栃木県茂木地域に産するピジョン輝石デイサイト

Pigeonite dacite occurring in Motegi district, Tochigi Prefecture

白	水	明 (Akira Shiramizu)*
高	橋	正 樹 (Masaki Takahashi)*
池	田	幸 雄 (Yukio Ikeda)*

Pigeonite dacite lava occurs in the northern part of the Motegi-cho, Tochigi prefecture. The Motegi pigeonite dacite contains phenocryst of ferrohortonolite, ferropigeonite, ferroaugite, plagioclase, ilmenite and magnetite. Some phenocrysts of ferropigeonite include corroded ferrohypersthene. The equilibrium crystallization of three pyroxenes and ferrohortonolite is discussed, and the estimated temperature and oxygen partial pressure of crystallization of these phenocrysts are 950° to 910°C and 10^{-12} to 10^{-13} atm., respectively. The Motegi pigeonite dacite is the strongly iron-enriched product of the latest-stage crystallization of tholeiitic magma.

I. はじめに

ピジョン輝石を斑晶として有する火成岩は比較的まれで、我国では有珠 (大場, 1961), 荷葉 (河野・青木, 1959), 船形 (青木, 1961), 茂庭 (生出, 1959), 千貫森 (八島, 1961), 南会津 (久野, 1964), 足尾 (Kuno, 1969), 箱根 (Kuno, 1936), 猪郷路 (竹下・八木, 1961) など報告されている。我国以外では, Mull (Halimond, 1914) や Weiselberg (Kuno, 1947; Nakamura and Kushiro, 1970) などがよく知られている。しかし, これらは玄武岩質又は安山岩質溶岩か, 小規模なデイサイト質岩脈であり, ピジョン輝石斑晶を含むデイサイト質溶岩は知られていない。

今回, 筆者らは, 栃木県茂木町北方の八幡山及びその周辺にピジョン輝石, オージェイト, カンラン石を斑晶として有するデイサイト質溶岩を発見したので, その岩石記載と主要構成鉱物の化学組成について報告する。ここでは特に, 鉄ハイパーシン, 鉄オージェイト, 鉄ピジョン輝石, フェロホルトノライトの相の平衡晶出関係についての議論を行ない, また, この4相を晶出するに至ったデイサイト質マグマの成因についても若干の考察を加える。

II. 溶岩の分布

烏山から茂木町に至る那珂川流域には, 新第三系が分布している (Kawada, 1953; Omori, 1958)。それは下位の中川層群と上位の荒川層群に分けられ, 前者は下部中新統に対比されている (栃木県地質図市説明書, 1977)。中川層群の最上部の茂木層は, 主として火山性堆積物からなるほぼ水平な地層で, 上部に, 溶岩流や火山角礫岩層が噴出当時の谷地形を埋める様にして分布している。

第1図に示した地域の茂木層には, 少なくとも三枚以上の安山岩質溶岩と小規模な安山岩質岩脈がみられる。これらの安山岩質溶岩及び岩脈は主として輝石安山岩で, Kuno (1950) によるピジョン輝石質岩系と紫蘇輝石質岩系の両岩系から成っている。

ピジョン輝石デイサイト溶岩は, 当地域の八幡山と鎌倉山及びその周辺にみられる。

これらの溶岩は, 一部で流理構造が発達するものの全体としては塊状で, 陸上に噴出した溶岩円頂丘あるいは溶岩平頂丘を形成していたものと推定され, 厚さは八幡山で約 150 m 以上, 鎌倉山で約 100 m 以上で, 下位の堆積岩層を直接おっている。これらの溶岩類はその分布からみて, 単成火山的な活動を行なったものと思われる。

* 茨城大学理学部地球科学教室

第1図 茂木町北部における火山岩類の分布。

III. 分析方法

全岩組成分析は、岩石試料を細粉にして、電気炉でガラス玉を作製し、それを岩石薄片にした後にX線マイクロアナライザー (XMA) を用いて分析するという方法 (福山・柵山, 1976) をとった。XMA の分析条件として、加速電圧は 15 kV, 試料電流は 5n amp, ビームの直径は約 50μ , そして照射時間は 50 秒である。XMA のデータの補正は Bence and Albee (1968) の方法を用いた。

鉱物組成分析は XMA を用いて行ない、同じく Bence and Albee (1968) の方法で補正した。

石基の化学組成は XMA のブロード・ビーム (直径約 60μ) を用いて測定した。石基には多くの相が存在しているため、その補正が必要であり、そのためのブロード・ビーム補正係数を以下のように求めた。

石基は斜長石、カリ長石、石英、ガラス、磁鉄鉱、カンラン石からなっていると考え、その化学組成と密度は、それぞれ、 $An_{30}Ab_{70}$ と 2.65, $Or_{60}Ab_{40}$ と 2.65, SiO_2 と 2.65, $Ab_1Or_1Qz_1$ と 2.3, $Usp_{60}Mt_{40}$ と 5.0, 及び $Fo_{20}Fa_{80}$ と 4.0 であると仮定する。例として、斜長石が 30% (体積%), カリ長石が 10%, 石英が 30%, ガ

