閃長岩化作用の温度及び関連する 2・3 の問題*

村 上 允 英**

(1960 年 7 月 6 受理)

Temperature of Syenitization of Granite and Some Related Problems

Nobuhide MURAKAMI

(Abstract)

The temperature of crystallization of the syenites occurring in granitic rocks was estimated by the values of $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ (CuK α) for albites after MacKenzie's diagram, as follows:

Type A : 470-510°C

Type B : 440-460°C

Type B' : 450°C, or 420-430°C or lower

Type C : 410-430°C or lower

In relation to the crystallization temperature of albites, the following problems are discussed in this paper.

1. The stability relation between albites and co-existing potash-feldspars.
2. The relation between crystallization temperatures and types of pyroxenes.
3. The stability relation between pyroxenes and andradites.
4. The crystallization temperature of the potash-feldspar from the Yashiro granite.

1. 緒 言

筆者は先に西南日本各地の花崗岩中に産する閃長岩質岩石の産状および構造・組織を総括的に記載し、あわせて閃長岩の生成温度および含有する 2・3 の鉱物の安定関係についてある程度の推論を行なった。しかし、それは主に野外における岩石の産状と顕微鏡下の観察によりなされたもので、定量的データに基くものではなかった。筆者はその後閃長岩中の長石類を光学およびX線的に詳しく調べて、上述の問題に関し更に精確なデータを得ることができたので、その大要を報告する。

2. 従 来 の 研 究

前論文 (MURAKAMI, 1959) において、筆者は閃長岩を構成鉱物により次の 4 タイプに分けた。

Type A : 有色鉱物が角閃石あるいは黒雲母よりなるカリ閃長岩。交代を行つた alkali-emanation は著しく K に富むが、Na をも伴っていたと考えられ、含有斜長石は殆んど曹長石化されている。カリ長石は何れも正長石質である。

Type B : 有色鉱物が輝石・角閃石・灰鉄柘榴石よりなるソーダ閃長岩。交代を行つた alkali-emanation は著しく Na に富むもので、含有するカリ長石は原花崗岩よりの残存鉱物か、あるいはその再結晶したもので何れも微斜長石質である。

Type B' : 有色鉱物が緑簾石よりなるもの。カリ閃長岩とソーダ閃長岩とあり、alkali-emanation

* 1960 年 6 月 19 日 日本地質学会西日本支部例会において発表。

** 山口大学文理学部地学教室

地質学雑誌 第 67 巻 第 787 号 1961 年 4 月

Fig. 1 Distribution of syenites at Utsugiono, Yamaguchi Prefecture.

1: Alluvium, 2: Granodiorite-porphry, 3: Syenite and associated alkali-granite, 4: Biotite-granite and hornblende-biotite-granite, 5: Pre-granitic intrusive rocks (granodiorite, plagiophyre, aplite and porphyrite), 6: Kwanmon group, 7: Sangun metamorphic group and serpentinite, 8: Flow direction of alkali-emanation, 9: Boundary line between three types of syenite, 10: $2\theta_{131}$ - $2\theta_{131}$ of albite in syenites, 11: Boundary line between orthoclase-bearing syenite and microcline-bearing syenite, 12: Fault line.

の成分には K に富むものも Na に富むものもあつたことを示している。カリ長石は微斜長石—正長石質である。

Type C: 有色鉱物が緑泥石・緑簾石・変質黒雲母よりなるもの。カリ閃長岩とソーダ閃長岩とある。含有するカリ長石はカリ閃長岩においては大部分正長石質で一部微斜長石質，ソーダ閃長岩においては正長石—微斜長石質である。

以上各タイプの閃長岩の生成温度の推定は次のような証拠に基づいてなされた。

1) 産状：山口県稔小野地域に産する閃長岩体は Type B・Type B'・Type C の順に漸移的に配列・分布している (Fig. 1)。これ等の中，Type B は岩体が最も大きく交代が行われていて，Type C は規模が小さく交代も不完全である。恐らく Type B は alkali-emanation の浸入地に近い地域において生成され，Type C は浸入地より遠く離れた地域において生成されたものであろう。このことから Type C・Type B' は Type B よりも低温で生成されたものと考えられる。

なお後述のように水蒸気圧は一般に Type B よりも Type B'・Type C において高いが, emanation 浸入地より著しく離れた地域においては後者のうける水蒸気圧は逆に著しく低くなつていたものと考えられる。

2) 含有鉱物の組み合わせ: Type A・Type B は略々 Amphibolite facies-Epidote-amphibolite facies に, Type B' は Epidote-amphibolite facies に, Type C は Greenschist facies に属すると考えられる。

