研究報文

有珠火山熔岩の化学組成変化と

その岩石成因論的考察

Petrogenesis of the lavas of the Usu volcano, Hokkaido,
on the basis of some fractional crystallization process

大場与志男 (Yoshio Ōba)*

Abstract: Detailed petrographic descriptions of the lavas from Usu volcano were made already by several researchers, but there has been no satisfactory petrological consideration on the remarkable difference in chemical composition between somma and dome-lavas.

The somma-lavas, forming a stratocone, are tholeiitic basalt or mafic andesite ($\text{SiO}_2=49.36-53.46\%$); on the other hand, the succeeding dome-lavas and pumice are dacite or rhyolite ($\text{SiO}_2=68.89-73.04\%$).

The present paper have applied Osborn's (1959) idea, which proposes two fractional crystallization trends depend on the Po_2 conditions, to interpret the genesis of the Usu lavas. If the chemical compositions of the lavas are plotted in the $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}-\text{SiO}_2$ diagram, the somma-lavas lie on a steep ascending trend while the dome-lavas lie on a gentle one. With some assumptions, the idealized fractional crystallization of the parental magma can be calculated as follows;

(1) The genesis of somma-lavas; Fractional crystallization on the tholeiite trend.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Parental magma} \\ L_1 \text{ (Table 3-1)} \\ 100\% \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Crystal phases} \\ X_1 \text{ (Table 3-3,4)} \\ 50\% \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Andesitic magma, the} \\ \text{groundmass of the} \\ \text{latest stage somma lava} \\ L_2 \text{ (Table 3-2)} \\ 50\% \end{array} \right)$$

(2) The genesis of dome-lavas; Fractional crystallization on the calc-alkali rock trend.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Andesitic magma} \\ L_2 \text{ (same as the} \\ \text{right hand of the} \\ \text{equality of (1))} \\ 100\% \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Crystal phases} \\ X_2 \\ \text{(Table 4-3, 4)} \\ 70\% \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Groundmass of the} \\ \text{Shōwa-Shinzan dome lava} \\ L_3 \\ \text{(Table 4-2)} \\ 30\% \end{array} \right)$$

For the dome-lavas, the trend of FeO and Fe_2O_3 contents could not be shown as a straight line; to maintain Po_2 , 0.4% oxygen must be added to the andesitic magma.

After all, primary magma is solidified as crystal aggregates and residual felsic lava in proportions as shown in Figure 4.

* 北海道大学理学部地質学鉱物学教室

(昭和40年8月9日受理)

有珠火山は、洞爺湖（カルデラ湖）の南縁に沖積世に入ってから形成された二重式火山である。

従つて、火山地質学のみならず、他の分野からも注目され、今日まで数多くの研究がされて来た。

さて、有珠火山の発達史は大きく2つの時期にわけられる。すなわち、ソレイト質玄武岩ないし苦鉄質安山岩熔岩が岩津を伴って、くりかえし噴出し、成層火山を形成した後、山頂部に径 $1.5 \times 1.0 \text{ km}$ の円形火口を作るまでの時期（主活動または外輪山形成期）と、しばらく休止期において、非常に珪長質な軽石が激しい爆発によって多量抛出され、つづいて石英安山岩質の熔岩円頂丘が小有珠・大有珠・昭和新山の順で形成された時期（末期活動または中央火口丘・寄生火山形成期）とである（近堂, 1963; 大場, 1964; 大場・近堂, 1964）。

古く加藤 (1909), 田中館 (1930) は, 漠然と有珠火山のマグマ溜りないし火口道中における結晶沈降を考えていたが, 外輪山熔岩流の下部に橄欖石が多いと言う記載だけで, 岩石成因論にまでふれるものではなかった。

八木 (1949, 1951) は、岩石成因論的に2つの問題を取りあげている。第1に、3個の円頂丘熔岩が極めて類似的性質をもち結晶質であり、一方では立岩泥流[大場(1964)の立岩熱雲堆積物]中のガラス質岩片は非晶質であるにもかかわらず、両者ともほぼ同じ化学組成をもっていることをあげている。

2. ガラス質熔岩

第2に、苦鉄質の外輪山熔岩から、珪長質の円頂丘熔岩への、著しい岩質の変化が有珠火山の規模や時間的な発達のみならず、決して“*in situ*”の晶出・分化作用では説明されないと述べている。

