島根県吉田複合岩体の Al・Cr に富む輝石とパーガス閃石

沢 田 順 弘*

Al, Cr-rich pyroxenes and pargasite from the Yoshida complex,
Shimane Prefecture, Southwest Japan

Yoshihiro SAWADA*

Abstract The intrusion of the Yoshida complex, which is composed mainly of gabbro, quartz diorite and various dyke rocks, represents the earliest volcano-plutonism at the Neogene Kakeya cauldron. The melanocratic gabbro was generated in the earliest stage of fractionation from SiO₂-saturated or oversaturated basic magma of the Yoshida complex, and consists of various minerals crystallized under different conditions.

In the first stage, Al, Cr-rich orthopyroxene and clinopyroxene (including Ca-Tschermak's component of 8—10 mol.%), pargasitic hornblende and chromite have crystallized in cotectic relation preceding the crystallization of olivine and plagioclase. These minerals are presumed to have precipitated under a pressure 10kb± or a little over, judging from the phase relations of olivine, pyroxene and amphibole found in SiO₂-saturated or oversaturated basic magma compositions, as well as from the experimental results concerning the stability fields of Al-rich pyroxenes and pargasitic hornblende. This assumption is supported also by the compositional similarity between pyroxene and amphibole in the Yoshida complex and those of other igneous or metamorphic rocks formed presumably under rather high pressure. From the above reasons, one of the magma reservoirs, generated prior to the first-stage depression of the Kakeya cauldron, is assumed to have been located at a depth of 35 km± (near the crust-mantle boundary). The existence of amphibole indicates that this crystallization occurred under hydrous condition. It is suggested, therefore, that this magma had originated in hydrous mantle.

はじめに

吉田複合岩体は、出雲湾入部最奥部に位置する新第三紀初期掛合陥没体に伴われる貫入岩体の一つである(沢田, 1978 a, b). この岩体の侵入は、陥没体での火山活動としては最も早期のものであることから、岩体形成史の解明は、グリーンタフ積成盆の発生期における構造運動と火成活動の関連を考える上で重要である。小論では、異なる条件下で生成されたと推定される多種の鉱物を含む優黒質斑れい岩に着目し、主要構成鉱物の晶出順序および最も早期に晶出した Al・Cr に富む輝石とパーガス閃石質角閃石の岩石学的な検討を通じて、岩体の形成条

件を考察する。また SiO₂ に過飽和な塩基性マグマ中で晶出した輝石・角閃石に関する若干の問題についてもあわせて検討する。

小論をまとめるにあたり、中山 勇氏をはじめ京大火成作用グループの諸氏に御討論をいただいたことを感謝する。

優黒質斑れい岩の岩石記載

優黒質斑れい岩は、吉田複合岩体の主岩型である中粒石英閃緑岩～トータル岩中の捕獲岩として産する(図版 I-A)。中粒で、半自形粒状組織を示す。主要構成鉱物は角閃石** (48~51%)・斜長石 (22~28%)・斜方輝石 (4~7%)・石英 (2~6%)・単斜輝石 (4~5%)・かんらん石 (1~3%) で、ほかに少量 (0.6% 以下) の黒雲

1978年4月11日 受理

* 京都大学理学部地質学鉱物学教室. Department of Geology & Mineralogy, Faculty of Science, Kyoto University, Kyoto, 606 Japan.

** 普通角閃石およびパーガス閃石質角閃石

第1図 かんらん石（仮像）に包有される角閃石-1 (a_1)・クローム鉄鉱 (ch)。[$s+t+sa+m$ (ol): 蛇紋石+滑石+サポーナイト+磁鉄鉱 (かんらん石仮像), o_1 : 斜方輝石-1, p : 斜長石, o_2 : 斜方輝石-2, c_2 : 単斜輝石-2, a_2 : 角閃石-2, $chl+ac$: 緑泥石+陽起石]。

母・クローム鉄鉱・磁鉄鉱・チタン鉄鉱およびごく少量のジルコン・アラナイトを含む。2次鉱物としては、陽起石が最も多く（繊維状～針状の産状を示すもので9～11%）、ほかに蛇紋石・サポーナイト・滑石・磁鉄鉱・斜方輝石-3（後述）・緑泥石・赤鉄鉱などが含まれる。

構成鉱物の産状は、沢田（1978b）により報告されているが、投稿後に2・3の新知見を得たことと、鉱物の生成順序を明らかにするために、やや詳細にそれらの産状を記す。

かんらん石：すべて蛇紋石・磁鉄鉱・サポーナイト・滑石により交代された仮像としてみられる。常に斜方輝石-2（後述）の反応縁にとり囲まれている（第1図、図版I-F・G）。細粒の斜方輝石-3・角閃石-1（後述）・クローム鉄鉱を包有する（第1図）。

輝石：単斜輝石は産状とAl量の違いから2つに区分される（第1表）。単斜輝石-1はAl・Crに富み、主に灰長石・単斜輝石-2・角閃石-2に包有されて産する。このような単斜輝石-1の中には、蠕虫状の斜方輝石-1や角閃石-1を含む結晶もある（図版I-B, 第2図）。この場合角閃石-1は外套部においてのみみられるものが多い。また角閃石-2により包有される結晶で、角閃石-1

と vermicular intergrowth* するものもある（図版I-D・E, 第3図）。ほかに、角閃石-1・クローム鉄鉱とともに、細粒のモザイク状集合体をつくる場合もまれにある（図版I-C）。単斜輝石-2は単斜輝石-1に比べAl・Crに乏しく、半自形粗粒結晶・普通角閃石中の残存結晶および斜長石中の包有物からなる。斜方輝石も産状と組織の違いにより1・2・3の3つに分けられる（第2表）。斜方輝石-1は単斜輝石-1と同様にAlに富む。既述のように単斜輝石-1・角閃石-1に伴われて産するか、あるいは果帯構造をもつ斜方輝石の核部を構成する。斜方輝石-2は斜方輝石-1に比べてAl・Crに乏しく、かんらん石の反応縁を形成する細粒他形結晶（図版I-F・G, 第1図）と、自形～半自形粗粒結晶および斜長石とともに micrographic 組織を示す他形結晶（図版I-G・H）からなる。（100）に平行する単斜輝石の離溶ラメラ（一部は普通角閃石により交代）をもつ Bushveld 型斜方輝石（Hess & Phillips, 1938）である。斜方輝石-3はCa・Alに乏しい細粒のモザイク状結晶で、常に斜方輝石-2により包有され、また、かんらん石を交代した蛇紋石に密接に伴われて産する（図版I-F, 第4図）。

角閃石：産状と組成の違いにより、角閃石-1・2と陽起石に区分される（第3表）。角閃石-1の産状は次のとおりである。i) かんらん石により包有される細粒他形結晶（第1図）。ii) 斜長石の核部を構成する灰長石中の自形～半自形結晶。iii) 核部から外套部に向かって角閃石-1—角閃石-2—陽起石という順に果帯構造を示す単独結晶（第5図）。iv) 単斜輝石-1と vermicular intergrowth するか、それに包有される蠕虫状結晶（図版I-B・D・E, 第2・3図）。v) 単斜輝石-1・クローム鉄鉱とモザイク状集合体をつくる細粒他形結晶（図版I-C）。角閃石-2は輝石-1・2の反応縁を形成する他形結晶と自形～半自形の単独結晶である。陽起石は輝石や他の角閃石を交代する繊維状～針状（一部は板状）の結晶である。

斜長石：半自形、一部他形で、粗粒結晶の核部は均質な場合（An 86—90, 第4表）と、patchy zoning**が発達する場合とがある。粗粒結晶の外套部では果帯構造が著しい（An 25—60）。ペリクリン双晶は核部のみ発達する。まれに斜方輝石とともに micrographic 組織を示す（図版I-G・H）。また、粗粒結晶の核部に単斜輝石-1・2と角閃石-1を包有する場合もある。

* シンプレクタイトまたは graphic intergrowth の用語の方が適切かもしれないが、ここでは形態的な意味で、この語を使用する。詳しくは後に議論する。

** VANCE (1965) による果帯構造の分類を、形態的な意味で使用。

第2図 単斜輝石・斜方輝石・角閃石の vermicular intergrowth [C₁: 単斜輝石-1, O₁: 斜方輝石-1, A₁・A₂: 角閃石-1・2].
vermicular intergrowth は XMA による scanning である。第3～6図についても同様である。

第3図 外套部で角閃石-1 と vermicular intergrowth する単斜輝石-1・斜方輝石-1.
記号は第2図に同じ。

第4図 斜方輝石-2 (O₂)—斜方輝石-3 (O₃).

クローム鉄鉱: 他形, 一部半自形で, 単斜輝石-1・角閃石-1 と集合体をつくるか, 単独結晶としてかんらん石・輝石-2・斜長石に包有される. 組成的にはクローム鉄鉱・ferritchromite (SPANGENBERG, 1943)・Cr に富

第5図 累帯構造を示す角閃石.
[A₁・A₂: 角閃石-1・2, Ac: 陽起石].

