

# 济州火山の翰林溶岩樹型のX線分析と偏光顕微鏡

(整型と横臥型の年代測定・成分分析・単斜晶系・偏光顕微鏡)

沢 勲 Isao SAWA 井上 央 Hisashi INOUE  
金 龍 哲 Ryoung-Chyol KIM 裴 斗 安 Doo-An BE

*X-Ray Analysis and Polarization-Microscope of Tree-Molds on Hallim Lava in Cheju Volcano (The Vertical and Transverse of Age Determination, Component Analysis and Monoclinic System and Polarization-Microscope)*

## ABSTRACT

The Hallim (T) lava is on the northeastern and the northwestern skirt of the Cheju Volcano, at latitude 33°22'59" N and longitude 126°14'58" E. Major chemical compositions of these lava tree-molds are revealed by XRF(X-Ray Fluorescence) analysis. These values are the same as those of lava tree-mold, and both lava tree-molds from VT (a vertical tree-mold) and TT (a transverse tree-mold) may belong to alkali-basalt. Average contents of major elements (wt.%) for the tree-mold from T are as follows :

SiO<sub>2</sub>=47.50, TiO<sub>2</sub>=2.58, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=14.40, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=12.60, MnO=0.16,  
MgO=8.63, CaO=9.12, Na<sub>2</sub>O=2.95, K<sub>2</sub>O=1.54, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.51 in VT,  
SiO<sub>2</sub>=47.40, TiO<sub>2</sub>=2.58, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=14.60, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=12.60, MnO=0.16,  
MgO=8.57, CaO=9.13, Na<sub>2</sub>O=2.93, K<sub>2</sub>O=1.48, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=0.60 in TT

It can be suggested that these facts are related to the chemical composition formation, the crystal structure and lattice constants on the tree-molds in Hallim lava samples by X-ray diffraction method. X-ray observation on the crystal structure of these materials are triclinic, orthorhombic, cubic and monoclinic system. Where, in the monoclinic system, it is found that the lattice constants (Am, Bm and Cm axis), and axis angle ( $\beta$ m) are, Am= 9.7799 Å, Bm= 8.9286 Å, Cm=5.1968 Å and  $\beta$ m=106.30° in VT and Am= 9.7656 Å, Bm=8.8183 Å, Cm=5.1889 Å and  $\beta$ m=106.46° in TT.

**Key words** : Lava Tree-Mold, X-Ray Fluorescence Analysis, X-Ray Diffraction, Lattice Constants, Monoclinic System, K-Ar Age Determination and Polarization-Microscope

[大阪経済法科大学論集 第79号] [The Review of Osaka University of Economics and Law, Vol 79 (2001), pp 1-36]

## 1 はじめに

本邦における溶岩樹型観察の論文は、史跡名勝天然記念物調査報告書(石原, 1929)に始まり、津屋弘達・小川孝徳(1971)等によって引き継がれている。最近では、1996年以降自衛隊北富士演習場の鷹丸尾溶岩流における溶岩樹型群観察報告書(立原, 1997, 1998)に述べられている。また、沢・井上・立原(1998)等によって柏原と翰林溶岩樹型の成分分析が行われた。今回は、K-Ar法による年代測定、成分分析値並びにX線回折による結晶構造から単斜晶系の格子定数を解析した。後者は含有率の多いケイ酸と格子定数との関係について解析を行った。さらに、X線回折による結晶構造と偏光顕微鏡写真による鉱物の検索を行ったのである。測定に用いた試料は博物館の横にある豎型樹型(VT)および正面にある横臥型樹型(TT)から採集されたものである。

### A) 濟州火山の翰林豎型溶岩樹型(VT)の概要

- a) 場 所: 濟州道北濟州郡翰林邑月林里(金龍哲所有地)
- b) 海 抜: 200m
- c) 経 度: 北緯 33°22' 59" ; 緯 度: 東経 126°14' 58"
- d) 洞 口: 355~400cm (巨大な円形状態)
- e) 洞 奥: 340cm
- e) 深 度: 317cm
- f) 調 査: 1997年10月(照葉樹の極相林と推定)

### B) 濟州火山の翰林横臥型溶岩樹型(TT)の概要

- b) 場 所: 濟州道北濟州郡翰林邑月林里(金龍哲所有地)
- b) 海 抜: 200m
- c) 経 度: 北緯 33°22' 59" ; 緯 度: 東経 126°14' 58"
- d) 洞 口: 80~90cm (縦と横の差は 10cm : ほぼ楕円形)
- e) 洞 奥: 20~30cm (縦と横の差は 10cm : ほぼ楕円形)
- e) 深 度: 600+200cm

f) 調査: 1997年10月(照葉樹の極相林と推定)

本報告では、サンプリングした溶岩樹型の化学組成と富士火山を構成する岩石の化学組成とを比較検討した。また、現在知られている溶岩樹型群は富士山群と濟州火山島であるが、富士山から1,150kmも離れた濟州火山島にある翰林溶岩樹型(横臥型と豎型)についても分析・比較を行った。さらに、年代測定を行い、なお、X線回折による格子定数および偏光顕微鏡による造岩鉱物の検索を行ったのである。以上について、一定な結論に達したので、ここに報告する。

## 実験方法

### 2.1 試料調製

本研究に用いた岩石試料は、ハンマーを用いて試料を約1cmのチップに荒砕し、超音波洗浄機を用いて純水で洗浄した。乾燥後、振動ミルにて、タンクステンカーバイト製容器を用い、ヘキサソによる200メッシュ以下への湿式粉碎を行った。粉碎後の粉末について、105°Cで2時間の乾燥を行った。ガラスビートの希釈率は、試料と融剤の量が1:10の割合(試料0.400g:融剤 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (無水四ホウ酸リチウム):4.0g)である。これらを十分に混合させてから、理学電機製全自動卓上型高周波ビートサンプラーを用い、最初の2分間は1200°Cに加熱して、その後、加熱したまま5分間揺動させた。融剤は、マッフル炉によって700°Cで4時間以上乾燥したものを使用した。隔離剤としてはLiIを用いた。

### 2.2 蛍光X線分析

全岩化学組成分析は、蛍光X線分析装置(リガク RIX2100)にてガラスビード法で行い、定量分析はFP法にて行った。測定条件はTable1のとおりである。

### 2.3 X線回折における一次検索の測定条件

測定にはX線管球のRh対陰極管を使用した。試料マスクにはステンレス材の測定試料径(30mmφ)を使用した。測定装置は、理学電機製のX線回折装置RINT-2500(湾曲グラファイト・モノクロメータ使用)である。本装置では、制御コンピュータ(PC-9821)および付属ソフトウェアにより全自動分析を行った。全自動分析におけるピーク・サーチの定性分析の測定条件は、次のとおりである。①X線の管球(Cu)、②発散スリット(1°)、③散乱スリット(1°)、④管電圧(50kV)、⑤管電流(300mA)、⑥走査軸(2θ/θ)、⑦受光スリット(0.15mm)、⑧サンプリング幅(0.020°)、⑨アタッチメント(標準試料ホルダー)、⑩走査速度(2deg./min)、⑪ゴニオメーター(広角ゴニオメーター)および⑫データ処理に用いたX線の波長(1.54056Å)である。

一次検索の定性分析を行うための検索条件は、次のように分類できる。すなわち、①信頼性係数再評価は行う、②平滑化点数は9、③最低一致率は10%、

**Table1** Measurement Condition of X-Ray Fluorescence Analysis on Tree-Molds from Hallim Lava in Cheju Volcanic Island

項目	Si	Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	P
分光結晶	PET	LiF	PET	LiF	LiF	TAP	Ge	TAP	Ge	Ge
検出器	F-PC	SC	F-PC	SC	SC	F-PC	F-PC	F-PC	F-PC	F-PC
測定時間 Peak	40秒	100秒	40秒	40秒						
バック グラウンド (BG)	20	20*2	20	20*2	20*2	20	20	50	20	20
スペクトル	Kα				X線管			縦型Rh管		
管電圧	50kV				管電流			70mA		
フィルター	Out				分析径			30mmφ		
アッテネータ	Out				スリット			Std.		
PHA	微分法				X線通路			真空		

④一致判定許容幅は3、⑤信頼性係数閾値は50、⑥回折角度は $2\theta = 3\sim 80$ 度、⑦検索ファイルは鉱物ファイル、⑧検索方法はファイル1だけ検索、⑨不定成分は水素・酸素と炭素の三元素、⑩元素指定方法は指定元素のみ、⑪主成分は酸素・ナトリウム・マグネシウム・アルミニウム・ケイ素・カルシウムおよび鉄の7元素。⑫信頼性係数計算方法は角度と強度因子とも使用、⑬微成分は、燐・カリウム・チタンの3元素である。