以上の証拠により Type A・Type B は高温で, Type B'・Type C はそれよりも低温で生成されたと推論された。

3. 生成温度の推定

MacKENZIE (1957) は 500°C から 1000°C にわたる間の種々の温度において, 合成した曹長石*の構造を安定化させることに成功し, その合成曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ (CuK α)** の値から, 逆にその生成温度を推定できることを明らかにした。Table 1 に示される通り閃長岩中の曹長石は光学的には大体 An 1—5.5 の成分***であるが, 岩石の総化学成分よりの推定・SMITH and YODER (1956) の図表上の位置・測定の誤差****・図表の精度***** 等より考えると, 実際の成分は更に, Ab 分に富んでいるものの

ように思われる。例えば愛媛県岩城島産閃長岩中の曹長石の成分は光学的には An 3.5 であるが, $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値は SMITH and YODER (1956) の図表上では低温型斜長石の線を可成り下方に隔つた所に位置 (Fig. 2) していて, また岩石の総化学成分より推定される値は An 2.2 である。また $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値は再結晶の著しい岩石中でもそうでない岩石中でも殆んど差が認められない。従つて生成後の熱作用が余りなければ MacKENZIE (1957) の図表によつて, その大体の生成温度の推定が可能であると考えられる。然し図表使用にあつては次の様な点を検討しておかなければならない。MacKENZIE は 500°C 以下の温度においては曹長石の安定化に成功しなかつたが, 生成温度に関する $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の変化曲線を外挿的に延長した結果, その値が low albite の値*****を示すのは約 440°C であるということを見出している。440°C 以下の温度における曹長石の合成は未だ成功していないが, MacKENZIE は alpine vein 中の曹長石*****が high-intermediate albite の性状を有することから, 急冷条件下 (低水蒸気圧下) あるいは低温下においては, 曹長石中の Al-Si 原子の ordering を促進するために必要なエネルギーが十分に得られないため, この条件下で安定な

Fig. 2. Relation between $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ and An-content of plagioclases.

* 曹長石質ガラスを結晶化させたもの。

** 以下単に $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ と記す。

*** 浸液法により α を測定し, CHAYES (1952) の図表を用いた。

**** 屈折率は ± 0.0005 , 従つて $\pm \text{An } 1$ の誤差があると考えられる。

***** CHAYES (1952) の図表においては An 5 以下の成分の斜長石で少くとも An 2—3 の誤差が認められる。

***** 天然産曹長石中 $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値の最小のもので, $1.04 \pm$ と推定される。

***** adularia を伴い, 略々 300°C の生成といわれている。

low albite* の構造が得られず, $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ はむしろ high-intermediate albite の値を示すであろうと述べている。この理論は既に LAVES (1952) により adularia の結晶構造に関し述べられていて, BARTH (1956) も低温 ($400^{\circ}\text{C}\pm$) 生成の片麻岩中におけるカリ長石が正長石質であることから同様の考えを述べている。又いわゆる authigenic potash-feldspar にも正長石質のものが多く知られ (BASKIN, 1956), 低温実験でも晶出の例 (BARRER, 1950) が知られていて, 上述の理論の正しいことを証明している。従つて略々 440°C より低温においては曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は次第に大きくなると考えられる。

なお生成温度がそれ程低くなくても冷却速度が大であれば曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値は大である。然し曹長石の安定化に要する時間** はカリ長石に比べて比較的短く, 後述のように岩石の産状・組織・含有鉱物等の性状を併せ考えて, ほぼ 440°C より高温の場合には全体的にこの冷却条件差は余り考える必要がないように思われる。

以上の実験結果を参考にして閃長岩中の曹長石の生成温度を推定すると次の通りである。なお純粋な曹長石との成分の違いによる温度の誤差は大体 10°C 以内で, 閃長岩相互間における成分の差による生成温度の誤差*** はこれよりも更に小さいと考えられる。

1) Type A 閃長岩

曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は 1.44 および 1.23 であるが, その生成温度が 440°C よりも高温か低温かはこの値からのみでは分らない。然し共存するカリ長石**** は Type C におけるカリ閃長岩中のカリ長石よりも著しく Na に富んでいる (Fig. 5)。TUTTLE and BOWEN (1958) によれば Or-Ab 系における固相分裂曲線(solvus)は低温になる程 Or 側および Ab 側に拡がるような形をしている。従つて高温で生成したカリ長石は低温で生成したカリ長石よりも Ab 分に富んでいることになる。また Type A 閃長岩中の有色鉱物は Type C 閃長岩中の有色鉱物よりも高温生成と考えられる。このような証拠により Type A 閃長岩中の曹長石は Type C 閃長岩中の曹長石よりも高温で, 恐らく 440°C よりも高温生成のものと考えられる。従つて MacKENZIE の図表によりその生成温度を求めると 510°C および 470°C あるいはこれよりやや低温 (冷却の早い時) となる。