む磁鉄鉱である (第4表). 累帯構造は細粒結晶 (70μ以下) では著しくないが, 粗粒結晶 (130~200μ) では著しい (第6図). また前者は後者に比べ, Fe に富み, Cr・Al・Mg に乏しく, Cr に富む磁鉄鉱の組成をもつ

第6図 クロム鉄鉱にみられる累帯構造および粒度による組成の相違。

ものが多い。かんらん岩の蛇紋石化・緑泥石化に伴い、含有クロム鉄鉱はFeが増加する一方、Al・Mgが減少し、ferritchromiteを経て磁鉄鉱に変わる場合があることが、ONYEAGOGCHA (1974)・ULMER (1974) により報告されている。本岩も同様な変質作用を受けていることを考えあわせると、粒度による組成の違いや累帯構造は変質作用の結果とみることができる。従って、初生的にはよりAl・Mgに富んでいたものと推定される。

上記以外の構成鉱物の産状は省略する。

輝石・角閃石の化学組成

第1～3表に輝石・角閃石のXMAによる分析値*を選択して示し、またそれらの組成範囲は第5表にまとめた。第7・8図には輝石・角閃石のCa-Mg-Fe図とAl-Ca-(Mg+Fe)図をそれぞれ示した。

〈輝石〉

輝石-1: 単斜輝石-1はendiopside**・透輝石・Mgに富む普通輝石とサラーイトの領域にある(第7図)。Al₂O₃量は4%***以下のものは少なく、多くは4.0～5.6%含んでおり、また、Crに比較的富む(第9図)。Na₂O量は、単斜輝石-2や吉田複合体の他の岩型中のものに比べてやや多い傾向はあるものの、きわだって多いとはいえない。単斜輝石-1は8～10モル%のCa-Tschermak分子****を含んでおり、通常、非アルカリ岩質火成岩中のものに比べ著しく高い。

斜方輝石-1は古銅輝石の領域にある(第7図)。単斜輝石-1と同様、Alに富み、またCrに富むものもある。

* Bushveld 型斜方輝石はビーム径を約20μに拡大し、ホストとラメラを合わせた平均組成を示した。

** 輝石の命名はPOLDERVAART & HESS (1951)に基づく。

*** 特にことわらない限り、重量%を示す。

**** Feは全Feとしてしか定量できないため、acmite分子はないものとし、またCrはNaCrSi₂O₆としてとり去った後、KUSHIRO (1962)に従って算出した。従って、acmite分子を考慮した場合、Ca-Tschermak分子はこの値より大きくなる。

Al₂O₃量は3.0～6.3%含まれるが、4～5%のものが多い(第9図)。斜方輝石-1は産状により組成、特にmg値(100Mg/(Mg+Fe))とCr₂O₃量が幾分異なる。すなわち、かんらん石の包有物: mg値=83.2～83.9, Al₂O₃=3.9～4.9%, Cr₂O₃=0.1%。粗粒結晶の核部と灰長石に包有される結晶の核部: mg値=80.2～83.8, Al₂O₃=3.0～6.3%, Cr₂O₃=0.13～0.37%。単斜輝石-1中の蠕虫状結晶: mg値=72.5, Al₂O₃=4.3%, Cr₂O₃=0.8%である。ほかに、Al₂O₃量は乏しいが(0.9%), クロム鉄鉱により包有され、本岩中では最も早期に晶出したものの1つと推定される斜方輝石には、Cr₂O₃が1.0%も含まれる結晶もある(mg値=85.9)。

輝石-1中のAl₂O₃量を見ると、全般に単斜輝石の方が斜方輝石に比べて多い傾向にあるが、斜方輝石の中には単斜輝石よりAlを多く含むものもある(Al₂O₃=6.3%, 第9図)。一般に火成岩中では、単斜輝石と斜方輝石が共生している場合、前者により多くAlが含有され、逆の例は少ない。しかし、輝石-1と同様な例が西南ドイツ、Saar-Naheトラフのソレーアイト(本地域の塩基性岩と同様、ノルム石英が算出される(第6表))から報告されている(NICHOLLS & LORENZ, 1973: Al₂O₃は最大で斜方輝石に5.5%, 単斜輝石に3.4%含まれている)。NICHOLLS & LORENZは同試料の溶融実験により、早期に斜方輝石が単独に晶出している時には著しくAlに富むが、単斜輝石と共存するようになると、Alに乏しくなるという結果を得、記載事実もそれと合致することを報告した。輝石-1の晶出過程でも同様なことがあった可能性はあるが、上述の著しくAlに富む斜方輝石-1は、単斜輝石-1と接していないために、両者の直接の関係を明らかにすることはできない。しかし、最も早期の段階を除けば、両輝石は共晶関係にあったものと考えてよい。

輝石-2: 単斜輝石-2は、Ca-Mg-Fe図(第7図)では単斜輝石-1とほぼ同様な領域にあるが、Al・Cr量はそれより低い(第5表)。一般に、角閃石-2との接触部付近では、Alが減少しCaが増加する傾向にある。斜方輝石-2は古銅輝石～Mgに富む紫ろ輝石の領域にある(第7図)。Al・Cr量は斜方輝石-1に比べ低い(第5表)。輝石-2は化学組成の点で、Skaergaard・Bushveld・Stillwater等のソレーアイト質層状分化岩体の早期晶出相の輝石(BROWN, 1957; NWE, 1976; ATKINS, 1969; HESS, 1960)に類似している。

斜方輝石-3: 古銅輝石で、Al・Cr・Ca・Tiに著しく乏しい(第7図、第2・5表)。Mnに比較的富む(MnO=0.6～0.9%)。斜方輝石-3は、モザイク状組織を示す

点, 蛇紋石に伴われて産する点, Ca に著しく乏しい点, これを含む優黒質斑れい岩が捕獲岩として産する点などから, ARAI (1974) により報告された Ca をほとんど含まない斜方輝石と同様な成因, つまり石英閃緑岩～トータル岩に捕獲された際の再結晶作用により生成されたものと推定される。ただし, ARAI により報告されたものに比べ, mg 値・Al と Cr の含量が低い傾向にある。

〈角閃石〉

角閃石の $Al^{IV}-(Na+K)$ (DEER *et al.*, 1962) による) を第 10 図に示した。LEAKE (1968) の分類区分に従えば, 角閃石-1 は pargasite・Ti-ferroan pargasite・pargasitic hornblende・ferroan pargasitic hornblende・edenitic hornblende の領域にあり, 角閃石-2 は magnesio-hornblende・actinolitic hornblende である (第 11 図)。

角閃石-1: mg 値は 63.5~86.7 の広い範囲にわたる。Al・Na 量は角閃石-2 に比べ多い (第 5 表)。Cr₂O₃ 量は比較的高く, 1.1% 含むものもある。角閃石-1 も斜方輝石-1 と同様に, 産状により組成が幾分異なるが, それは特に mg 値において顕著である。すなわち, かんらん石に包有されるか, 斜方輝石-1 と連晶する細粒結晶は mg 値が最も高く, 81.7~86.7 である。単斜輝石-1 と vermicular intergrowth する結晶と, モザイク状集合体をつくる結晶の mg 値はほぼ同様で, 73.1~76.7 の範囲にある。斜長石中の包有物はその値が最も低く, 63.5~67.0 である。TiO₂ は斜長石中に包有される結晶で高く, 1.8~2.7% である。

角閃石-2: mg 値は 73.4~76.3 である。Al・Cr・Na・Ti の含量は角閃石-1 に比べて低い (第 5 表)。角閃石-2 の組成は, 特に Al₂O₃・Na₂O 量は田万川陥没体 (MURAKAMI, 1969)・Ben Nevis (HASLAM, 1968)・Finnmarka (CZAMANSKE & WONES, 1973)・Guadalupe (BEST & MERCY, 1967) などの浅所侵入の塩基性～中性深成岩 (一般に小貫入岩体) 中のものと類似している。

陽起石: 組成は第 3 表の A-3 に示した。

考 察

1. 主要構成鉱物の生成順序

優黒質斑れい岩には, 異なる条件下で生成されたと推定される多種の鉱物が含まれている。従って, 鉱物の生成順序を明らかにし, 鉱物に保存されている各段階での生成時の条件を推察することにより, 生成条件の履歴を知ることが可能である。

優黒質斑れい岩における組織, 特に主要構成鉱物間の

包有関係や反応関係から, 生成順序を推定したものを第 12 図に示した。その生成過程は, 火成作用の段階 (ステージ I・II) と変成・変質作用の段階 (ステージ III) に分けられる。

ステージ I: 優黒質斑れい岩の生成過程の最も早期の段階にあたる。このステージで生成された鉱物は, 次の理由により単斜輝石-1・斜方輝石-1・角閃石-1・クローム鉄鉱と推定される。すなわち, i) 角閃石-1・クローム鉄鉱は, かんらん石に包有されることから (第 1 図), かんらん石以前に存在したものである。ii) 単斜輝石-1・角閃石-1・クローム鉄鉱は斜長石の核部を構成する灰長石により包有される。iii) 単斜輝石-1—角閃石-1, 単斜輝石-1—斜方輝石-1—角閃石-1 は vermicular intergrowth する可能性があることから, 上記 2 者または 3 者はほぼ同時期に生成されたものである。なお, ステージ I の生成条件については後に議論する。

ステージ II: かんらん石・輝石-2・斜長石・角閃石-2・黒雲母・石英・磁鉄鉱・チタン鉄鉱の晶出時期である。かんらん石—斜方輝石・輝石—角閃石・角閃石—黒雲母はそれぞれ反応関係にあることから, 苦鉄質鉱物としては, かんらん石→輝石→角閃石→黒雲母の順に晶出したものと推定される。

単斜輝石-2 は, 斜長石の核部に包有される場合があることから, ステージ II でも斜長石に先行して晶出し始めたものと推定される。斜方輝石-2 は斜長石の核部に包有されることはなく, 斜長石とともに micrographic 組織を示す場合もあることから, 両者はほぼ同時期に晶出したものと考えることができる。YODER & TILLEY (1962) によれば, ハワイ島の石英粗粒玄武岩・ノルム石英が算出されるソレーアイトでは, 常圧下でも単斜輝石の方が斜長石より高温で晶出する。もっとも, 優黒質斑れい岩の場合, 斜長石が An 成分に富むのに対し, 上記の石英粗粒玄武岩やソレーアイトでは曹灰長石であることから, 前者の場合, 斜長石の晶出温度がもっと高くなる。一方, YODER (1965) による灰長石—透輝石—H₂O 系の実験では, 灰長石と透輝石の融点は常圧下では前者の方が高いが, P_{H₂O}=3kb 前後を境にしてそれ以上では逆転する。斜長石と輝石の晶出温度は種々の要因により規制されるが, 少なくとも, 含水量が多い場合は, 低圧下で単斜輝石が斜長石に先行して晶出しうるものと考えることができる。また, 苦鉄質鉱物間の反応関係やそれらの晶出順序は, 比較的浅所で形成された塩基性～中性深成岩でみられるものと同一であるし, 既述のように輝石・角閃石の組成も類似している。これらのこ

第2表 斜方輝石の組成.