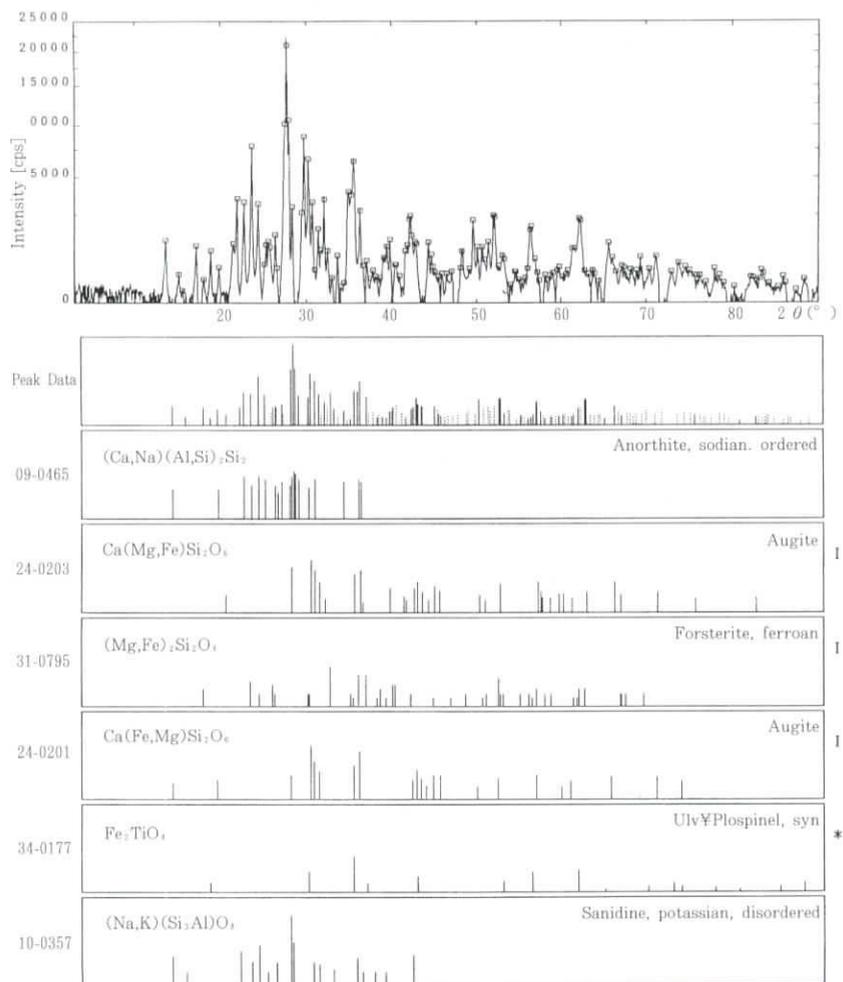
このプログラムに従ってデータの処理を行った。その結果、この定性分析のチャートは**Fig.1** (VT) と**Fig.2** (TT) であり、ピーク・サーチを行ったデータは**Table2** である。ここで、左側は回折のデータであり、このデータに対応するのが翰林溶岩樹型の堅型(中央)や横臥型(右側)である。面指数は回折角度によってそれぞれが異なっている。回折角度 $2\theta(^{\circ})$ と面間隔 $d(\text{\AA})$ は、ブラッグの反射条件式によって決定される。すなわち、国内の報告では、沢・井上・立原(1998)等によって柏原と翰林溶岩樹型のX線分析が行われた。外国の報告では、沢・洪・河野(1998)等によって萬丈窟の溶岩柱および沢(1999)・沢・井上(1999)と沢・井上・河野(20008)等によって萬丈窟の溶岩橋のX線分析が行われた。格子定数の計算には、次のような報告がある。

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\lambda$ は波長( $\text{\AA}$ )で、この回折角度と波長によって計算した面間隔の範囲は、**Table2**のとおりである。

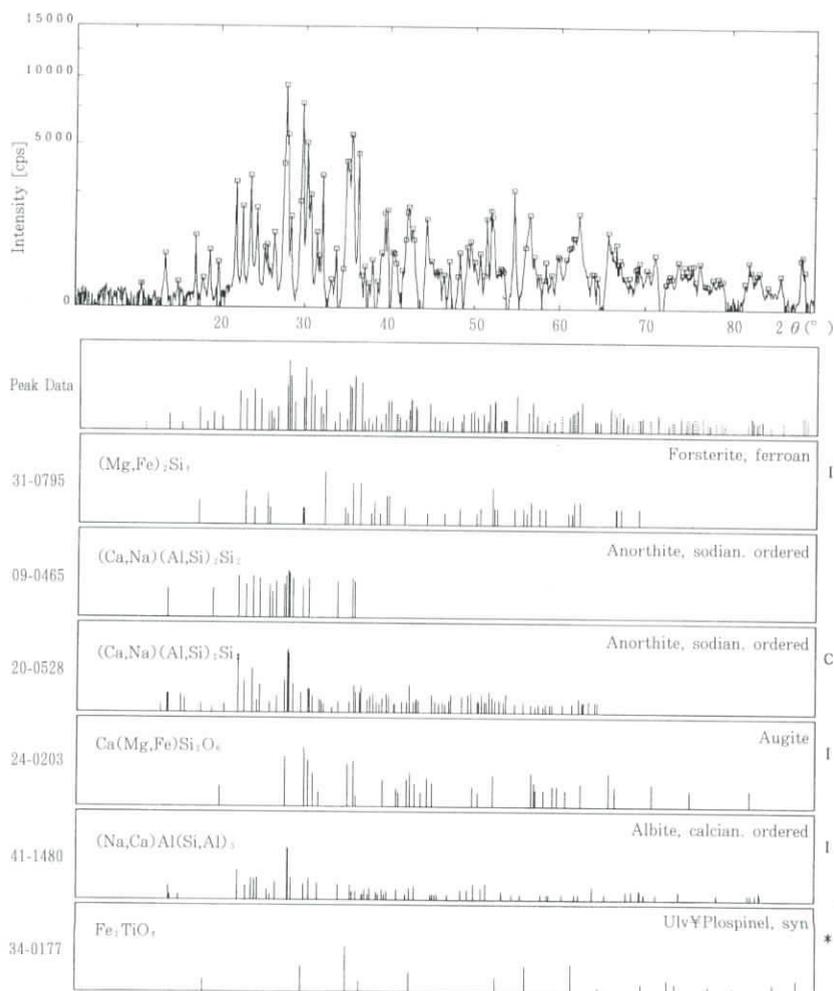
相対強度が15%以上になっているのは**Table2**である。すなわち、ICCDにおけるNo.24-0203のCa(Mg,Fe)Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>というAugiteの単斜晶系を基準とした面指数をピーク順にした。VT(**Fig.1**)における相対強度の①100は(220)面、②42は(-221)面、③32は(310)面、④16は(-311)面、⑤20は(-131)面および⑥32は(-202)面の6面指数である。次にTT(**Fig.2**)における相対強度の①100は(220)面、②86は(-221)面、③56は(310)面、④26は(-311)面、⑤40は(-131)面および⑥62は(-202)面、⑦48は(-112)面、⑧22は(-331)面、⑨20は(150)面、⑩18は(-531)面および⑪20は(060)面の11面指数であるここで、番号①から⑥までの面指

濟州火山の翰林溶岩樹型のX線分析と偏光顕微鏡(沢、井上、金、斐)



**Fig. 1** The Qualitative Analysis of 2<sup>nd</sup> Search-Match of the Vertical Tree-Mold (VT) Sample from Hallim in Cheju Volcanic Island

済州火山の翰林溶岩樹型の X線分析と偏光顕微鏡(沢、井上、金、斐)



**Fig.2** The Qualitative Analysis of 2<sup>nd</sup> Search-Match of the Transverse Tree-Mold (TT) Sample from Hallim in Cheju Volcanic Island

**Table 2** The X-ray Data (Miller Index, Lattice Distance, Half-With and Relative Intensity) of Lava Tree-Mold Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island

