Ca-輝石中の Al_2O_3 量と母岩のマグマ系との関係についての考察

高 沢 耕 一*・平 野 英 雄**

Some considerations on the relations between magma series and Al_2O_3 variation of Ca-pyroxene

Koichi TAKASAWA and Hideo HIRANO

Abstract On the basis of Ca-pyroxene data that have been rapidly accumulated due to recent advancement of analytical methods (EPMA etc.), previous studies on the relations between the Al_2O_3 content of igneous Ca-pyroxene and the magma series are critically reviewed.

Sufficient numbers of analyses of Ca-pyroxenes are needed to infer the magma series, as a small number of analyses might produce a misleading result.

The previous methods to infer the magma series using Ca-pyroxene should be applied only to the groundmass pyroxene of limited composition in basaltic rocks or to the similar pyroxene in the basic rocks of shallow-seated layered intrusions. The application of these methods to Ca-pyroxenes in the ultrabasic and the differentiated intermediate-acidic rocks and to phenocrystic Ca-pyroxenes would incur an unexpected failure.

It is noteworthy, however, that the groundmass Ca-pyroxenes in basaltic rocks or those in the basic rocks of layered intrusions often have a wide compositional range. In such cases, the following criterion may be useful to infer the magma series.: The alumina content of Ca-pyroxene increases with the FeO_t increase of Ca-pyroxene in the alkaline rocks, whereas in the non-alkaline rocks it decreases or remains constant with the FeO_t increase of Ca-pyroxene. Melilite-bearing rocks and feldspar-free alkaline basalts, however, do not necessarily show the above-mentioned alkaline trend.

I. は じ め に

Ca-輝石をつかってその岩石を形成したところのマグマの性質を調べる方法は, KUSHIRO (1960), LeBAS (1962), COOMBS (1963) により提唱された. その後も AOKI (1964), CHALLIS (1965), 丸山 (1976) らにより, 多少の修正を加えた独自の方法が考えられている.

しかしながら, 最近の EPMA を使用しての急激なデーターの集積のなかで, 主として湿式分析による輝石のデーターによって分けられていた LeBAS や AOKI, それに丸山の各マグマ系の領域に, それらとは異なるマグ

マ系の岩石の輝石がプロットされる例が報告されている. たとえば Leucite Hills のアルカリ岩 (CARMICHAEL, 1967) や Mid-Atlantic Ridge のソレーアイト (MUIR & TILLEY, 1964) 中のものは, 従来の方法に従うと, それぞれ非アルカリ岩領域とアルカリ岩領域にプロットされる. また各マグマ系の領域に広くまたがってプロットされる例も知られている (BARBERI *et al.*, 1971; GIBB, 1973; THOMPSON, 1972; TAZAKI, 1976). このため, Ca-輝石をつかってマグマ系を推定する方法に対する混乱や疑問は, 決して少なくない (八木・大沼, 1974; GIBB, 1973 など).

この小論では, Ca-輝石中の Al_2O_3 成分に着目し, 従来の方法を再検討するなかでそれらの方法の適用範囲について考察を加える. さらに TAZAKI (1976) の報告した嶺岡ピクライトの輝石の例のように, 成分変化の著し

1977 年 3 月 18 日 受理

* 東京都練馬区旭町 2-12-29, Asahi-cho, Nerima-ku, Tokyo, 176 Japan.

** 地質調査所鉱床部. Mineral Deposits Department, Geological Survey of Japan, Shinjuku, Tokyo, 162 Japan.

い Ca-輝石群からマグマ系を推定する方法を提案する。

II. 従 来 の 研 究

A. 研究の概要

KUSHIRO (1960) は、火成岩中の Ca-輝石の Al_2O_3 や TiO_2 量を統計的に調べ、これらの微量成分はアルカリ岩系の輝石には多く、ソレーイト系のものには少ないことを示した。そして輝石中のこれらの微量成分は、基本的には、マグマ中の SiO_2 濃度に規制されていると考えた。

この論文の中で彼は、準長石類を含むアルカリ岩系、準長石類を含まないアルカリ岩系およびソレーイト岩系の3者を区別したが、それらの間の境界線を引いていなかった。したがって KUSHIRO の図 (Si-Al または Al-Ti 図) は、ある領域に輝石の分析値がプロットされても、それから単純にマグマ系が推定されるというものではなかったため、後の研究者は、KUSHIRO の図よりもむしろ後に述べる LeBAS (1962) の図 (特に SiO_2 - Al_2O_3 図) をもちいた。また KUSHIRO は、アルカリ岩系に粗面岩・粗面安山岩・閃長岩も含めてそれらの輝石を取り扱っているが、これらの岩石中には、後章で述べるように Al_2O_3 に乏しく SiO_2 に富む非アルカリ岩系のそれときわめて類似の組成をもつ輝石が、多くの岩体から見つかった。

LeBAS (1962) は、主として火山岩の石基 Ca-輝石* をもちいて輝石の微量成分と母岩のマグマ系の対応関係について考察した。

これらの仕事に続いて、AOKI (1964)、CHALLIS (1965)、丸山 (1976) らは、KUSHIRO の仕事の中で残された各マグマ系を分ける境界線を描くなかで、いくつかの興味ある結果を示した。CHALLIS と丸山は、アルカリ岩領域と非アルカリ岩領域との中間に漸移帯をもうけ、きっちりと両者の間を一本の曲線で分けなかった。また、AOKI もこの二人と同様にアルカリ岩類を細分しなかった。

B. Ca-輝石中の Al_2O_3 量

Ca-輝石中の Al_2O_3 量に関与する要因は、主に次の3つが考えられる。それは圧力 (KUSHIRO & YODER, 1964 など)・温度 (MYSEN & BOETTCHER, 1976 など)・マグマの組成 (KUSHIRO, 1960 など) である。

圧力依存性についてはよく知られているところで、斜長石と石英と共存する Ca-輝石は、より高压のものほど

Al_2O_3 に富む (KUSHIRO, 1965)。火山岩の斑晶として産するものの中には、かなりの高压で生じたものも含まれている可能性があるため、斑晶の Ca-輝石を取り扱うときは注意を要する。

また温度の要因も無視できない。たとえば St. Vincent 島のカルク・アルカリ質岩の cumulate block は、約 2 kb の圧力下で生じたにもかかわらず、その Ca-輝石は高い Al_2O_3 量をもっており、LEWIS (1973) はこれを高温下での晶出によるものと考えた。

マグマの組成、特に SiO_2 や Al_2O_3 濃度への依存性は論をまたないところである。液中の Al_2O_3 および SiO_2 量と Ca-輝石中の Al_2O_3 量との関係は、THOMPSON (1974) の実験によると、みごとな相関があることが示されている (第1図)。また液中の SiO_2 に関しては、従来

の反応が成立し、 SiO_2 不飽和マグマほど Ca-チェルマック成分が増加すると考えられていた (BROWN, 1967; CARMICHAEL *et al.*, 1970; GUPTA *et al.*, 1973 など)。最近 CAMPBELL & BORLEY (1974) によって、液組成依存性についてより一般的な形で議論が進められ、Ca-チェルマック成分を含む反応式はつぎのようにあらわされ