2) Type B 閃長岩

曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は 1.19—1.04 にわたるが, 後述のように Type B' および Type C 閃長岩中の曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ も 1.19—1.12 にわたる値を示している。然し Type B 閃長岩と Type B'・Type C 閃長岩とは次のような点において異なっている。

a) 産状と含有鉱物とより, Type B 閃長岩は Type C 閃長岩よりも高温生成で, また恐らく Type B' 閃長岩よりも高温生成と推定される。

b) 後述のように Type B 閃長岩中のカリ長石は常に微斜長石質であるが, Type C 閃長岩において安定なカリ長石は正長石質のようである。微斜長石と正長石とは次のように種々の異つた条件下において生成されると考えられている。

(i) 正長石は微斜長石よりも高温 (略々 500°C 以上) で生成 (GOLDSMITH and LAVES, 1952a; HEIER, 1957)。

* FERGUSON, TRAIL and TAYLOR (1958) は charge balance の理論より, 長石において低温で安定なのは中間型斜長石及び正長石と考えた。然し MacKENZIE and SMITH (1959) はこれに反対している。

** 500°C 以上では 2000—3000 時間で, それ以下の温度では可成り長くなるようである。

*** SMITH and YODER (1956) の図表によれば, An 成分差による $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の偏差は大部分 0.03 以下であるが, その値と共存する他の鉱物の種々の恒数との間に比較的規則正しい関係が認められるので, 上述の偏差は更に小さいように思われる。

**** カリ長石の成分及び系列の決定は TUTTLE (1952) の図表によつた。

(ii) 中程度以上の温度において正長石は急冷条件下で、微斜長石は緩冷条件下で生成 (LAVES, 1950; MARMO, 1958)。

(iii) 正長石は微斜長石よりも低温 (略々 400°C 以下) で生成 (BARTH, 1956; MCKENZIE, 1957)。

以上の各条件差の中冷却条件差* については余り明らかでない。然し岩石の産状・組織等よりみて、正長石を含む Type B'・Type C 閃長岩のみが特に急冷条件下にあつたとは考え難く、全体的にみてこの条件差は余り問題にしないで良いように思われる。また含有鉱物・産状等より Type C 閃長岩が Type B 閃長岩よりも高温生成とは考え難い。従つて Type B 閃長岩は Type C 閃長岩よりも高温で生成されたと考えられる。また Type B' 閃長岩中のカリ長石は大部分正長石質であるが、Type B 閃長岩に近い地域に分布する岩石中では微斜長石質である (Fig. 1)。恐らく正長石質カリ長石を含む Type B' 閃長岩は Type B 閃長岩よりも低温生成と考えられるが、微斜長石質カリ長石を含むものは Type B 閃長岩に比べ、ただ水蒸気圧の高い条件下にあつたのみで、著しい生成温度の相違はなかつたとも考えられる。

従つて Type B 閃長岩中の曹長石においては $2\theta_{131}-2\theta_{131}=1.06$ の値を示すものが最も低い温度で生成**されたもので、生成温度の巾は略々 $440-460^{\circ}\text{C}$ (あるいはこれよりやや低温) にわたると推定される。なお福岡県長垂の Complex pegmatite より産した交代性曹長石 (An 3) は $2\theta_{131}-2\theta_{131}=1.07$ で、その生成温度は Type B 閃長岩中の曹長石の生成温度と大体同じである。

3) Type B' 閃長岩

曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は $1.14-1.19$ である。上述のようにそれらの多くは Type B 閃長岩中の曹長石よりも低温、即ち 440°C よりも低温生成と推定される。温度の低下に伴い曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ が 440°C より低温の場合においても高温の場合においても全く同一の変化を示すならば、その生成温度は略々 $420-430^{\circ}\text{C}$ ということになる。然しこの点にはなお多くの問題が残されていて、その生成温度は更に低い可能性もある。なお上述のように微斜長石質カリ長石を伴う曹長石は 440°C よりも高温生成の可能性がある。

4) Type C 閃長岩

曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は $1.12-1.21$ で、その生成温度は $410-430^{\circ}\text{C}$ か、或いは更に低温と推定される。Type C 閃長岩中で有色鉱物の変質黒雲母であつたり、緑簾石・緑泥石であつたりするのは、それ等に伴われる曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値に大差がないので、恐らく水蒸気圧が前者においては低く、後者においては高かつたため、生成温度の相違によるものではないと考えられる。またカリ閃長岩とソーダ閃長岩との間にも生成温度の相違は存在しないようである。

なお、山口県出葉に産する曹長岩 (村上, 1955) 中の曹長石 (An 4) は

Fig. 3. Temperature of syenitization.