大場 (1961, 1964) は、外輪山熔岩がソレライト質の玄武岩 (SiO_2 , 49.36%) から、ビジオン輝石斑晶を含むやや特異な安山岩 (SiO_2 , 53.36%) まで、晶出分化作用によつて岩質を変化させていることを定性的に述べ、さらに円頂丘熔岩については、2, 3 種の捕獲岩や捕獲結晶を見出し、円頂丘熔岩の生成に混成作用の考えを入れた。その後、筆者ら (大

場・近堂, 1964) は、中央火口丘・寄生火山形成期に先駆的な非常に激しい軽石の抛出があった事実に注目し、この軽石の化学組成から K_2O/Na_2O 比の目立つて小さいことや、含まれる外来岩片の性質などから、珧長質マグマの成因に花崗岩質岩石の大規模な混成同化は起らなかったと推定した。

このほか、根本ら (1957)、太田 (1958) も、有珠火山の岩石成因論にふれているが、彼等の考えた花崗岩質岩石の再融または、同化作用では説明し得ない現象のあることを筆者はすでに指摘している (大場, 1964)。従つて、有珠火山噴出物の組成変化の原因については、明らかな説明がされずに残されていた。

久野 (1964) によると、大有珠・昭和新山熔岩は、Ie 型石英安山岩の好例となつている。彼の分類による d 型・e 型紫蘇輝石質岩系はカルク・アルカリ岩すなわち混成作用の産物であると一般に解されていた。さいきん、久野 (1965 年 1 月岩鉱学会特別講演) は、カルクアルカリ岩の定義があいまいであるため、これを晶出分化の間に鉄の濃集程度が小さく、磁鉄鉱の晶出が早期に始まるような岩石系列にのみ適用すべきであると述べている。これは Osborn (1959) の酸素分圧一定条件での晶出分化作用のことであり、結局、カルク・アルカリ岩の成因には、酸素分圧が高い状態が保たれればよいのであつて、そのための混成同化作用は第二義的な意味しか有しないことになる。

この論文では、Osborn (1959) が $MgO-FeO-Fe_2O_3-SiO_2$ 系で考えた晶出分化作用の方法を、そのまま有珠火山噴出物にモデル化し、混成同化作用は考えずに、その晶出径路を検討してみた。すべて重量比での議論であり、且つ 2・3 の仮定を設けてあるので、問題となる点はあるが、一応計算上では有珠火山噴出物の化学組成変化を晶出分化作用のみで説明し得た。

もちろん、この議論が、実際の有珠火山で起つた現象であると断定は出来ず、1つの臆測として示したに過ぎない。

この研究を発表するに当たり、常々御指導いただいている、北海道大学理学部地質学鉱物学教室の石川俊夫・八木健三両教授、また在チリー大学の勝井 義雄助教授および北海道開発局の近堂祐弘氏に厚くお礼申し上げます。

なお、この研究には文部省科学研究費の一部を使用した。

2. 議論に使用された噴出物の化学組成

第 1 表にこの論文で計算に使用した有珠火山噴出物の分析値を示す。また、これらの熔岩に含まれる斑晶鉱物の性質を第 2 表に示す。

これらの分析値より、 $H_2O(+)^{-}$ 、 P_2O_5 を除き総計 100.0% とした値が、以後の議論に必要な値であり、第 3・4・5 表に示す。

3. 有珠火山マグマの結晶作用径路とそのモデル化

有珠火山の噴出物は、 SiO_2 量からみても、外輪山熔岩と円頂丘熔岩とでは、へだたりが大すぎて、中間組成の噴出物を欠く。従つて SiO_2 -各々酸化物変化図や、一般によく使用される Or-Ab-An, 全アルカリ-($FeO+Fe_2O_3$)- MgO 三角ダイアグラムでは、岩石成因論に結びつけるような結果は得られない。

第1表 有珠火山噴出物の化学分析値

	(1)	(2)	(3)	(4)
SiO ₂	49.36	53.21	68.89	73.04
TiO ₂	0.69	0.87	0.47	0.26
Al ₂ O ₃	16.07	19.22	14.92	12.95
Fe ₂ O ₃	3.79	2.34	3.01	1.11
FeO	7.68	6.33	1.78	1.54
MnO	0.21	0.13	0.16	0.06
MgO	8.92	4.21	0.90	0.36
CaO	10.75	10.43	4.10	2.41
Na ₂ O	2.03	2.76	4.00	5.07
K ₂ O	0.18	0.53	1.03	1.14
H ₂ O(+)	0.37	0.13	0.12	1.02
H ₂ O(-)	0.10	0.19	0.32	0.21
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.24	0.43
Total	100.27	100.46	99.94	99.60