第1図 高压下における液中の Al_2O_3 量と液相 Ca-輝石中の Al_2O_3 量の関係。

図中の数字は、液中の Al_2O_3 量をあらわす。A; transitional basalt, B; alkali basalt および tholeiitic andesite, C; augite leucite. 実験は THOMPSON (1974) による。

* 引用資料の一部には、LEWIS (1973) が指摘したように深成岩類のデータが含まれている。しかし深成岩類 (20 個) を除いた残り 35 個の輝石の分析値を筆者らが再検討したところ、LeBAS の非アルカリ岩領域・普通アルカリ岩領域・過アルカリ岩領域の境界は、大局的には変化しなかった。

た.

$$\frac{1}{2}\text{Y}_2\text{O}_3 + \frac{1}{2}\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{M}_2\text{Si}_2\text{O}_6 \\ = (\text{MY})\text{AlSiO}_6 + \text{SiO}_2 + \text{MO}$$

そして

$$(\text{MY})\text{AlSiO}_6 = K_{(\text{P.T})} \frac{(\text{Y}_2\text{O}_3)^{1/2} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3)^{1/2} \cdot (\text{M}_2\text{Si}_2\text{O}_6)}{(\text{SiO}_2) \cdot (\text{MO})}$$

が導びかれている。ここで Y は Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} を, M は Fe^{2+} , Mg, Ca をあらわす。K_(P.T) は平衡定数である。

したがってここである一定の温度・圧力を仮定してやれば、輝石中の Al_2O_3 量は、液組成に依存することになる。たとえば地表付近で固結した火山岩中の石基部の輝石は、2~3 kb 以下の圧力で晶出したものとみなしてさしつかえなく、温度についても、玄武岩質マグマなら 1050~950°C 程度の温度範囲で晶出したと考えられる。したがってこの場合にはほぼ一定の P・T 条件とみなせるため、マグマ中の Al_2O_3 や SiO_2 の活動度が輝石中の Al_2O_3 量を規制することになる。

C. 従来の方法の適用範囲

以上述べてきた輝石中の微量成分に着目してマグマの性質を明らかにする方法は、各提案者によりそれぞれ限定された範囲がある。たとえば KUSHIRO は、Na に乏しいものと限っているだけであるが、LeBAS は Na に乏しい輝石でかつ石基部のものであり、組成範囲を $\text{Ca}_{35-55}\text{Mg Fe}_{0-18}$ と制限している。また丸山も、Na に乏しく $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ が 0.25 以下のものという制限を加えて KUSHIRO の方法を再検討した。しかし丸山の規定した組成の輝石は一般的でないようである。特に EPMA 分析によっている場合、 Fe^{3+} が算出できないことにより、全 Fe を Fe^{2+} として便宜的に表現しているため、 $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}) < 0.25$ のものは、斑晶を除くとそう多くはない。現に丸山 (1976) では、第 1 期の Ca-輝石の分析値中、3 個しか $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}) < 0.25$ を満たしていないし、第 2 期のものでは、40 個のうち 8 個 (2 割) しかこの範囲に入るのはない。

しかしこのように厳しい制限を加えても、いくつかの例はまったく異常な領域にプロットされる。たとえばア

第 1 表 非アルカリ岩領域にプロットされるアルカリ岩の輝石

Rock type of host	Locality	Occurrence	Reference
(1)trachyte	Dogo, Oki	ph., gm.	Uchimizu (1966)
(2)syenite, foyaite	Ilímaussaq	-	Larsen (1976)
(3)wyomingite, orendite	Leucite Hills	gm.	Carmichael (1967)
(4)syenite, shonkinite	Little Belt	ph., gm.	Witkind (1969)
(5)diorite, gabbro	Monteregian	-	Frisch (1973)
(6)monzodiorite, nordakite	Dromedary	-	Boesen (1964)
(7)hawaiite	Oahu, Hawaii	?	Bunch & Keil (1971)
(8)syenite, monzonite	Rattlesnake	-	Carman Jr. et al. (1975)
(9)picrite, picrodolerite	Shiant Isle	-	Gibb (1973)
(10)madupite, orendite	Smoky Butte	ph.	Velde (1975)
(11)trachyte, phonolite	Suswa	ph.	Nash et al. (1969)
(12)alkali gabbro	Tulameen	-	Findlay (1969)
(13)hawaiite	Colorado Plateau	gm.	Best & Brimhall (1974)
(14)camptonite	Tanegashima	-	Yagi et al. (1975)
(15)trachyte, pantellerite	Socorro Island	ph.	Bryan (1969)
(16)jumillite	Murcia & Almeria	?	Borley (1967)
(17)syenite, ijolite	Eastern Uganda	-	Tyler & King (1967)
(18)syenite	White Mountain	-	Hess (1949)
(19)tinguaite	Square Top	?	Wilkinson (1966)
(20)absarokite	Yellowstone	?	Joplin et al. (1972)
(21)hawaiite	Comboyne Plateau	gm.	Knutson & Green (1975)
(22)leucite-bearing rock	New South Wales	ph.	Ferguson (1973)
(23)leucite-bearing rock	Vulsinia	ph.	Ferguson (1973)
(24)ijolite	Mt. Elgon	-	Rock (1976)
(25)basanitoid	Lesser Antilles	mph.	Arculus & Curran (1972)
(26)trachyte	Narce Area	ph.	Hollister & Gancarz (1971)
(27)syenite	Takakusayama	-	Tiba (1966)
(28)tephrite	Vesuvius	ph.	Thompson (1972)
(29)basalt	Ertra'Ale	gm.	Barberi et al. (1971)
(30)phonolite	Vico	ph.	Cundari (1975)
(31)limburgite	Kangerdlugssuaq	gm.	Brooks & Rucklidge (1974)
(32)hawaiite	Nandewar	gm.	Abbott (1969)
(33)phonolite	Canary	?	Ridley (1970)
(34)ijolite	Seabrook Lake	-	Mitchell (1972)

ph.: 斑晶, gm.: 石基, mph.: 微斑晶.

第2図 非アルカリ岩領域にプロットされるアルカリ岩の輝石の Al-Si 図。

黒丸は $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}) > 0.25$, 白丸は $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+} + \text{Mg}) < 0.25$. 実線の境界線は丸山 (1976) による. 点線の境界線は AOKI (1964) による. 出典は第1表参照.

ルカリ岩でありながら AOKI, CHALLIS, 丸山の非アルカリ岩領域におちる例は, Leucite Hills など多数存在する (第1表*および第2図). また, ソレーアイトあるいはカルク・アルカリ岩系に属しながらアルカリ岩領域におちるものとしては, Mid-Atlantic Ridge 玄武岩中の斑晶やコマチ岩中のものがある (第2表および第3図).

