霧島火山の岩石学的研究

Petrology of the Kirishima Volcano

進 野 勇 (Isamu Shinno)*

Abstract: Petrography (chemical analyses of rocks 15, clinopyroxenes 2, orthopyroxene 1, titanomagnetites 3; microscopic observation and compositional estimation of rock-forming minerals) of lavas of the Kirishima volcano are presented, with special reference to the distinguishable relation between olivine and pyroxene, which is able to make genetical classification of subalkaline rocks. Considering the thermodynamic knowledge and the data of olivines and pyroxenes obtained by Bowen and Schairer (1935) and Osborn and Muan (1956-59), the writer was induced to the following approach. If the oxygen partial pressures are sufficiently supplied, it may be tend to lower the temperature of crystallization. Mg-Fe distribution constant $K(t)$ of olivine and pyroxene, and entropy changes ΔS of those mineral formation in magma.

From the theoretical consideration on the petrographic properties of the lavas, the author proposed a hypothetical phase diagram MgSiO_3 -Fe SiO_3 join, by which are interpreted most facts; i.e. occurrence of myrmekitic magnetite in pyroxene, reverse zoning of orthopyroxene, abnormal relation of phenocryst pyroxene and groundmass one (Taneda 1943, 1947), and no pigeonite inverted from orthopyroxene, in calc alkaline rocks.

And by the petrochemical consideration, the writer agree with Yoder and Tilley's (1962) idea which the so-called "High alumina basalt magma" is not necessary as the original magma.

1. 序 言

霧島火山の岩石学的研究は少ないが 1958 年地調の図幅説明書(沢村孝之助他)において主な熔岩の化学組成が明かにされ、かつ“ビジョン輝石岩系”と“紫輝石岩系”とが混在していると指摘、1960 年には“高アルミ玄武岩”の存在も指摘された(Kuno 1960)。近年 Muan & Osborn (1956) の実験を基にしてマグマ中における酸素分圧の役割が論じられ (Osborn 1959, 1962, Taneda 1947, 種子田, 1949), Kennedy (1948) による天然岩石のガス分重視の立場が成因論進展上重要なことが認識されてきた。R. F. Fudali (1965) は天然岩石を実験試料に使用して $10^{-6.5} \sim 10^{-9}$ という値を岩石生成時の大ざっぱな酸素分圧として報告しているが、酸素分圧が高いとかんらん石や輝石の晶出が制限されマグネシオフィライトが早期から晶出すること、その結果として長石の晶出が遅れると考えられることなど。又“Ternary eutectic”が酸素分圧によって移動し MgO に富むかんらん石と SiO_2 の共存する領域の拡大する可能性があることなどは

* 九州大学理学部地質学教室 (昭和 41 年 1 月 5 日受理)

興味深く、酸素分圧というマグマの雰囲気考慮に入れた元素の分配、例えば Ramberg & De vore (1951) のかんらん石・斜方輝石における Mg-Fe の分配律の考察は再検討されるべきであろう。Yoder & Tilley (1962) の実験解釈も Dry 又は常圧下の 2~3 成分系の実験知識の利用限界を明らかにして岩石学の 1 つの方向を示したように思われる。CaO 含有量による斜方輝石の温度推定法、転移温度、さらに高アルミナ玄武岩マグマの問題など再検討すべき課題は少くない。

私はこういった視野のもとで霧島火山の熔岩類を調べている間に石基に紫輝石が存在しているというだけで成因的に“紫輝石岩系”として分類することは疑問であると考えた。新に霧島熔岩類を成因的に 2 つに大別して 1 つを「高アルミナ岩類」、他を「カルク・アルカリ岩類」と仮称することにした。前者は久野の高アルミナ玄武岩、“ビジョン輝石岩系”および若干の“紫輝石岩系”の岩石を包有し、後者は若干のものを除いた“紫輝石岩系”のほとんどすべてに相当する。これらの成因については、Osborn (1962) が酸素分圧の差によってサブアルカリ岩を 2 つの岩型に分類したように霧島の 2 つの岩類も酸素分圧の結晶作用、元素の分配に及ぼす影響の相違によって大まかに説明できる。

今後検討すべき多くの問題があるがこれまで野外ならびに室内において調査研究したところを報告して大方の御批判を得たいと思う。この研究に当り終始御指導をいただいた種子田定勝先生に厚くお礼申し上げます。又御助言をいただいた山口勝博士、石橋澄、柳摩両学士、宮久三千年博士（愛媛大学）、松本征夫博士（九大生産研）、沢村孝之助、松井和典両氏（地調）さらに我が教室の PM 会の皆様に深く感謝します。なお、特に化学分析については石橋学士のご指導によるところ大である。

なおこの研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によった。記して謝意を表す。

2. 岩石の記載

i) 岩石の分類

(a) カルクアルカリ岩類

化学組成上いわゆる紫輝石岩系にほぼ相当するものでマグマの分化と、ともに SiO_2 や $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ に富んでいき、 ΔFeO の濃集が起っていないと考えられるもので、紫輝石岩系という名称を使わなかったのは石基に紫輝石が存在しても成因的に異なるものがあると考えられるものがあるからである（P81, P80, P89 の御鉢熔岩類）。