ラスが 27.5%, 磁鉄鉱が 0.5%, カンラン石が 2% となる石基の場合を考える。これらの体積% に、上述の化学組成と密度とを考慮すると、その石基の各酸化物の真の重量% が計算により求められる。一方、Ikeda (1980) の方法により、その石基中の各主要元素のX線強度を計算し、この強度を用いて Bence and Albee 法による補正を加え、各酸化物のみかけの重量% を求める。こうして計算で得た各酸化物の真の重量% を、同じく計算で得たみかけの重量% で割ったものが、第1表の CASE-A に示したブロード・ビーム補正係数である。第1表には、石基を構成する、各相の量比を変化させた場合のブロード・ビーム補正係数が与えられており、CASE-B, CASE-C, CASE-D はそれぞれ、斜長石 (体積%): 34, 43, 40; カリ長石: 7, 16, 20; 石英: 30, 38.5, 37.5; ガラス: 26.5, 0, 0; 磁鉄鉱: 0.5, 0.5, 0.5; カンラン石: 2, 2, 2 である。

実際の石基組成の補正には、まず XMA のブロード・ビームを用いて各酸化物のX線強度を測定し、これを Bence and Albee 法で補正計算して求めたみかけの重量% に、第1表のブロード・ビーム補正係数の平均値をかけるという操作を行なった。

第1表 ブロード・ビーム分析の補正係数

	CASE-A	CASE-B	CASE-C	CASE-D	AVERAGE
Na ₂ O	0.984	0.956	0.960	0.974	0.97
MgO	1.58	1.58	1.58	1.58	1.6
Al ₂ O ₃	0.935	0.944	0.951	0.950	0.95
SiO ₂	0.937	0.943	0.935	0.936	0.94
K ₂ O	0.880	0.833	0.899	0.897	0.88
CaO	0.955	0.978	0.947	0.943	0.96
TiO ₂	1.54	1.54	1.54	1.54	1.5
MnO	—	—	—	—	(1.5)
FeO*	1.46	1.46	1.46	1.46	1.5

* Total Fe as FeO.

IV. 岩石記載

当地域のビジョン輝石デイサイトは暗灰色のち密な岩石(第2図a, b)で, 多くの場合変質が著しい。斑晶は全体の約3~13%を占めていて, 斜長石(約2~10体積%), フェロホルトノライト(約0.3~1.4%), 単斜輝石(約0.1~1.0%), 不透明鉱物(0~1%)からなる。

斜長石斑晶は自形で長径は最大で約3mmに及ぶ。累帯構造はあまり顕著ではない。フェロホルトノライト斑晶はかなり変質を受けており粘土鉱物の集合体になっているが, 一部に新鮮に残っている。外形は自形を示し

a

b

c

d

第2図 茂木デイサイト溶岩中の斑晶及び石基の顕微鏡写真(各バーの長さは1mm)。

a, 鎌倉山南東山腹のデイサイト(斑点状粗粒石基がみられる。また左端中央に残晶カンラン石を含む擬斑晶がある); b, 鎌倉山山頂付近のデイサイト; c, フェロホルトノライト斑晶(中央), 鉄オーチャイト(中央右)及び斜長石(下方左); d, 鉄ビジョン輝石斑晶; e, f(直交ニコル), 鉄オーチャイト斑晶(中央), ホルンブレンド(eの矢印)及び鉄オーチャイト斑晶に包有された鉄ビジョン輝石(fの矢印); g, h(直交ニコル), 鉄オーチャイト斑晶と包有された鉄ビジョン輝石(hの矢印); i, j(直交ニコル): 鉄ビジョン輝石斑晶(中央)と鉄ビジョン輝石に包有された鉄ハイパーシン(jの矢印); k, 斑晶不透明鉱物; l(直交ニコル): フェロホルトノライトの残晶を含む擬斑晶に隣接して産するトリデイマイト(矢印); m: 石基フェロホルトノライト; n: 石基鉄オーチャイト。

e

f

g

h

i

j

第2図 (つづき)

(第2図c), 長径は2mmから0.1mm程度である。単斜輝石斑晶としては鉄オージャイトと鉄ピジョン輝石がみられる。鉄オージャイトは長径約1mm以下の自形結晶で、その中に融食形のピジョン輝石を包有することがある(第2図e, f, g, h)。また、鉄オージャイト斑晶の外

縁部が一部ホルンブレンドに置換されていることがある(第2図e)。鉄ピジョン輝石斑晶は長径約1mm以下の自形結晶で柱状をなすこともある(第2図d)。稀に鉄ピジョン輝石斑晶中に融食形の斜方輝石を包有することがある(第2図i, j)。不透明鉱物の斑晶は磁鉄鉱とイルメ

第2図 (つづき)

ナイトで、長径 0.3 mm 以下の自形ないしは半自形結晶である(第2図 k)。磁鉄鉱中には粒状又はラメラ状の離溶イルメナイトを含むことが多い。

茂木ピジョン輝石デイサイトの石基は多くの場合、微細な細粒石基と斑点状粗粒石基とよりなり、後者は第2図 g に示すように直径 0.5 mm 程度の球状に近い完晶質物質で周囲の細粒石基と比較すると相対的に粗粒である。その構成鉱物は、斜長石、フェロホルツノライト(第2図 m)、単斜輝石(第2図 n)、石英、カリ長石、アパタイト及び不透明鉱物である。細粒石基の構成鉱物は斑点状粗粒石基と同じであるが、より細粒で構成鉱物の間隙にガラスがみられる。細粒石基と斑点状粗粒石基との量比は様々で、鎌倉山と八幡山の山頂付近のデイサイトは斑点状粗粒石基が少なく(第2図 b)、八幡山中腹付近のデイサイトは斑点状粗粒石基がかなり多い(第2図 a)。