このように見てくると, 与えられた制限内でありながら異常な領域にプロットされるものは, アルカリ岩類の場合にはハワイ岩・ミュージアライト・閃長岩・フォノライトなど, 一種の中性～酸性岩的な岩型が多い. これは LeBAS や丸山の場合, アルカリ岩と非アルカリ岩との境界を引くのに用いたデータが, 玄武岩かあるいは玄武岩質安山岩中のものであったためと思われる. というのは, 玄武岩や玄武岩質安山岩とかけ離れた中～酸性の

* 従来の論文では単に Na に乏しい輝石としてあるだけで具体的な制限はなかったが, 丸山 (1976) は Shonkin Sag も含めているので, ここではアルカリ岩の一部に Na_2O が 2.0% 近くまで達するものも含めた. しかし, 大部分は 1.0% 以下である.

第3図 アルカリ岩領域にプロットされる非アルカリ岩の輝石の Al-Si 図。

凡例は第2図に同じ. 出典は第2表参照.

マグマから形成された岩石中の輝石の場合には, それらの液中の SiO_2 や Al_2O_3 活動度が変化しているのに, 輝石中の Ca-チェルマック成分の減少がおりうからである.

また, 実際には非アルカリ岩系に属するものでありながら, アルカリ岩領域におちるものにはコマチ岩**がある. これは, マグマの組成が超塩基性であると同時に, 高温で晶出 (または急激に結晶成長) したためであろう. これに加えて第2表や第3図に示されているように, アルカリ岩領域におちる非アルカリ岩類の輝石の大部分は斑晶 Ca-輝石である. すなわち, 高压で晶出したと思われる Mid-Atlantic Ridge や榛名火山などの火山岩斑晶は, アルカリ岩領域にプロットされる.

したがって従来の方法をもちいる場合には, 玄武岩質岩石中の石基部のものか, 玄武岩質岩石で浅所に侵入固結した岩体 (Skaergaard 岩体など) の輝石に限定されるべきである.

しかし, 玄武岩の石基 Ca-輝石 (Leg 6 やハワイのソレーアイトなど. 第2表参照) や, 浅所侵入のハンレ

** コマチ岩は全て非アルカリ岩というわけではないので, 全岩組成やノルム, それに野外での high-Mg-tholeiite への漸移関係から, 非アルカリ岩と判断されるものだけをもちいた.

第2表 アルカリ岩領域にプロットされる非アルカリ岩の輝石

Rock type of host	Locality	Occurrence	Reference
(1)tholeiitic basalt	Kilauea, Hawaii	ph.	Anderson(1972)
(2)tholeiitic basalt	Maui, Hawaii	mph. & gm.	Fodor et al.(1975)
(3)tholeiitic basalt	Kilauea, Hawaii	ph.	Muir & Tilley(1957)
(4)tholeiitic basalt	Hawaii	ph.	Yoder & Tilley(1962)
(5)tholeiitic basalt	Snake River	?	Tilley & Thompson(1970)
(6)tholeiitic basalt	Leg 6(DSDP)	gm.	Ridley et al.(1974)
(7)tholeiitic basalt	Mid-Atlantic Ridge	ph.	Muir & Tilley(1964)
(8)tholeiitic basalt	Thingmuli	ph.	Carmichael(1964)
(9)tholeiitic andesite	St. Paul	ph.	Gunn et al.(1975)
(10)tholeiitic gabbro	Giles, Australia	-	Goode & Moore(1975)
(11)calc-alkaline basalt	Ryozen	ph.	Konda(1970)
(12)calc-alkaline andesite	Haruna	ph.	Oshima(1975)
(13)calc-alkaline andesite	Ogi & Yoneyama	ph.	Shimazu et al.(1974)
(14)calc-alkaline andesite	Lorne Plateau	ph.	Groome & Hall(1974)
(15)calc-alkaline gabbro	St. Vincent	cum.	Lewis(1973)
(16)calc-alkaline basalt	North Izu	ph.	Kuno(1950)
(17)tholeiitic basalt	Western Atlantic Ridge	gm*	Bryan(1972)
(18)komatiite	Gold Field	gm*	Lewis & Williams(1973)
(19)komatiite	Munro Township	gm*	Fleet & MacRae(1975)
(20)komatiite	Belingwe	gm*	Bickle et al.(1975)

cum.: 集積相, gm.*: dendritic な組織を示す石基. 他の記号は第1表に同じ.

イ岩 (Monteregian 岩体, 第1表参照) のものにも異常な領域にプロットされる例がいくつか存在する. 問題のCa-輝石は, すべて EPMA によって分析されている. 湿式分析は岩片中の輝石の平均組成に近い値をあらわしているとする, EPMA 分析は各粒子の部分的な組成を示している.

薄片単位での輝石組成の大きな変異については, 多数の報告例がある (BARBERI *et al.*, 1971 など). したがって1枚の薄片中のCa-輝石がほぼ均質であるという保証がないかぎり, 数多くの EPMA 分析を行い, 大局をみる必要がある. このことは先に述べた FODOR *et al.* (1975) のハワイのソレーアイト (サンプル番号 C-121) 中の石基 Ca-輝石が, Al_2O_3 量で 1.7~5.0% の範囲をもっていることからうかがえる.

III. 各領域にまたがる輝石群について

第II章Cで述べたように適用範囲 (玄武岩中の石基およびそれに準ずるもの) を設定して, その範囲の中で輝石の分析値を検討してみると, LeBAS の方法にしろ, KUSHIRO の方法をもちいた AOKI, CHALLIS, 丸山のものにしろ, 多少の分散はあるがある領域に集中してプロットされる例が多い. そしてそのプロットされた領域からマグマ系を推定することは可能である.

しかし, 分散の程度が著しく大きく, アルカリ岩領域にも非アルカリ岩領域にもプロットされる例 (BARBERI *et al.*, 1971; HOLLISTER & GANCARZ, 1971; THOMPSON, 1972; ARCULUS & CURRAN, 1972; GROOME &

第4図 漸移帯にプロットされる岩体例のSi-Al図.

(1) Shiant Isles (GIBB, 1973). 黒丸は PD/P-U, 白丸は PD/P-L, (2) Tulameen (FINDLAY, 1969), (3) Blue Mountain (GRAPES, 1975). Endiopside のみ, (4) Kap Edvard Holm (DEER & ABBOTT, 1965). Lower layered series のみ, (5) Comores 群島 (FLOWER, 1973), (6) 温海 (KUSHIRO, 1964). 表示された点は全て $(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}) < 0.25$.

HALL, 1974; GRAPES, 1975; TAZAKI, 1976), および分散の程度は小さいがアルカリ岩と非アルカリ岩の漸移帯にプロットされる例も決して少なくない (第4図). 後者については, たとえば丸山の図では漸移帯の領域が広い, ししばしば生じる問題点である. そしてこのよ

第5図 アルカリ岩の FeO_t - Al_2O_3 図.