(b) 高アルミナ岩類

SiO_2 - Al_2O_3 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 関係が久野（1960）の高アルミナ玄武岩に属するものおよび石基にビジョン輝石の存在する安山岩類である。但し上述の御鉢熔岩* のようにかんらん石と斜方輝石の Mg-Fe の分配関係から（後述）この類に入れたものもある。以上の分類をもとに各種の特徴をこれから述べる。

ii) 化学組成

新に熔岩 15 個、輝石 3 個、磁鉄鉍 2 個、を分析した。結果は第 1~4 表に示すとおりである。こゝで地調の分析値の表示は割愛する。

分析法と試料

SiO_2 、 $\text{T. R}_2\text{O}_3$ 、 CaO 、 MgO' : 重量法。 Na_2O 、 K_2O : 炎光法。 $\text{T. Fe}_2\text{O}_3$ 、 P_2O_5 、

* 日本地質学会関西・西日本支部松山例会（1964）で講演

Table 1. Chemical compositions of Kirishima high aluminous rocks

	1 N1	2 P8*	3 P8**	4 P811	5 P81	6 P80	7 P89	8 P3
SiO ₂	57.43	53.16	50.03	52.40	52.82	53.81	53.72	55.58
TiO ₂	0.90	0.77	0.62	0.60	0.69	0.64	0.61	0.64
Al ₂ O ₃	17.76	15.70	12.56	19.36	19.22	19.08	18.98	18.86
Fe ₂ O ₃	2.61	5.84	4.67	4.56	4.96	4.06	4.85	1.90
FeO	5.58	5.62	10.14	4.39	4.14	4.39	3.96	5.50
MnO	0.15	0.20	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.13
MgO	3.17	6.16	11.78	4.81	4.77	4.65	4.27	3.72
CaO	7.92	7.71	6.17	9.42	9.29	9.06	8.33	8.26
Na ₂ O	3.06	2.98	2.39	3.01	3.04	3.01	3.12	3.05
K ₂ O	1.29	1.04	0.83	0.81	0.88	1.07	1.20	1.45
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.08	0.08	0.26	0.06	0.16	0.13
H ₂ O+	0.40	0.49	0.39	0.39	0.43	0.19	0.68	0.41
H ₂ O-	0.12	0.23	0.18	0.18	0.11	0.15	0.39	0.28
Total	100.49	100.00	100.00	100.17	100.77	100.32	100.43	99.91
or	12.0	10.6		7.4	8.3	19.2	10.6	13.1
ab	40.4	43.1		37.5	37.6	37.6	38.8	38.4
an	47.6	45.7		55.1	54.1	53.2	50.6	48.5
wo	17.4	18.8		19.3	16.1	19.3	12.8	15.3
en	43.8	62.5		62.2	68.7	60.2	69.8	46.8
fs	38.8	18.7		18.5	15.2	20.5	17.4	37.9
A. I.	30.92	29.5	25.1	36.9	36.3	35.5	35.4	33.9
F:M	51.2	49.5	48.8	49.6	50.1	47.9	47.8	46.7
	20.6	28.2	40.2	28.1	27.5	27.7	27.4	24.1
Q	11.52	6.78		5.16	6.54	6.54	7.65	6.96
mt	3.71	8.35		6.73	7.19	6.03	7.19	2.78
il	1.67	1.52		1.22	1.37	1.22	1.22	1.22
ap	0.34	0.34		0.34	1.34	0.34	1.01	0.34
O. I.	2.14	0.96	2.17	0.96	0.81	1.08	0.08	2.89
T. FeO	7.90	10.82	14.29	8.49	8.73	8.04	8.32	7.21

N1 : Ohata Lavas, Au, Hy, And., (蒲牟田川上流海拔 350m).

P3 : Takachiho basal Lavas, Pig. Au, Hy, And., (高千穂峯西山腹).

P81, P811 : Ohachi Lavas, O1, basalt, (御鉢火口内下部).

P80, P89 : Ohachi Lavas, O1, Au, Hy, And., (御鉢火口内中部 P81 の上部).

P83, P82 : Ohachi Lavas, Au, Hy, And., (御鉢火口内上部 (P83) 火口底 (85)).

A. I. : Alumina Index; O. I. : Oxidation Index.

Symbols representing Lava name, type and locality are same as Geological map constructed by Sawamura et al. (1958).

Analyst: I. Shinno.

TiO₂, MnO : 比色法。FeO, CaO : KMnO₄ 滴定法。MgO は MgO' から MnO (比色法) を差引いて求めた。TR₂O₃ は Na₂O 熔融し溶液中の微量 SiO₂ を比色法で求め、SiO₂' に加えた。Al₂O₃ は T. R₂O₃ から T. Fe₂O₃, P₂O₅, TiO₂ を差引いたもの。熔岩の試料はすべて斑晶を含む。

単斜輝石の試料は何れも同一御鉢玄武岩のもので、顕微鏡的にかんらん石がボーリングャイトに変質している部分 (P81) と変質していない部分 (P811) から採った。