斑晶は斑点状粗粒石基中に産する場合や細粒石基中に産する場合などがあるが、斑点状粗粒石基が部分的にのみ付着している斑晶も多く見られる。鉄オーグナイト斑

晶の周縁部が部分的にホルンブレンドに置き換えられている場合は斑点状粗粒石基に接していることが多い。また斑点状粗粒石基中の特に粗い部分には、トリディマイトの自形結晶がみられる(第2図 l)。

八幡山頂上南側付近のデイサイトは著しい流理構造を示している。肉眼観察では、優白質層と優黒質層とからなり、その厚さは 1~10 mm 程度である。顕微鏡で観察すると、前者には斑晶が多く、その石基も後者のそれよりも粗粒にみえる。しかし、前者の石基にはトリディマイトの結晶が多く含まれており、しかも完晶質ではない点で、上述の斑点状粗粒石基とは異なっている。

V. 構成鉱物の化学組成

先に述べたように、茂木ピジョン輝石デイサイトはかなり変質を受けているが、新鮮な岩石を3ヶ所の露頭で採集することができた。それは八幡山山頂、八幡山南東中腹、及び鎌倉山北側中腹である。構成鉱物の化学組成や全岩組成は上述の3ヶ所の岩石でほとんど同一であっ

たので、主に八幡山南東中腹の岩石について以下に述べる。

1. 斜長石

斜長石斑晶は弱いオッシレイトリイ累帯構造を示しており、中心部の組成は $An_{58-50}Ab_{49-41}Or_1$ で、周縁部では $An_{50-43}Ab_{55-46}Or_{1-2}$ 程度である。

2. フェロホルトノライト

フェロホルトノライト斑晶は一般に粘土鉱物に変質している場合が多いが、擬形斑晶中に残晶としてかなり存在している（第2図 a, c, l）。その化学組成を第2表に示してある。

石基中にも $10\sim 40\mu$ 程度の大きさのフェロホルトノライトがみられ、その組成も第2表に示してある。斑晶フェノホルトノライトの組成は $Fe_{24-21}Fa_{79-76}$ であるが、石基フェロホルトノライトでは $Fe_{15-13}Fa_{87-85}$ である。

フェロホルトノライト斑晶中には、鉄オーチャイト、鉄ピジョン輝石、不透明鉱物、アパタイトなどが包有されていることがある。

3. 鉄オーチャイト

フェロホルトノライト斑晶がかなり変質しているのに比べて、鉄オーチャイト斑晶は、ほとんど変質していない。但し斑点状粗粒石基中に産する鉄オーチャイトは、

第2表 フェロホルトノライトの化学組成

	1	2	3	4	5	6
	KO-1	KO-2	HO-1	HO-2	HGO-1	HGO-2
SiO ₂ (wt.%)	32.41	32.28	31.81	31.40	30.68	30.29
TiO ₂	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO*	58.12	58.00	57.28	58.54	60.64	61.21
MnO	1.58	1.70	1.55	1.65	1.96	2.17
MgO	8.58	8.57	9.70	8.89	5.59	5.44
CaO	0.22	0.25	0.26	0.26	0.14	0.14
Na ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Total	100.91	100.81	100.62	100.80	99.01	99.25
Ca	0.4	0.4	0.5	0.5	0.3	0.3
Mg	20.7	20.8	23.1	21.2	14.1	13.6
Fe	78.9	78.8	76.5	78.3	85.7	86.1

* Total Fe as FeO.

1~2, 鎌倉山斑晶; 3~4, 八幡山斑晶; 5~6, 八幡山石基。

第3表 鉄オーチャイトの化学組成

	1	2	3	4	5	6	7
	HA-2	HA-3	HA-9	HA-15	HGA-1	HGA-2	HGA-8
SiO ₂ (wt.%)	49.67	49.57	50.13	50.68	48.74	48.74	49.08
TiO ₂	0.47	0.25	0.23	0.19	0.41	0.41	0.39
Al ₂ O ₃	1.02	0.79	0.80	1.00	1.29	1.20	2.02
FeO*	21.40	21.64	20.51	21.54	23.51	24.36	24.06
MnO	0.79	0.83	0.75	0.81	1.02	0.94	1.06
MgO	9.11	9.06	8.90	9.01	6.32	6.30	6.83
CaO	16.71	16.80	17.98	17.24	17.34	16.69	16.76
Na ₂ O	0.11	0.21	0.20	0.20	0.36	0.35	0.37
K ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03
Total	99.30	99.15	99.51	100.67	98.99	99.02	100.59
Ca	36.3	36.3	38.8	37.0	39.0	37.5	37.2
Mg	27.5	27.2	26.7	26.9	19.8	19.7	21.1
Fe	36.2	36.5	34.5	36.1	42.1	42.8	41.7

* Total Fe as FeO.