* 勿論個々の岩石について幾分かの冷却条件差はあるかも知れない。然し閃長岩のタイプに関係するほど大きく影響しているとは考え難い。

** $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ が 1.15 よりも小さい曹長石は 440°C 以下の温度において生成した可能性が考えられるが、後述のように共存する輝石との関係よりすれば、大部分 440°C より高温で生成したと考えた方が良いように思われる。

Table 1. Crystallization temperature of albites in some syenites.

No.	Loc.	Rock	Type	Geologic age	Albite		
					An-content (Average) (determined optically)	$2\theta_{131}-2\theta_{131}$	Temperature °C
1	Kagawa, Yamaguchi Pref.	Biotite-quartz- syenite	A	Cretaceous	4	1.44	510
2	Miyauchi, Hiroshima Pref.	Hornblende-quartz- syenite	A	ditto.	3	1.23	470
3	Utsugiono, Yamaguchi Pref.	Ferrosalite- quartz-syenite	B	ditto.	5.5	1.19	460
4	In Islet, Hiroshima Pref.	ditto.	B	ditto.	4.5	1.14	450
5	Yamada, Osaka Pref.	Aegirine-augite- quartz-syenite	B	Triassic	4	1.11	450
6	Utsugiono, Yamaguchi Pref.	Andradite- quartz-syenite	B	Cretaceous	4	1.08	450
7	Iwaki Islet, Ehime Pref.	Aegirine- quartz-syenite	B	ditto.	3.5	1.06	440
8	ditto.	Epidote- quartz-syenite	B'	ditto.	3	1.12	450, or 430 or lower
9	ditto.	ditto.	B'	ditto.	3	1.15	450, or 430 or lower
10	ditto.	ditto.	B'	ditto.	5.5	1.19	420 or lower
11	Tsugawa, Shimane Pref.	Chlorite- quartz-syenite	C	ditto.	1	1.12	430 or lower
12	Watase, Yamaguchi Pref.	Altered biotite- quartz-syenite	C	ditto.	4.5	1.16	420 or lower
13	Tateiwa, Ehime Pref.	Epidote-chlorite- quartz-syenite	C	Triassic	3	1.16	420 or lower
14	Irahara, Fukuoka Pref.	Chlorite- quartz-syenite	C	Cretaceous	3	1.17	420 or lower
15	Kishiro, Fukuoka Pref.	Epidote-chlorite- quartz-syenite	C	Triassic ?	3	1.18	420 or lower
16	Watanose, Hiroshima Pref.	Altered biotite- quartz-syenite	C	Cretaceous	4	1.18	420 or lower
17	Kumogi, Shimane Pref.	ditto.	C	Palaeogene	5	1.21	410 or lower

$2\theta_{131}-2\theta_{131}=1.16$ で Type C 閃長岩中の曹長石と略々同一温度で生成されたものと考えられる。

以上各タイプの閃長岩の生成温度* の関係を括めると Fig. 3 のようになる。

なお TUTTLE and BOWEN (1958) によれば、曹長石は H_2O 4000kg/cm² (3869 atm) の圧力下においても熔融するには 750°C の温度を必要とするという。また H_2O に HF を伴う成分系 (TUTTLE and WILLEY, 1957) においても曹長石の熔融には 80000psi (5340 atm.) において 550°C もの温度を必要とする。従つて筆者の主張しているように閃長岩中の曹長石は何れも熔融体 (magma) よりの晶出物ではなく、ガスあるいは熱水条件下における生成と考えられる。

4. 曹長石と共存するカリ長石との安定関係

閃長岩中には曹長石と共に屢々カリ長石が共存している。カリ閃長岩の様に曹長石化作用とカリ長石化作用とが同時に行われる場合には、曹長石と共存するカリ長石とは略々平衡関係にあると考えら

* low albite 以外の曹長石は晶出後は常温でも metastable と考えられる。従つて熱作用を受けた岩石や古い地質時代の岩石においては、曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ より、その生成時の温度を正確に推定できるか何うかはなお検討を要する。然し既述の閃長岩中の曹長石には殆んど low albite に等しいと思われるものに伴つて種々の中間型の構造を示す曹長石が共存し、また後述のように曹長石と共存する他の鉱物との間に規則的安定関係が認められるので、上述の値は大体そのまま使用できるように思われる。

れるが、カリ長石が原花崗岩中の残存鉱物である場合には両者は必ずしも平衡関係にあるとは限らない。即ち花崗岩中のカリ長石は再結晶作用をうける場合を除き、単に閃長岩化作用中の加熱をうけるだけの時には、その温度において安定な結晶構造に変化するに必要な熱エネルギーが十分に得られないことがあると考えられる。特に低温の場合において著しいであろう。このような見地から、閃長岩中のカリ長石の光軸角と、閃長岩に近接する花崗岩中のカリ長石の光軸角との関係を求めると Fig. 4 のようになる。この関係を検討した結果次のような結論が得られる。

Fig. 4. Relation between 2V about X of potash-feldspars in syenites and that in surrounding granites.