磁鉄鉱の分離には化学処理をさせて、200 メッシュ以下のものをハリモンド型磁選器

Table 2. Chemical compositions of Kirishima calc-alkaline rocks

	1 P83	2 O31	3 M 3	4 P82	5 L21	6 M12	7 O23	8 N 3	9 P85
SiO ₂	60.59	53.98	55.51	59.75	59.42	57.03	57.26	59.22	59.73
TiO ₂	0.71	0.77	0.68	0.55	0.67	0.94	0.73	0.74	0.56
Al ₂ O ₃	15.13	17.82	17.74	17.19	14.75	17.34	17.65	16.80	15.63
Fe ₂ O ₃	3.46	2.93	2.33	2.61	2.50	2.87	2.56	2.56	4.56
FeO	2.99	5.19	5.18	4.07	3.98	4.63	4.15	4.30	3.50
MnO	0.12	0.15	0.13	0.13	0.10	0.13	0.11	0.11	0.13
MgO	3.31	5.22	4.49	3.65	3.71	3.81	3.74	4.12	3.47
CaO	5.82	9.27	8.46	6.37	7.07	7.30	7.01	7.20	6.87
Na ₂ O	3.04	2.88	3.10	2.96	3.53	3.13	3.11	3.13	3.38
K ₂ O	1.93	1.63	1.69	1.79	2.08	2.04	2.13	2.16	1.80
P ₂ O ₅	0.11	0.17	0.14	0.16	0.13	0.23	0.15	0.32	0.09
H ₂ O+	1.74	0.29	0.44	0.90	0.60	0.99	0.51	0.68	0.19
H ₂ O-	0.55	0.26	0.51	0.19	0.23	0.22	0.11	0.20	0.10
Total	99.50	100.56	100.40	100.30	98.79	100.66	99.22	101.54	100.01
or	19.0	14.5	15.2	16.5	20.3	17.9	18.3	19.9	17.2
ab	43.0	37.9	39.9	39.3	48.7	40.1	39.2	40.6	47.0
an	38.0	47.6	44.9	44.2	31.0	42.0	42.5	39.6	35.8
wo	19.8	45.0	21.5	2.5	33.1	18.6	14.4	19.3	31.4
en	67.4	9.8	49.1	65.3	46.5	54.3	57.9	55.2	57.3
fs	12.8	45.2	29.4	32.2	20.4	27.1	27.7	25.5	11.3
A. I.	24.8	33.0	32.0	28.6	24.8	30.4	30.8	28.4	26.2
F:M	43.0	44.5	43.9	43.9	39.9	44.4	41.7	41.1	46.8
	22.0	29.8	27.1	29.8	23.9	23.6	24.3	25.8	21.4
Q	19.56	3.98	6.06	15.72	12.24	10.08	10.2	11.7	15.18
mt	5.10	4.18	3.25	3.71	2.75	4.18	3.71	3.71	6.73
il	1.37	1.52	1.37	1.22	1.52	1.67	1.37	1.37	1.22
ap	0.34	0.34	0.34	1.01	0.34	0.34	0.34	0.68	0.34
O. I.	0.86	1.46	2.22	1.56	1.59	1.61	1.62	1.68	0.77
T. FeO	6.07	7.80	7.26	6.39	6.20	7.18	6.42	6.57	7.55

P85 : Ohachi lavas, Au. Hy. And., (火口附近 パン及状熔岩急冷部).

O31 : Shiratoriyama lavas, Ol. Hy. Au. And., (白鳥山頂上).

M 3 : Onamike lavas, Ol. Au. Hy. And., (大浪池北東岸).

L21 : Shiratori basal lavas, Au. Hy. And., (韓国岳北北東環野).

M12 : Rothukannonike lavas, Au. Hy. And., (六観音池北岸).

N 3 : Ohatayama basal lavas, Au. Hy. And., (大幡山西南).

O23 : Iimoriyama lavas, Au. Hy. And., (飯盛山北東, 長江川河岸).

Other symbols are same as Table 1.

Analyst: I. Shinno.

で荒分けし, 水中磁撰した。少量の輝石と石基の混入が避けられなかった。反射顕微鏡下にイルメナイトや赤鉄鉱は認められない。

iii) 造岩鉱物の化学組成の推定 (第5表)

霧島火山熔岩は 40 数枚の多くがある。その代表的なものについてかんらん石, 単斜輝石, 斜方輝石, 若干の斜長石を調べ, 化学組成の推定は主にX線によった。[かんらん石 : Yoder et. al. (1957), 単斜輝石 : Brown (1960), 斜方輝石 : Kuno (1954)]。斜方輝石については 2V 法を併用。

Table 3. Chemical composition of pyroxenes

	1 P81*	2 P811*	3 L1***
SiO ₂	49.25	50.66	50.61
Al ₂ O ₃	4.04	4.09	1.94
Fe ₂ O ₃	1.64	2.80	2.99
FeO	7.44	6.13	16.22
MgO	16.40	16.45	22.23
CaO	19.80	18.41	2.72
Na ₂ O	0.59	0.66	0.67
K ₂ O	0.00	0.00	0.00
TiO ₂	0.67	0.52	0.36
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00
MnO	0.24	0.30	0.69
Total	100.07	100.02	98.34
Si	1.832	1.866	1.903
Al ^{IV}	0.168	0.134	0.087
Al ^{VI}	0.007	0.042	0.000
Ti	0.019	0.014	0.010
Fe ⁺⁺⁺	0.046	0.080	0.085
Fe ⁺⁺	0.230	0.187	0.508
Mn	0.007	0.008	0.018
Mg	0.691	0.669	1.254
Mg	0.224	0.240	0.000
Ca	0.750	0.727	0.109
Na	0.039	0.045	0.048
2-Si	0.168	0.134	0.097
Ion Volume	298.01	296.90	
Cell Volume	436.7	437.3	
Packing Index	6.82	6.79	
Ca : Mg : Fe+Mn	39.7:46.0:14.3	38.5:46.9:14.6	5.5:63.5:31.0
a sin β	9.346	9.348	18.33 (a)
b	8.907	8.913	8.881
c sin β	5.036	5.036	5.199(c)

* Refer to Table 2.