1~4, 八幡山斑晶, このうち1と2は鉄ピジョンナイト (HP-4) を包有する結晶; 5~7, 八幡山石基。

第4表 ホルンブレンドの化学組成

	1	2	3	4
	HB-1	HB-2	HB-3	HB-4
SiO ₂ (wt.%)	45.43	42.95	42.90	45.19
TiO ₂	0.54	0.87	0.96	1.01
Al ₂ O ₃	5.83	7.70	6.44	5.85
FeO*	18.78	22.75	23.49	21.40
MnO	0.36	0.43	0.63	0.59
MgO	11.50	8.72	7.97	9.65
CaO	10.21	9.98	10.27	10.55
Na ₂ O	2.42	2.61	2.40	2.35
K ₂ O	0.96	1.19	1.30	1.22
Total	96.03	97.20	96.36	97.81
Ca	25.2	24.1	24.6	25.4
Mg	28.4	21.0	19.1	23.2
Fe	46.4	54.9	56.3	51.4

* Total Fe as FeO.

1~4, 八幡山の鉄オーグサイト斑晶の縁辺部のホルンブレンド。

その周縁部がわずかにホルンブレンドに置換されている場合がある。鉄オーグサイト斑晶中にはアパタイトや不透明鉱物の他に、融食形の鉄ビジョン輝石が包有されていることがある。八幡山南東中腹の鉄ビジョンナイト斑晶の化学組成及びその縁辺部に存在するホルンブレンドの化学組成を第3表・第4表にそれぞれ示してある。石基中にみられる鉄オーグサイトは長柱又は短柱状であり、その化学組成も第3表に示す、石基鉄オーグサイトは斑晶鉄オーグサイトに比べるとFeO成分に富んでいるがCaO成分はあまり違わない。

4. 鉄ビジョン輝石

鉄ビジョン輝石は、単独の斑晶として産する場合と、他の斑晶中に融食形で包有されている場合とがある。一般的傾向として、単独斑晶は細粒石基中に産することが多い。後者の場合には、フェロホルトノライトや鉄オーグサイトの斑晶中に包有されている。この事実は、マグマ中で

の反応が生じたことを示している。但し、この反心の程度は岩石ごとに多少異なっており、斑点状粗粒石基の少ない八幡山山頂の岩石では単独の鉄ビジョン輝石斑晶が多く、しかも鉄オーグサイト斑晶中に融食形で包有されている場合でもその粒径は大きく(第2図g, h)、反応(1)があまり進行していない状態を示しているものと考えられる。一方、斑点状粗粒石基を多く含む八幡山南東中腹の岩石では、単独の鉄ビジョン輝石斑晶は少なく、また、鉄オーグサイト斑晶中に包有されている場合でも、その中心部にわずかに融食形の残晶として存在して

第5表 鉄ビジョン輝石の化学組成

	1	2	3	4	5
	HP-1	HP-2	HP-4	HP-10	HP-12
SiO ₂ (wt.%)	49.73	49.28	49.36	49.32	50.06
TiO ₂	0.19	0.14	0.20	0.00	0.10
Al ₂ O ₃	0.48	0.39	0.41	0.43	0.47
FeO*	34.54	35.01	34.30	34.57	33.99
MnO	1.37	1.56	1.26	1.20	1.12
MgO	10.22	10.15	10.41	10.64	10.98
CaO	3.99	3.76	4.26	3.25	3.50
Na ₂ O	0.05	0.05	0.04	0.06	0.07
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Total	100.57	100.35	100.25	99.47	100.29
Ca	8.8	8.3	9.4	7.2	7.7
Mg	31.5	31.2	31.8	32.9	33.7
Fe	59.7	60.5	58.8	59.9	58.6

* Total Fe as FeO.

1~5, 八幡山の輝石斑晶。このうち3は鉄オーグサイト(HA-2, 3)中に包有されている結晶で、5は鉄ハイパーシン(HH-1, HH-11)を包有し、かつ、それに最近接している鉄ビジョン輝石。

いるのみで(第2図e, f)、反応(1)がかなり進行した状態であると思われる。しかしながら、鉄ビジョン輝石の化学組成は、岩石の違い又は反応(1)の進行程度の違いにかかわらずかなり均一である。八幡山南東中腹の岩石中の鉄ビジョン輝石の化学組成を第5表に示してある。その平均組成は、ほぼ $\text{Wo}_{9-8}\text{En}_{32}\text{Fs}_{60-59}$ である。

5. 鉄ハイパーシン

鉄ハイパーシンは、鉄ビジョン輝石斑晶中に融食形の残晶としてまれに存在し(第2図i, j)、単独斑晶としては産しない。この産状から、マグマ中では

の反応が生じたものと思われる。八幡山南東中腹の岩石中の鉄ハイパーシンの化学組成を第6表に示してある。この鉄ハイパーシンを包有する鉄ビジョン輝石の組成には巾があり、鉄ハイパーシンに直接に接する鉄ビジョン輝石の組成は最もMgOに富んでいる(第5表)。

6. 不透明鉱物

茂木ビジョン輝石デイサイト中には、イルメナイトの斑晶と磁鉄鉱の斑晶とが見られる。磁鉄鉱斑晶には、離溶したと思われるイルメナイトのラメラ又は細粒を含んでいるものと含んでいないものとがあり、後者をタイプI、前者をタイプIIとする。タイプIの磁鉄鉱(第7表)は、タイプIIの磁鉄鉱よりTiO₂に富んでいる(第3図)。また斑晶イルメナイト(第7表)は、タイプII磁鉄鉱中の離溶イルメナイトと比較すると多少TiO₂に乏しい傾向がある(第3図)。XMAの測定ではFe成分は

第6表 鉄ハイパーシンの化学組成

	1	2
	HH-1	HH-11
SiO ₂ (wt.%)	49.78	48.79
TiO ₂	0.32	0.23
Al ₂ O ₃	0.73	1.14
FeO*	35.05	34.76
MnO	1.15	1.21
MgO	11.98	11.84
CaO	1.70	1.74
Na ₂ O	0.02	0.02
K ₂ O	0.01	0.00
Total	100.74	99.74
Ca	3.7	3.8
Mg	36.5	36.3
Fe	59.8	59.8

* Total Fe as FeO.