	O-1a	O-1b	O-1c	O-1d	O-2a	O-2b	O-2c	O-3
SiO ₂	52.94	52.95	51.31	53.29	55.22	53.47	52.91	55.89
TiO ₂	0.12	0.12	0.30	0.17	0.24	0.13	0.24	0.01
Al ₂ O ₃	6.30	4.85	4.29	3.45	1.10	2.47	1.19	0.03
Cr ₂ O ₃	0.13	0.10	0.79	0.37	0.05	n.d.	n.d.	0.09
FeO*	10.42	10.26	16.42	12.39	10.43	13.35	20.07	10.14
MnO	0.27	0.24	0.23	0.27	0.22	0.29	0.58	0.65
MgO	30.30	29.61	24.20	28.11	31.38	28.58	23.86	32.45
CaO	0.63	0.86	1.80	1.99	0.91	1.39	0.94	0.06
Na ₂ O	0.01	0.03	0.10	0.05	0.02	-	-	0.01
K ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	-
Total	101.14	99.04	99.46	100.10	99.58	99.69	99.80	99.33
Si	1.845	1.884	1.882	1.903	1.955	1.921	1.958	1.979
Al IV	0.155	0.116	0.118	0.097	0.045	0.079	0.042	0.001
Al VI	0.104	0.087	0.068	0.048	0.001	0.025	0.010	-
Ti	0.003	0.003	0.008	0.004	0.006	0.004	0.007	-
Cr	0.003	0.003	0.023	0.011	0.001	n.d.	n.d.	0.003
Fe	0.304	0.305	0.503	0.370	0.309	0.401	0.621	0.300
Mn	0.008	0.007	0.007	0.008	0.006	0.009	0.018	0.020
Mg	1.575	1.571	1.323	1.496	1.656	1.531	1.316	1.713
Ca	0.023	0.033	0.071	0.076	0.034	0.054	0.037	0.002
Na	0.001	0.002	0.007	0.003	0.002	-	-	0.001
K	0.001	0.001	0.001	0.001	-	-	0.001	-
Ca	1.2	1.7	3.5	3.9	1.7	2.7	1.9	0.1
Mg	82.8	82.3	69.7	77.0	82.8	77.1	66.7	85.0
Fe	16.0	16.0	26.5	19.1	15.5	20.2	31.5	14.9
100xMg Mg+Fe	83.8	83.7	72.5	80.2	84.3	79.2	67.9	85.1

Numbers of cations on the basis of 6 oxygens. *: Total Fe as FeO.

O-1: Orthopyroxene-1 [a: core of orthopyroxene included in calcic plagioclase; b: included in olivine; c: forming vermicular intergrowth with clinopyroxene-1; d: core of coarse-grained orthopyroxene]. O-2: Orthopyroxene-2. O-3: Orthopyroxene-3.

第1表 単斜輝石の組成.

	C-1a	C-1b	C-1c	C-1d	C-1e	C-1f	C-2a	C-2b	C-2c
SiO ₂	50.25	50.43	50.12	50.81	50.03	52.10	52.67	53.31	53.06
TiO ₂	0.58	0.55	0.49	0.49	0.38	0.20	0.18	0.13	0.16
Al ₂ O ₃	5.60	5.31	5.33	5.02	4.91	4.65	2.56	1.98	0.39
Cr ₂ O ₃	0.50	0.37	0.64	1.00	0.60	0.48	n.d.	0.39	n.d.
FeO*	6.10	6.39	5.88	6.58	5.91	5.26	5.31	6.20	7.54
MnO	0.19	0.18	0.23	0.19	0.21	0.16	0.21	0.25	0.32
MgO	15.00	15.22	14.79	15.61	14.92	16.02	17.34	16.30	14.75
CaO	20.81	20.87	21.67	20.45	22.12	21.28	21.25	21.79	23.11
Na ₂ O	0.49	0.65	0.35	0.38	0.37	0.40	0.16	0.25	0.25
K ₂ O	0.03	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.01	0.02	0.01
Total	99.55	100.01	99.56	100.56	99.49	100.59	99.68	100.62	99.60
Si	1.858	1.860	1.857	1.863	1.859	1.896	1.933	1.950	1.982
Al IV	0.142	0.140	0.143	0.137	0.141	0.104	0.067	0.050	0.017
Al VI	0.102	0.091	0.090	0.080	0.074	0.095	0.044	0.035	-
Ti	0.016	0.015	0.014	0.013	0.011	0.006	0.005	0.004	0.005
Cr	0.015	0.011	0.019	0.029	0.017	0.014	n.d.	0.011	n.d.
Fe	0.189	0.197	0.182	0.202	0.184	0.160	0.163	0.189	0.236
Mn	0.006	0.006	0.007	0.006	0.007	0.005	0.007	0.008	0.010
Mg	0.827	0.836	0.817	0.853	0.826	0.869	0.948	0.888	0.821
Ca	0.824	0.825	0.860	0.803	0.881	0.830	0.835	0.854	0.925
Na	0.035	0.047	0.025	0.027	0.027	0.028	0.011	0.018	0.018
K	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	-	0.001	-
Ca	44.8	44.4	46.3	43.2	46.6	44.6	42.9	44.2	46.7
Mg	44.9	45.0	43.9	45.9	43.7	46.8	48.7	46.0	41.4
Fe	10.3	10.6	9.8	10.9	9.7	8.6	8.4	9.8	11.9
100xMg Mg+Fe	81.4	80.9	82.5	80.9	81.8	84.5	85.3	82.4	77.7

Numbers of cations on the basis of 6 oxygens. *: Total Fe as FeO.

C-1: Clinopyroxene-1 [a~d: core of clinopyroxene included in calcic plagioclase; e,f: forming vermicular intergrowth with amphibole-1].
C-2: Clinopyroxene-2 [a,b: core and mantle of clinopyroxene-2; c: contacts with amphibole-2].

第4表 斜長石の核部・クローム鉄鉱の組成.

Pl-1		Ch-1		Ch-2		Ch-3	
SiO ₂	45.12	SiO ₂	0.31		0.04		0.75
TiO ₂	0.01	TiO ₂	0.95		0.17		0.11
Al ₂ O ₃	34.36	Al ₂ O ₃	6.91		9.10		16.95
Fe ₂ O ₃ *	0.43	Cr ₂ O ₃	43.71		40.49		34.21
MgO	0.04	Fe ₂ O ₃ **	15.77		19.81		14.08
CaO	18.03	FeO**	26.81		21.53		27.30
Na ₂ O	1.17	MnO	0.81		0.97		0.42
K ₂ O	0.03	MgO	4.17		6.91		4.87
Total	99.19	CaO	0.02		0.03		0.04
Si	8.393	Total	99.46		99.05		98.73
Ti	0.001	Si	0.088		0.012		0.203
Al	7.534	Ti	0.202		0.035		0.023
Fe	0.060	Al	2.301		2.959		5.391
Mg	0.011	Cr	9.766		8.834		7.300
Ca	3.594	Fe ³⁺	3.183		4.113		2.859
Na	0.423	Fe ²⁺	6.334		4.969		6.161
K	0.007	Mn	0.194		0.227		0.096
An	89.3	Mg	1.756		2.842		1.959
Ab	10.5	Ca	0.007		0.008		0.011
Or	0.2						

Numbers of cations on the basis of 32 oxygens.
 *: Total Fe as Fe₂O₃. **: FeO and Fe₂O₃ calculated from total iron assuming spinel stoichiometry.
 Pl-1: Core of coarse-grained plagioclase.
 Ch-1: Chromite included in orthopyroxene-2.
 Ch-2,3: Chromite included in olivine.

第3表 角閃石の組成.

	A-1a	A-1b	A-1c	A-1d	A-1e	A-1f	A-1g	A-2a	A-2b	A-2c	A-3
SiO ₂	44.44	43.53	43.30	41.85	43.96	43.21	41.79	47.15	50.00	49.52	53.89
TiO ₂	0.93	1.07	1.21	1.31	0.19	2.31	2.64	0.95	0.45	1.47	0.02
Al ₂ O ₃	11.98	13.11	12.25	13.57	11.63	11.22	11.02	8.28	6.36	5.71	1.02
Cr ₂ O ₃	0.27	0.36	0.48	0.45	0.78	0.44	1.11	0.46	0.16	n.d.	0.04
FeO*	5.79	7.01	8.76	9.65	10.01	12.55	13.33	8.29	9.19	10.05	14.67
MnO	0.09	0.13	0.11	0.09	0.17	0.15	0.33	0.22	0.17	0.15	0.79
MgO	18.60	17.56	17.39	16.56	15.28	13.70	12.99	18.66	17.34	17.08	13.18
CaO	12.19	11.89	11.45	11.72	12.59	11.59	11.50	11.62	12.47	11.49	12.84
Na ₂ O	2.61	2.64	2.36	2.46	2.22	2.55	2.36	1.46	1.27	1.26	1.26
K ₂ O	0.32	0.25	0.11	0.40	0.19	0.52	0.74	0.27	0.29	0.37	0.03
Total	97.20	97.55	97.42	98.06	97.02	98.24	97.81	97.36	97.70	97.10	97.74
Si	6.380	6.261	6.279	6.083	6.451	6.350	6.233	6.783	7.162	7.159	7.882
Al IV	1.620	1.739	1.721	1.917	1.549	1.650	1.767	1.217	0.838	0.841	0.118
Al VI	0.406	0.483	0.373	0.407	0.462	0.292	0.169	0.186	0.236	0.131	0.059
Ti	0.100	0.116	0.132	0.144	0.021	0.255	0.296	0.102	0.048	0.160	0.002
Cr	0.031	0.041	0.054	0.051	0.091	0.052	0.130	0.052	0.019	n.d.	0.005
Fe	0.695	0.843	1.062	1.173	1.228	1.543	1.662	0.998	1.101	1.214	1.794
Mn	0.010	0.015	0.014	0.012	0.021	0.019	0.041	0.027	0.021	0.018	0.097
Mg	3.981	3.769	3.759	3.589	3.343	3.002	2.889	4.002	3.703	3.681	2.875
Ca	1.875	1.833	1.778	1.826	1.979	1.825	1.837	1.792	1.914	1.780	2.012
Na	0.727	0.737	0.664	0.694	0.631	0.726	0.683	0.408	0.353	0.352	0.356
K	0.058	0.046	0.021	0.075	0.035	0.098	0.140	0.050	0.053	0.069	0.006
100Mg Mg+Fe	85.1	81.7	78.0	75.4	73.1	66.1	63.5	80.0	77.1	75.1	61.5

Numbers of cations on the basis of 23 oxygens. *: Total Fe as FeO.
 A-1: Amphibole-1 [a: included in olivine; b: forming parallel intergrowth with orthopyroxene-1;
 c~e: forming vermicular intergrowth with clinopyroxene-1; f: included in calcic plagioclase;
 g: core of zoned amphibole]. A-2: Amphibole-2. A-3: Actinolite.