番号	面指数			翰林溶岩樹型(堅型)(VT)			翰林溶岩樹型(横臥型)(TT)		
	h	k	l	面間隔	半価幅	相対強度	面間隔	半価幅	相対強度
	h	k	l	d	$\Delta$ (°)	I/I <sub>0</sub>	d	$\Delta$ (°)	I/I <sub>0</sub>
1	0	2	0	4.4713	0.212	2.0	4.4468	0.235	6.0
2	2	2	0	3.2155	0.188	100.0	3.2155	0.212	100.0
3	-2	2	1	3.0035	0.212	42.0	3.0055	0.259	86.0
4	3	1	0	2.9550	0.188	32.0	2.9512	0.235	56.0
5	-3	1	1	2.9080	0.212	16.0	2.9117	0.259	26.0
6	1	3	0	2.8448	0.212	10.0	2.8430	0.188	12.0
7	-1	3	1	2.5673	0.259	20.0	2.5545	* * *	40.0
8	-2	0	2	2.5225	0.329	32.0	2.5225	* * *	62.0
9	-1	1	2	2.4715	0.188	14.0	2.4715	0.188	48.0
10	3	1	1	2.3030	0.282	4.0	2.3008	* * *	8.0
11	-3	1	2	2.2244	* * *	4.0	2.2192	* * *	8.0
12	1	1	2	2.2036	0.188	2.0	2.2077	0.188	6.0
13	3	3	0	2.1563	* * *	6.0	2.1523	* * *	10.0
14	-3	3	1	2.1387	* * *	12.0	2.1378	0.353	22.0
15	-4	2	1	2.1130	* * *	6.0	2.1083	0.165	10.0
16	4	2	0	2.1064	* * *	6.0	2.0386	0.259	18.0
17	0	4	1	2.0421	0.235	6.0	2.0145	0.400	6.0
18	2	4	0	2.0188	* * *	4.0	1.9919	0.235	4.0
19	5	1	0	1.8364	0.259	12.0	1.8364	0.306	10.0
20	-3	3	2	1.8179	0.212	6.0	1.8206	0.165	6.0
21	1	5	0	1.7515	0.165	12.0	1.7578	0.165	20.0
22	-5	3	1	1.6274	* * *	10.0	1.6279	0.329	18.0
23	4	4	0	1.6153	0.212	4.0	1.6143	0.165	6.0
24	-2	2	3	1.6081	* * *	2.0	1.5999	0.212	4.0
25	5	1	1	1.5843	* * *	2.0	1.5848	0.235	2.0
26	6	0	0	1.5623	0.212	2.0	1.5628	0.259	4.0
27	3	5	0	1.5495	0.188	2.0	1.5443	* * *	6.0
28	-6	2	1	1.5272	* * *	2.0	1.5222	0.165	6.0
29	0	6	0	1.4887	0.400	12.0	1.4900	0.212	20.0
30	2	6	0	1.4208	0.212	6.0	1.4204	0.212	12.0
31	-3	5	2	1.4049	0.165	2.0	1.4079	* * *	6.0
32	-7	1	2	1.3360	0.329	2.0	1.3363	0.188	4.0
33	-4	6	1	1.2636	0.165	2.0	1.2633	* * *	4.0

数は、VTとTTのは共に一致しているが、他の面指数は異なっているのである。TTの相対強度数はVTより多い。

半価幅が $0.25^\circ$ 以上の面指数 (**Table2**) は、VT (**Fig.2**) では、半価幅の①0.259は(-131)面、②0.329は(-202)面、③0.282は(311)面、④0.259は(510)面、⑤0.400は(060)面および⑥0.329は(-712)面の6面指数である。次にTT (**Fig.2**) では、半価幅の①0.259は(-221)面、②0.259は(-311)面、③0.353は(-331)面、④0.259は(420)面、⑤0.400は(041)面、⑥0.306は(510)面、⑦0.329は(-531)面および⑧0.259は(600)面の8面指数である。ここで、面指数(510)は、VTとTTのは共に一致しているが、他の面指数は異なっているのである。TTの相対強度数はVTより多い。

#### 2.4 X線回折における二次検索の測定条件

全自動分析を行った二次検索の定性分析の測定条件は、次のとおりである。  
 ①X線の管球(Cu)、②発散スリット(1deg.)、③散乱スリット(1deg.)、  
 ④管電圧(50kV)、⑤管電流(300mA)、⑥走査軸( $2\theta/\theta$ )、⑦受光スリット(0.15mm)、⑧サンプリング幅( $0.020^\circ$ )、⑨アタッチメント(標準試料ホルダー)、⑩走査速度( $2^\circ/\text{min}$ )、⑪ゴニオメーター(RINT2000広角ゴニオメーター)および⑫データ処理に用いたX線の波長( $1.54056\text{\AA}$ )である。

#### 2.5 K-Ar法による年代測定

火山洞窟学を研究する時に、洞窟がいつ形成されたのを知りたく、興味と楽しみをもつのである。地質時代に形成された洞窟は、地質学の研究対象になるため、地質学的の層序学的手法を使って年代を推定する。たとえば、石灰岩分布地域では、石灰岩洞窟・鐘乳洞窟が発達する。石灰岩洞窟の成分は、海棲の微生物の遺骸や生活跡が集積したものであり、その中に含まれる示準化石を用いて時代を決定して行く。一方、溶岩洞窟は、日本の富士山や韓国の濟州道のように、火山から噴出する溶岩流の内部によって形成される。その溶岩の絶対年代測定を行うことによって洞窟形成の時期が確定できる。本文では、地球年代科学で利用されている放射年代測定法の中で、カリウム-アルゴン(K-Ar)

法を用いて行った。カリウム-アルゴン (K-Ar) 法とは、放射性核種の親元素と娘元素の量比の時間的変化を利用する方法である。この場合、親元素は  $K_{40}$  であり、娘元素は  $Ar_{40}$  である。したがって、正確に言えば、 $K_{40}$ - $Ar_{40}$  法と呼ばれるべきである。便宜的に両方の 40 を省き K-Ar 法と呼んでいるのである。時系列による K-Ar 法測定には、次のような理由がある。自然界には、 $K_{39}$  (93.258%)、 $K_{40}$  (0.012%) および  $K_{41}$  (6.730%) のカリウム同位体もっている。この中で、 $K_{40}$  (0.012%) は、極微量の放射性同位元素であり、自然に崩壊して約 89.5%は  $Ca_{40}$ 、残りの 10.5%は  $Ar_{40}$  には壊変する。 $K_{40}$ - $Ar_{40}$  法は、時間の関数として微分方程式によって解明できる。

### 2.5 a 年代測定試料の調整

萬丈窟洞窟における溶岩双子石柱と溶岩ブリッジについて、K-Ar 法を用いて年代測定を実施した。その手順は次のようである。

- ① 試料を岩石カッターで厚さ 5mm 程度の薄い板状にスライスし、洗浄・乾燥させる。
- ② 板状の試料を鉄乳鉢で粉碎し、60-80 メッシュに整粒する。
- ③ 整粒したものをイオン交換水で超音波洗浄機を用いて洗浄・乾燥させる。
- ④ 乾燥後、電磁分離機を用いて斑晶と強磁性鉱物を除去する。
- ⑤ 除去した試料を、沸騰した蒸留水で約 3 昼夜も洗浄・乾燥させる。
- ⑥ その一部をアルゴン (Ar) の測定用とする。
- ⑦ その残りはメノウの乳鉢を用いて粉末化し、カリウム (K) 定量に使用した。

### 2.5 b カリウム (K) 定量分析

カリウム (K) は、分光光度計を用いて炎光分光分析法によって定量した。定量分析にあたっては、干渉剤として 2000ppm のセシウム (Cs) を使用した。1 回のカリウム (K) の定量には、約 50-100mg の粉末試料を使用した。分析には、試料の不均質さや定量の再現性等を確認するため、1 試料につき最低 2 回以上を行い、相対誤差 2% 以内の分析値の平均を年代計算に使用した。

### 2.5c アルゴン (Ar) 同位体比の測定

アルゴン (Ar) は、専用の質量分析計を用い、質量数 38 のアルゴン ( $^{38}\text{Ar}$ ) をトレーサー (スパイク) とした同位体希釈法によって測定した。試料の測定にあたっては、同一条件で標準試料を測定し、その中央値との誤差が 1% 以内であることを確認した。年代計算に使用した壊変定数は Steiger&Jager(1977) の  $\lambda e = 0.581 \cdot 10^{-10}/\text{year}$ 、 $\lambda \beta = 4.962 \cdot 10^{-10}/\text{year}$  および  $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.0001167$  を用いた。ここで、定数  $\lambda e$  は  $^{40}\text{K}$  から  $^{40}\text{Ar}$  への壊変定数、定数  $\lambda \beta$  は  $^{40}\text{K}$  から  $^{40}\text{Ca}$  への壊変定数および  $^{40}\text{K}/\text{K}$  は K の中に  $^{40}\text{K}$  の含有率を示している。