(1) Shiant Isles (GIBB, 1973), (2) 嶺岡
アルカリ玄武岩 (田崎, 未公表), (3) 高草
山 (TIBA, 1966), (4) Tahiti (McBIRNEY
& AOKI, 1968), (5) Lesser Antilles
(ARGULUS & CURRAN, 1972), (6) Blue
Mountain (GRAPES, 1975), (7) Central
France (MAGONTHIER & VELDE, 1976),
(8) Vesuvius & Monte Somma (RAHMAN,
1975), (9) 温海 (KUSHIRO, 1964).

うな場合, 従来の方法でマグマ系を決めることは不可能である.

そこで分析値が大きな分散を示す前者も含めて, 各岩系の輝石の成分変化を系統的に調べてみると, アルカリ岩系と非アルカリ岩系 (ソレライトおよびカルク・アルカリ岩) との間に, 異なったパターンが認められる.

A. FeO_t - Al_2O_3 の関係

アルカリ岩系においては, Ca-輝石中の $\text{FeO}+0.9\text{Fe}_2\text{O}_3$ (以後 FeO_t とあらわす) の増加にともない, Al_2O_3 量は一般に増加する* (第5図). また非アルカリ

第6図 非アルカリ岩の FeO_t - Al_2O_3 図.

(1) Bushveld (ATKINS, 1969; HESS, 1960), (2) Centre III (WALSH, 1975), (3) Jimberlana (CAMPBELL & BORLEY, 1974), (4) Stillwater (HESS, 1960), (5) Sudbury Nickel Intrusive (NALDRETT, *et al.*, 1970; HEWINS, 1974), (6) Tawhi-roko (NAKAMURA, 1973; NAKAMURA & COOMBS, 1973), (7) 青沢 (FUJII, 1974), (8) 室戸岬 (YAJIMA, 1972), (9) Nuanetsi (COX & JAMIESON, 1974), (10) Siera Ancha (SMITH, 1970).

岩系の場合は, FeO_t の増加にともない, Al_2O_3 量は減少するかほぼ一定である (第6図). これらの傾向については, LeBAS (1962) によってすでに概念的に示されていた.

この傾向を導くのにもちいた文献を第3表に示す. これらはいずれも玄武岩の石基部のものか, 玄武岩質マグマからの分化で生じた層状分化岩体の場合には, 低圧下で固結したものに限った. また Na に乏しい輝石**のみ着目した. ただし層状分化岩体の場合には, 岩石名が単純に塩基性岩となっても, 中性~酸性マグマからの結晶集積作用の結果としての岩石もある可能性がある

* 筆者らを取り扱った多数の文献中, 1例 (WILKINSON, 1957) のみ例外が認められた.

** ここではアルカリ岩系の場合, Na_2O が 1.0% 以下のものを選んだ.

第3表 第5図および第6図を導くのにもちいた
引用文献

Locality	Reference	Remarks
(1)Atumi	Kushiro(1964)	dol.
(2)Mineoka	Tazaki(unpublished)	gm.
(3)Takakusayama	Tiba(1966)	gm.
(4)Vesvius & Monte Somma	Rahman(1975)	gm.
(5)Lesser Antilles	Arculus & Curran(1972)	mph.
(6)Kangerdlugssuaq	Brooks & Platt(1975)	gm.
(7)Hawaii	Fodor et al.(1975)	gm.
(8)Southeastern California	Smith & Carmichael(1969)	gm.
(9)Nordhessen	Gramse(1970)	gm.
(10)Blue Mountain	Grapes(1975)	gab.
(11)Tahiti	McBirney & Aoki(1968)	gab.
(12)Garbh Eilean	Murray(1954)	gab.
(13)Shiant Isles	Gibb(1973)	gab.
(14)Black Jack	Wilkinson(1957)	gab.
(15)Bridget Cove	Irvine(1973)	gm.
(16)Central France	Magonthier & Velde(1976)	gm.
(17)Picture Gorge	Smith & Lindsley(1971)	gm.
(18)Picture Gorge	Aoki & Kushiro(1968)	gm.
(19)Hawaii	Fodor et al.(1975)	gm.
(20)Hawaii	Evans & Moore(1968)	gm.
(21)Jimberlana	Campbell & Borley(1974)	gab.
(22)Skaergaard	Brown(1957)	gab.
(23)Murotomisaki	Yajima(1972)	gab.
(24)Aozawa	Fujii(1974)	dol.
(25)Stillwater	Hess(1960)	gab.
(26)Tawhiroko	Nakamura(1973)	dol.
(27)Tawhiroko	Nakamura & Coombs(1973)	dol.
(28)Salt Lick Creek	Wilkinson et al.(1975)	gab.
(29)Bushveld	Hess(1960)	gab.
(30)Bushveld	Atkins(1969)	gab.
(31)Sierra Ancha	Smith(1970)	dol.
(32)Centre III	Walsh(1975)	gab.
(33)Nuanetsi	Cox & Jamieson(1974)	gm.
(34)Leg 6	Ridley et al.(1974)	gm.
(35)Sudbury	Naldrett et al.(1970)	gab.
(36)Sudbury	Hewins(1974)	gab.
(37)Niua Fo'ou	Ewart(1976)	gm.
(38)Kiglapait	Morse(1970)	gab.
(39)Mogollon Plateau	Fodor(1971)	gm.
(40)Palisades	Walker(1969)	dol.

(1)~(16): アルカリ岩類, (17)~(40): 非アルカリ岩類. gm.: 石基, mph.: 微斑晶, gab.: はんれい岩, dol.: ドレライト.

ので, 便宜上, 塩基性岩中のものであり Ca-輝石中の FeO_t が, 11.5 wt% 未満のものについてのみ取り扱った.

ここで注意したいことは, 以上の検討を加えるものは, FeO_t 値にある程度の変異があるものに限るということである. あまりこの値が変化しない例, たとえば Blue Mountain 岩体中の endiopside だけから描かれる $\text{FeO}_t\text{-Al}_2\text{O}_3$ 図は, 輝石中の FeO_t 値がほとんど変化しないためか, なんらの傾向も示さない. しかし Blue Mountain 岩体中の titanaugite まで含めた $\text{FeO}_t\text{-Al}_2\text{O}_3$ 図を描くと, endiopside とのつながりは, FeO_t の増加にともなって Al_2O_3 量が増加する傾向がある.

ところで前章で問題にしたハワイのソレーアイトをこの方法をもちいて検討してみると, 石基 Ca-輝石は FeO_t の増加と共に Al_2O_3 量が減少する (Fodor et al.,

1975). またネフェリナイトの石基 Ca-輝石は, Wo 成分の増加と共に Al_2O_3 量が増加し, かつ Fs 成分が増加している. したがって FeO_t の増加と共に Al_2O_3 量が増加するものとみなせる. これら以外の Fodor et al. (1975) がアルカリ岩としたものの Ca-輝石については, $\text{FeO}_t\text{-Al}_2\text{O}_3$ の関係は明瞭でない. これは Fodor et al. (1975) がアルカリ岩系としたものの一部 (サンプル番号 C-118 と C-126) には石基ピジオン輝石が含まれているし, ミュジアライト, ハワイ岩および粗面岩中の輝石も取り扱ったため, はっきりした傾向が出なかったものと思われる. Leg 6 のソレーアイト (Ridley et al., 1974) についても, FeO_t の増加にともなって Al_2O_3 量が減少している.