(分析者, 大場)

(1); 最早期外輪山熔岩, 普通輝石・紫蘇輝石橄欖石玄武岩

(2); 最晩期外輪山熔岩, 普通輝石・ビジョン輝石紫蘇輝石安山岩

(3); 昭和南山熔岩, 紫蘇輝石石英安山岩

(4); “Ub” 降下軽石, (流紋岩質)

(文献) 1, 2; 大場 (1964), 3, 4; 大場・近堂 (1965)

第2表 斑晶造岩鉱物の性質と重量比 (wt%)

(番号は第1表と同じ)

斑 晶	1		2		3		4
Plagioclase	An ₉₅₋₆₀	25.6wt %	An ₉₅₋₄₅	35.0	An ₆₀₋₄₀	12.0	いく少量の andesine と稀に biotite, hornblende, quartz を含む
Augite	Wo 45 En 29 Fs 26	0.1	Wo 37 En 32 Fs 31	0.2			
Pigeonite			Wo 11 En 45 Fs 44	0.5			
Hypersthene	En 67 Fs 33	2.0	Fn 62 Fs 38	1.0	*En 52 Fs 44 Wo 4	2.0	
Olivine	Fo 73 Fa 27	7.3					
Magnetite		+		+		1.0	

* 原岩より、重液および磁力分離器を用いて分離した紫蘇輝石の化学分析結果から算出。

第 3 表

	(1)	(2)	(3)	(4)
SiO ₂	49.06	56.09	41.6	Plagioclase { Ab 12.3 An 87.7 } 54.8 wt%
TiO ₂	0.66	1.38	0.0	
Al ₂ O ₃	15.34	11.83	18.8	Wollastonite Wo 6.8
Fe ₂ O ₃	3.66	3.67	4.6	
FeO	8.00	9.39	5.8	Olivine { Fo 84.0 Fa 16.0 } 31.8
MnO	0.20	0.21	0.2	
MgO	10.71	6.12	15.1	Magnetite 6.7
CaO	10.24	7.37	13.0	加えられた Oxygen 0.1
Na ₂ O	1.93	3.12	0.8	Solidify ratio 50%
K ₂ O	0.17	0.84	0.0	

(1) ; 推算した有珠火山本源マグマ組成。第1表の(1)から算出した石基組成(掲示していない)の Solidification Index (久野, 1954) ($100\text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) = 29.7 より Skaergaard intrusion の場合を応用し固結率 40% と推定した。第1表の(1)はすでに斑晶として斜長石・橄欖石・紫蘇輝石・普通輝石を 35% (重量比) 含んでいるから、5% の橄欖石 ($\text{Fa}_{20}\text{Fo}_{80}$) を分離しているものとして、これを加えて、本源マグマ組成を計算した。H₂O(+), (-), P₂O₅ は無視してある。(2) ; 最晩期外輪山熔岩の石基組成 (L₂)。第1表の(2)から算出した石基組成で後述するように(第4表)、安山岩質マグマを示していると考ええる。(3) ; (1)から(2)を生ずるために(1)より除かれるべき結晶相の組成 ($\times_2$) 固結量は、(2)の S·I = 26.4 より、本源マグマの 50% ; と推定した。(4) ; (3)から計算した重量比ノルム鉱物。

第 4 表

	(1)	(2)	(3)	(4)
SiO ₂	56.09	72.63	48.9	Plagioclase { Or 8.2 Ab 57.1 An 34.7 } 44.2 wt%
TiO ₂	1.38	0.56	2.0	
Al ₂ O ₃	11.82	13.58	11.1	Subcalcic Augite { Wo 29.3 En 46.8 Fs 23.9 } 42.3
Fe ₂ O ₃	3.67	2.74	7.8	
FeO	9.39	1.24	9.6	Magnetite 13.9
MnO	0.21	0.19	0.2	
MgO	6.12	0.63	8.5	加えられた Oxygen 0.4
CaO	7.37	3.39	9.0	
Na ₂ O	3.12	3.81	2.9	固結量 70%
K ₂ O	0.84	1.23	0.6	