## 3 定量分析の結果と格子定数の解析

### 3.1 定量分析と結晶構造

定量分析値 (重量百分率 wt.%) はグループ分析によると 10 成分である。VT では  $\text{SiO}_2 = 47.50$ ,  $\text{TiO}_2 = 2.58$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.40$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 12.60$ ,  $\text{MnO} = 0.16$ ,  $\text{MgO} = 8.63$ ,  $\text{CaO} = 9.12$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 2.95$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1.54$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.51$  である。さらに、TT では、 $\text{SiO}_2 = 47.40$ ,  $\text{TiO}_2 = 2.58$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.60$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 12.60$ ,  $\text{MnO} = 0.16$ ,  $\text{MgO} = 8.57$ ,  $\text{CaO} = 9.13$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 2.93$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1.48$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.60$  である。溶岩樹型に近い成分の物質番号 ICCD (VT は **Table3** と **Fig.1**; TT は **Table4** と **Fig.2**) は、No.09-0465 の (Ca, Na)  $(\text{Si}, \text{Al})_2\text{Si}_2\text{O}_8$  という Anorthite の三斜晶系、No.20-0528 の (Ca, Na)  $(\text{Si}, \text{Al})_2\text{Si}_2\text{O}_8$  という Anorthite の三斜晶系、No.24-0203 の Ca (Mg, Fe)  $\text{Si}_2\text{O}_6$  という Augite の単斜晶系、No.31-0795 の (Mg, Fe) $_2\text{SiO}_4$  という Forsterite の斜方晶系、No.34-0177 の  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  という Ulvospinel の立方晶系および No.41-1480 の (Ca, Na)  $\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$  という Albite の三斜晶系等である。今回は単斜晶系の No.24-0203 を引用した単斜晶系の数値解析を行った格子定数である。

### 3.2 単斜晶系の格子定数の決め方

単斜晶系の格子定数 (沢ら、1996・1998・2000) は、面間隔 (d) と面指数

**Table 3** The Qualitative Analysis of  $I^*$  Search-Match for the Vertical Lova Tree-Mold (VT) Sample from Hallim in Cheju Volcanic Island

	Card No.	Chemical Formula	Mineral Name	Standard Number	Agreement Number	Reliability Factor	Crystal Structure
1	09-0465	$(Ca,Na)(Al,Si)_2Si_2O_8$	Anorthite, sodian, ordered	19	17	714	Triclinic
2	24-0203	$Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$	Augite	36	30	674	Monoclinic
3	31-0795	$(Mg,Fe)_2SiO_4$	Forsterite, ferroan	40	25	659	Orthorhombic
4	24-0201	$Ca(Mg,Fe)Si_2O_6$	Augite	24	15	552	Monoclinic
5	34-0177	$Fe_2TiO_4$	Ulvöspinel,sys	16	10	508	Cubic
6	10-0357	$Na,K(Si,Al)O_8$	Sanidine,potassian, disordered	17	11	503	
7	20-0528	$(Ca,Na)(Al,Si)_2Si_2O_8$	Anorthite, sodian, ordered	92	58	702	Triclinic
8	18-1202	$(Ca,Na)(Al,Si)_2O_8$	Anorthite, sodian, interme	52	44	675	Triclinic
9	41-1486	$CaAl_2Si_2O_8$	Anorthite, ordered	82	48	616	Triclinic
10	41-1481	$(Ca,Na)(Si,Al)_2O_8$	Anorthite, sodian, ordered	66	45	606	Triclinic

Plus 35 chemical composition to reliability factor 435

**Table 4** The Qualitative Analysis of 1<sup>st</sup> Search-Match for the Transverse Lava Tree-Mold (TT) Sample from Hallim in Cheju Volcanic Island

Card No.	Chemical Formula	Mineral Name	Standard Number	Agreement Number	Reliability Factor	Crystal Structure
1	(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Forsterite, ferroan	40	30	776	Othorhombic
2	(Ca,Na)(Al,Si) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Anorthite, sodian, ordered	19	16	707	Triclinic
3	(Ca,Na)(Al,Si) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Anorthite, sodian, ordered	92	56	691	Triclinic
4	Ca(Mg,Fe)Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Augite	36	27	658	Monoclinic
5	(Ca,Na)Al(Si,Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Albite, Calcian, ordered	71	47	586	Triclinic
6	Fe <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub>	Ulvospinel,sys	16	10	515	Cubic
7	(Ca,Na)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Anorthite, sodian, interme	52	45	690	Triclinic
8	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Anorthite, ordered	82	54	652	Triclinic
9	(Na,Ca)(Al,Si) <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Albite, calcian, disordered	19	10	649	Triclinic
10	Na(Si,Al)O <sub>3</sub>	Albite, disordered	42	28	636	Triclinic

Plus 35 chemical composition to reliability factor 435

(hkl) によって求められる。これらの関係式は、次のとおりである。

$$\frac{1}{d(hkl)^2} = \frac{h^2}{A^2 \sin^2 \beta} + \frac{k^2}{B^2} + \frac{l^2}{C^2 \sin^2 \beta} - \frac{2hlc \cos \beta}{AC \sin^2 \beta} \dots\dots\dots (2)$$

面間隔 [d (hkl)] は、ブラッグの反射条件式の面指数 (hkl) と格子定数 (A、B、C) によって求められる。面指数 (hkl) は、**Table1** のように決定し、格子定数を求めるためにデータシートを表示した。**Table1** における面間隔 (d) と面指数 (hkl) から最小 2 乗法によって、格子定数 (A、B、C) が求められる仕組みを行った。計算の手順は式 (1) を書きかえると次のようになる。式 (2) の右辺第 1 項より第 4 項の未知の部分それぞれ  $X_1$ 、 $\dots$ 、 $X_4$  と略記し、これらを最小 2 乗法によって処理する。次に確定となった  $X_1$ 、 $\dots$ 、 $X_4$  を使って、条件 (\*) の基で A、B、C、 $\beta$  を次のように連立させて求める。

$$1/(A^2 \sin^2 \beta) = X_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$1/B^2 = X_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$1/(C^2 \sin^2 \beta) = X_3 \dots\dots\dots (5)$$

$$-2 \cos \beta / (AC \sin^2 \beta) = X_4 \dots\dots\dots (6)$$

ここでは、(\*) の格子定数 A、B、C は正の実数を  $\pi/2 < \beta < \pi$  として表現する。

### 3.2 $\alpha$ 格子定数 (B) の求め方

式 (4) を  $B^2 = 1/X_2$  と書き換えると、

$$B = \sqrt{1/X_2} \dots\dots\dots (7)$$

条件 (\*) から次のように格子定数 B が求められる。

### 3.2 $\beta$ 軸角 ( $\beta$ ) の求め方

$X_1$  と  $X_3$  は式 (3) と (5) である。この式 (3) と (5) や条件 (\*) より次式のように書きかえられる。

$$\sqrt{1/X_1 X_3} = 1/(AC \sin^2 \beta) \dots\dots\dots (8)$$

この等式の右辺を式(6)の左辺と比べれば、つぎのような等式が、

$$-2 \cos \beta \sqrt{1/X_1 X_3} = X_4 \dots\dots\dots (9)$$

のように得られる。それから式(9)を書きかえると式(10)のようになる。

$$\cos \beta = -(1/2) \{X_4 / (\sqrt{X_1 X_3})\} \dots\dots\dots (10)$$

また、 $\cos \beta$ から式(11)のような軸角の $\sin^2 \beta$ が求まる。

$$\sin^2 \beta = 1 - \cos^2 \beta = (1 - 4^{-1}) (X_4^2 / X_1 X_3) \dots\dots\dots (11)$$

したがって、

$$\beta = \cos^{-1} (1 - 2^{-1} (X_4^2 / X_1 X_3)) \dots\dots\dots (12)$$

式(11)より軸角( $\beta$ )は $\pi/2 < \beta < \pi$ の範囲で表現できる。

### 3.2 $\gamma$ 格子定数(A)の求め方

式(3)を $A^2$ について解くと、次のようになる。

$$\begin{aligned} A^2 &= X_1^{-1} (1/\sin^2 \beta) = 4 X_1 X_3 / \{X_4 (4 X_1 X_3 - X_4^2)\} \\ &= 4 X_3 / (4 X_1 X_3 - X_4^2) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

したがって、条件(\*)から格子定数Aは式(14)のように求められる。

$$A = 2 \sqrt{X_3 / (4 X_1 - X_4^2)} \dots\dots\dots (14)$$

条件(\*)から格子定数Aは式(14)のように求められる。

### 3.2 $\delta$ 格子定数(C)の求め方

式(5)を $C^2$ について解くと $A^2$ の場合と同様に式(15)が得られる。

$$C^2 = 4 X_1 / (4 X_1 X_3 - X_4^2) \dots\dots\dots (15)$$

したがって、

$$C^2 = \sqrt{X_1 / (4 X_1 X_3 - X_4^2)} \dots\dots\dots (16)$$

条件 (\*) から格子定数Cは、式 (16) として与えられる。

### 3.3 手計算による連立方程式の解法 (クラームルの公式)

面間隔 (d) から  $1/d(hkl)^2 = \mu$ 、面指数 (hkl) から  $h^2 = \alpha$ 、 $k^2 = \beta$ 、 $l^2 = \gamma$  および  $hk = \delta$  と書くと  $X_1$ 、 $\dots$ 、 $X_4$  を求める正規方程式の係数から作られる行列式 (沢ら、1996・1998・2000) は次のようになる。

$$\Delta = \begin{vmatrix} \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \gamma^2 & \Sigma \gamma \delta \\ \Sigma \alpha \delta & \Sigma \beta \delta & \Sigma \gamma \delta & \Sigma \delta^2 \\ \Sigma \alpha^2 & \Sigma \alpha \beta & \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \alpha \delta \\ \Sigma \alpha \beta & \Sigma \beta^2 & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \beta \delta \end{vmatrix} \dots\dots\dots (17)$$