Fig. 5. Relation between 2V about X and Or-content of potash-feldspars.

1) Type A 閃長岩

何れもカリ閃長岩であるので、カリ長石と曹長石とは略々平衡関係にあると考えられる。

2) Type B 閃長岩

全ての閃長岩において、含有カリ長石量は周辺花崗岩中のカリ長石量よりも少ない。従つてこの場合には次のような検討が必要である。

(i) カリ長石が再結晶作用により斑状変晶

をなす場合(大阪府山田産閃長岩)：カリ長石と曹長石とは略々平衡関係にあると考えられる。

(ii) その他の場合：Fig. 5 および Table 2 に示す通り閃長岩中のカリ長石は常に微斜長石質である。この性質は閃長岩の周辺にある花崗岩中のカリ長石が正長石質の場合においても同様である。この関係により、花崗岩よりの残存カリ長石は閃長岩化作用の折に熱せられてその内部構造を変化したものと考えられる。従つてカリ長石と曹長石とは平衡か或いはそれに近い関係にあつたものと推論される。

3) Type B' 閃長岩

カリ閃長岩中では曹長石とカリ長石とは略々平衡関係にあると考えられる。ソーダ閃長岩においては Fig. 4 の通り、閃長岩中のカリ長石の光軸角は、閃長岩の周辺にある花崗岩中のカリ長石の光軸角よりもやや大である。然し多くの場合 Type B' 閃長岩の生成温度は Type B 閃長岩の生成温度より低いと推定されるので、ソーダ閃長岩中におけるカリ長石と曹長石とが完全に平衡関係にあるかどうかは更に検討を要する。Type C 閃長岩の性状よりして、恐らく完全な平衡関係にはないものと考えられる。

4) Type C 閃長岩

カリ閃長岩においてはカリ長石と曹長石とは平衡関係にあるものと考えられる。ソーダ閃長岩については Fig. 4 に示す通り、閃長岩中のカリ長石と周辺花崗岩中のカリ長石とはその光軸角において

Table 2. Optical constants and X-ray datas of potash-feldspars and co-existing albites.

No.	Loc.	Rock	Type	Potash-feldspar			Albite		
				γ	2Vx	Triclinicity	α	2Vz	$2\theta_{131}-2\theta_{131}$
1	Kagawa, Yamaguchi Pref.	Biotite-quartz-syenite	A	1.5285	54-57	0	1.529-1.530	80-83	1.44
2	Miyauchi, Hiroshima Pref.	Hornblende-quartz-syenite	A	1.5245	48-51	0	1.529	n. d.	1.23
3	Iwaki Islet, Ehime Pref.	Aegirine-quartz-syenite	B	1.524	73-76	0.89	1.528-1.531	76-82	1.06
4	Shôdo Islet, Kagawa Pref.	Ferrosalite-quartz-syenite	B	1.525	64-68	0.29	1.529-1.530	75-84	1.13
5	In Islet, Hiroshima Pref.	Ferrosalite-quartz-syenite	B	1.5245	68-72	0.23	1.529-1.531	77-81	1.14
6	Yamada, Osaka Pref.	Aegirine-augite-quartz-syenite	B	1.5245	65-69	0.37	1.529-1.530	76-81	1.11
7	Utsugiono, Yamaguchi Pref.	Ferrosalite-hornblende-quartz-syenite	B	1.524	68-70	0.06	1.529-1.532	78-82	1.16
8	ditto.	Hornblende-quartz-syenite	B	1.524	62-65	0.14	1.529-1.531	79-81	1.15
9	ditto.	Epidote-quartz-syenite	B'	1.524	68-72	0.18	1.528-1.530	76-78	1.18
10	ditto.	ditto.	B'	1.524	60-61	0	1.530-1.531	80-83	1.19
11	ditto.	ditte.	B'	1.524	63-64	0.09	1.529	78-80	1.15
12	Watanose, Hiroshima Pref.	Altered biotite-quartz-syenite	C	1.5245	51-53	0	1.528-1.532	76-82	1.18
13	Utsugiono, Yamaguchi Pref.	Chlorite-epidote-quartz-syenite	C	1.5245	60-63	0	1.530	78-80	1.17
14	Watase, Yamaguchi Pref.	Altered biotite-quartz-syenite	C	1.524	58-66	0.07	1.529-1.531	81-82	1.16
15	Futamatase, Yamaguchi pref.	ditto.	C	1.524	62	0	1.529-1.530	79-81	1.15