第5表 産状の異なる輝石・角閃石の組成範囲.

	Al ₂ O ₃ (wt%)	Cr ₂ O ₃ (wt%)	CaO (wt%)	100Mg Mg+Fe
Opx-1	3.0-6.3	0.1-0.8	0.4-2.0	72.5-84.4
Opx-2	0.8-2.5	<0.4	0.6-1.4	67.9-84.5
Opx-3	0.02-0.13	<0.1	0.06-0.16	78.5-85.1
			Na ₂ O (wt%)	
Cpx-1	3.5-5.6	0.3-1.0	0.3-0.7	79.8-84.7
Cpx-2	0.4-2.8	<0.4	0.2-0.5	75.0-85.3
Amp-1	10.0-13.6	0.3-1.1	2.0-2.6	63.5-86.7
Amp-2	4.4-8.3	<0.5	0.9-1.5	73.4-76.3
Act	1.0	0.04	1.3	61.5
[Amp-1: TiO ₂ =0.2-2.7wt%]				
[Opx: orthopyroxene, Cpx: clinopyroxene, Amp: amphibole, Act: actinolite]				

とから、ステージIIにおける結晶作用は後に議論するステージIの場合とは異なり、比較的低い圧力条件下でおこなわれたものと推定される。

ステージIII: この段階はグリーンタフ地域の深成岩類にみられるものと同様な変質作用によるか、あるいは石英閃緑岩〜トナル岩中に捕獲岩としてとり込まれた際の接触変成作用による2次鉱物の生成段階である。

2. Al・Crに富む輝石とパーガス閃石の vermicular intergrowth.

以後の議論において、ステージIとした諸鉱物がマグマからの結晶作用により生成されたものかどうか問題となるので、ここでふれておく。

既述のようにステージIとした4鉱物の産状には種々のものがある。そのうち、輝石-1—角閃石-1シンプレクタイト（ここでは vermicular intergrowth としている）や単斜輝石-1・角閃石-1・クローム鉄鉍間にみられるモザイク状組織は、一般に固相間の反応生成物あるいは再結晶作用の産物と考えられている。しかし、一方では、単斜輝石-1・斜方輝石-1・角閃石-1がそれぞれ単独に存在することや、斜方輝石や角閃石のように核部に-1, 外殻部に-2という、組成的に著しいギャップを示す累帯構造をもつものがあることは、ステージIの鉱物が結晶作用によりマグマから早期に生成された同源的な捕獲結晶であるという考えを支持するものである。このことは固相間の反応または再結晶作用の産物であるとする考えに對し否定的である。そこで、輝石—角閃石シンプレクタイト (vermicular intergrowth) が、結晶作用によってできないのかどうかという問題について検討する。

輝石-1—角閃石-1 vermicular intergrowth の成因としては次のようなことが考えられる。i) ステージI以前に生成された（他源的なものを含む）固相間の反応。ii) 固相の subsolidus における分解あるいは再結晶。iii) ある種の輝石または角閃石の離溶。iv) 交代作用または replacement。v) マグマから共晶関係で晶出（これらのうち、i)~iii) は温度・圧力条件の変化に伴うものである）。このような成因が考えられるが、intergrowth している単斜輝石-1・斜方輝石-1・角閃石-1と組成的に類似

第7図 輝石・角閃石の Ca-Mg-Fe 図.

第8図 輝石・角閃石の Al-Ca-(Mg+Fe) 図。

した* 鉱物がそれぞれ単独に存在し、その量もかなり多いという点や、核部に単斜輝石-1 があり、その外套部に蠕虫状の斜方輝石-1 や角閃石-1 を含み、しかも単斜輝石-1 の組成には大きな差がない点は、上記の i)~iv) の考えに対し、否定的である。また、intergrowth する場合、輝石と角閃石の量比が一定していないことは i)~iii) の考えにとって不利である。

以上みてきたように、消去法によって検討した結果、v) 以外の考えには無理があるように思われる。では、v) の考えが妥当かどうかについて次に検討する。ここで問題にした vermicular intergrowth とよく類似したものに、長石と石英にみられる(微)文象構造がある。このような組織は結晶作用の末期において、共晶関係で晶出する場合にみられると一般に考えられている。また、これと酷似した組織は共晶合金ではごく普通にみられるもので、層状(ラメラ)共晶(組織)と呼ばれている (CEHALMERS, 1964 など)。輝石-角閃石の vermicular intergrowth は、筆者の知るかぎり他岩体から報告されていないが、次のような鉱物間では、かんらん岩や斑れい岩において同様な組織が知られている。すなわち、クロム鉄鉱-珪酸塩鉱物 (かんらん石・斜方輝石・単斜輝石・パーガス閃石) (DAWSON & SMITH, 1975), 単斜

輝石-チタン鉄鉱 (WYATT, 1977), 斜方輝石-磁鉄鉱 AMBLER & ASHLEY, 1977) などである。そしていずれの論者も、上記の2 鉱物間でみられる intergrowth は共晶関係を示す組織であると結論づけている。その論拠として、独立に存在する鉱物と、intergrowth する鉱物との間に組成的な相異がみられない点をあげている。また WYATT (1977) は、高温高圧実験によっても検証している。ここで扱った優黒質斑れい岩でも、同様な組織が、明らかにマグマ中で晶出した(ステージII)と推定される斜方輝石-斜長石間に認められる(図版I-H)。以上の諸点から、ステージIにおける単斜輝石-1-角閃石-1あるいはそれらに斜方輝石-1 が加わった vermicular intergrowth は、共晶関係を示す組織と考えるのが妥当である。

輝石と角閃石は、比較的高い水蒸気圧下で、晶出温度が同じになる場合があることが実験的に知られていたが (YODER & TILLEY, 1962), 両者の相関係は明らかではなかった。しかし、前述したような点から判断して、ある条件下(後述)では、輝石-角閃石は共晶関係にあると推察される。輝石-角閃石の相関係は、圧力条件の違いにより異なるものと考えられる。つまり、より低圧下では包晶反応関係(輝石+液→角閃石)にあるが、比較的高い水蒸気圧下では共晶関係(液→輝石+角閃石)に変

* mg 値にはわずかに相違が認められる。

[Yoshida complex]

Clinopyroxene-1 or orthopyroxene-1 from melanocratic gabbro

Clinopyroxene-2 or orthopyroxene-2 from melanocratic gabbro

Orthopyroxene-3 from melanocratic gabbro

Clinopyroxene from gabbro and quartz gabbro

A, B and C show maximum solubility of Al_2O_3 [A: gabbroic rocks; B: quartz diorite; C: granodiorite].

Clinopyroxene or orthopyroxene from intrusions of Giles complex, Central Australia (Goode & Moore, 1975)

Clinopyroxene or orthopyroxene from lherzolite inclusions, Ichinome-gata (Aoki & Shiba, 1973a)

Clinopyroxene or orthopyroxene from mafic inclusions, Ichinome-gata (Aoki, 1971)

Al_2O_3 Cr_2O_3

● ○

▲ △

■ □

○ ⊙

□ ⊠

△ ▲

第9図 単斜輝石の $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})-\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ 図および斜方輝石の $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})-\text{Al}_2\text{O}_3$ 図.

1 3: Melanocratic gabbro from the Yoshida complex [1: amphibole-1; 2: amphibole-2; 3: actinolite]. Fields enclosed with solid line show amphiboles from gabbro, quartz gabbro, quartz diorite and granodiorite of the Yoshida complex.

4: Lherzolite and websterite inclusions from Ichinome-gata (Aoki & Shiba, 1973b).

5: Mafic inclusions from Ichinome-gata (Yamazaki et al., 1966; Kuno, 1967; Aoki, 1971).

6: Hornblende gabbroic inclusions in andesite from Nagano and Niigata Prefectures (Yamazaki et al., 1966).

第10図 角閃石の $\text{Al}^{\text{IV}}-(\text{Na}+\text{K})$ 図 (DEER et al., 1962 による).

Pa:Pargasite; Tsch:Tschermakite;
 Fp:Ferroan pargasite; Ph:Parga-
 sitic hornblende; Th:Tschermakitic
 hornblende; Fph:Ferroan pargasitic
 hornblende; Mhh:Magnesian
 hastingsitic hornblende;
 Fth:Ferro-tschermakitic hornblende
 Hh:Hastingsitic hornblende
 Ed:Edenitic hornblende
 Mh:Magnesian hornblende
 Ah:Actinolitic hornblende
 Ac:Actinolite hornblende
 Trh:tremolitic
 Tr:Tremolite

●: Amphibole-1
 ▲: Amphibole-2
 ◆: Actinolite
 ✕: Projected onto the Si-(100Mg/(Mg+Fe))-plane.
 ✕: Projected onto the Si-(Ca+Na+K)-plane.
 a~c: Fields of amphiboles
 a: Gabbro, quartz gabbro, quartz diorite and granodiorite
 from the Yoshida complex.
 b: Lherzolite and websterite inclusions from Ichinome-gata
 (Aoki & Shiba, 1973b).
 c: Mafic inclusions from Ichinome-gata (Yamazaki et al.,
 1966; Kuno, 1967; Aoki, 1971).
 ⊕: Hornblende gabbroic inclusions in andesite at Nagano and
 Niigata Prefectures (Yamazaki et al., 1966).

第11図 角閃石の Si-100Mg/(Mg+Fe)・Si-(Ca+Na+K)図 (LEAKE, 1968 による).

第12図 優黒質斑れい岩における主要造岩鉱物の生成順序.