さらに丸山の図で漸移帯にプロットされた岩石中 (第4図) のものも, この $\text{FeO}_t\text{-Al}_2\text{O}_3$ 図をもちいると, アルカリ岩中の輝石は, FeO_t の増加にともない Al_2O_3 が増加していることがわかる.

B. ゾーニング・パターンについて

石基部あるいは微斑晶様の輝石のゾーニング・パターンも, アルカリ岩については, コアから鉱物端に向かって, FeO_t の増加にともない Al_2O_3 が増加している例が報告されている (Brooks & Platt, 1975 など). さらに, このように地表部で晶出したもの以外で, ほぼ一定の温度・圧力下で急速に成長したと考えられるセクター・ゾーニングをなす塩基性岩中の輝石を対象とした場合, アルカリ岩系と非アルカリ岩系との間に異なったパターンが見られる.

すなわちアルカリ岩系の場合には, FeO_t が増加するにつれて Al_2O_3 が増加し (Smith & Carmichael, 1969; Von Schorner, 1970; Thompson, 1972; Ferguson, 1973; Wass, 1973; Leung, 1974 など), 非アルカリ岩系の場合には, FeO_t の増加と共に Al_2O_3 は減少する (Nakamura, 1973; 大島, 1975 など).

セクター・ゾーニングをもつ輝石は, 各セクターごとに著しく異なった組成をもつことが知られているが, 橋本 (1976) は, このような輝石をもちいても, マグマ系を推定する際に結論に大きな影響を与えないとしている.

しかし従来の方法をもちいたのでは, セクター・ゾーニングをなす輝石からマグマ系を推定するのは困難である. というのは, 従来の方法によるアルカリ岩と非アルカリ岩の各領域にきわめて広く分散する例が多数報告されているからである (Barberi et al., 1971; Thompson, 1972; Hollister & Gancarz, 1971; Tazaki, 1976 など). $\text{FeO}_t\text{-Al}_2\text{O}_3$ の関係では, 逆に FeO_t に大きな

変異があるものほど、明瞭な傾向がえられるものと予想している。

IV. 討 論

KUSHIRO (1960) や LeBAS (1962) らの初期の研究は、輝石中の Al_2O_3 量は、単純にマグマ中の SiO_2 含量に支配されると考えた。その後 CARMICHAEL *et al.* (1970) はこの考えを発展させ、 SiO_2 活動度の考えを導入して各岩系に特有の共存鉱物から $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ buffer 線をもうけ、具体的に $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ を計算した (第7図)。

この図をもちいると、アルカリ岩系と非アルカリ岩系マグマ中の $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ の違いが容易にわかり、輝石中の Al_2O_3 量の相違が説明される。彼らの論文では、アルカリ岩系と非アルカリ岩系は、Ca に乏しい輝石* を含むか含まないかにより区別されているが、その考えに従うと、非アルカリ岩系においては分化が進むに従い、かんらん石と Ca に乏しい輝石が次第に Fe に富むため、Fo-En buffer 線は $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ が増加する方向に変化する。これにともない斜長石は An 成分に乏しいものとなる。ここで輝石中の Al_2O_3 量は、一義的に Ca-チェルマック量に支配されると想定し、問題を単純化するために次の反応式を使って Ca-チェルマック輝石成分を取り扱うと、

第7図 共存鉱物の $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ と温度の関係。

i の上方がソレーサイト、i と ii の間がアルカリ岩、ii 以下は準長石類を含むアルカリ岩。

CARMICHAEL *et al.* (1970) による。

となり

$$a_{\text{CaAl}_2\text{SiO}_6}^{\text{PX}} = K(\text{P.T.}) \frac{a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}}{a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}}$$

と表わされる。分化の進行にともない、輝石の FeO_t と上式の分母の $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ は増加し、分子の $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ は減少する。そこで Ca-輝石中の Al_2O_3 量は分化の進行と共に減少することになる。

他方アルカリ岩系においては、ネフェリン** と共存する長石の Ab 成分 (またはリューサイトと共存する長石の Or 成分) は大きな変化なしに分化が進むため、 $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ はほぼ Ne-Ab buffer 線 (または Lc-Or buffer 線) に沿って減少する。これと同時に $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ も減少するが、非アルカリ岩系の場合、斜長石の $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ は非アルカリ岩系のそれとくらべると低い。また、アルカリ岩系の塩基性岩中の斜長石の An 成分変化は小さい (CARMICHAEL *et al.*, 1974)。そこで、アルカリ岩中の $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ の変化は大きくないことが予想される。このため $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ の減少が反応全体を支配して、輝石中の Al_2O_3 量は増加すると考えられる。

長石類を欠く強アルカリ岩類の場合には、これらの岩石中の $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ は極端に小さいため、輝石中の Al_2O_3 量は低くなることが予想される。実際に Leucite Hills などの wyomingite (長石を欠くフォノライトの1種) 中の輝石は、異常に低い Al_2O_3 量をもっている (CARMICHAEL, 1967)。また強アルカリ岩類でも極端に $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ が低下したものでは、次に示すように黄長石 (ゲーライト成分で代表してある) を生ずる反応が起こり、

SiO_2 により富んでいる場合に、輝石中の Ca-チェルマック成分は富む。したがって分化が進むに従い、輝石中の Al_2O_3 量は減少する (CARMICHAEL *et al.*, 1970)。

ところで中性～酸性岩中の輝石は、第2章 C で述べ

* CIPW ノルム hypersthene に対応するものとする。

** アルカリ岩系はすべてネフェリンまたはリューサイトを含んでいるわけではない。ここでの議論は1つの近似として、共存していない場合でも、共存している場合に準じて議論をすすめる。

たように、アルカリ岩であっても低い Al_2O_3 量をもつ例が普遍的に存在する。これは中性～酸性岩に至るとアルカリ岩中の $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ が著しく低下するためであろう。

第Ⅲ章AおよびBで述べたように、アルカリ岩中の輝石の Al_2O_3 量は FeO_t の増加と共に増加するが、さらに分化が進むに従い、ある時点から減少する例がある(たとえば Shiant Isles : GIBB, 1973 など)。アルカリ岩の場合、中性～酸性岩に至ると $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ はほぼ一定となり、 $a_{\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8}^{\text{Pl}}$ は一方的に減少する (CARMICHAEL *et al.*, 1974)。このようなマグマ中の変化が、Shiant Isles のように分化の初期の段階では輝石中の Al_2O_3 量は増加するが、次第に減少する例の1つの説明となろう。そしてこのような成分変化をしめす例は、アルカリ岩でも Shiant Isles のように層状分化岩体中の輝石に多い。これは早期に晶出したかんらん石やスピネル鉱物などが取り除かれて液との関係を絶たれてしまったため、残液だけの $a_{\text{SiO}_2}^{\text{liq}}$ がかんらん石やスピネル鉱物と共存している状態にくらべると、高くなるために生ずる現象としてもとらえることができる。