** Shiratori Lavas, Ol, Au, Hy, And, Same as Sawamura (1958).

IV) 顕微鏡的性質

(a) カルク・アルカリ岩

一般にカルク・アルカリ岩には磁鉄鉱, MgO に富むかんらん石の斑晶が多い。モードの2例を第6表に示す。031 にはクリストバライトの大晶が MgO に富むかんらん石と共存する (Fig. 1~2)。かんらん石には径 5mm に達する大きなものがあり累帯構造は少い M21 のかんらん石は一部炭酸塩に変質し、磁鉄鉱と斜方輝石からなる反応縁をもつものがある (Fig5~8)。L20 には、磁鉄鉱の斑晶が少く単斜輝石がなくて、自形又は斜方輝石と密接に伴う褐色角閃石が存在する。(Fig2~7)。斜方輝石は一般にミルメカイト様の磁鉄鉱を包有している (Fig1~3)。このような斜方輝石はミルメカイト様磁鉄鉱

Table 4. Chemical composition of titanomagnetites

	1 L 1	2 L 21	3 O 3
FeO	34.66	36.64	33.05
Fe ₂ O ₃	40.19	39.02	32.33
TiO ₂	10.45	9.99	9.31
SiO ₂	6.65	—	—
CaO	1.15	—	—
MgO	3.42	—	—
MnO	0.30	—	—
Al ₂ O ₃	3.11	—	—
Total	99.93	85.65	74.69
Fe ⁺⁺	43.2	45.4	46.9
Fe ⁺⁺⁺	45.1	43.5	41.3
Ti (mol %)	11.7	11.1	11.8
a (=Å)	8.418	8.412	8.415

a = Lattice constant

Country rocks refer to Table 2.

をもたない共存する斜方輝石に比べて 2V が 4~13° 大きい (第5表参照)。SiO₂60% 近いものには逆果帯構造の輝石が見出される。又石基の輝石が斑晶輝石より MgO に富むものもある。磁鉄鉱の周囲に黒雲母が生成しているものがある (Fig1及び Fig2)。

(b) 高アルミナ岩

N51 のかんらん石はまれに磁鉄鉱の粒子を周囲にもっているが、輝石の反応縁はない。石基輝石は単斜輝石である P81, P811, P80, P89, のかんらん石には磁鉄鉱と斜方輝石からなる反応縁が発達し (Fig2~5), 石基輝石は斜方輝石である。P81 のかんらん石は一部ボーリンジャイトに変化している。かんらん石が単斜輝石にボイキリティックに含まれることもあるがこのかんらん石は磁鉄鉱からなる反応縁をもたない (Fig 2-6)。P3の斜方輝石はビジョン輝石からなる反応縁をもっているが、石基輝石も同じくビジョン輝石である。第7表に両岩類に分けた場合に考えられる鉱物の晶出順序を示す。

3. 岩石成因的考察

1) かんらん石、斜方輝石の反応関係について

記載した同一熔岩中に共存するかんらん石、斜方輝石の組成を MgO-FeO-SiO₂ 系に点示すると Mg-Fe の分配関係が著しく異なる2つの型のあることが分る (Fig 3)。

P81, P80, P89 (N5) (高アルミナ岩類) 等がかんらん石が比較的 FeO に富むものまで晶出してこれに対し MgO に富む斜方輝石が共存している型と, L1, 3, M5, M2 (カルクアルカリ岩類) 等かんらん石が MgO に富むものしかなくて, それに対し FeO により富む斜方輝石が共存している型の2つである。

前述のように M2のかんらん石は Fo₇₄ で磁鉄鉱と斜方輝石の反応縁をもち, 一方 P81 等のかんらん石は Fo₅₉ で同ような反応縁をもっていることから推定されるように岩種