第6表 本地域の塩基性岩と議論で扱われた塩基性岩の主化学組成。

	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	51.40	53.16	50.05	52.9	51.5	53.75	50.71
TiO ₂	0.56	0.38	1.55	1.5	1.8	0.55	1.70
Al ₂ O ₃	17.01	15.96	13.37	16.9	13.8	14.30	14.48
Fe ₂ O ₃	3.42	2.08	3.71	0.3	2.2	1.70	4.89
FeO	6.12	6.94	10.39	7.9	8.9	4.46	9.07
MnO	0.23	0.26	0.25	0.2	0.1	0.11	0.22
MgO	7.00	6.48	6.49	7.0	9.4	9.58	4.68
CaO	11.10	10.32	11.00	10.0	8.9	6.89	8.83
Na ₂ O	2.07	1.67	2.38	2.7	2.5	2.55	3.16
K ₂ O	0.42	0.68	0.36	0.6	0.7	1.99	0.77
P ₂ O ₅	0.07	0.01	0.12	-	0.2	0.16	0.36
H ₂ O(+)	0.54	1.17	0.39	-	-	3.34*	1.04*
Total	99.94	99.11	100.06	100.0	100.0	99.38	99.91
Q	4.25	7.83	1.80	1.3	0.2	2.1	0.73
Or	2.34	4.02	2.22	3.5	4.1	12.2	4.55
Ab	17.52	14.13	20.44	22.8	21.4	22.5	26.74
An	35.94	34.04	24.46	32.2	24.2	22.6	23.05
Di	15.06	13.97	23.31	14.2	15.4	9.5	15.44
Hy	18.09	20.19	18.71	22.6	27.8	27.5	20.90
Mt	4.95	3.02	5.34	0.4	3.2	2.0	3.23
Il	1.06	0.72	2.89	2.8	3.3	1.1	3.13
Ap	0.17	0.02	0.34	-	0.4	0.4	0.83

*: Total H₂O. 1: Average composition of gabbroic rocks from the Yoshida complex (Sawada, 1978b, Table 6, No.1~5). 2: Dolerite from the South Mindani complex (Sawada, 1978b, Table 6, No.14). 3: Eclogite from Glenelg, Scotland (similar in composition to tholeiite) (Yoder & Tilley, 1962, Table 35, No.2). 4: SiO₂-saturated tholeiite (T.H.Green et al., 1967, Table 1). 5: SiO₂-saturated tholeiite (Nicholls & Ringwood, 1973, Table 1, No.2). 6: Tholeiite from the Saar-Nahe trough, SW Germany (Nicholls & Lorenz, 1973, Table 2, No.2). 7: Picture Gorge quartz tholeiite (Hamilton et al., 1964, Table 1, No.1).

わるものと考えることができる。このような関係は、圧力条件の相異なるかんらん石と輝石の相関係数変化(KUSHIRO & KUNO, 1963; KUSHIRO, 1964)とよく似ている。かんらん石-輝石と輝石-角閃石の間にみられるこのような共通した性格は、苦鉄質鉱物間における圧力条件と相関係を考える上で重要である。

モザイク状組織を示す単斜輝石-1・角閃石-1・クローム鉄鉱も、組成的には他の産状のものとよく類似している。個々の結晶粒は細粒であり、また角ばったものもかなりみられることから、この組織は再結晶作用によるものというより、機械的な破壊によって生じたものと推定される。

以上述べてきたように、ステージIで生成された諸鉱物にみられる種々の産状を合理的に説明するためには、それらがマグマからの結晶作用の結果、生成されたもの

であると考えるのが妥当である。なお、mg 値のばらつきは、晶出過程における組成変化と考えられる。

3. 鉱物の晶出過程から推定されるステージIの生成条件

優黒質斑れい岩における鉱物の晶出順序で特徴的なことは、かんらん石に先行して、ステージIでは輝石・角閃石・クローム鉄鉱が晶出している点と、輝石・角閃石がほぼ同時に晶出しており、両者の間に反応関係がみられない点である。鉱物の晶出順序はマグマの組成(揮発成分を含む)・温度・圧力などにより規制される。吉田複合岩体を含め本地域の塩基性マグマはSiO₂に過飽和なマグマとされており(第6表; 沢田, 1978b), 組成の点だけをみれば石英ソレーアイトと近縁である。ステージIとそれ以後とでマグマの組成は、途中で結晶作用が起こっている以上、幾分異なっていたであろうが、いずれにしてもSiO₂に飽和~過飽和なものと考えることができる。というのは、掛合陥没体の周辺地域における新第三紀初期の火成岩類には、SiO₂に不飽和なものは見られないことと、陥没体に伴われる塩基性岩は類似しており、いずれもノルム石英が算出される(第6表)ことからである。従って、ステージIにおけるマグマの組成はSiO₂に飽和~過飽和な塩基性マグマとして議論を進めていく。

まず、輝石と角閃石の晶出に関する問題については、YODER & TILLEY (1962) による溶融実験が参考となる。それによれば、ノルム石英が算出されるソレーアイト組成の液(Glenelyeclogite, 第6表)において、P_{H₂O}=10 kb ではすでに角閃石の方が単斜輝石より晶出温度が高くなっており、模式的なダイアグラム*(第13図)によるものではあるが、両者の晶出温度が等しくなるのは10 kb よりやや低い圧力条件下であるとされている。この結果はP_{total}=P_{H₂O}の場合であるが、P_{total}>P_{H₂O}では輝石と角閃石の晶出温度が同じになる時の圧力は上昇する。一方、この試料による実験でかんらん石が晶出していない点は、優黒質斑れい岩における結晶作用と異なる。

次に、かんらん石に先行して輝石・角閃石・クローム鉄鉱が晶出している問題を検討する。SiO₂に飽和した組成での実験でみると、dry 条件下では4.5kbですでにかんらん石は晶出しない(GREEN et al., 1967)。しかし、ステージIでは角閃石が晶出しているのでdryな条件とは考えられない。wetな条件下では、かんらん石の安定領域(圧力条件)は著しく拡大される[NICHOLLS & RINGWOOD (1972)によればP_{H₂O}=17kbまで。ま

* 実験は10kb (P_{total}=P_{H₂O}, P_{H₂O}=0)と1barにおいて行われているのみで、liquidus curveは他の試料による実験結果から推定したものである。

第 13 図 ノルム石英が算出されるソレーアイトにおける模式的なダイアグラム (YODER & TILLEY, 1962 による)。

第 14 図 ノルム石英が算出されるソレーアイトにおける相関係図 (NICHOLLS & LORENZ, 1973 による)。

た、 $P_{\text{total}} > P_{\text{H}_2\text{O}}$ ($\text{H}_2\text{O} = 10\text{wt}\%$) では 12~15kb でかんらん石に代り斜方輝石が晶出する。吉田複合岩体の塩基性マグマと組成的に近縁で、かつ輝石の組成も比較的似ている西南ドイツ、Saar-Nahe トラフのソレーアイト (第 6 表) を用いた溶融実験 (NICHOLLS & LORENZ, 1973) によれば、かんらん石が liquidus phase として晶出するための圧力の上限は、含水量 2wt% で 6~7kb, 4wt% では 8~10kb であり*, それ以上の圧力下では斜方輝石, または斜方輝石+単斜輝石の晶出相となる (第

14 図)。彼らによる実験では角閃石は晶出していない。一方、ステージ I では角閃石が晶出していることから、ステージ I における含水量はさらに多いことが期待される。WOOD & BANNO (1973) の方法により求めた単斜輝石-1 と斜方輝石-1 の晶出温度は 1000~1100°C の範囲にあり、ステージ I から II への晶出順序を $\text{H}_2\text{O} 4\text{wt}\%$ の相関係図と照らし合わせてみると、その温度はやや低い傾向にあることも、含水量がより多い条件下にあったとする考えを支持している。NICHOLLS & LORENZ (1973) の実験結果に基づくステージ I の圧力条件、すなわち 8~10kb ($\text{H}_2\text{O} 4\text{wt}\%$) は、かんらん石に先行して輝石が晶出するための下限である。含水量が増加すれば、かんらん石が晶出する圧力の上限は高くなることから (NICHOLLS & RINGWOOD, 1972, 1973), 上記の圧力条件はこれらの実験結果に基づく限り、最下限を示すと推定される。

以上検討してきたように、優黒質斑れい岩における早期の結晶作用の過程から、ステージ I における圧力条件は、8~10kb (深さ 26~35km) 以上と推定される。

4. Al・Cr に富む輝石とパーガス閃石

ここでは SiO_2 に飽和~過飽和なマグマ中で晶出した輝石・角閃石 (特にステージ I) の組成について 2・3 の問題を検討する。

〈Al・Cr に富む輝石〉

輝石-1 と輝石-2 の組成上の大きな相違は、Al・Cr 量の違いにあり、一般に前者においてこれらの含有量が高い。単斜輝石中の Al 量はマグマの組成 (特に $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ の活動度)・圧力・温度・共生関係にある鉱物種などによって規制される (KUSHIRO, 1960, 1965; LE-BAS, 1962; CLARK *et al.*, 1962; KUSHIRO & YODER, 1965; LEWIS, 1973; THOMPSON, 1974; MYSEN & BOETTCHER, 1976)。斜方輝石においても同様なことが言える (BOYD & ENGLAND, 1963; GREEN & RINGWOOD, 1976; ANASTASIOU & SEIFERT, 1972; FUJII & TAKAHASHI, 1976; ARIMA & ONUMA, 1977)。

前述したように、輝石-1 と輝石-2 が晶出したマグマの組成には大差はなく、いずれも SiO_2 に飽和していたものと推定される。従って、この場合、輝石中の Al 量を規制する要因のうち、マグマの組成依存性は無視できる。一方、輝石-1 と輝石-2 の中には、それらの mg 値と単斜輝石-1 斜方輝石間の miscibility gap に差がなく、つまり、定性的には晶出温度がほぼ等しいと考えられる**にもかかわらず、両者の Al 量に著しい差がみら

* NICHOLLS & LORENZ (1973) の本文に基づいた。相関係図 (第 14 図) でみると 5~7 kb ($\text{H}_2\text{O} 2\text{wt}\%$), 6~8 kb ($\text{H}_2\text{O} 4\text{wt}\%$) である。

** WOOD & BANNO (1973) の方法により求めた温度でも差はない。

れるものもある。このことは温度依存性も重要な支配要因ではないことを示している。1～3で考察したように、輝石-1と輝石-2の晶出条件のうち、もっとも顕著な違いは圧力条件の相違にあることから、両者におけるAl量の差は、主として圧力条件の違いを反映しているものと推察される。