これら2つの説明に加えて、分化の進行にともなうマグマの温度低下という要素も、中性～酸性岩中の輝石の Al_2O_3 量減少に作用するかもしれない。実際には層状分化岩体の一部を構成する中性～酸性岩中では、以上の3つの要素が組み合わさって、輝石の Al_2O_3 量を減少させているものと思われる。

V. ま と め

EPMA の分析により比較的容易に輝石の分析値を得ることができるが、乏しい数の分析値からそのマグマ系を推定することは望ましくない。

Ca-輝石から従来の方法にもとづいてマグマ系を推定する場合、超塩基性岩あるいは中性～酸性岩中のCa-輝石、および高温・高圧下で形成された可能性のある斑晶Ca-輝石は、避けるべきである。

1枚の薄片あるいは1つの分化岩体中の輝石群が広い組成範囲を示す場合には、筆者らの提案した FeO_t - Al_2O_3 図がマグマ系推定に有効である。すなわち、 FeO_t の増加に従って Al_2O_3 量が増加する輝石の母岩はアルカリ岩系に、 FeO_t の増加にともなって Al_2O_3 量が減少したりほぼ一定の輝石の母岩は、非アルカリ岩系に属すると判断される。ただし、長石類を欠いたり黄長石を有する強アルカリ岩中の輝石の成分変化については、この限りではない。

謝 辞

筆者らの1人(高沢)の所属教室閉鎖のため、本論文中に引用した文献多数の入手には、国立国会図書館の渋谷正雄氏のお世話をいただいた。東京教育大学の牛来正夫先生からは、本論文をまとめるにあたり終始御指導をいただいた。同大学理学部の田中千代子氏には、文献複写の際お世話をいただいた。また岡山大学温泉研究所の田崎耕市博士には、未公表の資料を教えていただいた。以上の方々に心からお礼申し上げる。

文 献

- ABBOTT, M. J., 1969: Petrology of the Nandewar volcano, N. S. W., Australia. *Contr. Miner. Petrol.*, **20**, 115—134.
- ANDERSON, A. T., 1972: Phenocrysts and glass inclusions and their bearing of oxidation and mixing of basaltic magmas, Kilauea volcano, Hawaii. *Amer. Miner.*, **57**, 188—216.
- AOKI, K., 1964: Clinopyroxenes from alkaline rocks of Japan. *Ibid.*, **49**, 1199—1223.
- 青木謙一郎・久城育夫, 1968: Oregon 州 Spray の Columbia river 玄武岩, Picture gorge 型の分化。岩鉱, **59**, 49—59.
- ARCULUS, R. J. and CURRAN, E. B., 1972: The genesis of the calc-alkaline rock suite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **15**, 255—262.
- ATKINS, F. B., 1969: Pyroxenes of the Bushveld intrusion, South Africa. *Jour. Petrol.*, **10**, 229—249.
- BARBERI, F., BIZOUARD, H. and JAND, V., 1971: Nature of the clinopyroxene and iron enrichment in alkalic and transitional basaltic magmas. *Contr. Miner. Petrol.*, **33**, 93—107.
- BEST, M. G. and BRIMHALL, W. H., 1974: Late Cenozoic alkali basalt magmas in the western Colorado plateaus and the Basin and Range transition zone, U.S.A. and bearing on mantle dynamics. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **85**, 1677—1690.
- BICKLE, M. J., MARTIN, A. and NISBET, E. G., 1975: Basaltic and peridotitic komatiites and stromatolites above a basal unconformity in the Belingwe greenstone belt, Rhodesia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **27**, 155—162.
- BOESEN, R. S., 1964: The clinopyroxenes of a monzonitic complex at mount Dromedary, New South Wales. *Amer. Miner.*, **49**, 1435—1457.
- BORLEY, G. D., 1967: Potash-rich volcanic rocks from southern Spain. *Miner. Mag.*, **36**, 364—379.
- BROOKS, C. K. and PLATT, R. G., 1975: Kaersutite-bearing gabbroic inclusion and the late dike swarm of Kangerdlugssuaq, east Greenland. *Ibid.*, **40**, 259—283.