(1) ; 安山岩質マグマ (L₂)。第3表の(2)に同じ。(2) ; 昭和新山熔岩の石基組成 (L₃)。第1表の(3)より算出した値 S·I = 8.4 より固結率は本源マグマの 85% すなわち、(1)の安山岩質マグマの 70% と推定した。(3) ; (1)から(2)を生ずるために、(1)より除かれるべき、結晶相の組成 (X₂)。(4) ; (3)から推算した重量比ノルム鉱物。

第5表

	1	2
SiO ₂	72.63	74.57
TiO ₂	0.56	0.26
Al ₂ O ₃	13.58	13.22
Fe ₂ O ₃	2.74	1.13
FeO	1.24	1.58
MnO	0.19	0.06
MgO	0.63	0.36
CaO	3.39	2.46
Na ₂ O	3.81	5.23
K ₂ O	1.23	1.18

(1) ; 昭和新山熔岩の石基の化学組成.

第4表の(2)に同じ

(2) ; “Ub” 降下軽石 (第1表の4)
より H₂O⁽⁺⁾⁽⁻⁾, P₂O₅ を除いて
総計 100% とした値.

外輪山熔岩と円頂丘熔岩とは、異つた条件下で別傾向の晶出分化作用を行なつたと仮定してみた。このために、もつとも適当な図として、Osborn (1959) が示したように、FeO+Fe₂O₃/FeO+Fe₂O₃+MgO を縦軸に、SiO₂ を横軸にとつた図を使用する (第1図)。この図で、MgO-FeO-Fe₂O₃-SiO₂ 系における晶出分化経路は、条件の違いによつて、全く異つた傾向をとることを、Osborn (1959) は指摘している。

(a) 全成分一定条件下で晶出分化が進行する場合……図のnから出発して鉄の濃集する方向へ向う (-132→40→24)。これは残液が quaternary univariant line を FeO 頂点に向つて進むためである。なお SiO₂ は濃集しない。

(b) 酸素分圧 (Po₂) が一定ないし漸増条件下で晶出分化が進行する場合……図のnから出発して、SiO₂ の濃集する方向へ向う (-c→d, -a→b)。これは、残液が isobaric surface から外れず、磁鉄鉱を晶出して鉄の濃集がおこされるためである。

これらの関係を、玄武岩質マグマの晶出分化について適用すると、基本的に SiO₂ 量に差はあるけれども、(a)は、Skaergaard 液や Nockolds の平均 tholeiite の分化経路と似ており、“tholeiitic trend”、また (b) は Cascades の安山岩-石英安山岩一流紋岩の分化経路と似ており、“calc-alkalic trend” と名付けられている。

さて、玄武岩質マグマの晶出分化の途中で分化経路が (a)→(b) へ変化したと考えられる現象は、竹下・八木 (1961) の長野県碓氷郡路安山岩体や、Carmichael (1964) のアイスランドの Thingmuli 火山岩体に報告されている。とくに後者は、ソレライト質玄武岩から、いわゆる “icelandite” を経て、末期の流紋岩、花崗斑岩まで連続的に各種岩型が記載されている。

有珠火山の場合、最初に述べたように、中間型の岩種を全く欠くが、最晩期外輪山熔岩までは、本源マグマから (a) に近い条件下で晶出分化を行い、その後、最晩期外輪山熔岩の石基組成のマグマから、昭和新山熔岩までは (b) の条件下で晶出分化を行つたとして、きわめて単純なモデル化を設定した。晶出分化の際、マグマから取去られるべき結晶集合体の化学組成は、組成加減図によつて決めた。この場合、マグマの固結する量比は、Skaergaard 液の固結率と、その solidification index (久野, 1954) = $\text{MgO} \times 100 / \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ との関係から推定した。従つて、Bowen (1928) の組成加減図のように、結晶集合体の K₂O=0 となる方法は、誤差も大きいので採用しなかつた。また、結晶集合体の化学組成から、そのモードを推算する場合、重量%で直接計算法 (Wahlstrom, 1955) によつた。

第1図 $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} - \text{SiO}_2$ 図

n-132-40-24 : 全成分一定の条件

n-c-d : 酸素分圧一定の条件

n-a-b : 酸素分圧漸増の条件

上記3本の太線は、Osborn (1959) による $\text{MgO} - \text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ 系の晶出分化作用径路。