1~2, 八幡山鉄ピジョン輝石斑晶中の結晶。

第7表 Fe-Ti 酸化鉱物の化学組成

	1	2	3	4
	Mt-16	Mt-19	Il-17	Il-18
SiO ₂ (wt.%)	0.06	0.01	0.00	0.00
TiO ₂	20.49	20.15	50.00	48.62
Al ₂ O ₃	1.07	1.29	0.15	0.11
FeO*	72.42	71.83	48.71	47.48
MnO	0.90	0.85	1.10	1.32
MgO	0.31	0.23	0.44	0.33
CaO	0.00	0.01	0.02	0.04
Na ₂ O	0.00	0.00	0.04	0.00
K ₂ O	0.00	0.01	0.03	0.00
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.04	0.00
Total	95.27	94.37	100.51	97.91

* Total Fe as FeO.

1~2, タイプ I 磁鉄鉱; 3~4, イルメナイト斑晶。

FeO として得られるので、第3図では、Ti と Fe の原子比とイルメナイト-ヘマタイト結線又はウルボスピネル-磁鉄鉱結線との交点を、それぞれイルメナイト及び磁鉄鉱の化学組成とした。但し、ウルボスピネルと磁鉄鉱の固溶体は理想的組成式よりも TiO₂ 成分を多く固溶しているので、第3図では Buddington and Lindsley (1964) による 1000°C における固溶体組成領域が考慮されている。茂木ピジョン輝石デイサイト中の磁鉄鉱の化学組成は第3図に示された菱形領域中に存在しているものと考えられる。

第3図 Fe-Ti 酸化鉱物の化学組成 (モル比)。黒丸、イルメナイト斑晶; 白丸、タイプ II 磁鉄鉱中の離溶イルメナイト; 黒菱形、タイプ I 磁鉄鉱; 白菱形、タイプ II 磁鉄鉱。

VI. 議 論

1. 斑点状粗粒石基について

茂木ピジョン輝石デイサイトの石基は斑点状構造や流線構造を示している。八幡山南東山腹の岩石の石基は斑点状構造を示しているが、その斑点状粗粒石基と細粒石基の化学組成は第8表に示す様にほとんど同一であり、マグマ中の液体不混和とは考えられない。この両者の主な違いは、石基鉱物の粒度、石基中のガラスの有無、石基トリディマイトの有無、鉄オーチャイト斑晶におけるホルンブレンド反応縁の有無などである。これらの違いは、両者の石基形成時における冷却速度の違いによるものと思われる。即ち、この両者は異なった冷却場で別々に形成されたものであろう。1つの可能性として、次の様な過程が考えられる。まず地下のマグマ溜まりから、フェロホルトノライト、鉄オーチャイト、鉄ピジョン輝石、斜長石、及び不透明鉱物(タイプ I 磁鉄鉱とイルメナイト)の斑晶を含むマグマが貫入して火道を満たし、そこで徐冷して完晶質の、又はわずかに残液を含む半固結状態のデイサイトを形成する。ここでは鉄オーチャイト斑晶と残液とが反応してその縁辺にホルンブレンドが反応縁として晶出し、石基中にはトリディマイトの比較的大きな結晶が形成された。またタイプ I 磁鉄鉱は徐冷によってイルメナイトを離溶し、タイプ II 磁鉄鉱になったであろう。その火道に同じ組成のマグマが新たに貫入してきて、半固結状態のデイサイトを破砕併呑しながら

第4図 鉄ハイパーシン、鉄ピジョン輝石、鉄オーチャイト、フェロホルトノライトの化学組成（モル比）。白丸、斑晶鉄ピジョン輝石と鉄オーチャイト；黒丸、鉄ハイパーシン；黒三角、斑晶フェロホルトノライト；白三角、石基の鉄オーチャイトとフェロホルトノライト；黒四角、白四角、白菱形はそれぞれ Weisberg の斑晶鉄ハイパーシン、斑晶及び石基の鉄ピジョン輝石、鉄オーチャイト (Nakamura and Kushiro, 1970)。

第8表 石基の化学組成（八幡山）

	1	2	3	4	5	6	7
	C-1	C-2	C-3	C-4	F-1	F-2	F-3
SiO ₂ (wt.%)	70.88	70.67	69.96	71.19	68.75	69.72	69.19
TiO ₂	0.35	0.26	0.29	0.32	0.39	0.18	0.39
Al ₂ O ₃	13.11	13.40	13.11	12.92	13.50	13.36	13.37
FeO*	4.95	4.82	5.29	4.93	5.61	4.85	5.90
MnO	0.15	0.12	0.06	0.06	0.09	0.04	0.04
MgO	0.34	0.30	0.40	0.27	0.37	0.29	0.38
CaO	2.29	2.28	2.33	2.13	2.27	2.23	2.25
Na ₂ O	4.21	4.25	4.30	4.16	4.36	4.38	4.35
K ₂ O	1.71	1.80	1.86	1.87	1.86	1.92	1.87
Total	97.99	97.90	97.60	97.85	97.20	96.97	97.94

* Total Fe as FeO.