Table 5. Estimated composition of rock-forming minerals

Rock type***	Olivine	Cl. pyroxene	Orth. pyroxene	Plagioclase	Others
Hy. Ol. Au. And. O3	Fe ₈₃ Fa ₁₇ d ₁₃₀ =2.7770	Wo ₄₃ En ₄₈ Fs ₉ a=9.357 b=8.916 2V _z =52	En ₆₈ Fs ₃₂ 2V _x =52		Mt. a=8.415
Ol. Au. Hy. And. L1	Fe ₈₃ Fa ₁₇ d ₁₃₀ =2.7773	Wo ₄₂ En ₄₃ Fs ₁₅ a=9.367 b=8.929 2V _z =50	En ₆₇ Fs ₃₃ a=18.33 b=8.881 2V _x =61		Mt. a=8.418
Ol. Au. Hy. And. M5	Fe ₈₁ Fa ₁₉ d ₁₃₀ =2.7782	Wo ₄₁ En ₄₅ Fs ₁₄ a=9.363 b=8.925 2V _z =53	En ₆₈ Fs ₃₂ a=18.30 b=8.893 2V _x =62, 66**		
Ol. Au. Hy. And. M21	Fe ₇₄ Fa ₂₆ d ₁₃₀ =2.7834	Wo ₃₇ En ₄₆ Fs ₁₇ a=9.340 b=8.928 2V _z =50	En ₆₆ Fs ₃₄ a=18.34 b=8.875 2V _x =61, 68 **		
Hor. Hy. And. L20	non	non	En ₅₀ Fs ₅₀ 2V _x =53, 60*		Hornblende 2V _x =81 Mt. rare a=8.412
Ol. basalt N ₆	Fe ₆₅ Fa ₃₅ d ₁₃₀ =2.7883	?	?		spinel
Ol. basalt P81	Fe ₅₉ Fa ₄₁ d ₁₃₀ =2.793 alter to bow- lingite	Wo ₃₉ En ₅₄ Fs ₁₇ a=9.346 b=8.907	En ₇₁ Fs ₂₉ a=18.327 b=8.868 Ol. rim	An ₇₅ Ab ₂₅ Δ=2.25	Mt. a=8.398 spinel
Ol. Au. Hy. And. P80	same above	Wo ₄₂ En ₄₈ Fs ₁₀ a=9.355 b=8.916	En ₇₄ Fs ₂₆ a=18.29 b=8.866 2V _x =69	An ₆₈ Ab ₃₂ Δ=2.23	Mt. a=8.384 Gypsum
Au. Py. Hy. and P89	non	Wo ₄₂ En ₅₁ Fs ₁₇ β=1.691- 1.683 Wo ₁₂ En ₅₈ Fs ₃₀ =1.689	En ₇₁ Fs ₂₉ a=1.687 2V _x =65		
Au. Ai. Hy And. P3	non	Wo ₄₂ En ₄₁ Fs ₁₇ β=1.691~ 1.693 Wo ₁₂ En ₅₈ Fs ₃₀ β=1.689	En ₇₁ Fs ₂₉ a=1.687 2V _x =65		

* contain myrmekite like magnetites.

** form olivine reaction rims

*** Hy: Hypersthene, Ol.: Olivine, Au.: Augite, Hor.: Hornblende,
 Pi.: Pigeonite, And.: andesite
 Lava symbols (O3, L1 etc) and localities are same as the Table 1. 2
 Δ=2θ(131)-2θ (131)

によって酸素分圧の効果が違うことを示していると考え。霧島だけの資料ではこれ以上の議論は出来ないが、かんらん石斜方輝石の酸化反応の熱力学的な取扱い、酸素分圧のかからなかった Bowen & Schairer (1935) の実験、酸素分圧をコントロールした Muir & Osborn (1956) の実験資料から Fe-Mg の分配律を検討した結果* を簡単に述べる。天然で酸素分圧の高かった状態の元素の分配は Osborn らの資料に、低かった状態での分配は Bowen らの資料のうち 1 つの melt と共存している状態に対応すると考えられる。第 4 図に示すように酸素分圧が高いと分配律は低下し鉄に富むかんらん石は晶出しにくい。5 図で右下に式の変形を示すように (ΔH , ΔS が温度に対し定数と仮定) $R \cdot \ln K(t)$ (分配律の自然対数とガス定数の積)** が勾配 ΔH 、切片 ΔS の直線で表わされる関係にあるから、かんらん石と斜方輝石の Mg-Fe の分配反応における ΔS を推定することができる。酸素分圧が高くなると反応系の ΔS が小さくなることが知れる。またかんらん石、斜方輝石の晶出温度も低下する。さらに酸素分圧がマグマ中に高くなった時かんらん石の方が斜方輝石より早く酸化を受けるであろう。こういった熱力学的な方法からの推定は天然の事実の解釈に有効であるがさらに検討を要する段階にある。

ii) 斜方輝石の酸素分圧効果

かんらん石、斜方輝石の反応関係に酸素分圧が大きく影響を与えることは上述のことから明らかである。霧島の高アルミナ岩、箱根のビジョン輝石岩、カルク・アルカリ岩のそれぞれに含まれる斜方輝石 (第 8 表) の En 百分率と FeO 重量百分率の関係図は第 6 図のとおりである。理論的には $\text{FeOwt}\% = \frac{7200 - 72 \cdot \text{Enmol}\%}{13200 - 32 \cdot \text{Enmol}\%}$ 曲線の上に FeOwt% (分析値) は点示されるはずであるが、天然のものは FeO の酸化や MnO の置換のために曲線下にくることが分る。カルク・アルカリ岩の斜方輝石は高アルミナ岩やビジョン輝石岩系のものより FeOwt% が約 1% も少い。これは FeO が Fe_2O_3 に酸化されているためである。酸素分圧の影響による晶出温度や分配律の低下は熱力学的にはその反応系のエントロピー変化の減少を意味しており、斜方輝石自体では FeO がより多く Fe_2O_3 になることに対応する。屈折率についてはガラス中では Fe^{+2} と Fe^{+3} の比屈折率は後者が高く、一般に結晶内でも Fe^{+3} の増加は屈折率を高めると考えられていた。ところが種子田 (1947, 1948) は斜方輝石において Fe^{+3} の屈折率低下現象を見出している。四配位の Al は γ (屈折率) を高めるが Fe^{+3} の増加で低くなる傾向を示すのである (第 6 図上部)。これは斜方輝石中では Fe^{+3} が本来の性質を打ち消されるような結晶格子中に入っているからであろう。一方斜方輝石中にはミルメカイト様磁鉄鉱が多くみられ、 Fe^{+3} の増分は Si^{+4} を置換してスピネル構造になる可能性を示す (ミルメカイト様磁鉄鉱を離溶と考える)。このように考えると晶出温度・分配律・ ΔS ・屈折率等の低下が離溶現象と結びつく。これらを斜方輝石の“酸素分圧効果”ということにする。