Skaergaard 径路 : Wager and Deer (1939)

Thingmuli 径路 : Carmichael (1964)

Th——Th : Nockolds (1954) の平均 tholeiite

Cascades 径路 : Turner and Verhoogen (1951)

Usu 径路 { : ⊙ 円頂丘熔岩 ub 降下軽石
 : ⊖ 外輪山熔岩
 : ⊙ 推算した有珠火山の本源マグマ

(1) 外輪山熔岩の成因—本源マグマから全成分ほぼ一定条件下で晶出分化作用が始まったとした場合の数量的考察

第1図に於て、外輪山熔岩は、ほぼ直線的な変化を示す。従つて、推定される本源マグマ (第3表の (1) から最晩期外輪山熔岩石基 (第3表の (2)) が結晶集合体 (第3表の (3)) を分別することによつて生成するように考えればよい。外輪山熔岩は、この晶出分化過程で、地表に幾度か噴出したと考える。得られた結晶集合体は、非常に“calcic”な斜長石が多い。有珠火山外輪山熔岩の一般的特徴として、“calcic”な斜長石斑晶に富む (16~35% 重量比)、これは晶出した斜長石 (比重 2.75) が、マグマ中に浮游して他の鉄苦土鉱物のように著しい沈降分別を起さなかつたと推定される。(1) 場合の組成加減図を第2図に示した。理想通りの全成分一定条件でなく、わずかに酸素が加えられたことが、計算の上で明らかになつた。

第2図 外輪山熔岩についての組成加減図
 L_1 = 本源マグマ : L_2 = 安山岩質マグマ : X_1 = 除かれるべき結晶 :
 相外側の%尺度は、 SiO_2 にのみ適用する。

(2) 円頂丘熔岩の成因—安山岩質マグマから酸素分圧一定ないし漸増条件下での晶出分化作用が行われたとした場合の数量的考察

第1図に於て、円頂丘熔岩は外輪山熔岩と可成り隔つており、且つ外輪山熔岩の分化経路の延長上には無い。これを、ソレライト質マグマの晶出分化径路が、 $SiO_2=55$ 附近で、強く折曲つて、鉄の濃集が衰え、 SiO_2 の濃集が著しくなった現象と解釈した。すなわち晶出分化の条件が、先にのべた(a)から(b)へと変化したことを意味している。

この考えにたつて、安山岩質マグマ(第4表の1)から、昭和新山熔岩マグマ(第4表の2)を生ずるために除かれるべき結晶集合体(第4表の3)を、前述と同じ方法で推定した。求められた結晶集合体は、斜長石とCa分に乏しい普通輝石が大部分を占めており、橄欖石は算出されなかつた。これを(1)で述べた外輪山熔岩を生ずる

ために除かれた結晶集合体と比較すると、当然期待される通り、斜長石はAb分に富み、鉄苦土鉱物は鉄分に富んでいる。

また磁鉄鉱は増加しており、酸素分圧の高いことにより、 $FeO \rightarrow Fe_2O_3$ の酸化がより顕著に行われたことを示している。

なお、昭和新山熔岩中には斜長石13.1%と紫蘇輝石2%の斑晶として残されている。従つて斜長石は晶出した42.2%のうち、一部が昭和新山熔岩中に斑晶として残り、Caに乏しい普通輝石はほとんど分別してしまつたと推定される。

酸素分圧一定条件の晶出分化では、結晶の晶出による酸素分圧の減少を補うために系外から酸素が加えられる。昭和新山熔岩の場合その量は0.4%で、Osborn(1959)が合成液で得た値0.6%と大体同じ程度である。第3図において FeO 、 Fe_2O_3 の変化は、マグマ組成の所で強く折曲つている。晶出分化による生成物においては、 Fe_2O_3/FeO が著るしく増大するのはこのためである。

(3) “Ub” 降下軽石の成因—揮発成分の濃集

小有珠円頂丘熔岩の押上げ寸前に激しく抛出された“Ub”降下軽石については、その噴火機構と共に岩石成因論的にもすでに詳しく論じた(大場, 近堂 1964)。すなわち、“Ub”降下軽石と、昭和新山熔岩石基の化学組成とは、大体よく似た組成を有するが、詳しくみると前者は SiO_2 およびアルカリに富む(第5表)。これは、Kennedy(1955)