1～4, 斑点状粗粒石基；1～7, 細粒石基。

地表に流出し、そこで急冷された。この急冷のため、鉄オーチャイト斑晶にはホルンブレンドの反応縁が生成されず、また、石基はガラスに富む細粒石基となった。一方、破碎併呑された半固結状態のデイサイトは斑点状粗粒石基になったり、流出時に引き伸ばされて層状の流理構造を形成したりした。

2. 鉄ハイパーシン、鉄ピジョン輝石、鉄オーチャイト

ト、フェロホルトノライトの平衡晶出関係

茂木ピジョン輝石デイサイトでは、鉄オーチャイトと鉄ピジョン輝石とフェロホルトノライトとが斑晶として晶出しており、これらはほぼ平衡共存していたと思われる（第4図）。しかし、V-4で述べた様に、マグマ溜まりでは(1)式の反応が進行中であった。鉄ピジョン輝石を包有している鉄オーチャイト斑晶は(1)式の反応の最

中に晶出したもので、その斑晶中で互いに隣接する鉄オージャイトと鉄ピジョン輝石は平衡にあったものと考えてよい(第4図)。

Lindsley and Andersen (1983) の2相輝石温度計によると、この鉄オージャイトの晶出温度は940~950°Cで、鉄ピジョン輝石は910~930°Cである。この温度計の誤差は±50°Cであるので、両者の温度は比較よく一致しており、斑晶の晶出温度は910~950°C近傍であると考える。

V-5で述べた様に、鉄ピジョン輝石斑晶中に融食形の鉄ハイパーシンが包有されており、(2)式の反応があったことを示している。第5図は低圧における MgSiO_3 - FeSiO_3 - CaSiO_3 系の800~900°Cの等温平衡模式図で、Huebner (1980)を参照して描いたものである。800~900°Cの温度範囲の高温域では、鉄ピジョン輝石の安定領域はabd内であるが、低温域ではさらに安定領域が小さくなり、ついには1点cのみとなり、更に低温では鉄ピジョン輝石は安定に存在し得ない。点cはLindsley and Grover (1980)によると825±15°Cである。しかし、圧力が高い場合や、Alなどの成分が固溶されている場合には、面abcは高-Ca側に移動し(Lindsley and Andersen, 1983)、鉄ピジョン輝石の安定組成域はさらに小さくなるらしい。その場合には、c点も825±15°Cより高温になるであろう。

第5図の模式図を考慮すると、分化するマグマでは、反応式(2)が先で、その後に反応式(1)が始まることになる。茂木ピジョン輝石デイサイトにおいて反応(2)でできた鉄ピジョン輝石は鉄ハイパーシンに最近接する鉄ピジョン輝石だとすると、その組成(第5図のac)は、

第5図 低圧における MgSiO_3 - FeSiO_3 - CaSiO_3 系の800~900°Cの等温平衡模式図(Huebner, 1980)を参照した)。Aug, 鉄オージャイト; Hyp, 鉄ハイパーシン; Fig, 鉄ピジョン輝石; Ol, フェロホルツノライト。

$\text{Wo}_{7.7}\text{En}_{88.7}\text{Fs}_{68.6}$ (第5表のコラム5)で、茂木ピジョン輝石デイサイトの中で最もMgOに富んだ鉄ピジョン輝石である(第4図)。一方、反応(1)における鉄ピジョン輝石の組成(第5図のdc)は、斑晶ごとに多少変化し、厳密にはその組成を指定することができないが、第4図に示した鉄ピジョン輝石の組成域にあるはずである。しかし、反応(1)と反応(2)で生じた鉄ピジョン輝石の組成の違いは小さい。このことは、反応(1)と反応(2)との間にはほとんど温度差がなく、また鉄ピジョン輝石は第5図のc点近傍で晶出したことを意味している。茂木ピジョン輝石デイサイトでは、このc点を厳密に決定することはできないが、鉄ピジョン輝石の組成域のほぼ中央部であるとする、その値は $\text{Wo}_{8-10}\text{En}_{80-92}\text{Fs}_{69-81}$ で、 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ モル比は0.64~0.66となる。この組成は純粋な MgSiO_3 - FeSiO_3 - CaSiO_3 系相平衡図で予想される825°Cのc点(Lindsley and Andersen, 1983)と比較すると、よりMgOに富んだ組成であり、かつ温度も100°C程高い。この違いは Al_2O_3 などの微量成分の影響か、又は圧力の違いによる影響かであろう。

茂木ピジョン輝石デイサイト中の鉄オージャイトと鉄ハイパーシンと鉄ピジョン輝石(第5表のコラム5の組成)とがある時点で平衡であったとすると、Lindsley and Andersen (1982, Fig. 7)の三相輝石共存におけるピジョン輝石の組成より、晶出温度は880~900°Cとなり、また、Ishii *et al.* (1979)のピジョン輝石温度計では965°Cになる。先に求めた鉄オージャイトと鉄ピジョン輝石の晶出温度(910~950°C)とほぼ同じ温度か、わずかに高い温度になるべきで、前者の温度(880~900°C)が低すぎるのは、 Al_2O_3 などの微量元素が圧力の違いによる影響であるかも知れない。