ここでは特に、輝石-1と輝石-2との間のAl量の差を生じた要因を検討してきた。しかし、小論では扱っていない*が、例えば輝石-2におけるmiscibility gapの拡大に伴うAl量の減少や、累帯構造の発達した単斜輝石中におけるmg値と、Ca量の増大に伴うAl量の減少から推定される温度依存性、また、母岩のSiO₂量の増大に伴うAl量の減少から考えられる組成依存性(第9図)も、本地域の複合岩体で明らかとなっている。

単斜輝石-1は8～10モル%のCa-Tschermak分子を含んでいる。既述のように、この値はacmite分子をとり去っていないので、実際にはもっと大きいと考えられる。いずれにせよ、比較的浅所で形成された非アルカリ岩中の単斜輝石と比較して高い値を示す。温度一定で、ガーネット(pyrope-grossularite)が安定に存在しない場合は、圧力の上昇につれ、単斜輝石中のCa-Tschermak分子は増加する(KUSHIRO, 1965)。前述したSaar-Naheトラフのソレーアイトを用いた溶融実験(NICHOLLS & LORENZ, 1973)によると、8および10kb(H₂O 4wt%), 1080～1140°Cの条件下で晶出した単斜輝石と斜方輝石中のAl₂O₃量は、輝石-1中のものにきわめて近い。

上部マントルあるいは地殻下部から由来したと推定される包有物や岩体が世界各地から報告されている。第9・15図には10～12kbで晶出したと推定されている中央オーストラリア、Giles complexのlayered intrusionに含まれる輝石(GOODE & MOORE, 1975)のAl₂O₃-mg値と単斜輝石のAl^{IV}-Al^{VI}を示した。また、同図には秋田県一ノ目湯産のlherzoliteの包有物中の輝石** (AOKI & SHIBA, 1973a)も示した。輝石-1とGiles complexのintrusions中の輝石を比較すると、単斜輝石に含まれるNa₂O量が前者で0.65%以下、後者で1.14%以下と違いがあるのみで、他の成分はほぼ等しく、特にいずれもAlとCrに富むことが特徴である。また、一ノ目湯産lherzolite中のものと比べると、mg値に差がある点(輝石-1の方がやや低い)を除けば、Al・Cr・Na量はよく類似している。

* 後続の論文で検討する予定である。

** 6～7kbでの再結晶作用のため、幾分もとの組成から変化しているものと考えられている(AOKI & SHIBA, 1973a)。

長野県・新潟県の鮮新世カルクアルカリ質安山岩中に角閃石斑れい岩の包有物がみられる。この包有物を同源捕獲岩とする考え(TAKESHITA, 1973)と他源的なものとする考え(YAMAZAKI *et al.*, 1966)があるが、いずれの論者も、地殻下部から由来したものとする点では一致している。この包有物中に含まれる単斜輝石のmg値は単斜輝石-1に比べやや低い、他の点では両者は比較的類似している。

単斜輝石のAl^{IV}-Al^{VI}図(第15図)では、AOKI & KUSHIRO (1968)によるeclogites・玄武岩中の包有物とgranulites・火成岩類に含まれる単斜輝石の領域を示すとともに、吉田複合岩体中の単斜輝石を高圧型と低圧型の2つの領域に分けた。ここで言う高圧型とは、すでに議論してきたように、地殻最下部～最上部マントルで晶出したと推定されるものであり、低圧型とは地殻上部で晶出したと考えられる単斜輝石である。そもそもがAlに乏しい単斜輝石のAl^{IV}-Al^{VI}の関係を議論することは、あまり重要な意味を持たないかもしれないが、低圧型の単斜輝石でも第15図のb-c境界線の上側にプロットされるものが多い点は注目に値する。単斜輝石中のAl量は、マグマのSiO₂活動度により大きく規制される(KUSHIRO, 1960)ことと、吉田複合岩体の塩基性岩を形成したマグマはSiO₂に飽和～過飽和であったことから、上記の点は次のように解釈できる。すなわちマグマがSiO₂に飽和～過飽和な場合、低圧の条件下では不飽和な場合に比べAl₂O₃量が低い(3%以下)と同時に、Al^{IV}が減少し、逆にAl^{VI}が増加するということである。Al^{IV}とAl^{VI}の関係は、マグマ中のSiO₂活動度による制約を受けていると考えられるので、単斜輝石におけるAl^{IV}とAl^{VI}の関係を検討する際には、この点の考慮が必要である。

〈パーガス閃石〉

輝石-1とはほぼ同時期に晶出した角閃石-1はパーガス閃石質であり、角閃石-2と組成的に異なる(第3表、第10・11図)。パーガス閃石質角閃石の安定領域は著しく広く、高圧から低圧まで***安定に存在しうる。その領域はP_{total}=P_{H₂O}の場合とP_{total}>P_{H₂O}の場合とで当然異なる。volatile content(H₂O・F₂・CO₂など)によっても変動し、例えば、fluid phase中のH₂Oのmole fractionによって著しく変化することが明らかとなっている(HOLLOWAY, 1973)。また、その領域はマグマ中のSiO₂活動度の増加に伴い、温度・圧力ともに縮小する

*** 高圧側では、約900°C、P_{total}=P_{H₂O}条件下で、KUSHIRO (1970)によれば27kbまで、NISHIKAWA *et al.* (1970)によれば37kbまで存在しうる。低圧側ではBOYD (1959)の実験がある。

第 15 図 単斜輝石の Al^{IV} - Al^{VI} 図.

(ALLEN *et al.*, 1972*). 従って, 天然系においては, パーガス閃石質角閃石の存在から, その晶出条件を一義的に決めることはできない. しかし, そのような多くの制約があるにしても, 少なくとも次の点はいいうる. つまり, いずれの実験結果でも, より高圧側 (KUSHIRO, 1970 によれば 20kb 以上) では, 圧力は温度に対し負の勾配をもつが, より低圧側ではそれが正の勾配へと変わる. つまり, マグマ組成と晶出温度がわかれば, 大まかな圧力の範囲を知ることができる. ステージ I の場合, 角閃石-1 と斜方輝石-1 の蠕虫状結晶を含む単斜輝石-1 から, 輝石の晶出温度を WOOD & BANNO (1973) の方法により求め, それを角閃石の晶出温度とすると, 誤差を 50°C 土と見積っても 950°C 以下にはならない. 一方, 本地域の塩基性マグマは, ALLEN *et al.* (1972) により使用された Picture Gorge 石英ソレーアイトに

組成が近縁である (第 6 表) ことから, その組成中での角閃石の安定領域を参考にすると (第 16 図), 圧力条件は 950°C では 10~19kb, 1000°C では 12~17kb となる. この結果は, 鉱物の晶出順序と輝石の組成から推定されるステージ I の圧力条件と矛盾しない.

角閃石-1 の中には Ti・Cr に富むものがある (第 3 表の A-1g). GREEN & RINGWOOD (1968) によれば, 高アルミナ石英ソレーアイト組成において, $920\sim 1040^{\circ}\text{C}$, 9~10kb (wet) の条件下で晶出した角閃石は, Ti-パーガス閃石質 (mg 値=62.1 ~ 77.8) であり, A-1g とよく似ている. HELZ (1973) は $P_{H_2O}=5\text{kb}$ 下で, 角閃石組成に及ぼす温度・ fo_2 . マグマの組成などの影響について検討し, 角閃石中の Ti 含量は bulk Ti content にはあまり依存せず, fo_2 と温度への依存性が強いことを指摘している. つまり, 温度とマグマ組成が一定のもとでは fo_2 の減少に伴い Ti 量が上昇する. また, QFM buffer の fo_2 の条件下では, 温度上昇に伴って, Ti 量はほぼ直線的に上昇する. Picture Gorge 石英ソレー

* 原著にあたることができなかったで, MYSEN & BOETTCHER (1976) と針谷 (1976) を参考にした. 第 16 図についても同様である.

第 16 図 ソレーアイト・石英ソレーアイト・安山岩における角閃石の安定領域 (ALLEN *et al.*, 1972 による).

アイト組成で晶出した角閃石は fo_2 -QFM buffer, 930~1000°C の条件下で, 2.73~3.98% の TiO_2 を含む. このように石英ソレーアイト中でも Ti に比較的富むパーガス閃石質角閃石が生成されうる.

Cr に富む角閃石 (パーガス閃石質~Tschermakitic) は上部マントル~地殻下部から由来したと推定されている (包有物中からしばしば報告されている (VARNE, 1970; BOYD, 1971; BEST, 1974; DAWSON & SMITH, 1975 など). 一ノ目瀉産包有物中にも, パーガス閃石質角閃石が普遍的に含まれている (KUNO, 1967; AOKI & SHIBA, 1973b). 角閃石-1 を一ノ目瀉産包有物中のものと比較すると, mg 値は角閃石-1 のうち高いものは超塩基性岩中のものに, また低いものは塩基性岩中のものに類似している (第 11 図). Al, Al^{IV} は角閃石-1 で低く (第 10 図), 逆に Cr はやや高い傾向にある. 長野県・新潟県の鮮新世カルクアルカリ岩に包有される角閃石斑れい岩中の角閃石もパーガス閃石質~Tschermakitic である (YAMAZAKI *et al.*, 1966; TAKESHITA & OJI, 1968; TAKESHITA, 1973; 第 10 図). それらは Al・ Al^{IV} ともに角閃石-1 に比べ高いが, mg 値は角閃石の中でも低い方のものと同様な範囲にある.

以上, 輝石-1 と角閃石-1 の組成上の特徴について, 高温・高圧実験の結果から, また他地域の高圧下で生成されたと推定されている輝石・角閃石との組成的類似性から考察してきたが, 以上のすべての点は, 鉱物の晶出順序から推定された圧力条件 (すなわち 8~10kb 以上) を支持している. 圧力の上限については, パーガス閃石

第 17 図 掛合陥没体における模式的な初期火成活動史 (I~VI は本文参照).

質角閃石の安定領域からいえば 17~19kb 以下である. しかし, pyrope 成分に富むガーネットは含まれず, また単斜輝石中の Al_2O_3 量や Ca-Tschermak 分子の量は, 他地域の 10 kb 前後で形成されたと推定されているものによく類似していることから, 総合的に判断すると, ステージ I における圧力条件は 10 kb 前後か, それよりやや高いと考えるのが妥当である.