の述べたごとく、マグマ溜り上部——内部圧の低い部分——に H_2O が SiO_2 およびアルカリを伴って蓄積し、軽石を抛出させるような激しい爆発活動を起こす原因となつたと思われる。揮発成分の濃集したマグマを軽石として抛出させた後、粘性の高い円頂丘熔岩が押上げたことになる。特に揮発成分が1時的にせよ、濃集した条件があつたことは、“Ub” 降下軽石中に稀に黒雲母・角閃石斑晶の含まれることや、円頂丘熔岩のガラス質部急冷部にオバサイト化した角閃石(?)の含まれる事実からも想像される。

円頂丘熔岩マグマに粘性が高いため、ほとんどその後の晶出分化は期待されない。有珠火山の噴出物は、小有珠・大有珠・昭和新山の各熔岩の岩石学的性質が、八木(1949)も指摘しているように、350~500年前から現在まで、ほとんど変化していない。

4. 検討

これまで、Osborn (1959) の人工合成系についての2種類の晶出分化径路を、有珠火山噴出物にモデル化して適用し、組成加減図によつて、分別すべき結晶集合体の化学組成と鉱物組合せを推算してみた。これには、幾つかの仮定を設けてはあがあるが、実際に有珠火山にみられる岩石学的な現象——噴出物の化学組成変化、造岩鉱物の組成と量比など——との間に大きな矛盾はみられない。

例えば、早期外輪山熔岩に斜長石・橄欖石・普通輝石の大晶が、恐らく同源捕獲結晶として、見出されることや、昭和新山熔岩中に特異な累帯構造を有する斜長石斑晶(一般斑晶より著しく“calcic”, 斜長石を不連続的に普通組成の斜長石が包んでいる), および斜長石・普通輝石・紫蘇輝石・磁鉄鉱の集合体よりなる深成岩的な同源捕獲岩の含まれる事実(大場, 1964)は、この論文で述べた、結晶集合体の分別作用によつてより明瞭に説明できるように思われる。

外輪山形成期終了(-2,000年~-2,500年)後、中央円頂丘・寄生火山形成期開始(-350年~-500年)前の相当な休止期の間、地下のマグマにおいて条件が変化し——具体的には何等かのメカニズムで酸素分圧が増し——晶出分化径路は急速に SiO_2 濃集傾向になつたものと解釈される。

マグマ溜りでの酸素分圧の増大は、Kennedy (1955) や Osborn (1959) によれば、水がマグマ中に加えられるか、局所に濃集するかによつて起る。これは堆積岩の混成作用でもよいわけであるが、混成作用すなわち同化作用(マグマの組成変化)と考えなくても、

第3図 円頂丘熔岩についての組成加減図

L_2 =安山岩質マグマ: L_3 =昭和新山熔岩の石基: X_2 =除かれるべき結晶相。

有珠火山の場合には説明は可能である。

Osborn & Roeder (1960) は Osborn (1959) の人工合成液には Al_2O_3 が全く考慮されていない点を補足し、さらに $(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \text{ 灰長石成分})$ を加えて、5成分系についての、分別結晶作用を論じたが、基本的な結晶作用の性質は、変らないことを明らかにしている。有珠火山の外輪山熔岩は一般に、斜長石斑晶に富んでおり、また円頂丘熔岩を生ずるためには、多量の斜長石を分離せねばならない。残液は、より速やかに、合成系の中の“univariant line”に沿うて、 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 頂点に接近し“eutectic point”に達し、斜長石を晶出したと考えられる。このとき、斜長石を考慮しない場合に比較して、温度の低下のみで、結晶作用の傾向は変らないと考えられる。

最後に、もつとも重要な問題として晶出分化作用による、珪長質マグマの生成量が実際の火山噴出物の量と一致しない点があげられる。

この論文では、昭和新山熔岩のような珪長質マグマは本源マグマの 15% (重量比) 形成されるに過ぎないことが明らかにされた。しかし、有珠火山の噴出量は、外輪山熔岩 $0.98 \times 10^6 \text{t}$ 珪長質噴出物は“Ub” 降下軽石を液体マグマに換算して円頂丘熔岩に加えて $1.43 \times 10^6 \text{t}$ と推定され (大場・近堂, 1964) 外輪山熔岩は期待される量よりも著しく過少である。