殆んど差*が認められない。即ち花崗岩中のカリ長石が微斜長石質であれば閃長岩中のカリ長石も微斜長石質で、前者が正長石質であれば後者も正長石質である。このことは閃長岩中の残存カリ長石が閃長岩化時における熱作用により構造変化をうけるだけの熱エネルギーを得られなかつたことを物語っている。従つてソーダ閃長岩中のカリ長石と曹長石とは恐らく平衡関係になかつたと推論される。

上述の Type A 閃長岩・Type B 閃長岩・Type B' 閃長岩（微斜長石を含むカリ閃長岩）の各々に含まれる曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ とカリ長石の Triclinicity (GOLDSMITH and LAVES, 1954a) との関係を求めると Fig. 6 の通りで、両者間に規則正しい関係が認められる。即ち曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の減少に伴い、カリ長石の Triclinicity は増加し、前者が略々 low albite の値となる時は後者の値は 0.9 である。MacKENZIE and SMITH (1959) によれば maximum microcline (GOLDSMITH and LAVES, 1954b) は low albite よりも低温で生ずるとのことであるので、恐らく Triclinicity=1.0 のカリ長石と平衡に共存する曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は 1.04 よりもやや大きいと推定される。一方曹

Fig. 6. Relation between $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ of albites and triclinicity of co-existing potash-feldspars.

* カリ閃長岩と周辺花崗岩とでは、カリ長石の光軸角に可成りの差のあることが多い (Fig. 4).

長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ が 1.19 以上の場合には共存するカリ長石の **Triclinicity** は常に 0 である。即ち曹長石の生成温度が略々 470°C より高温の時には共存するカリ長石は正長石質ということになり、HEIER (1957) の述べている広域変成岩中におけるカリ長石の相転移温度と大体一致するようである。恐らくこの関係により、カリ長石の **Triclinicity** よりその生成温度を推定*することも可能であると考えられる。

5. 曹長石と共存する輝石との安定関係

閃長岩中に産する輝石には次の 3 タイプがある (MURAKAMI, 1959)。

- (i) エジリン：屈折率・光軸角共に著しく大きく、顕著な多色性を有している。
- (ii) エジリン輝石：エジリンに次ぎ屈折率・光軸角が大きく、草緑色の多色性を有する。
- (iii) フェロサーライト：屈折率・光軸角共にやや小さく、多色性は殆んど認められない。

以上の輝石類と共存する曹長石との関係を検討すると、Fig. 7 に示される通り輝石の屈折率と曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ との間には規則正しい関係のあることが分つた。即ち輝石の α が小さければ曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ は大きく、曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ が low albite の値に近付けば輝石の α は大きくエジリン質となる。このように輝石類のタイプの相違はその生成温度**と密接な関係のあることが考えられる。即ち比較的高温で生じた輝石はフェロサーライト質で生成温度が 440°C に近付くにつれて輝石のタイプはエジリン質となり、成分の上では CaO を失い Na_2O を増し FeO の Fe_2O_3 化を著しくする(酸素圧の上昇)傾向がある。従つて、アルカリに極めて富むいわゆるアルカリ閃長岩は $440^{\circ}\text{C}\pm$ の温度において最も良く生成されるように思われる。

Fig. 7. Relation between $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ of albites and α -index of co-existing pyroxenes.

Table 3. Optical constants of pyroxenes and $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ of co-existing albites.

No.	Loc.	Pyroxene			$2\theta_{131}-2\theta_{131}$ of albite
		α	γ	$2Vz$	
1	Utsugiono, Yamaguchi Pref.	1.714	1.739	65- 68	1.16
2	ditto.	1.712	1.738	64- 65	1.19
3	ditto.	1.715	1.741	67- 69	1.12
4	In Islet, Hiroshima Pref.	1.714	1.740	59- 60	1.14
5	Kure, Hiroshima Pref.	1.712	1.738	58- 59	1.15
6	Hagata, Ehime Pref.	1.714	1.739	62- 63	1.68 (Oligoclase)
7	Shôdo Islet, Kagawa Pref.	1.713	1.740	59- 60	1.13
8	ditto.	1.721	1.749	68- 73	1.09
9	Yamada, Ôsaka Pref.	1.720	1.748	70- 72	1.11
10	Iwaki Islet, Ehime Pref.	1.740	1.793	111-112	1.06