まとめにかえて—吉田複合岩体の形成史—

小論では, 吉田複合岩体に含まれる優黒質斑れい岩を対象にして, 特にステージ I の形成条件について検討してきた. この結果と沢田 (1978b) により報告された地質学的根拠から, 現在までの段階で考えられる吉田複合岩体の形成過程の概略を述べる. なお, 第 17 図に模式的な岩体形成史を示した.

I. 先駆的火山活動

吉田複合岩体により接触作用を受けていると推定される安山岩～石英安山岩質火砕岩の存在から、吉田複合岩体貫入以前に火山活動があったと考えられる(沢田, 1978b). 波多期^{はた}の最も初期の活動で、主に安山岩・石英安山岩からなる。

II. 地下深部への塩基性マグマの進入と結晶作用

この小論で議論してきたステージ I にあたる。進入したマグマは SiO_2 に飽和～過飽和なものであり、また、初期の段階で角閃石が晶出していることから、初生的に水に富むものであったことは確実である。もし、このマグマがマントル上部で発生したとするならば、その場は比較的含水鉱物に富んでいた (hydrous mantle) と推察される。現在知りうる限りの最初の結晶作用は、10kb 前後ないしはそれよりやや高い圧力条件下、すなわち深さ 35 km 前後で起こったものと推定される。山陰地方の地下構造については、RESEARCH GROUP FOR EXPLOSION SEISMOLOGY (1970) により、鳥取県倉吉一花房地域の爆破観測から 2 つのモデルが出されている、いま仮にここで I を採用し、地震波速度が 6.7km/s と 7.9 (8.0) km/s との境界 (地下 35～40km) をモホ面と考えると、上述の推定深度は地殻最下部付近に相当する。

小論では、優黒質斑れい岩についてのみ検討してきたが、複輝石斑れい岩でも、同一試料中で 2 種類の単斜輝石が含まれる岩相もある (図版 I-I)。そのうち 1 つは、他の斑れい岩類中で見られるものと同様な組成と組織をもつ単斜輝石 (C_2) である。他の 1 つ (C_1) は蠕虫状のサポーナイトを含み、小論で扱った単斜輝石-1 とよく似た組織をもつ。サポーナイトは一般に斜方輝石や角閃石から交代したものが多く、同岩中の斜方輝石は大部分が変質せず残っていることから、角閃石から交代した可能性が強い*。つまり、初生的に Al に富んでいた単斜輝石が分解したものか**、あるいは優黒質斑れい岩中の単斜輝石-1 と同様に、角閃石と同時に晶出したものとみることができる。従って、斑れい岩中のこの特異な組織をもつ単斜輝石-1 も、ステージ I とほぼ同様な条件下で晶出したものと推察される。

III. 断層帯に沿う塩基性マグマの上昇と地殻上部での結晶作用—斑れい岩類の形成。

上述したように、優黒質斑れい岩と斑れい岩には、ステージ I で晶出した結晶がレリクトとして含まれている。このことは、ステージ I で晶出した結晶 (早期晶出

相) が残液とともに上昇したか、あるいは、ステージ I で塩基性マグマが固化しつつあった時に、別個の塩基性マグマが引き続いて進入し、それらを包有して上昇したかのいずれかである。マグマの上昇には、断層帯が大きな役割を果たしていたものと考えられる (沢田, 1978b)。そのマグマは地殻の比較的浅い位置に貫入し、斑れい岩類を形成した。その過程で、ステージ I で晶出した結晶の多くは、新しい条件に対応して組成を変えていったものと考えられる。

IV. 中性マグマの生成と上昇—石英閃緑岩類の形成

地下深部で中性マグマが生成*** され、斑れい岩類を形成したマグマとはほぼ同様な通路を経て上昇し、その過程で斑れい岩類を巨大なブロックとして包有した。中性マグマは地表付近で結晶化し、石英閃緑岩—トータル岩—花崗閃緑岩を形成した。

V. 深成複合岩体の周辺部における火山活動

深成複合岩体の形成後、主にその岩体と基盤との境界部に沿い、中性 (一部、塩基性・酸性) マグマが貫入した。このことは岩体周辺部における多種多様な岩脈と貫入状火山角礫岩の存在から推察される。複合岩体周辺部の火山活動は、次の第 1 次陥没以後も何回か繰り返し起こったものと推定される。

VI. 第 1 次陥没と陥没体内部における火山活動

以上の火山—深成活動の進行に伴い、第 1 次陥没^{たふ}が起こり、湖沼が形成された (基底角礫岩層を含む成砕屑岩層の堆積)。第 1 次陥没の直後から、陥没体内部を中心に大規模な火山活動が起こっている (松笠火山岩層—玄武岩質安山岩・安山岩・斜長流紋岩を主とする)。この過程については詳細に検討する必要があるが、小論では結論だけにとどめておく。

掛合陥没体は約 11km の規模をもち、規模としては本宿グリーンタフ層積成盆 (本宿団体研究グループ, 1970) とほぼ同様である。また、両積成盆の発生期には陥没運動 (第 1 次) があった点も共通している。本宿団体研究グループ (1970) は、第 1 次陥没とマグマ活動の関連について、構造地質学の面からの検討を行い、地表付近での裂かの傾斜を地下深部まで延長できるという仮定の上になつての議論ではあるが、1 つの試論を提出している。それによると、第 1 次陥没直前の隆起現象を引き起こした物理化学的変動部は、地下 30km 付近のところに生じたと推定している。くしくも地下 30km 前後という値は、小論で岩石学的に検討したステージ I の圧力条件とよい調和を示している。つまりこのような深さにマグ

* 投稿後に変質せずに残っているパーガス閃石がみいだされた。

** ホストの単斜輝石は Al_2O_3 が 2.5%± で単斜輝石-2 とよく似ていることから、この考えの方が有力である。

*** この過程についての考察は、稿を改めて行う予定である。

マの停滞部（マグマ溜りの存在を肯定するならば、そのようなものの1つと考えてもよい）があったものと推察される。

しかしながら、積成盆の発生期の問題だけをとりても、本宿団体研究グループ（1970）によって示されたシェーマと、掛合陥没体における形成史との間には幾つかの相違がみられる。例えば、本宿層積成盆では第1次陥没以前に火成活動はなかったとされているのに対し、掛合陥没体では火山—深成活動があったと推定される。また、彼らは地下深部での物理化学的変化を地表での構造運動の第一義的要因としてとらえているが、著者は、陥没体よりもっと大きい規模での構造運動—マグマの生成と上昇—陥没体規模での隆起・陥没現象は密接に関連しあい、相互作用を及ぼしあっているものと考えている。この点に関しては本題からそれるので、稿を改めて、火成活動の側からみた構造運動との関連の問題として報告する予定である。

グリーンタフ火山活動に伴われる貫入複合岩体は、一般に小規模であるために研究対象として見逃がされがちである。しかし、小規模であるが故に、各晶出段階で完全平衡に達していない場合も多く、晶出条件の異なる鉱物のレリクトを同一岩体に含んでいることが期待される。つまり、このような貫入岩体は、地表付近のみならず、地下深部での火成作用（マグマ活動）を明らかにする上で貴重な資料を提供してくれるものと思われる。

文 献

- ALLEN, J. C., MORDRESKI, P. J., HAYGOOD, C. and BOETTCHER, A. L., 1972: The role of water in the mantle of the earth. *The stability of amphibole and mica*. 24th Int. Geol. Congr., p 231.
- AMBLER, E. P. and ASHLEY, P. M., 1977: Vermicular orthopyroxene—magnetite symplectites from the Wateranga layered mafic intrusion, Queensland, Australia. *Lithos*, **10**, 163—172.
- ANASTASIOU, P. and SEIFERT, F., 1972: Solid solubility of Al_2O_3 in enstatite at high temperatures and 1—5 kb water pressure. *Contr. Miner. Petrol.*, **34**, 272—287.
- AOKI, K. and KUSHIRO, I., 1968: Some clinopyroxenes from ultramafic inclusions in Dreiser Weiher, Eifel. *Ibid.*, **18**, 326—337.
- and SHIBA, I., 1973a: Pyroxenes from lherzolite inclusions of Itinome-gata, Japan. *Lithos*, **6**, 41—51.
- and ———, 1973b: Pargasites in lherzolite and websterite inclusions from Itinome gata, Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **68**, 303—310.
- ARAI, S., 1974: “Non-calciferous” orthopyroxene and its bearing on the petrogenesis of ultramafic rocks in Sangun and Joetsu zones. *Ibid.*, **69**, 343—353.
- ARIMA, M. and ONUMA, K., 1977: The solubility of Alumina in enstatite and the phase equilibria in the join MgSiO_3 — $\text{MgAl}_2\text{SiO}_6$ at 10—25 kbar. *Contr. Miner. Petrol.*, **61**, 251—265.
- ATKINS, F. B., 1969: Pyroxenes of the Bushveld intrusion, south Africa. *Jour. Petrol.*, **10**, 222—249.
- BEST, M. G., 1974: Mantle-derived amphibole within inclusions in alkalic-basaltic lavas. *Jour. Geoph. Res.*, **79**, 2107—2113.
- and MERCY, E. L. P., 1967: Composition and crystallization of mafic minerals in the Guadalupe igneous complex, California. *Amer. Miner.*, **52**, 436—474.
- BOYD, F. R., 1959: Hydrothermal investigations of amphiboles. In P. H. ABELSON ed.: *Researches in geochemistry*, 337—396, John Wiley and Sons New-york.
- , 1971: Pargasite—spinel peridotite xenolith from the Wesselton Mine. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **70**, 138—142.
- and ENGLAND, J. L., 1963: Some effects of pressure on phase relations in the system MgO — Al_2O_3 — SiO_2 . *Ibid.*, **62**, 121—124.
- BROWN, G. M., 1957: Pyroxenes from the early and middle stages of fractionation of the Skaergaard intrusion, east Greenland. *Miner. Mag.*, **31**, 511—543.
- CHALMERS, B., 1964: Principles of solidification: 岡本 平・鈴木 章共訳: 金属の凝固. 287p. 丸善.
- CLARK, Jr., S. P., SCHAIRER, J. F. and DE NEUFVILLE, J., 1962: Phase relations in the system $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ — $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ — SiO_2 at low and high pressure. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **61**, 59—68.
- CZAMANSKE, G. K. and WONES, D. R., 1973: Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway: part 2, the mafic silicates. *Jour. Petrol.*, **14**, 349—380.
- DAWSON, J. B. and SMITH, J. V., 1975: Chromite-silicate intergrowths in upper-mantle peridotites. *Phys. Chem. Earth*, **9**, 339—350.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. and ZUSMAN, J., 1962: *Rock-forming minerals*, vol. 2, chain silicates. 263—314. Longmans, Green and Co. Ltd., London.
- FUJII, T. and TAKAHASHI, E., 1976: On the solubility of alumina in orthopyroxene coexisting with olivine and spinel in the system MgO — Al_2O_3 — SiO_2 . *Miner. Jour.*, **8**, 122—128.
- GOODE, A. D. T. and MOORE, A. C., 1975: High pressure crystallization of the Ewarara, Kalka and Gosse Pile intrusions, Giles complex, central Australia