久野 (1953) は、箱根火山において外輪山熔岩 (苦鉄質) と、中央火口丘熔岩・軽石流堆積物 (珪長質) の量比が、大体、晶出分化作用によつて期待される量比と一致すると述べているが、一般には火山の形態や、基盤の地質構造によつては、晶出分化作用によつて期待される熔岩の量が、地表に噴出した量と合致したのは当然である。アイスランドの Thingmuli 火山では、苦鉄質本源マグマに近い橄欖石ソレライト玄武岩はわずか 7% 噴出したに過ぎず、それから由来したソレライト～安山岩 (Icelandite) が 68% を占め、分化末期の流紋岩は 21% も存在している。これは、珪長質マグマは玄武岩マグマ溜りの頂部に形成されて、地表に現われる率が大いとしている。(Carmichael, 1964)。アイスランドでは、いわゆる sial 層を欠き、過量の珪長質マグマの成因を、花崗岩質岩石の再融や、その著しい混成同化に帰することはできない。さて有珠火山の場合は、根本 (1957)、太田 (1958) の述べたような、花崗岩の再融や著しい混成作用は起つたと考えられるであろうか。

山崎 (1956) は、ソレライト質マグマが花崗岩質岩石を混成同化すると、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比が急増することを述べている。Carmichael (1963b) は、このような K_2O の増大と共に、生成した珪長質岩には 2 種の長石 (斜長石とサニディン) を晶出するのに反し、アイスランドのようにソレライト質マグマから分化した珪長質岩では 1 種のみ長石 (斜長石—アノーソグレース固溶体) しか晶出しないと述べている。アイスランド Thingmuli 火山岩の分化末期の珪長質岩と、昭和新山熔岩とを比較すると、鉍物組成において長石がアンデシンであり、ノルム Q が 30% に達するにもかかわらず石英斑晶は晶出しない等の共通点が存在する。

5. 結論と今後の問題

有珠火山噴出物を化学組成と岩質からみると、主期の外輪山熔岩と、末期の円頂丘熔岩および“Ub” 降下軽石とは著しい差があり、これまで両者の岩石成因論的な関連は

よく説明されていなかった。

Osborn (1959) は $\text{MgO-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系において、晶出分化経路に2つの場合が可能であるとして、実際の玄武岩マグマの晶出分化にも適用されることを示した。

Carmichael (1964) が、この考えをアイスランドの Thingmuli 火山岩に適用し、岩質の変化を説明した。

有珠火山には、アイスランドの icelandite に相当する SiO_2 55~65% の中間岩種を全く欠いてはいるが、晶出分化を次のように考えた

1. 外輪山熔岩は、本源マグマから、全成分一定条件下で、平均して、石灰質な斜長石 54.8%、橄欖石 31.8%、珪灰石 6.8% 磁鉄鉱 6.7% の割合の結晶集合体を、全体量の 50% だけ分別するようなメカニズムで生ずる。

2. 円頂丘熔岩は外輪山熔岩の最晩期残液から、酸素分圧一定または漸増条件で、平均してソーダ質斜長石 44.2%、石灰に乏しい普通輝石 42.3%、磁鉄鉱 13.9% の割合の結晶集合体を分別し 0.4% の酸素を外部から得て、最初の本源マグマの 85% が固結したとき生成される。

3. すでに筆者らが述べたことであるが (大場・近堂, 1964,) “Ub” 降下軽石は、珪長質マグマ中での H_2O とそれに伴う SiO_2 アルカリの局所的濃集によって生じたものである。

第4図に示すように、本源マグマの 15% が珪長質岩に分化する。現在の有珠火山の噴出物量より考えて、地表に噴出した外輪山熔岩よりはるかに大量の苦鉄質マグマと、橄欖石・斜長石・輝石・磁鉄鉱などが地下に存在している筈である。従つて地下のマグマ溜りでの大規模な分化現象のほんの一端を地表に具現したに過ぎないと考えられる。

最後に、分別結晶作用の起つた時間的な問題であるが、とくに安山岩質 マグマが 85% も固結して、大部分の結晶が除去されるのに、わずか 1,500 年~2,000 年しか要しなかったとは考えられない。苦鉄質な安山岩の活動が、約 2,000 年~2,500 年前に終わったとしても、それより以前から、局部において現在の円頂丘熔岩々体を作るような珪長質マグマは形成されつつあったと思われる。