* カリ長石も maximum microcline 以外は常温でも metastable と考えられるので、古い地質時代における岩石では、生成温度の推定に於て検討を要する。然し HEIER (1957) の研究では地質時代に余り関係なく、大体そのまま地質温度計として使用できるようである。

** 同一タイプの輝石あるいは柘榴石に伴う曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ に余り差がないので冷却条件差には余り関係ないように思われる。

6. 閃長岩中の輝石類と灰鉄柘榴石との関係

山口県稔小野および香川県小豆島産閃長岩の中には輝石類と共に屢々灰鉄柘榴石が含まれている。稔小野地域における両者の安定関係を検討するために共存する曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ を求めると Table 4 のようになる。即ち主として灰鉄柘榴石を含む岩石中においては、輝石（フェロサーライト）を主として含む岩石中よりも曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値が小さい。これは恐らく前者の生成温度が後者の生成温度* よりも低く酸素圧が高かったことを示すものと考えられる。灰鉄柘榴石にはフェロサーライトにより交代されたような産状のものがある (MURAKAMI, 1959) が、これは alkali-emanation の温度の上昇する条件下（増進変成過程）における交代作用の産物であろう。なお MIYASHIRO (1959) は朝鮮福辰山産の閃長岩において、温度の低下と水蒸気圧の増加する条件下で、エジリンが灰鉄柘榴石に交代されたと述べている。然し、Type B 閃長岩においては、エジリンに伴う曹長石と灰鉄柘榴石に伴う曹長石とは $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値に大差がなく、またエジリンと灰鉄柘榴石とは共産することがない。従つてエジリンと灰鉄柘榴石との安定関係は確認できない。なお Type B 閃長岩には角閃石の可成り多く含まれるものがある。角閃石は輝石（フェロサーライト）を交代し、また岩石の割目を充していることも多い。Table 4 の通り角閃石に富む岩石中の曹長石も、輝石に富む岩石中の曹長石も、 $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ の値に大差がないので、その産状と併せ考え角閃石は輝石よりも水蒸気圧の高い条件下において生成されたもので、両者の間には恐らく著しい生成温度の相違はなかつたものと考えられる。

Table 4. Correlation of $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ of albites from pyroxene-bearing syenites with that from andradite-bearing syenites of the Utsugiono area, Yamaguchi Prefecture.

Sample No.	Mafic minerals		Albites	
	stable	unstable	An-content (Average) (Determined optically)	$2\theta_{131}-2\theta_{131}$
441	Andradite	—	4	1.08
369	Andradite, (Hornblende), (Biotite)	—	5	1.08
366	Pyroxene, (Hornblende)	—	5.5	1.19
370	Pyroxene, (Hornblende)	—	4.5	1.12
371	Pyroxene, (Hornblende), (Epidote)	Andradite	5.5	1.16
138	Pyroxene, (Hornblende)	—	5	1.16
322	Hornblende	Pyroxene	5.5	1.17
120	Hornblende	Andradite	4.5	1.15
465	Hornblende, Epidote	Andradite, Pyroxene	4.5	1.18

7. 山口県八代花崗岩の生成温度

山口県八代花崗岩中の斑状カリ長石は、既に筆者により述べられたように交代成因と考えられ (村上, 1960), 交代性曹長石を伴っている。斑状カリ長石の Triclinicity は 0—0.94 にわたるが、その変化は冷却条件の差によるもので、生成温度の差によるものではないと考えられる。交代性カリ長石は成因的にも、生成時代においても、閃長岩中のカリ長石と類似しているので、カリ長石の Triclinicity よりその生成温度を推定することも可能であると考えられる。閃長岩の生成の場合と冷却条件に差がないものとするれば、Fig. 7 により生成温度は略々 440°C あるいはそれ以下と推定される。煌斑岩の貫入はこれより更に低い温度下において行われたものであろう。

* 前頁脚注の ** を参照.

8. 結 論

1) 閃長岩中の曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ よりその生成温度を推定した。Type A 閃長岩は $470-510^{\circ}\text{C}$, Type B 閃長岩は $440-460^{\circ}\text{C}$, Type B' および Type C 閃長岩は $410-430^{\circ}\text{C}$ 或いは更に低温 (或いは一部 $450^{\circ}\text{C}\pm$) で生成されたと考えられる。

2) 曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ と平衡状態下に共存するカリ長石の Triclinicity との間には一定の関係が認められ, カリ長石の Triclinicity よりその生成温度を推定することも可能であると考えられる。

3) 曹長石の $2\theta_{131}-2\theta_{131}$ と共存する輝石の屈折率との間には一定の関係が認められ, この関係から輝石のタイプの相違はその生成温度・酸素圧に関係するものと考えられる。