この正規方程式から作られる行列式 (17) は、VT と TT の係数では、

$$\Delta = \begin{vmatrix} 8722 & 2458 & 514 & -1268 \\ 2458 & 7138 & 282 & -516 \\ 514 & 282 & 204 & -218 \\ -1268 & -516 & -218 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (17A)$$

=2.02737E+12

である。まず、式 (3) の  $X_1$  を求めるクラームルの公式とその値は、式 (18) のようになる。

$$X_1 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Sigma \alpha \mu & \Sigma \alpha \beta & \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \alpha \delta \\ \Sigma \beta \mu & \Sigma \beta^2 & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \beta \delta \\ \Sigma \gamma \mu & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \gamma^2 & \Sigma \gamma \delta \\ \Sigma \delta \mu & \Sigma \beta \delta & \Sigma \gamma \delta & \Sigma \delta^2 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

この正規方程式から作られる行列式 (18) は、 $X_{1VT}$  と  $X_{1TT}$  の係数では、

$$X_{1VT} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 135.278 & 2458 & 514 & -1268 \\ 122.587 & 7138 & 282 & -516 \\ 14.957 & 282 & 204 & -218 \\ -23.464 & -516 & -218 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (18_{VT})$$

$$= 0.011349$$

$$X_{1TT} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 135.678 & 2458 & 514 & -1268 \\ 122.864 & 7138 & 282 & -516 \\ 14.992 & 282 & 204 & -218 \\ -23.495 & -516 & -218 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (18_{TT})$$

$$= 0.011402$$

のようになる。式(18)の $X_{1VT}$ はと $X_{1TT}$ は0.011349と0.011402である。つぎに、式(4)の $X_2$ を求めるクラームルの公式とその値は、式(19)ようになる。

$$X_2 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Sigma \alpha^2 & \Sigma \alpha \mu & \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \alpha \delta \\ \Sigma \alpha \beta & \Sigma \beta \mu & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \beta \delta \\ \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \gamma \mu & \Sigma \gamma^2 & \Sigma \gamma \delta \\ \Sigma \alpha \delta & \Sigma \delta \mu & \Sigma \gamma \delta & \Sigma \delta^2 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (19)$$

この正規方程式から作られる行列式(19)は、 $X_{2VT}$ と $X_{2TT}$ の係数では、

$$X_{2VT} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 8722 & 135.278 & 514 & -1268 \\ 2458 & 122.587 & 282 & -516 \\ 514 & 14.957 & 204 & -218 \\ -1268 & -23.464 & -218 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (19_{VT})$$

$$= 0.012544$$

$$X_{2\pi} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 8722 & 135.678 & 514 & -1268 \\ 2458 & 122.864 & 282 & -516 \\ 514 & 14.992 & 204 & -218 \\ -1268 & -23.495 & -218 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (19_{\pi})$$

$$= 0.012570$$

のようになる。式(19)の $X_{2VT}$ はと $X_{2\pi}$ は0.012544と0.012570である。式(5)の $X_3$ を求めるクラームルの公式とその値は、式(20)のようになる。

$$X_3 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Sigma \alpha^2 & \Sigma \alpha \beta & \Sigma \alpha \mu & \Sigma \alpha \delta \\ \Sigma \alpha \beta & \Sigma \beta^2 & \Sigma \beta \mu & \Sigma \beta \delta \\ \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \delta \mu & \Sigma \gamma \delta \\ \Sigma \alpha \delta & \Sigma \beta \delta & \Sigma \gamma \mu & \Sigma \delta^2 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

この正規方程式から作られる行列式(21)は $X_{3VT}$ と $X_{3\pi}$ の係数では、

$$X_{3VT} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 8722 & 2458 & 135.278 & -1268 \\ 2458 & 7138 & 122.587 & -516 \\ 514 & 282 & 14.957 & -218 \\ -1268 & -516 & -23.464 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (20_{VT})$$

$$= 0.040193$$

$$X_{3\pi} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 8722 & 2458 & 135.678 & -1268 \\ 2458 & 7138 & 122.864 & -516 \\ 514 & 282 & 14.992 & -218 \\ -1268 & -516 & -23.495 & 514 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (20_{\pi})$$

$$= 0.040385$$

のようになる。式(20)の $X_{3VT}$ はと $X_{3\pi}$ は0.040193と0.040385である。最後に、式(6)の $X_4$ の値を求めるクラームルの公式とその値は、式(21)のようになる。

$$X_4 = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} \Sigma \alpha^2 & \Sigma \alpha \beta & \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \delta \mu \\ \Sigma \alpha \beta & \Sigma \beta^2 & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \delta \mu \\ \Sigma \alpha \gamma & \Sigma \beta \gamma & \Sigma \gamma^2 & \Sigma \delta \mu \\ \Sigma \alpha \delta & \Sigma \beta \delta & \Sigma \gamma \delta & \Sigma \delta \mu \end{vmatrix} \dots\dots\dots (21)$$

この正規方程式から作られる行列式 (21) は、 $X_{4VT}$  と  $X_{4TT}$  の係数では、

$$X_{4VT} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 8722 & 2458 & 514 & 135.278 \\ 2458 & 7138 & 282 & 122.587 \\ -1268 & -516 & -218 & 14.957 \\ 514 & 282 & 204 & -23.464 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (21_{VT})$$

= 0.011987

$$X_{4TT} = \frac{1}{\Delta} \begin{vmatrix} 8722 & 2458 & 514 & 135.678 \\ 2458 & 7138 & 282 & 122.864 \\ 514 & 282 & 204 & 14.992 \\ -1268 & -516 & -218 & -23.495 \end{vmatrix} \dots\dots\dots (21_{TT})$$

= 0.012165

のようになる。式 (21) の  $X_{4VT}$  はと  $X_{4TT}$  は 0.011987 と 0.012165 である。

### 3.4 単斜晶系の格子定数

このグループ分析による重量百分率からの格子定数Aは  $A_{VT}$  と  $A_{TT}$  に関して、式 (14) から式 (22) のように求められる。

$$A_{VT} = 2\sqrt{0.040193 / (4 \times 0.011349 \times 0.040193 - 0.011987^2)}$$

$$= 9.7799 \text{ \AA} \dots\dots\dots (22_{VT})$$

$$A_{TT} = 2\sqrt{0.040385 / (4 \times 0.011402 \times 0.040385 - 0.012165^2)}$$

$$= 9.7656 \text{ \AA} \dots\dots\dots (22_{TT})$$

格子定数Bは、式 (7) から式 (23) のように求められる。

$$B_{VT} = \sqrt{1/0.012544} = 8.9286 \text{ \AA} \dots\dots\dots (23_{VT})$$

$$B_{TT} = \sqrt{1/0.012570} = 8.9193 \text{ \AA} \dots\dots\dots (23_{TT})$$

格子定数Cは $C_{VT}$ と $C_{TT}$ に関して、式(16)から式(24)のように求められる。

$$C_{VT} = 2\sqrt{0.011349/(4 \times 0.011349 \times 0.040193 - 0.011987^2)}$$

$$= 5.1968 \text{ \AA} \dots\dots\dots (24_{VT})$$

$$C_{TT} = 2\sqrt{0.011402/(4 \times 0.011402 \times 0.040385 - 0.012165^2)}$$

$$= 5.1899 \text{ \AA} \dots\dots\dots (24_{TT})$$

軸角( $\beta$ )は $\beta_{VT}$ と $\beta_{TT}$ に関して式(12)から式(25)のように求められる。

$$\beta_{VT} = \cos^{-1}(1 - 2^{-1})(0.011987/\sqrt{0.011349 \times 0.040193})$$

$$= 106.30^\circ \dots\dots\dots (25_{VT})$$

$$\beta_{TT} = \cos^{-1}(1 - 2^{-1})(0.012165/\sqrt{0.011402 \times 0.040193})$$

$$= 5.1899 \text{ \AA} \dots\dots\dots (25_{TT})$$

## 4. 考 察

### 4.1 K-Ar 法による年代測定

濟州火山における年代測定では、破壊定数はSteiger & Jager (1977) の $\lambda e=0.581 \times 10^{-10}/\text{year}$ 、 $\lambda \beta=4.962 \times 10^{-10}/\text{year}$  および $40K/K=0.0001167$ を使用した。一覧表においては、Sample Nameは試料名、Potassiumはカリウム、Rad.Argon 40は放射性起源の質量数40のアルゴン、K-Ar ageはカリウム-アルゴン年代、Maは百万年前およびNon Rad. Arは非放射性起源の質量数40のアルゴンである。その結果、濟州火山帯の中で知られている年代測定値は、今から74万年前の山房山の形成が古い。濟州の最高所である漢拏山頂にある白鹿潭は、新しく2万5千年前である(Wonら、1986)。その中間期に萬丈窟にある双子溶岩石柱(42万年前)がある(沢ら、1989・1990・

