, (l) 0.09~0.13mm, (m) 0.13~0.18mm, (n) 0.18~0.24mm

斜方輝石量 x ($=Rh \times 100 / (Rh + Mo)$), Rh は斜方輝石, Mo は単斜輝石の割合または計数) の1次式

$$y = a x + m \quad (1)$$

であらわされる。ここに $a = (r - m) / 100$. r, m はそれぞれ斜方輝石, 単斜輝石の光学恒数によつてことなる。これは第6図の $0^\circ \sim 20^\circ$ の曲線をみればあきらかである。 $2V(-) = 60^\circ$ の紫蘇輝石については, $r = 97\%$, $2V(+) = 45^\circ$, $c \wedge Z = 45^\circ$ の単斜輝石のばあい $m = 16\%$ (第6図から補間によつて求めた)。この両輝石からなる岩石では, $a = 0.8$ となる。第9図の直線 A は $r = 97\%$, $m = 15\%$ ($2V(+) = 50^\circ$, $c \wedge Z = 45^\circ$) のばあい, 直線 B は $r = 98\%$ ($2V(-) = 70^\circ$, $c \wedge Z = 0^\circ$), $m = 18\%$ ($2V(+) = 50^\circ$, $c \wedge Z = 40^\circ$) のばあいについて, それぞれ $c \wedge Z'$ 分布からえた y の値により x を求めるためのグラフである。単斜輝石の $c \wedge Z$ は $c \wedge Z'$ 分布から推定され, また普通の偏光顕微鏡下でも測れるので (干渉色の高いものをえらぶ, またしばしばみられる (100) 双晶の接合線により対称消光角がえらばれるばあいには, とくに好都合である), 普通のカルクアルカリ岩のばあい (石基輝石は, 普通輝石 $2V(+) = 45^\circ \sim 60^\circ$ と紫蘇輝石 $2V(-) = 70^\circ \sim 50^\circ$ よりなる), かならずしも光軸角を測ることなく, $c \wedge Z$ をもとめるだけで, A, B いずれかの直線 ($c \wedge Z = 45^\circ$ のばあい直線 A, $c \wedge Z = 40^\circ$ のばあい直線 B をもちいる) または両直線の間の部分をもちて, 斜方輝石量 x を推定しうる。第8図には, このようにして推定した斜方輝石量をしめす。

おもに抽出による y の誤差を Δy とすると, x の誤差 Δx は (1) 式より

$$\Delta x = (1/a) \cdot \Delta y \quad (2)$$

第9図 0° から 20° までの $c \wedge Z'$ 累積 百分率 y と斜方輝石量 x ($=Rh \times 100 / (Rh + Mo)$) との関係図

によつてあたえられる。 γ は鉱物の計数によつてえられた値であるから、その誤差 4γ は、信頼区間をしめす Manning (1953) の式によつてあたえられる。ある母集団における特定の鉱物の出現頻度が p であるばあい、そのなかから全鉱物を N 粒だけ計数し、そのうち n 粒だけ特定の鉱物が計数されれば、頻度 $P=n/N$ により、母集団の p にたいする信頼区間は、次式によつてあたえられる。

$$P\{[\sin(\sin^{-1}\sqrt{p} - t_{\gamma/2} \cdot (1/2\sqrt{N}))^2] \leq p \leq \sin(\sin^{-1}\sqrt{p} + t_{\gamma/2} \cdot (1/2\sqrt{N}))^2\} = \gamma$$

ここに

$$\gamma = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-t_{\gamma/2}}^{+t_{\gamma/2}} e^{-t^2/2} dt$$

$t_{\gamma/2}$ は $\gamma=95\%$ (有意水準 5%) にたいしては、 $N>50$ のばあい、 2.0 とおいてもさしつかえない。Manning はこの式にもとづいて数値計算をおこない、種々の n/N にたいし、計数 N のばあいの confidence belt をしめす図表を作成した。彼の図表をよむと、 95% 信頼区間と標準誤差 $\pm\gamma$ はつぎの通りである。

第 2 表

N	(n/N) × 100 %	信 頼 区 間 95%	± γ	N	(n/N) × 100 %	信 頼 区 間 95%	± γ
50	15	7.0~28.0	± 10.5	250	15	11.0~20.0	± 4.5
	30	18.0~45.0	± 13.5		30	24.5~36.5	± 6.0
	50	35.0~65.0	± 15.0		50	43.7~56.3	± 6.3
	70	55.0~82.4	± 13.7		70	64.1~75.5	± 5.7
	15	8.5~24.1	± 7.8	500	15	12.0~19.0	± 3.5
100	30	21.0~40.0	± 9.5		30	26.0~35.0	± 4.5
	50	40.0~60.0	± 10.0		50	45.0~55.0	± 5.0
	70	60.0~79.0	± 9.5		70	65.0~74.0	± 4.5

(2) 式により $4x$ が計算できる。 $4x$ は一般に $4y$ よりやや大きい。しかし自在回転台をもちいて総計数 N のなかから、斜方輝石の計数 n を確実にえたとしても、母集団における斜方輝石量は前述の誤差 $4y$ に匹敵するものである。