石基中の鉄オージャイトは斑晶よりもFeOに富んでいて、その組成から見て、石基フェロホルツノライトとほぼ平衡関係にあった様に見える(第4図)。石基の晶出時には、第5図より分かる様に、鉄ピジョン輝石はすでに安定ではなくなっている。

3. Fe-Ti 酸化鉱物について

茂木ピジョン輝石デイサイト中には、イルメナイトと磁鉄鉱の斑晶が存在している。イルメナイト斑晶とタイプI磁鉄鉱斑晶の化学組成は、ほぼ $\text{Il}_{95}\text{Ht}_5$ と $\text{Usp}_{50-60}\text{Mt}_{41-34}$ であり、それらが平衡晶出関係にあったと考え、Buddington and Lindsley (1964)によりその晶出温度は900~950°Cであり、酸素分圧は 10^{-12} ~ 10^{-18} atmである。この温度は輝石斑晶の晶出温度(910~950°C)と一致し、イルメナイト斑晶やタイプI磁鉄鉱斑晶がその組成を変化させない程度に急冷されたことを意味して

第9表 全岩化学組成

	1	2	3	4	5	6	7	8
	AS 82081002	AS 82081001	AS 83011603	AS 82081004	AS 83011605	AS 82041701	AS 82042501	AS 82081003
SiO ₂ (wt.%)	67.70	68.22	68.61	68.62	69.11	69.12	69.29	69.64
TiO ₂	0.51	0.67	0.66	0.59	0.49	0.48	0.38	0.46
Al ₂ O ₃	14.53	14.26	14.14	14.32	14.03	14.25	14.57	14.25
FeO*	5.76	5.85	5.51	5.82	5.40	5.16	5.28	5.74
MnO	0.06	0.08	0.15	0.12	0.18	0.20	0.13	0.07
MgO	0.45	0.69	0.57	0.74	0.45	0.42	0.47	0.50
CaO	3.74	3.51	3.25	3.46	3.31	3.38	3.15	3.34
Na ₂ O	4.53	4.42	4.35	4.32	4.39	4.33	4.39	4.45
K ₂ O	1.77	1.67	1.75	1.72	1.74	1.81	1.67	1.71
Total	99.05	99.37	98.99	99.71	99.10	99.15	99.33	100.16

* Total Fe as FeO.

第6図 茂木ピジョン輝石デイサイト及び関連する安山岩・デイサイトのAFM図。白菱形，足尾安山岩・デイサイト (Kuno, 1969)；黒丸，茂木安山岩類；白丸，茂木ピジョン輝石デイサイト全岩組成；黒三角，茂木ピジョン輝石デイサイト石基組成；点線，スクエアガード岩体分化トレンド。

いる。一方，タイプII磁鉄鉱は，ホストの磁鉄鉱とラメラ状又は細粒状のイルメナイトからなり，その組成はそれぞれ $\text{Usp}_{44-52}\text{Mt}_{56-48}$ と $\text{Il}_{2-5}\text{Ht}_{98-95}$ である。それらが平衡関係にあったとすると，温度と酸素分圧はそれぞれ $850\sim 650^\circ\text{C}$ と $10^{-14}\sim 10^{-21}$ atm となる。前述した様に，タイプII磁鉄鉱はタイプI磁鉄鉱が徐冷されて，2相に離溶したものと考えられるので，斑晶の晶出温度より低い温度を示しているのは当然であろう。

4. ピジョン輝石デイサイト質マグマの成因

茂木ピジョン輝石デイサイトの全岩組成を第9表及び

第6図に示してある。この岩石の $\text{FeO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ 比は極めて大きいのが特徴である。第6図には茂木ピジョン輝石デイサイト溶岩の近傍に産する安山岩溶岩の全岩化学組成 (Shiramizu, 1983) と栃木県足尾のファライト・デイサイト岩脈及びピジョン輝石安山岩岩脈の全岩化学組成 (Kuno, 1969) がプロットしてある。茂木の安山岩で最も SiO_2 に富んだ岩石の組成は， $\text{SiO}_2=57\sim 58\text{wt}\%$ ， $\text{Al}_2\text{O}_3=19\sim 20\%$ ， $\Sigma\text{FeO}=6.0\sim 6.6\%$ ， $\text{MgO}=1.8\sim 2.1\%$ ，であり，斑晶は斜長石，オーチャイト，ハイパーシン，磁鉄鉱である。この岩石には既に磁鉄鉱が斑晶として晶出しているので，この岩石の分化によっては，著しく FeO が濃集している茂木ピジョン輝石デイサイトは生成されない。茂木ピジョン輝石デイサイト質マグマはむしろ，スクエアガード岩体の残液や足尾のファライトデイサイトの様に著しく FeO に濃集したソレアイト岩系マグマの最終分化物と考えた方がよい。特に茂木ピジョン輝石デイサイトの石基の組成はスクエアガード岩体の最終残液の化学組成と比較すると，後者で K_2O が若干高いことを除けば，極めてよく類似していると言える。著しく FeO に濃集したソレアイト岩系の最終分化物と考えるのは，茂木ピジョン輝石デイサイト質マグマの低い酸素分圧からも支持される。 $900\sim 950^\circ\text{C}$ で $10^{-12}\sim 10^{-13}$ atm の酸素分圧 (ほぼ QFM バッファー線に相当) は，世界中の安山岩，デイサイト及び流紋岩の酸素分圧 (一般に NNO バッファー線以上) と比較してかなり低い値である。この結果として，磁鉄鉱の晶出が結晶分化の晩期まで起らず， FeO が著しく残液に濃集したものと考えられる。 FeO に富んだピジョン輝石やカンラン石を含む岩石は，東北日本弧では茂木や足尾以外に会津地方にも見られ，これらはいずれも中新世に活動したものであって，同一の成因的背景を有する一つの岩