Bowen & Schairer (1935), Osborn & Muir (1956), Kuno et al (1952) の実験及び仮説を上記の考察と合せて、マグマ中における MgSiO_3 - FeSiO_3 断面における仮想平衡図を第 7 図のように示した。酸素分圧の高い条件下では“Solvus dome”のため

* 三鉱学会連合秋季講演会 (1965) で報告。別稿予定。

** Ramberg (1951) の $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{FeSiO}_3 \rightarrow 2\text{MgSiO}_3 + \text{Fe}_2\text{SiO}_4$ に基いて分配律を導いた。

Explanation of Fig. 1

- 1 Open nicol, coexisting MgO rich olivine and porphyritic cristobalite, O3.
- 2 Close nicol, same above.
- 3 Orthopyroxene with myrmekitic magnetite. Open nicol, L1.
- 4 Phenocrystic magnetite with biotite. Open nicol, M2.

- 5 Phenocrystic olivine with magnetite and orthopyroxene reaction rim. Open nicol, P81.
- 6 Clinopyroxene enclose olivine. Open nicol, P81.
- 7 Orthopyroxene with brown hornblende. Open nicol, L20.
- 8 Olivine reacting oxygen form to magnetite and pyroxene. Open nicol, M21.

Table 6 Mode analyses of representative rocks

	Groundmass	Phenocryst				
		Ol.	Clino-Px	Ortho-Px	Mt.	Pl.
O31	70*	4	7	2	2	15
P81	73	4.5 **	0.5	—	—	22

* contain porphyritic cristobalites

** contain Mt. -reaction rim, substantial 3%

Table 7 Order of crystallization of essential mafic minerals

(1) Calc alkaline rocks

Mg rich Olivine..... Fo74 Oxidation

?.....Mg-Fe Ortho-Px.....En 50 Oxidation

Hornblende.....?

CaO rich Augite.....

?.....TiO₂ rich Magnetite.....?.....Biotite....

(2) High aluminous rocks

?.....Mg-Fe Olivine.....Fo59 Oxidation

?.....Mg-Fe Ortho-Px.....En71 Pigeonite....

CaO rich Augite.....

?.....MgO rich Magnetite.....?

Fig. 3 Olivine and pyroxene reaction relation

にビジョン輝石が存在しない。縦軸の温度や A、B 点などは条件によって変移する。カルク・アルカリ岩中 L20 では大きな斑晶で En50Fs50 であるにもかかわらずビジョン輝石ではない。P81、P80、P89 の石基紫ろ輝石はまだビジョン輝石ではない。同一岩石でも斑晶相と石基相では結晶条件が当然異なることも考えられる。M5、L20、M21 など同一熔岩内でミルメカイト様磁鉄鉱のある斜方輝石はそうでないものより En に富んでいて、しかも後者の組成如何にかかわらずほとんど同一成分(第5表参照)を示すことは興味深い。SiO₂60% 位のカルク・アルカリ岩では石基の輝石が斑晶輝石よりも En に富

Fig. 4 Distribution constant at various temperatures

Fig. 5 Distribution constant changes at various temperatures

み、又逆累帯構造を示すこともこの仮想平衡図がよく説明する。霧島のカルク・アルカリ岩類に限らず一般に角閃石を晶出するような火山岩類において、斜方輝石が逆累帯構造を示し斑晶と石基結晶の間にも同じ傾向の差異があることは、先に種子田の明らかにしたところであってこのような特性が“鉄鉍”や An 分の晶出促進と関係があり、それはこの種の岩石に期待される揮発成分の濃集によってもたらされるものであろうと指摘している

Table 8 FeO content and refractive index of orthopyroxenes

	En	FeO (wt%)	γ	
1	74.9	15.73	1.698	Bronzite and. (1947, Kuno)
2	74	15.59		P80
3	73	15.50	1.699	P89
4	69.3	17.18	1.703	Hy. Ol. and. (1952, Kuno)
5	68.9	18.05	17.07	Au. Hy. and (1952, Ota)
6	61.9	22.65	17.15	Au. Pi. Hy. and. (1950, Kuno)
7	54.7	25.91	1.721	Au. bearing Hy. dacite (Kuno, 1954)
a	85.2	6.46	1.683	Bronzite and. (1963, Ishibasi)
b	68	16.50	1.704	M5
c	67.0	16.22	1.704	L1
d	65.8	18.92	1.710	"Sirasu" (1963, Miyazi)
e	50.6	26.87	1.726	Pumice (1949, Taneda)

Fig. 6 Oxidation effect of orthopyroxenes

(種子田 1940, Taneda 1941, 47, 49, 50 etc.)。

iii) 単斜輝石の "Packing index" と "Tie line relation"