4. 本方法の適用と今後の課題

本方法は、結晶質の火山岩 (ガラスの量を見捨てるもの) に適用すれば、岩石成因ごとにマグマの冷却過程の理解を十分ならしめる。長野市西方の貉郷路採石場の岩頸状岩体はビジオン輝石斑晶を有する火山岩として、八木・八木 (1958) によつて記載された。筆者はこの岩体の露頭のほぼ全域にわたつて系統的なサンプリングをおこない、その薄片について本方法を試みた。その結果、岩体の中心部 (Vc 型) は石基輝石がすべて単斜輝石であるにもかかわらず、周辺部 (Vd 型) は斜方・単斜両輝石からなり、斜方輝石量 x は、 $10\sim 90\%$ (なかには痕跡程度に石基斜方輝石をふくむものがある) にわたつて変化するにもかかわらず、化学組成はほとんど実験誤差内で一致し、ただ FeO と Fe_2O_3 の量比にわずかな差がみられる。この点に関連して、石基斜方輝石量を岩石成因考察の一助としてのべた (竹下・八木 1961)。第 8 図 (a)~(e) は貉郷路 Vc~Vd 型 (a), Vd 型

(b), (c), (d), (e)) 岩石の石基輝石の $c\wedge Z'$ 分布の代表例である。これらはいずれも母岩(泥岩)との接触部から数 m 内外の周辺からの試料である。(d) は急冷周辺部の試料で暗色を呈するガラス質岩であるが、他はみな明灰色結晶質である。これらの化学組成はほとんど変りないことが 2, 3 の分析結果と顕微鏡の特徴とから判定される。それにもかかわらず石基斜方輝石量は変化にとみ、ことに周辺ほど大きな値をしめす。これは進入したばかりのマグマの周辺ほどガス圧の影響を多くこうむり、そのため低温区域の輝石(斜方輝石)が多く晶出したものと解釈している。

今後、本方法をカルクアルカリ火山岩に広く適用し、岩石成因論や火山層序学に資したい。

[補遺] $c\wedge Z'$ の測定には、その度ごとに検板をさしこみ、 Z' の方向をきめて回転ステージを右あるいは左にまわして、結晶を消光位にもたらさねばならない。しかし、検板をさしこむことなく、ステージをつねに右に、あるいはつねに左にまわすよう各自できめておけば、消光角 $c\wedge Z'$ またはその余角 ($c\wedge X'$ にひとしい) を測ることになる。ただし、回転角が 70° 以上になるばあいには、つねにまわす方向とは反対の方向にまわし、その値を負とする。このようにしてえられた消光角の頻度分布は -20° から $+70^\circ$ の範囲にわたり、第 1, 2 図あるいは第 4, 5 図の分布のうえにさらにこれらの分布を裏返しにした形を加えることになるので、対称性のある山型分布となる。これは第 7, 8 図についても同じことである。単斜輝石の $c\wedge Z'$ が 70° 以上になることは、特別なばあい ($c\wedge Z \geq 50^\circ$ のばあい) をのぞき、ほとんどないので、本論にのべたのと同じ方法で、消光角 $c\wedge Z'$ とその余角の $-20^\circ \sim +20^\circ$ 累積百分率 $\gamma(\%)$ をうれば、(1) 式によつて斜方輝石量 χ をうる。ただこのばあい、あらかじめ高い干渉色をしめす粒(とくに(100)双晶により対称消光角のえられるものがよい)について、 $c\wedge Z$ 値を測つておく必要はある。

この簡易化された方法によると、精度はすこしもそこなわれることなく、検板の出し入れにわずらわされないので、一層迅速に測定をおこなうことができる。

謝辞： 終始指導いただいている北海道大学理学部八木健三教授に、また昭和新山の試料を提供いただいた三松正夫氏に心からなる謝意を表する。

引 用 文 献

- 久野 久 (1954), 火山及び火山岩, 岩波全書, 200~219.
 Manning, J. C. (1953), Application of statistical estimation and hypothesis testing to geological data, Jour. Geol., **61**, 544~556.
 応地善雄 (1962), 北九州地域の新生代玄武岩類の岩石学的研究, 岩鉱, **47**, 23~35.
 杉 健一 (1938), 四国高松付近の讃岐岩類, 特にその中の Xenocryst に就いて, 火山, **4**, 17~33.
 ——— (1951), 丹波綾部斑礫岩の異剝石とその包裹物に就いて, 九州大学理学部研究報告, **3**, 2.
 竹下 寿 (1957), 単斜・斜方両輝石の任意断面における消光角 $c\wedge Z'$ について, 岩鉱, **41**, 181~184.
 竹下 寿・八木健三 (1961), 長野市谿郷路安山岩の鉱物組成と化学組成, とくにその成因的考察, 火山, II, **6**, 70~85.
 八木貞助・八木健三 (1958), 上水内郡地質誌, 上水内教育会.