- and RUCKLIDGE, J. C., 1974: Strongly undersaturated Tertiary volcanic rocks from the Kangerdlugssuaq area, east Greenland. *Lithos*, **7**, 239—248.
- BROWN, G. M., 1957: Pyroxenes from the early and middle stages of fractionation of the Skaergaard intrusion, east Greenland. *Miner. Mag.*, **31**, 511—543.
- , 1967: Mineralogy of basaltic rocks. In HESS & POLDERVAART, eds.: *Basalt*, **1**, 103—162. Wiley-Interscience.
- BRYAN, W. B., 1969: Alkaline and peralkaline rocks of Socorro island, Mexico. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **68**, 194—200.
- , 1972: Mineralogical studies of submarine basalts. *Ibid.*, **71**, 396—403.
- BUNCH, T. E., and KEIL, K., 1971: Contributions to mineral chemistry of Hawaiian rocks. I. Gabbroic pegmatoid dike segregations in the Waranae range Oahu, Hawaii. *Contr. Miner. Petrol.*, **31**, 267—274.
- CAMPBELL, I. H. and BORLEY, G. D. 1974: The geochemistry of pyroxenes from the lower layered series of the Jimberlana intrusion, Western Australia. *Ibid.*, **47**, 281—297.
- CARMAN, M. F. Jr., CAMERON, M. GUNN, B., CAMERON, K. L. and BUTTER, J. C., 1975: Petrology of Rattlesnake mountain sill, Big Bend national park, Texas. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **86**, 177—193.
- CARMICHAEL, I. S. E., 1964: The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in eastern Iceland. *Jour. Petrol.*, **5**, 435—460.
- , 1967: The mineralogy and petrology of the volcanic rocks from the Leucite Hills, Wyoming. *Contr. Miner. Petrol.*, **15**, 24—66.
- , NICHOLLS, J. and SMITH, A. L., 1970: Silica activity in igneous rocks. *Amer. Miner.*, **55**, 246—263.
- , TURNER, F. J. and VERHOOGEN, J., 1974: Thermodynamic approach to classification. In CARMICHAEL, TURNER & VERHOOGEN, eds.: *Igneous Petrology*, 50—59. McGraw-Hill Book Company.
- CHALLIS, G. A., 1965: The origin of New Zealand ultramafic intrusions. *Jour. Petrol.*, **6**, 322—364.
- COOMBS, D. S., 1963: Trends and affinities of basaltic magmas and pyroxenes as illustrated on the diopside-olivine-silica diagram. *Spec. Paper Miner. Soc. Amer.*, **1**, 227—250.
- COX, K. G. and JAMIESON, B. G., 1974: The olivine-rich lavas of Nuanetsi: a study of polybaric magmatic evolution. *Jour. Petrol.*, **15**, 269—301.
- CUNDARI, A. 1975: Mineral chemistry and petrogenetic aspects of the Vico lavas, Roman volcanic region, Italy. *Contr. Miner. Petrol.*, **53**, 129—144.
- DEER, W. A. and ABBOTT, D. 1965: Clinopyroxenes of the gabbro cumulates of the Kap Edvard Holm complex, east Greenland. *Miner. Mag.*, **34**, 177—195.
- EVANS, B. and MOORE, J. G., 1968: Mineralogy as a function of depth in the prehistoric Makaopuhi tholeiitic lava lake, Hawaii. *Contr. Miner. Petrol.*, **17**, 85—115.
- EWART, A., 1976: A petrological study of the younger Tongan andesites and dacites, and the olivine tholeiites of Niua Fo'ou Island, S. W. Pacific. *Ibid.*, **58**, 1—21.
- FERGSON, A. K., 1973: On hour-glass sector zoning in clinopyroxene. *Miner. Mag.*, **39**, 321—325.
- FINDLAY, D. C., 1969: Origin of the Tulameen ultramafic-gabbro complex, southern British Columbia. *Canad. Jour. Earth. Sci.*, **6**, 399—425.
- FLEET, M. E. and MACRAE, N. D., 1975: A spinifex rock from Munro township, Ontario. *Ibid.*, **12**, 928—939.
- FLOWER, M. F. J., 1973: Evolution of basaltic and differentiated lavas from Anjouan, Comores archipelago. *Contr. Miner. Petrol.*, **38**, 237—260.
- FODOR, R. V., 1971: Fe content in pyroxenes from a calc-alkalic volcanic suite, New Mexico, U.S.A. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **11**, 385—390.
- , KEIL, K. and BUNCH, T. E., 1975: Contributions to the mineral chemistry of Hawaiian rocks. IV. Pyroxenes in rocks from Haleakala and west Maui volcanoes, Maui, Hawaii. *Contr. Miner. Petrol.*, **50**, 173—195.
- FRISCH, T., 1973: Clinopyroxenes from Shefford mountain, a Montegregian intrusion in southern Quebec. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **84**, 649—656.
- FUJII, T., 1974: Petrology of the Aozawa dolerite sill, Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, [2], **19**, 57—80.
- GIBB, F. G. F., 1973: The zoned clinopyroxenes of the Shiant isles sill, Scotland. *Jour. Petrol.*, **14**, 203—230.
- GOODE, A. D. T. and MOORE, A. C., 1975: High pressure crystallization of the Ewarara, Kalka and Gosse pile intrusion, Giles complex, central Australia. *Contr. Miner. Petrol.*, **51**, 77—97.
- GRAMSE, M. 1970: Quantitative Untersuchungen mit der Elektronen-Mikrosonde an Pyroxenen aus Basalten und Periodotit-Einschlüssen. *Ibid.*, **29**, 43—73.
- GRAPES, R., 1975: Petrology of the Blue mountain complex, Marlborough, New Zealand. *Jour. Petrol.*, **16**, 371—428.
- GROOME, D. R. and HALL, A., 1974: The geochemistry of the Devonian lavas of the northern Lorne plateau, Scotland. *Miner. Mag.*, **39**, 621—640.
- GUNN, B. M., WATKINS, N. D., TRCIENSKI, W. E. Jr. and NOUGIER, J., 1975: The Amsterdam-St. Paul volcanic province, and the formation of low Al tholeiitic andesites. *Lithos*, **8**, 137—149.

- GUPTA, A. K., ONUMA, K., YAGI, K. and LIDIAK, E. G., 1973: Effect of silica concentration on the diopside pyroxene in the system diopside-CaTiAl₂O₆-SiO₂. *Contr. Miner. Petrol.*, **41**, 336—344.
- 橋本光男, 1976: 序論にかえて一緑色岩研究の2つの話題. マグマ発生の時間的空間的分布, no. 4, 1.
- HESS, H. H., 1949: Chemical composition and optical properties of common clinopyroxenes. Part I. *Amer. Miner.*, **34**, 621—666.
- , 1960: Stillwater igneous complex, Montana, *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 230p.
- HEWINS, R. H., 1974: Pyroxene crystallization trends and contrasting augite zoning in the Sudbury nickel irruptive. *Amer. Miner.*, **59**, 120—126.
- HOLLISTER, L. S. and GANCARZ, A. J., 1971: Compositional sector-zoning in clinopyroxene from the Narce area, Italy. *Ibid.*, **56**, 959—979.
- IRVINE, T. N., 1973: Bridget Cove volcanics, Juneau area, Alaska: possible parental magma of Alaskan-type ultramafic complex. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **72**, 478—491.
- JOPLIN, G. A., KISS, E., WARE, N. G. and WIDDOWSON, J. R., 1972: Some chemical data on members of the shoshonite association. *Miner. Mag.*, **38**, 936—945.
- KNUTSON, J. and GREEN, T. H., 1975: Experimental duplication of a high-pressure megacryst/cumulate assemblage in a near-saturated hawaiite. *Contr. Miner. Petrol.*, **52**, 121—132.
- 今田 正, 1970: 霊山カルクアルカリ玄武岩中のペグマタイトの endiopside. *地質雑*, **76**, 7—12.
- KUNO, H., 1950: Petrology of Hakone volcano and the adjacent area, Japan. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **61**, 957—1020.
- KUSHIRO, I., 1960: Si—Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. *Amer. Jour. Sci.*, **258**, 548—554.
- , 1964: Petrology of the Atumi dolerite, Japan. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, [2], **15**, 135—202.
- , 1965: Clinopyroxene solid solutions at high pressure. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **64**, 112—117.
- and YODER, H. S. Jr., 1964: Experimental studies on the basalt-eclogite transformation. *Ibid.*, **63**, 108—114.
- LARSEN, L. M., 1976: Clinopyroxenes and coexisting mafic minerals from the alkaline Ilimaussaq intrusion, south Greenland. *Jour. Petrol.*, **17**, 258—290.
- LEBAS, M. J., 1962: The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *Amer. Jour. Sci.*, **260**, 267—288.
- LEUNG, I. S., 1974: Sector-zoned titanagites: Morphology, crystal chemistry, and growth. *Amer. Miner.*, **59**, 127—138.
- LEWIS, J. D. and WILLIAMS, I. R., 1973: The petrology of an ultramafic lava near Murphy Well, eastern Goldfields, western Australia. *Ann. Rept. Geol. Surv. W. Australia*, 1972, 60—68.
- LEWIS, J. F., 1973: Petrology of the ejected plutonic blocks, St. Vincent, western Indies. *Jour. Petrol.*, **14**, 81—112.
- MAGANTHIER, M. C. and VELDE, D., 1976: Mineralogy and petrology of some Tertiary leucite-rhönite basanites from central France. *Miner. Mag.*, **40**, 817—826.
- 丸山茂徳, 1976: 四国東部秩父帯中の沢谷緑色岩コンプレックスの化学的性質. *地質雑*, **82**, 183—197.
- MCBIRNEY, A. R. and AOKI, K., 1968: Petrology of the island of Tahiti. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **116**, 523—556.
- MITCHELL, R. H., 1972: Composition of nepheline, pyroxene and biotite in ijolite from the Seabrook lake complex, Ontario, Canada. *N. Jb. Miner., Monat.*, 415—429.
- MORSE, S. A., 1970: Preliminary chemical data on the augite series of the Kiglapait layered intrusion. *Amer. Miner.*, **55**, 303—304.
- MUIR, I. D. and TILLEY, C. E., 1957: Contributions to the petrology of Hawaiian basalts. I. The picrite-basalts of Kilauea. *Amer. Jour. Sci.*, **255**, 241—253.
- and ———, 1964: Basalts from the northern part of the rift zone of the Mid-Atlantic ridge. *Jour. Petrol.*, **5**, 409—434.
- MURRAY, R. J., 1954: The clinopyroxenes of the Garbh Eilean sill, Shiant isles. *Geol. Mag.*, **91**, 17—31.
- MYSEN, B. O. and BOETTCHER, A. L., 1976: Melting of a hydrous mantle: III. Phase relations of garnet websterite+H₂O at high pressures and temperatures. *Jour. Petrol.*, **17**, 1—14.
- NAKAMURA, Y., 1973: Origin of sector-zoning of igneous clinopyroxenes. *Amer. Miner.*, **58**, 986—990.
- and COOMBS, D. S., 1973: Clinopyroxenes in the Tawhiroko tholeiitic dolerite at Molraki, north-eastern Otago, New Zealand. *Contr. Miner. Petrol.*, **42**, 213—228.
- NALDRETT, A. J., BRAY, J. G., GASPARRINI, E. L., PODOLSKY, T. and RUCKLIDGE, J. C., 1970: Cryptic variation and the petrology of the Sudbury nickel irruptive. *Econ. Geol.*, **65**, 122—155.
- NASH, W. P., CARMICHAEL, I. S. E. and JOHNSON, R. W., 1969: The mineralogy and petrology of Mount Suswa, Kenya. *Jour. Petrol.*, **10**, 409—439.
- 大島 治, 1975: 噴火現象の mineralogy. 火山特別号, 第2集, 275—298.
- RAHMAN, S., 1975: Some aluminous clinopyroxenes from Vesuvius and Monte Somma, Italy. *Miner. Mag.*, **40**, 43—52.
- RIDLEY, W. I., 1970: The petrology of the Las Canadas volcanoes, Tenerife, Canary islands. *Contr.*