御鉢産玄武岩 (P81, P811) は約 0.4% 単斜輝石を含んでいる。これはかんらん石をボイキリティックに含んでおり、斜方輝石の "Exsolution lamellae" 様の物質をもち捕獲結晶 (超塩基性岩の熔け残り) であるような印象を与えるが化学組成は Le Bas (1962), Kushiro (1960) の図のアルカリ岩とソレライトの境界附近にあり、Ti, Al, も特徴的ではない。

山口 (1964) の "2-Si~Packing index" 図でも玄武岩斑晶輝石と同一位置にくるので一応普通の斑晶として取扱う。

共存する輝石間の "Tie line relation" (Hess 1941) は第8図に示すとおり、高ア

Fig. 7 Schematic diagram of MgSiO_3 - FeSiO_3 join in magma

ルミナ岩では分化に伴って Tie Line と En-Wo 線との交点が Wo 頂点に近づいているが、カルク・アルカリ岩では分化につれてある時期までは交点が Wo 頂点に近づくがその後逆もどりして、Di 点に近づくこれは酸素分圧による。Di-Hd~En-Fs 間の“Solvus dome”の拡大と単斜輝石の晶出制限 (diopsidic なもののみ産出している) によると考えられ 7 図に示す仮説と関連してその究明は今後の問題である。

iv) 岩石化学的考察

すでに AMF 図で霧島型の熔岩には箱根で確立された両岩系の境界線は適用されないことが指摘されているが私の高アルミナ岩類とカルク・アルカリ岩類との間には略境界線が引ける (第 9 図)。

Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 の変化図 (10 図) においてカルク・アルカリ岩は MgO に富むかんらん石斑晶の集積の影響がよく表れている。 CaO は岩種に関係なく SiO_2 に対して直線的に変化している。 TiO_2 は分別作用と共に減るのが普通であるが一様でない。これは 4 表に示すようなチタン磁鉄鉱の斑晶の影響である。一般に火山岩中の磁鉄鉱の格子定数が大きくなるのは主に TiO_2 によることから考えてカルク・アルカリ岩中の磁鉄鉱はほとんどチタンを含むものだろう (第 5 表)。

これに対し高アルミナ岩のかんらん石の反応縁をつくる磁鉄鉱の格子定数は小さく MgO が多く入っていることがうかがえる。P89 のものはマグヘマイトである*。

Al_2O_3 の挙動は Murata (1960) の 11 図でよくわかる。 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = \text{A. I.}$ (Alumina index) が他のいかなる岩系よりも著しく高く、 MgO は高アルミナ岩に低く、カルク・アルカリ岩に高い。このちがいが斜長石斑晶の量に関係することは P81 の玄武岩を例に取って説明できる。P81 の斑晶斜長石 ($\text{An}_{75}\text{Ab}_{25}$) 22% を、Bulk (P81) から差引くと P8* になる。P81 は Alkalies- Al_2O_3 - SiO_2 図 (Kuno 1960) の高アルミナ玄武岩域にあるが P8* はソレライト岩系域に入る。Yoder & Tilley (1962) も述べて

* 化学分析を試みたが SiO_2 との小さな結晶の集合体であるので正確なデータは得られなかった

Fig. 8 Tie line relation of pyroxenes

Fig. 9 AMF. diagram of bulk analyses

Fig. 10 Variation diagram

いるように“高アルミナ玄武岩マグマ”の存在を考えなくてよいように思われる。Yoder (1954) の実験によると加水圧下では透輝石と灰長石の間の共融点が大きく灰長石側による。このことは酸素分圧が高いと基性のある本源マグマからかんらん石、透輝石の晶出に遅れて灰長石が晶出することを示す。P81, N5 のかんらん石、普通輝石の成分からみても霧島の玄武岩は相当に分別作用が進行している。早期晶出の MgO に富むかんらん石、透輝石は地下ではんれい岩や、かんらん岩を形成しているのであろう。そうして斜長石の晶出時期に達したものが噴出したので 22% の斜長石を含むのであろう。

これを Osborn (1959) の $\text{MgO}-\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}-\text{SiO}_2$ 系の知識と連合させると酸素分圧が高い状態でのマグマの結晶作用は、かんらん石領域の Fe に富む部分からマグネシオフェライトが晶出するため MgO に富むかんらん石領域でのみ主に行なわれと考えられる。このことは序論でも述べたように SiO_2 と MgO に富むかんらん石の共存領域が広がる可能性を示すと共に Anderson (1915) の SiO_2 -forsterite-anorthite 系などと考え合すと灰長石系列との上述のような関連性が説明できるのである。O31 はクリストバライトやかんらん石 (Fo_{83}) 4%, チタン磁鉄鉱 2% をもっているのはこのよい例である。

酸素分圧に鋭敏な $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ - SiO_2 関係図 (12 図) を Osborn の実験結果と比較すると高アルミナ岩は酸素分圧の低い関係に、カルク・アルカリ岩は酸素分圧の高い場合

Fig. 11 Plot correlating MgO, Al_2O_3 enrichment in Kirishima lavas (symbols same as Fig. 10) with in the other representative rock series

Fig. 12 Oxidation effects of ferric-ferrous ratio in Kirishima lavas

に近いとみなすことができる。これは (i) に述べたこと、よく調和する。

4. 要 約

霧島火山の熔岩記載から岩石成因考察を種々の実験知識や熱力学的知識と結びつけて行なった。かんらん石及斜方輝石の Mg-Fe の分配律については Bowen & Shairer (1935), Muan & Osborn (1956~59) の実験資料を基にして、酸素分圧が晶出温度低