筆者は先に (大場, 1964) 円頂丘 熔岩の成因として混成作用の可能性を述べたが、その後 “Ub” 降下 軽石の岩石化学的性質が明らかにされ (大場・近堂, 1964) K_2O 量の乏しい事実が明らかとなり、著るしい混成作用は行われなかったものと考えた。さらにこの論文では、極端な晶出分化作用を有珠火山の熔岩の成因論に応用した。結局は、混成作用か晶出分化作用のいずれが、有珠火山マグマの進化を支配したかは現段

第4図 最初の本源マグマ 100% (wt%) が完全に固結するまでの、結晶相・残液の量比を図示した。

Wo=wollastonite, Mt=magnetite

階では断定し得ないが、晶出分化作用による説明が半定量的に可能であることが示されたことになる。

引 用 文 献

- Carmichael, I. S. E. (1963), The crystallization of feldspar in volcanic acid liquids. *Quart. J. Geol. London*, **119**, 95~131.
- (1964), The petrology of Thingmuli, a Tertiary volcano in Eastern Iceland. *Jour. Petr.*, **5**, 435~460.
- Kennedy, G. C. (1955), Some aspects of the rule of water in rock melts. *Geol. Soc. Am., Sp. paper*, **62**, 489~503.
- Kuno, H. (1953), Formation of calderas and magmatic evolution. *Trans. Am. Geophys. Union*, **34**, 267~280.
- 久野 久 (1954), 火山及び火山岩. 岩波書店
- 加藤武夫 (1909), 有珠岳火山及洞爺湖地質調査報告. 震災予防調査会報告, **56**.
- 近堂祐弘 (1963), 北海道有珠火山周辺における第四紀火山碎屑物の粘土鉱物学的研究. *地質雑*, **69**, 362~377.
- Minakami, T., Ishikawa, T. and Yagi, K. (1951), The 1944 eruption of volcano Usu in Hokkaido, Japan. *Bull. Volcanologique, Ser. 2*, **2**, 45~157.
- 根本忠寛, 早川正己, 高橋 清, 小穴進也 (1957), 昭和新山地熱地帯の火山地質および地球物理地球化学的研究. *地質調査所報告*, **170**.
- Nockolds, S. R. (1954), Average chemical compositions of some igneous rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **65**, 1007~1032.
- 大場与志男 (1961), 北海道有珠外輪山 熔岩中のビジオン 輝石斑晶について, *岩鉱* **46**, 172~177.
- (1964), 有珠火山の岩石学的研究——とくに外輪山熔岩について——*岩鉱*, **51**, 53~66, 88~97.
- , 近堂祐弘 (1964), 有珠火山の降下軽石堆積物について. *火山*, **9**, 75~86.
- Osborn, E. F. (1959), Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma. *Am. Jour. Sci.*, **257**, 609~647.
- and Roeder, P. L. (1960), Effect of oxygen pressure on crystallization in simplified basal systems. *Rep. 21 Intern. Geol. Congr., Copenhagen, Part XIII*, 145~155.
- 太田良平 (1958), 輝石安山岩にみられる混成作用. *岩鉱*, **42**, 104~114, 191~202.
- 竹下 寿, 八木健三 (1961), 長野市狛郷路安山岩体の鉱物組成と化学組成, とくにその成因の考察. *火山*, 第2集, **6**, 70~85.
- Tanakadate, H. (1930), Two types of volcanic dome in Japan. *Proc. 4th Paci. Sci. Congr. Java*, 695~704.
- Turner, J. and Verhoogen, J. (1951) *Igneous and metamorphic petrology*. New York, McGraw-hill Book Co.
- Wager, L. R., and Deer, W. A. (1939), *The petrology of the Skaergaard in-*

- trusion, Kangerdlugssuaq, East Greenland. Medd. om Grønland, **105**, 1~352.
- Wahlstrom, E. E. (1955), Petrographic Mineralogy. 85~90.
- 八木健三 (1949), 有珠火山昭和新山の岩石学的研究. 岩鉱, **33**, 3~17.
- Yamasaki, M. (1956), Petrogenetic significance of the K_2O/Na_2O ratios of volcanic rocks of the Fuji and Nasu volcanic zone in Japan. Jap. Jour. Geol. **62**, 504~514.