- Miner. Petrol.*, **26**, 124—160.
- , RHODES, J. M., REID, A. M., JAKES, P., SHIH, C. and BASS, M. N., 1974: Basalts from Leg 6 of the Deep-Sea Drilling Project. *Jour. Petrol.*, **15**, 140—159.
- ROCK, N. M. S., 1976: Petrogenetic significance of some new xenolithic alkaline rocks from east Africa. *Miner. Mag.*, **40**, 611—625.
- SHIMAZU, M., KOMATSU, M. and YAMADA, M., 1974: Chrome-diopsides from the Miocene basalts and andesites in the Misaka mountainland, Yamanashi Prefecture, central Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 11, 59—67.
- SMITH, A. L. and CARMICHAEL, I. S. E., 1969: Quaternary trachybasalts from southeastern California. *Amer. Miner.*, **54**, 909—923.
- SMITH, D., 1970: Mineralogy and petrology of the diabase rocks in a differentiated olivine diabase sill complex, Sierra Ancha, Arizona. *Contr. Miner. Petrol.*, **27**, 95—113.
- and LINDSLEY, D. H., 1971: Stable and metastable augite crystallization trends in a single basalt flow. *Amer. Miner.*, **56**, 225—232.
- TAZAKI, K., 1976: Dendritic titanaugite in ultrabasic picrite basalt from the Mineoka tectonic belt, Boso Peninsula, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **82**, 573—580.
- THOMPSON, R. N., 1972: Oscillatory and sector zoning in augite from a Vesuvian lava. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **71**, 463—470.
- , 1974: Some high-pressure pyroxenes. *Miner. Mag.*, **39**, 768—787.
- TIBA, T., 1966: Petrology of the alkaline rocks of the Takakusayama district, Japan. *Sci. Rept. Tohoku Univ.*, [3], **9**, 541—610.
- TILLEY, C. E. and THOMPSON, R. N., 1970: Melting and crystallization relations of the Snake river basalts of southern Idaho, U.S.A., *Earth Planet. Sci. Lett.*, **8**, 79—92.
- TYLER, R. C. and KING, B. C., 1967: The pyroxenes of the alkaline igneous complexes of eastern Uganda. *Miner. Mag.*, **36**, 5—21.
- UCHIMIZU, M., 1966: Geology and petrology of alkali rocks from Dogo, Oki islands. *Jour. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, [2], **16**, 85—159.
- VELDE, D., 1975: Armalcolite-Ti-phlogopite-diopside-analcite-bearing lamproites from Smoky Butte, Garfield County, Montana. *Amer. Miner.*, **60**, 566—573.
- VON SCHORER, G., 1970: Sanduhrbau und Optik von titanaugiten alkalibasaltischer Gestein des Vogelsberges. *N. Jb. Miner., Monat.*, 310—325.
- WALKER, K. R., 1969: The Palisades sill, New Jersey: a reinvestigation. *Spec. Paper Geol. Soc. Amer.*, **111**, 178 p.
- WALSH, J. N., 1975: Clinopyroxenes and biotites from the Centre III igneous complex, Ardnamurchan, Argyllshire. *Miner. Mag.*, **40**, 335—345.
- WASS, S. Y., 1973: The origin and petrogenetic significance of hour-glass zoning in titaniferous clinopyroxenes. *Ibid.*, **39**, 133—144.
- WILKINSON, J. F. G., 1957: The clinopyroxenes of a differentiated teschenite sill near Gunnedah, New South Wales. *Geol. Mag.*, **94**, 123—134.
- , 1966: Clinopyroxenes from the Square Top intrusion, Nunndle, New South Wales. *Miner. Mag.*, **35**, 1061—1070.
- , DUGGAN, M. B., HERBERT, H. K. and KALOCZAI, G. I. Z., 1975: The Salt Lick creek layered intrusion, east Kimberley region, western Australia. *Contr. Miner. Petrol.*, **50**, 1—23.
- WITKIND, I. J., 1969: Clinopyroxenes from acidic, intermediate, and basic rocks, Little Belt mountain, Montana. *Amer. Miner.*, **54**, 1118—1138.
- YAGI, K., ISHIKAWA, H. and KOJIMA, M., 1975: Petrology of a lamprophyre sheet in Tanegashima islands, Kagoshima Prefecture, Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.* **70**, 213—224.
- 八木健三・大沼晃助, 1974: アルカリ岩の輝石に関する2・3の問題. *地質学論集*, no. 11, 293—302.
- YAJIMA, T., 1972: Petrology of the Murotomisaki gabbroic complex. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.* **67**, 218—241.
- YODER, H. S. Jr. and TILLEY, C. E., 1962: Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock system. *Jour. Petrol.*, **3**, 342—532.