下, 分配律低下, $4S$ 低下を引き起す重要な役割りのあることを論じた。斜方輝石においては主成分である FeO がより多く Fe_2O_3 に酸化され屈折率低下を起し(斜方輝石の酸素分圧効果) Fe^{+3} の増分は 4 配位の Si^{++++} を置換して磁鉄鉱を生じるという現象で現れていることを述べた。又酸素分圧が高い状態でのマグマ中における $MgSiO_3$ - $FeSiO_3$ 断面の仮想平衡図を推定した(第 7 図)。これは逆累帯構造, 石基輝石の MgO 増加 (Taneda 1943, 1947 etc) など天然の事実をよく説明するであろう。

霧島火山の熔岩は酸素分圧が比較的高いカルク・アルカリ岩と, 比較的低い高アルミナ岩に大別され前者は上述のようなかんらん石・斜方輝石の特徴をもっていると考え。高アルミナ岩については, 斜長石斑晶の影響で Al_2O_3 に富んでいて霧島の場合高アルミナ玄武岩マグマを考えなくてもよいと考える。

引 用 文 献

- Bowen, N.L. and Schairer, J.F. (1935), The system, MgO - FeO - SiO_2 . *Am. Jour. Sci.*, **29**, 151-217.
- Brown, G.M. (1960), The effect of ion substitution on the unit cell dimensions of the common clinopyroxenes. *Am. Min.*, **45**, 15-38.
- Fudali, R.F. (1965), Oxygen fugacities of basaltic and andesitic magmas. *Geochim. Cosmo. Acta.*, **29**, 1063-1075.
- 石橋 澄・山内 齊 (1963), 松山市高浜黒岩海岸産古銅輝石安山岩, 愛媛大学紀要, 第 II 部 自然科学, D. 4, 4, 35-42.
- Kennedy, G.C. (1948), Equilibrium between volatiles and iron oxides in igneous rocks. *Am. Jour. Sci.*, **246**, 529-549.
- Kuno, H. (1952), Chemical compositions of hypersthene and pigeonite in equilibrium in magma. *Am. Min.*, **37**, 1000-1006.
- (1954), Study of orthopyroxene from volcanic rocks. *Am. Jour. Sci.*, **39**, 30-45.
- (1960), High alumina basalt. *Jour. Petro.*, **1**, 121-145.
- Kushiro, I. (1960), Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. *Am. Jour. Sci.*, **258**, 548-554.
- Le Bas, M.J. (1962), The role of aluminium in igneous clinopyroxenes with relation to their parentage. *Am. Jour. Sci.*, **260**, 267-288.
- Miyachi, M. (1963), Petrological study of the shirasu in southern Kyushu, Japan. *Rep. Earth Sci. General Educ. Kyushu Univ.*, **10**, 55-60.
- Osborn, E.F. (1959), Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma. *Am. Jour. Sci.*, **257**, 609-647.
- (1962), Reaction series for subalkaline igneous rocks based on different oxygen pressure condition. *Am. Min.*, **47**, 211-226.
- Ramberg, H. and DeVore, G. (1951), The distribution of Fe^{++} and Mg^{++} in coexisting olivines and pyroxenes. *Jour. Geol.*, **59**, 193-209.
- 沢村孝之助, 松井 和典 (1958), 「霧島山」
- Taneda, S. (1943a), Occurrence of Olivine at the peripheral zone of hypersthene phenocryst. *Proc. Imp. Academy*, **19**, 31-36.
- (1943b), Petrographic notes on the volcanic rocks from Haruna, Central Japan. Part IV., *Mem. Fac. Sci., Kyushu Imp. Univ.*, ser. D,

- 2, 15-96.
- 種子田定勝 (1964a), 角閃安山岩の石基の輝石, 地質, 52, 56-60.
- (1946b) 榛名火山産紫蘇輝石, 地質, 61-64.
- Taneda, S. (1947a), Petrological studies on the volcanic rocks from Japan with special reference to the "hornblende andesite". Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. D, 3, No. 1, 19-62.
- (1947b), Hypersthene und Hornblende aus dem Haruna Vulkane, Do., 13.
- (1947c), Variations in chemical composition and optic properties in rhombic pyroxenes. Do., 14-16.
- 種子田定勝 (1948), 斜方輝石の化学成分-光学性関係, 地質, 54, 6-12
- (1949), 磁鉄鉱に関する岩石学的考察 (I) 地質, 55, 72-76
- (1950), " (II) 地質, 56, 415-422
- Taneda, S. (1952), Petrographic notes on the volcanic rocks from Sambe, Southwestern Japan. Jap. Jour. Geol. Geog., 22, 1-26.
- Yamaguchi, M. (1964), Petrogenic significance of ultrabasic inclusions in basaltic rocks from southwest Japan. Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. D, 15, No. 1, 163-216.
- Yoder, H.S. and Sahama, G. (1957), Olivine X-ray determinative curve. Am. Min., 42, 475-491.
- and Tilley, C.E. (1962), Origin of basalt magmas: An experimental study of natural and synthetic rock system. Jour. Petro., 3, 342-532