4) Type B 閃長岩において灰鉄柘榴石はフェロサーライトよりも低温・高酸素圧下で生成されたものと考えられる。また角閃石はフェロサーライトよりも高水蒸気圧下の生成と推定される。

5) 山口県八代花崗岩中における斑状カリ長石の生成は最低 440°C 或いはそれ以下の温度において行われたものと考えられる。

なお今後この研究には岩石の冷却史・長石の安定性等更に細く検討せねばならない問題が多く残されている。最近 WYART et SABATIER (1956) は長石の構造を決めるのは温度でなく H_2O であると述べているが, 結晶化の時間, 実験材料等の点で, そのまま閃長岩化作用の問題には適用できないように思われる。

謝 辞

稿を終るに当り, 終始御指導をいただいている九州大学富田達教授に深甚の謝意を表する。また山口大学富阪武士助教授には長石問題について色々御教示いただき, この論文の内容についても検討していただいた。北海道大学光田武氏にはX線データ測定に当り御手数をお掛けした。両氏に厚く御礼申し上げる。なお研究費の一部として文部省科学研究費を使用した。

文 献

- BARRER, R. M. (1950): Hydrothermal synthesis of potash-feldspar in the range $195-200^{\circ}\text{C}$. *Nature*, **30**, 562.
- BARTH, T. F. W. (1956): Studies in gneiss and granite. *Skr. Vid. Akad. Oslo*, **1**, Mat. Natur. Kl. **1**, 1—35.
- BASKIN, Y. (1956): A study of authigenic feldspars. *Jour. Geol.*, **64**, 132—155.
- CHAYES, F. (1952): Relations between compositions and indices of refraction in natural plagioclases. *Am. Jour. Sci.*, Bowen vol., 85—105.
- FERGUSON, R. B., TRAIL, R. J., and TAYLOR, W. H. (1958): The crystal structure of low-temperature and high-temperature albite. *Acta Cryst.*, **11**, 331—348.
- GOLDSMITH, J. R. and LAVES, F. (1954a): The microcline-sanidine stability relations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **5**, 1—19.
- and ——— (1954b): Potassium feldspar structurally intermediate between microcline and sanidine. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **6**, 100—118.
- HEIER, K. S. (1957): Phase relations of potash-feldspar in metamorphism. *Jour. Geol.*, **65**, 468—490.
- LAVES, F. (1950): The lattice and twinning of microcline and other potash-feldspars. *Jour. Geol.*, **58**, 548—571.
- (1951): Artificial preparation of microcline. *Jour. Geol.*, **59**, 511—512.
- (1952): Phase relations of the alkali feldspars. *Jour. Geol.*, **60**, 436—450, 549—574.
- MARMO, V. (1958): Orthoclase and microcline granite. *Am. Jour. Sci.*, **256**, 360—364.

- MACKENZIE, W. S. (1957): The crystalline modification of $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$. *Am. Jour. Sci.*, **255**, 481—516.
- and SMITH, J. V. (1959): Charge balance and the stability of alkali feldspars. *Acta. Cryst.*, **12**, 73—74.
- MIYASHIRO, A. (1959): Notes on rock-forming minerals (6): Garnet in nepheline-syenite of the Fukushinzan district. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **65**, 171—172.
- 村上 允英 (1950): 山口県出葉の曹長岩, 岩鉱, **39**, 68—75.
- MURAKAMI, N. (1959): Metasomatic syenites occurring in granitic rocks of south-western Japan. *Sci. Rep. Yamaguchi Univ.*, **10**, 73—90.
- 村上 允英 (1960): 山口県八代花崗岩の貫入機構に関する一考察, 地質雑, **66**, 202—212.
- SMITH, J. R. and YODER, H. S. (1956): Variations in X-ray powder diffraction patterns of plagioclase feldspars. *Am. Mineral.*, **41**, 632—647.
- TUTTLE, O. F. (1952): Optical studies on alkali feldspars. *Am Jour. Sci.*, Bowen vol., 553—567.
- and WILLEY, P. J. (1957): Hydrothermal studies in the systems $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albite)- H_2O -HF and granite- H_2O -HF. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **68**, 1807.
- and BOWEN, N. L. (1958): Origin of granite in the light of experimental studies in the system $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - H_2O . *Geol. Soc. Am. Mem.*, **74**.
- WILLEY, P. J. and TUTTLE, O. F. (1959): Effect of carbon dioxide on the melting of granite and feldspars. *Am. Jour. Sci.*, **257**, 648—655.
- WYART, P. J. et SABATIER, G. (1956): Transformations mutuelles des feldspaths alcalins reproduction du microcline et de l'albite. *Bull. Soc. franc. Min. Crist.* **79**, 574—581.
-