石区を形成していた可能性が大きい。

VII. 結 論

茂木ピジョン輝石デイサイトでは、フェロボルトノライト、鉄オーチャイト、鉄ピジョン輝石、鉄ハイパーシオンがほぼ平衡共存に近い状態で晶出していた。斑晶の晶出時の温度は900~950°Cで、その時の酸素分圧は 10^{-12} ~ 10^{-13} atmであった。このマグマは著しくFeOに濃集するソレアイト岩系の晩期分化物であったと思われる。

VIII. 謝 辞

東京大学の中村保夫助教授には原稿を読んで戴いた。また茨城大学工学部久保田護教授には、XMAを使用して戴いた。これらの方々に感謝致します。

引用文献

- 青木謙一郎 (1961), 那須火山帯の早期玄武岩類. 岩鉱, **45**, 54-65.
- Bence, A.E. and Albee, A.L. (1968), Empirical correction factors for the electron microanalysis of silicates and oxides. *J. Geol.*, **76**, 382-403.
- 福山博之, 柵山雅則 (1976), マイクロプローブによる岩石の全岩化学分析. 地質雑, **82**, 345-346.
- Hallimond, A.F. (1914), Optically uniaxial augite from Mull. *Mineral. Mag.*, **27**, 97-99.
- Huebner, J.S. (1980), Pyroxene phase equilibria at low pressure. *Rev. Mineral.*, **7**, 213-288.
- Ikeda, Y. (1980), Petrology of ALLAN HILLS-764 Chondrite (LL3). *Hem. Natl. Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **17**, 50-82.
- Ishii, T., Takeda, H. and Yanai, K. (1979), Pyroxene geothermometry applied to a three-pyroxene achondrite from Allan Hills, Antarctica and ordinary chondrites. *Mineral. J.*, **9**, 460-481.
- Kawada, K. (1953), Geological studies on the Yamizo, Torinoko and Toriashi mountain blocks and their neighbourhood in the northeastern Kwanto district. *Sci. Rep. Tokyo Bunrika Daigaku., Ser. C*, **2-15**, 207-307.
- 河野義礼, 青木謙一郎 (1969), 八幡平およびその周辺火山群の岩石. 火山, **4**, 61-76.
- Kuno, H. (1936), Petrological note on some pyroxene-andesite from Hakone volcano, with special reference to some types with pigeonite phenocryst. *Japan. J. Geol. Geogr.*, **13**, 108-140.
- 久野 久 (1940), 福島県南会津郡産ピジョン輝石安山岩に就いて (予報). 地質雑, **47**, 180-182.
- Kuno, H. (1947), Occurrence of porphyritic pigeonite in "Weiselbergite" from Weiselberg, Germany. *Proc. Japan. Acad.*, **23**, 111-113.
- Kuno, H. (1950), Petrology of Hakone volcano and adjacent areas, Japan. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **61**, 957-1020.
- Kuno, H. (1969), Pigeonite-bearing andesite and associated dacite from Ashio, Japan. *Amer. J. Sci.*, **267A**, 257-268.
- Lindsley, D.H. and Grover, J.E. (1980), Ferric pigeonite: a geobarometer. *Geol. Soc. Amer. Abstr. Programs*, **12**.
- Lindsley, D.H. and Andersen, D.J. (1983), A two-pyroxene thermometer. *Proc. 13th Lunar Planet. Sci. Conf., Part 2, J.G.R.*, **88**, Suppl., A 887-A906.
- Nakamura, Y. and Kushiro, I. (1970), Equilibrium relations of hypersthene, pigeonite and augite in crystallizing magmas: microprobe study of a pigeonite andesite from Weiselberg, Germany. *Amer. Mineral.*, **55**, 1999-2015.
- 大場与志男 (1961), 北海道有珠火山外輪山熔岩中のピジョン輝石斑晶について. 岩鉱, **46**, 172-177.
- 生出慶司 (1959), 仙台市茂庭安山岩中のピジョン輝石斑晶について. 地質雑, **65**, 343-348.
- Omori, M. (1958), On the geological history of the Tertiary system in the southwestern part of the Abukuma mountainland, with special reference to the geological meaning of the Tanakura sheared zone. *Sci. Rep. Tokyo Univ. Education., Sec. C.*, **6**, 5 1, 55-116.
- Shiramizu, A. (1983), Petrochemical study of the Miocene igneous rocks occurring in the eastern side of northeastern Japan. - III. Geological survey and petrochemical Study of volcanic rocks occurring in Motegi district, Tochigi prefecture. *B. Sc. thesis. Ibaraki Univ.*
- 竹下 寿, 八木健三 (1961), 長野市猪郷路安山岩体の鉱物組成と化学組成, とくにその成因的考察. 火山, **6**, 70-85.
- 栃木県地質説明書 (1977).
- 八島隆一 (1961), 福島県飯野町千貫森産の斑晶ピジョン輝石. 岩鉱, **45**, 9-13.