- Contr. Miner. Petrol.*, **51**, 77—97.
- GREEN, D. H. and RINGWOOD, A. E., 1967: The genesis of basaltic magmas. *Ibid.*, **15**, 103—190.
- GREEN, T. H., GREEN, D. H. and RINGWOOD, A. E., 1967: The origin of high-alumina basalts and their relationships to quartz tholeiites and alkali basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **2**, 41—51.
- and RINGWOOD, A. E., 1968: Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite. *Contr. Miner. Petrol.*, **18**, 105—162.
- 針谷 宥, 1976: 上部マントル中の水—角閃石その他 2, 3 の鉱物の安定領域. 岩鉱学会特別号 (富阪武士編), No. 1, 造岩鉱物の進歩, 175—184.
- HASLAM, H. W., 1968: The crystallization of intermediate and acid magmas at Ben Nevis, Scotland. *Jour. Petrol.*, **9**, 84—104.
- HELZ, R. T., 1973: Phase relations of basalts in their melting range at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity, Part I, Mafic phases. *Ibid.*, **14**, 249—302.
- HESS, H. H., 1960: Stillwater igneous complex, Montana: a quantitative mineralogical study. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 1—230.
- and PHILLIPS, A. H., 1938: Orthopyroxenes of the Bushveld type. *Amer. Miner.*, **23**, 450—456.
- HOLLOWAY, J. R., 1973: The system pargasite- H_2O - CO_2 : a model for melting of a hydrous mineral with a mixed-volatile fluid—I, Experimental results to 8 kbar. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **37**, 651—666.
- KUNO, H., 1967: Mafic and ultramafic nodules from Itinome-gata, Japan. In P. J. WYLLIE ed.: *Ultramafic and related rocks*, 337—342, John Wiley and Sons, New York.
- KUSHIRO, I., 1960: Si-Al relation in clinopyroxene from igneous rocks. *Amer. Jour. Sci.*, **258**, 548—554.
- , 1962: Clinopyroxene solid solutions, Part I, The $CaAl_2SiO_6$ component. *Japan. Jour. Geol. Geogr.*, **33**, 213—220.
- , 1964: The system diopside-forsterite-enstatite at 20 kb. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **63**, 101—108.
- , 1965: Clinopyroxene solid solutions at high pressures. *Ibid.*, **64**, 112—117.
- , 1970: Stability of amphibole and phlogopite in the upper mantle. *Ibid.*, **68**, 245—247.
- and KUNO, H., 1963: Origin of primary basalt magmas and classification of basaltic rocks. *Jour. Petrol.*, **4**, 75—89.
- and YODER, Jr., H. S., 1965: The reactions between forsterite and anorthite at high pressures. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **64**, 89—95.
- LEAKE, B. E., 1968: A catalog of analyzed calciferous and subcalciferous amphiboles together with their nomenclature and associated minerals. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, no. 98, 1—210.
- LEBAS, M. J., 1962: The role of aluminum in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *Amer. Jour. Sci.*, **260**, 267—288.
- LEWIS, J. F., 1973: Petrology of the ejected plutonic blocks of the Soufrière Volcano, St. Vincent, West Indies. *Jour. Petrol.*, **14**, 81—112.
- 本宿団体研究グループ, 1970: グリーンタフ変動の研究—本宿グリーンタフ層についての団体研究—. 地団研専報, no. 16, 95 p.
- MURAKAMI, N., 1969: Two contrastive trends of evolution of biotites in granitic rocks. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.*, **62**, 223—248.
- MYSEN, B. O. and BOETTCHER, A. L., 1976: Melting of a hydrous mantle: III. Phase relations of garnet and subcalciferous amphiboles together with their websterites+ H_2O at high pressures and temperatures. *Jour. Petrol.*, **17**, 1—14.
- NICHOLLS, I. A. and LORENZ, V., 1973: Origin and crystallization history of permian tholeiites from the Saar-Nahe trough, SW Germany. *Contr. Miner. Petrol.*, **40**, 327—344.
- and RINGWOOD, A. E., 1972: Production of silica-saturated tholeiites magmas in Island Arcs. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **17**, 243—246.
- and ———, 1973: Effect of water on olivine stability in tholeiites and the production of silica-saturated magmas in the Island-Arcs environment. *Jour. Geol.*, **81**, 285—300.
- NISHIKAWA, M., KUSHIRO, I. and UEDA, S., 1970: Stability of natural hornblende at high water pressures: Preliminary experiments. *Japan Jour. Geol. Geogr.*, **41**, 41—50.
- NWE, Y. Y., 1976: Electron-probe studies of the earlier pyroxenes and olivines from the Skeargaard intrusion, east Greenland. *Contr. Miner. Petrol.*, **55**, 105—126.
- ONYEAGOGHA, A. C., 1974: Alteration of chromite from the Twin Sisters Dunitite, Washington. *Amer. Miner.*, **59**, 608—612.
- POLDERVAART, A. and HESS, H. H., 1951: Pyroxenes in the crystallization of basaltic magma. *Jour. Geol.*, **59**, 472—489.
- RESEARCH GROUP FOR EXPLOSION SEISMOLOGY, 1970: Crustal structure in the western part of Japan derived from the observation of the first and second Kurayoshi and Hanabusa explosions, Part 1. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **48**, 1121—1127.
- , 1970: Crustal structure in the western part of Japan derived from the observation of the first and second Kurayoshi and Hanabusa explosions, Part 2. *Ibid.*, **48**, 1129—1136.
- 沢田順弘, 1978a: 島根県出雲市南方地域の地質. 地質雑, **84**, 111—130.
- , 1978b: 島根県掛合陥没体に伴われる貫入複

- 合岩体—非アルカリ岩のマグマ型と岩石系列に関する
2, 3 の問題—。同上, **84**, 177—200.
- SPANGENBERG, K., 1943: Die chromitlagerstätte von
Tampadel in Zobten. *Zeits. Prakt. Geol.*, **51**, 13—35.
- TAKESHITA, H., 1973: Petrological studies on the
volcanic rocks of the northern Fossa Magna region,
central Japan. *Pacific Geology*, no. 7, 65—95.
- and OJI, Y., 1968: Hornblende gabbroic
inclusions in the calc-alkaline andesites from the nor-
thern district of Nagano prefecture, Japan. (I). *Jour.*
Japan. Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol., **60**, 1—26.
- and ———, 1958: Hornblende gabbroic
inclusions in the calc-alkaline andesites from the
northern district of Nagano prefecture, Japan. (II).
Ibid., **60**, 59—74.
- THOMPSON, R. N., 1974: Some high-pressure pyro-
xenes. *Miner. Mag.*, **39**, 768—787.
- ULMER, G. C., 1974: Alteration of chromite during
serpentinization in the Pennsylvania-Maryland dis-
trict. *Amer. Miner.*, **59**, 1236—1241.
- VANCE, J. A., 1965: Zoning in igneous plagioclase:
patchy zoning. *Jour. Geol.*, **73**, 636—651.
- VARNE, R., 1970: Hornblende lherzolite and upper
mantle. *Contr. Miner. Petrol.*, **27**, 45—51.
- WOOD, B. J. and BANNO, S., 1973: Garnet-orthopyro-
xene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships
in simple and complex systems. *Ibid.*, **42**, 109—124.
- WYATT, B. A., 1977: The melting and crystalization
behaviour of a natural clinopyroxene-ilmenite inter-
growth. *Ibid.*, **61**, 1—9.
- YAMAZAKI, T., ONUKI, H. and TIBA, T., 1966: Significance of hornblende gabbroic inclusions in calc-alkali rocks. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petrol. Econ. Geol.*, **55**, 87—103.
- YODER, Jr., H. S., 1965: Diopside-anorthite-water at five and ten kilobars and its bearing on explosive volcanism. *Carnegie Inst. Wash., Year Book*, **64**, 82—89.
- and TILLEY, C. E., 1962: Origin of basalt magmas: An experimental study of natural and synthetic rock systems. *Jour. Petrol.*, **3**, 342—532.

図 版 説 明

- A. トーナル岩中の優黒質斑れい岩の捕獲岩。
- B. 外套部で蠕虫状角閃石-1 を包有する単斜輝石-1 (XMA による反射電子像)。
[B～I の記号は次のとおりである。 $c_1 \cdot c_2$: 単斜輝石-1・2, $o_1 \cdot o_2 \cdot o_3$: 斜方輝石-1・2・3, $a_1 \cdot a_2$: 角閃石-1・2, ch: クローム鉄鉱, p: 斜長石, s+m: 蛇紋石+磁鉄鉱 (かんらん石仮像), B～H: 優黒質斑れい岩]。
- C. モザイク状組織を示す単斜輝石-1・角閃石-1・クローム鉄鉱。
- D. 単斜輝石-1 と角閃石-1 の vermicular intergrowth (開放ニコル)。
- E. D と同じ (XMA による反射電子像)。[c_1 : 明るい部分, a_1 : 明るい灰色の部分, a_2 : 暗い灰色の部分]
- F. かんらん石 (仮像)・斜方輝石-3 とそれらを包有する斜方輝石-2 (開放ニコル)。
- G. かんらん石 (仮像) とその反応縁を構成する斜方輝石-2 および斜方輝石-2 と斜長石にみられる micrographic 組織 (開放ニコル)。
- H. 斜方輝石-2 と斜長石にみられる micrographic 組織 (G の白わく部分の拡大。開放ニコルおよび XMA の $MgK\alpha$ -X 線像)。
- I. 斑れい岩における輝石の産状 (クロスニコル。o: 斜方輝石)。