1991)。さらに、双子溶岩石柱と白鹿潭形成期の中間に、萬丈窟にある溶岩橋が、19 万年前に形成している(沢ら、1999・2000)。翰林堅型溶岩樹型の場合は、長い期間にわたって放置していたから正確な年代は得られなかったのである。K-Ar age はカリウム-アルゴン年代として  $Ar^{40}/Ar^{36}=292.9 \pm 5.0$  Ma であることが証明されたのである。

#### 4.2 全岩化学組成および考察

濟州火山における火山噴出物の化学組成の分析は、李商萬(1966)・元鐘寬(1975)および李文遠、(1982)によって報告されている。一方、萬丈窟の溶岩石柱に関する成分分析として、化学分析値は沢・片山(1989)、FD法による分析値は沢・高(1989)と沢(1990)、物理定数法による分析値は沢・洪・村田(1989)および蛍光X線分析による分析値は沢・村田・洪・鹿島(1989)と沢・村田・河野(1996)によって報告されている。さらに、萬丈窟の溶岩ブリッジに関する成分分析として、蛍光X線分析による分析値は沢(1999)、沢・井上(1999)、沢・川村(2000)と沢・井上・河野(2000)によって報告されている。

翰林溶岩樹型群(VTとTT)の溶岩樹型2試料についての蛍光X線分析に

**Table5** K-Ar Age Determination of Lava Column and Bridge in Manjang-gul Cave and Lava-Tree in Hallim

Sample Name	Potassium (wt%)	Rad. Argon40 ( $10^6$ ccSTP/g)	K-Ar age (Ma)	Non Rad. Ar (%)	References
SAWA-61-102 (lava column)	$0.81 \pm 0.02$	$0.09 \pm 0.21$ $0.13 \pm 0.13$ $0.15 \pm 0.14$	$0.03 \pm 0.07$ $0.04 \pm 0.04$ $0.05 \pm 0.05$	99.3 98.5 98.4	OKADA(1991) SAWA(1990)
SAWA-62	$0.91 \pm 0.03$	$1.49 \pm 1.50$ $1.12 \pm 1.48$	$0.42 \pm 0.42$ $0.32 \pm 0.42$	98.5 98.9	OKADA(1991) SAWA(1990)
SAWA-3F (Bridge)	$0.321 \pm 0.016$	$0.23 \pm 0.17$	$0.19 \pm 0.14$	97.7	SAWA(1999) SAWA(2000)
SAWA-Tate (lava Tree)	$1.445 \pm 0.029$	...	$Ar^{40}/Ar^{36} = 292.9 \pm 5.0$	...	This Paper

よる全岩化学組成は、萬丈窟の溶岩石柱と溶岩橋、濟州火山島および富士火山を合わせて **Table 6** に示した。富士火山における洞窟内の火山噴出物の  $\text{SiO}_2$  組成範囲は、48.0 (八幡穴洞窟) ~ 51.3 (須走胎内洞窟) wt.% であり、濟州火山島における火山噴出物の  $\text{SiO}_2$  組成範囲は、41.20 ~ 66.31 wt.% で、さらに、萬丈窟の溶岩 (沢・井上、1990・1996・1999・2000) の  $\text{SiO}_2$  組成範囲は、50.9 wt.% である。富士火山と濟州火山島における火山噴出物の  $\text{SiO}_2$  組成範囲を比較した。その結果、翰林熔岩樹型試料 (VT と TT) の  $\text{SiO}_2$  は、最小含有量の 47.45 wt.% で玄武岩質 (塩基性岩) である。濟州火山は、海底からの隆起物と火山による混合の噴出物であるから広い範囲であることが考えられる。富士火山において 2 番目に多い噴出物 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) は 13.19 ~ 25.20 wt.% の範囲である。熔岩樹型の VT と TT は、共に 12.60 wt.% である。VT と TT の含有率は富士火山や濟州火山島から比較すれば、平均値よりやや少ない値である。

#### 4.3 含有鉱物および考察

一般に熔岩洞窟とされるものには、玄武岩に形成されることが多く、安山岩にも一部が存在する。玄武岩には、カンラン石、普通輝石および斜長石の鉱物が含有する。安山岩には、斜方輝石、普通輝石、斜長石および石英の鉱物が含有する。これらの鉱物が、富士山地域の熔岩樹型にどの程度に含まれているかを知るために次のように検討を行った。定性分析は、蛍光X線分析結果の元素情報を参考にして解析を行った。定性分析の結果、いずれの試料も主成分として Anorthite が同定された。しかしながら、元素情報および CD-ROM JCPDS カード記載のピークに対してピークがシフトしていることを考慮すると、JCPDS カード記載の構成元素に対して他の元素が固溶しているものと思われる。したがって、Anorthite は、JCPDS カードに相当するかについては断定できない。そのため、比較のプロファイルの近い物質を定性分析結果に記載した。

定性分析結果を記載した VT と TT における各鉱物は、それぞれ **Table 3** および **Table 4** に表示した。VT と TT の信頼係数では、斜長石 (JCPDS カードの No.09-0465 にある Anorthite・三斜晶系の 714 と 707)、カンラン石

**Table 6** Representative XRF Analysis Results (wt.%) for the Lava in the Tree-Mold (VT and TT) Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island

NAME	翰林溶岩樹型 (KT)			萬丈窟 (MC)	富士火山	濟州火山
	豎型(VT)	横臥(TT)	平均			
SiO <sub>2</sub>	47.50	47.40	47.45	50.99	48.00~51.30	41.20~66.31
TiO <sub>2</sub>	2.58	2.58	2.58	2.15	1.03~ 1.97	0.00~ 3.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.40	14.60	14.50	15.17	15.83~19.03	13.19~25.20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	12.60	12.60	12.60	12.56	1.60~13.70	0.67~14.24
MnO	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15~ 0.29	0.00~ 1.53
MgO	8.63	8.57	8.60	6.15	3.80~ 6.76	0.00~10.61
CaO	9.12	9.13	9.13	8.06	0.77~10.42	1.07~12.76
Na <sub>2</sub> O	2.95	2.93	2.94	3.27	2.29~ 3.16	1.41~ 8.09
K <sub>2</sub> O	1.54	1.48	1.51	1.04	0.52~ 1.16	0.05~ 5.63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.51	0.60	0.56	0.30	0.08~ 0.54	0.00~ 1.71

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> \* : Total Fe as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

(JCPDS カードの No.31-0795 にある Forsterite・斜方晶系の 659 と 776) および灰長石 (JCPDS カードの No.18-1202 にある Anorthite・三斜晶系の 675 と 690) である。これらの造岩鉱物は、富士火山における青木ヶ原や柏原溶岩樹型と似ているのに、萬丈窟にある溶岩柱と溶岩橋とは異なっている。その他、存在の可能性のある物質を記載したが、これらもピークのシフトやピーク強度比が異なることが確認された。これら定性分析結果に記載した物質も他元素の固溶や固溶に伴う構造の変化が考えられる。

#### 4. 4 造岩鉱物の検索方法の偏光顕微鏡

濟州火山灰にある造岩鉱物の検索方法として、富士火山や濟州火山にある洞窟に関する溶岩について偏光顕微鏡写真を撮影した。岩石を切断してから、表面を研磨した。それからスライドガラスへの貼る付けを行った。薄片岩石を切断してから薄片の厚さを 30 μm 程度まで研磨し、カバーガラスの貼る付けを行った。薄片写真の撮影として、岩石薄片を岩石顕微鏡にセットして、オーブ

ソニコル写真とクロスニコル写真を 47 倍で表示した。その結果、かんらん石 (OI)・輝石 (Px)・単斜輝石 (CPx)・斜方輝石 (OPx)・斜長石 (PI)・石基 (Matrix)・穴 (None) および発砲 (Pore) 等が見られたのである。偏光顕微鏡写真から **Fig.3** に照合すれば、有色鉱物のかんらん石 (OI) および無色鉱物の斜長石 (PI) が含まれていることが理解できる。これらは、X線回折図形からも判明されたのである。しかしながら、X線回折図形からは色彩・表面・形状の判定は不可能である。

#### 4.5 ケイ酸と斑状組織との関係

ケイ酸の含有率を基準として、アルカリ性 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )、カリウム ( $\text{K}_2\text{O}$ )、有色鉱物および斑状組織との関係を解析している。その中で、ケイ酸の含有率とアルカリ性の関係として、( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) が多くなるとそれぞれの成分が異なることが分かる。火山・溶岩洞窟にあるケイ酸の含有率は、約 45 (玄武岩) ~ 53 (玄武岩質安山岩) wt.% の範囲である。その結果、**Table7** のような関係が得られる (国立中央青年の家、1996)。

ケイ酸の含有率と斑状組織との関係を分類できる。玄武岩には、性質は苦鉄質・塩基性であり、色彩は濃厚な色、深成岩 (等粒状組織) は班礫岩であり、深成岩は粗粒玄武岩である。したがって、斑状組織は、富士火山や濟州火山にある玄武岩である。翰林溶岩樹型を形成しているケイ酸の含有率は、約 47.5wt.% であることから解釈すれば、低い粘性をもった玄武岩質の極小噴火であり、1200°C 程度である。

**Table7** Relation between  $\text{SiO}_2$  Composition VS Eruption, Rock-Forming Minerals, Temperature and Viscous

$\text{SiO}_2$ (wt. %)	Eruption	Rock-Forming Minerals	Temperature	Viscous
45~52	極小噴火	玄武岩質	高い温度 (1200°C)	低い粘性
57~67	小噴火	安山岩質	中間温度 (1000~1200°C)	中間粘性
69~	大噴火	流紋岩質	低い温度 (800~000°C)	高い粘性



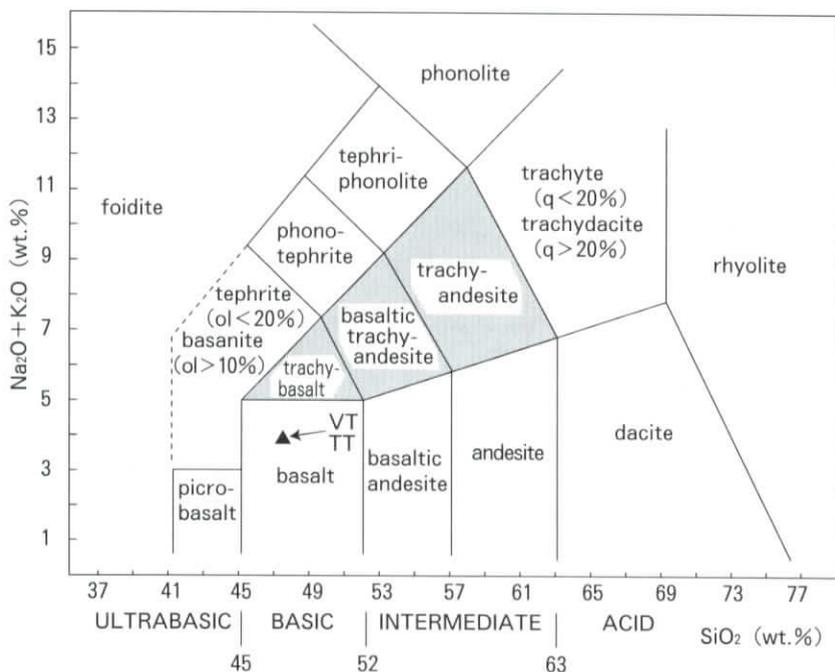
**Fig.3** Polarization-Microscope of Vertical Lava Tree-Mold Samples (VT) from Hallim in Cheju Volcanic Island. (OI : Olivine and PI : Plagioclase)

#### 4.6 ケイ酸とアルカリ成分 ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) との関係

濟州火山島における火山噴出物の ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 組成範囲は 1.46~13.72wt.%で、富士火山より広い範囲であり、この濟州火山島の平均値より小さい値である。一方、富士火山における火山噴出物の ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) 組成範囲は 2.81 (八幡穴) ~4.32wt.%で、その平均より極わずかに多い VT と TT の ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) は 4.49 と 4.41wt.%で玄武岩質である。ケイ酸とアルカリ成分との関係を究明するため、**Table6** と **Fig.4** は、横軸に  $\text{SiO}_2$  (wt.%)、縦軸に ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) (wt.%) をとり、それぞれの熔岩の化学組成 (Miyashiro,1978 ; R.W.Le Maitre, 1938) をプロットした。**Fig.5** 上図は濟州火山島における全体の成分であり、下図は濟州火山島における翰林溶岩樹型 (HT) と萬丈窟の双子溶岩柱 (MC) の成分である。下図の A 線はアルカリ玄武岩系であり、下図の AH 線は非アルカリ玄武岩系である。2本の境界線があり、上部境界線より上の領域がアルカリ玄武岩、下の領域が非アルカリ玄武岩、2本の境界線に挟まれる部分が高アルミナ質玄武岩です。**Fig.5** におけるアルカリ玄武岩と非アルカリ玄武岩との境界線は、KUNO (1966) によるものである。これによると、双方の熔岩樹型とも高アルミナ玄武岩であることが分かる。HT の VT と TT のアルカリ成分は、TC に近い値である。

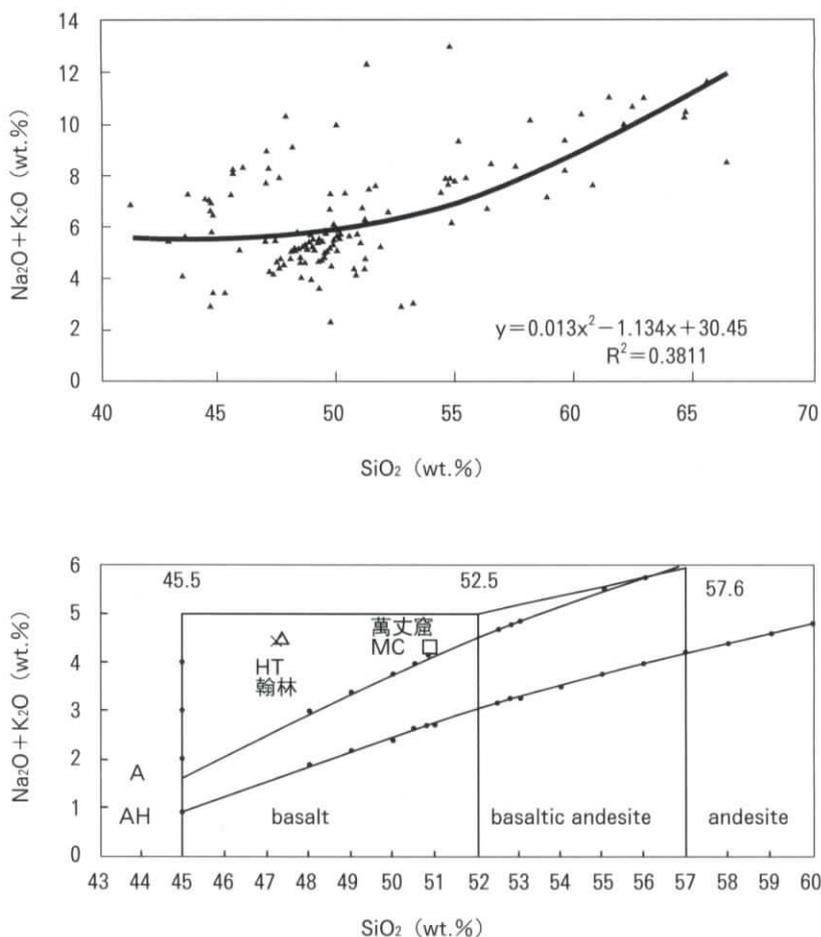
#### 4.7 ケイ酸と酸化カリウムとの関係

濟州火山島における火山噴出物の  $\text{K}_2\text{O}$  組成範囲は 0.05~5.63wt.%で、富士火山より広い範囲であり、この濟州火山島の平均値より小さい値である。一方、富士火山における火山噴出物の  $\text{K}_2\text{O}$  組成範囲は 0.52 (八幡穴) ~1.16wt.%で、その平均値に近い VT と TT の  $\text{K}_2\text{O}$  (wt.%) は 1.48 と 1.51wt.%の玄武岩質である。ケイ酸とアルカリ成分との関係を究明するため、**Fig.6** は、横軸に  $\text{SiO}_2$  (wt.%)、縦軸に  $\text{K}_2\text{O}$  (wt.%) をとり、それぞれの熔岩の化学組成をプロットした。境界線は、Miyashiro,1978 ; R. W. Le Maitre, 1938 に基づいている。**Fig.7** の上図は濟州火山島における全体成分成分であり、下図は HT と TC 値である。濟州火山島の噴出物の広い範囲では、ケイ酸が増大するにつれ、カリ

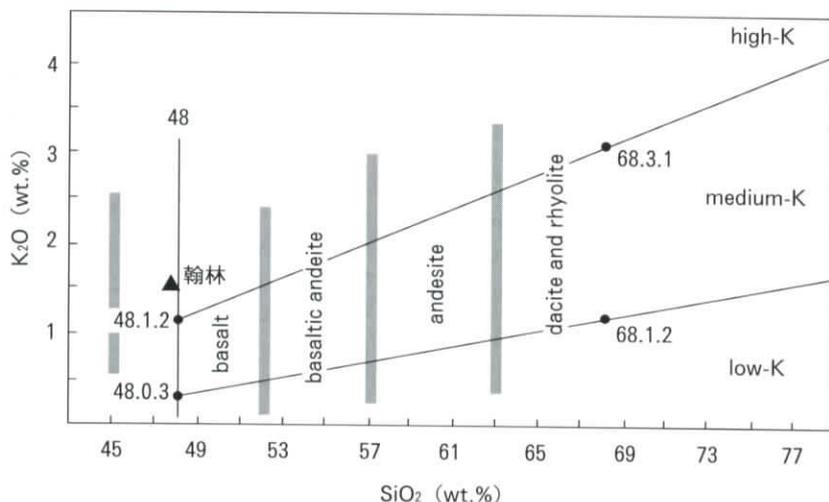


**Fig.4** Plot of  $\text{SiO}_2$  vs.  $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  Contents of Lava Tree-Mold Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island. Chemical Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks using the Total Alkali Versus Silica (TAS) Diagram (after Le Bas et al., 1986, Fig.2). The Letter Solid Triangle denotes for Rocks from VT and TT. The Thick Vertical Lines indicate the Equivalent Position of the Fields in the TAS Diagram.

ウム成分は同様にわずかな増大傾向を示している。VT・TTの $\text{K}_2\text{O}$ 組成は、回帰直線の値と近いカリウム成分である。VTとTTのカリウム成分は、 $\text{SiO}_2$ 組成と $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 組成と同様に、似たような特徴である。下図における上の線はhigh-Kとmedium-Kの境界線の玄武岩系であり、下の線はmedium-Kとlow-Kの境界線の玄武岩系である。**Fig.7**における横軸52(wt.%)を基準線として、その以下は玄武岩であり、その以上は玄武岩質安山岩である。したがって、双方の溶岩樹型ともmedium-Kの高アルミナ玄武岩であることが分かる。VTとTTのカリウム成分は、 $\text{SiO}_2$ 組成と $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 組成と同様



**Fig.5** Plot of  $\text{SiO}_2$  vs.  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  Contents of Lava Tree-Mold Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island. The Letter A denotes for Alkali Basalt Rock-Series; AH, High Alumina-Basalt Rock-Series; X-Indicate and Solid Triangle Square Rocks from VT and TT; Solid Square Rocks from MC(Twin Lava Column Sample from Manjang-gul Cave). The Thick Vertical Lines indicate the Equivalent Position of the Fields in the TAS Diagram.



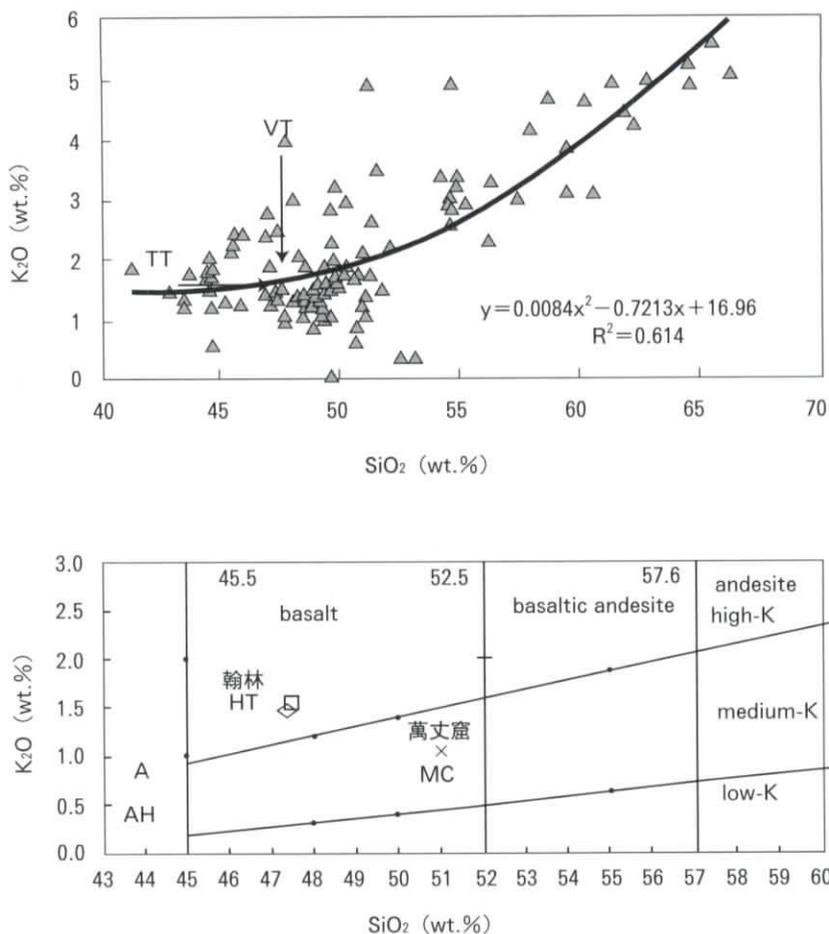
**Fig.6** Plot of  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  Contents of Lava Tree-Mold Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island. Division of Basalts (with  $\text{SiO}_2 \geq 48\%$ , Basaltic Andesites and Andesites in Low-K, Medium-K and High-K Types. Note that High-K is NOT Synonymous with Potassic. Solid Triangle Square Rocks from VT and TT. The Thick Vertical Lines indicate the Equivalent Position of the Fields in the TAS Diagram.

に、似たような特徴である。

#### 4.8 ケイ酸と有色鉱物 ( $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ) との関係

濟州火山島における火山噴出物の  $\text{MgO}$  (wt.%) 組成範囲は 0.00~10.61wt.% で、その平均値とほぼ同様の VT と TT の  $\text{CaO}$  (wt.%) は 8.63 と 8.57wt.% である。濟州火山島における火山噴出物の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (wt.%) 組成範囲は 0.67~14.24wt.% で、富士火山より広い範囲であり、この平均値よりはるかに多い含有率である。一方、富士火山における火山噴出物の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (wt.%) 組成範囲は 1.60~13.70 (八幡穴) wt.% で、その平均値より多い VT と TT の  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (wt.%) は 12.60 と 12.60wt.% である。

ケイ酸と有色鉱物 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$ ) 成分との関係を究明するため、**Fig.8** は、横軸に  $\text{SiO}_2$  (wt.%)、縦軸に ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$ ) (wt.%) をとり、



**Fig.7** Plot of SiO<sub>2</sub> vs. K<sub>2</sub>O Contents of Lava Tree-Mold Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island. Division of Basalts (with SiO<sub>2</sub> ≥ 48%, Basaltic Andesites and Andesites in Low-K, Medium-K and High-K Types. Note that High-K is NOT Synonymous with Potassic. Where, Solid Square and Solid Rhombus Rocks from VT and TT; Star Rocks from MC (Twin Lava Column Sample from Manjang-Gul Cave). The Thick Vertical Lines indicate the Equivalent Position of the Fields in the TAS Diagram.

それぞれの熔岩の化学組成をプロットした。上図は濟州火山島における MgO 成分であり、平均値より大きい。中図は濟州火山島富士火山帯における Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成分であり、平均値より大きい。さらに、下図は濟州火山島における CaO であり、平均値に近い値である。濟州火山島の噴出物の広い範囲では、ケイ酸が増大するにつれ、MgO と CaO の成分は同様に減少の傾向であるが、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は異なった傾向である。

#### 4.9 ケイ酸と格子定数との関係

単斜晶系の格子定数は、**Table 8** の通りである。VT では  $A_m = 9.7799 \text{ \AA}$ ,  $B_m = 8.9286 \text{ \AA}$ ,  $C_m = 5.1968 \text{ \AA}$  and  $\beta_m = 106.30^\circ$  in VT であり、TT では、 $A_m = 9.7656 \text{ \AA}$ ,  $B_m = 8.8183 \text{ \AA}$ ,  $C_m = 5.1889 \text{ \AA}$  and  $\beta_m = 106.46^\circ$  である。濟州火山島における溶岩洞窟の成分「SiO<sub>2</sub> (wt.%)」と格子定数との関係は、つぎのような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$A_m (\text{\AA}) = 9.62 + 0.003W_{\text{SiO}_2} (\text{wt.}\%) \dots (R^2=0.099) \dots (26)$$

$$B_m (\text{\AA}) = 8.97 - 0.001W_{\text{SiO}_2} (\text{wt.}\%) \dots (R^2=0.029) \dots (27)$$

$$C_m (\text{\AA}) = 4.98 + 0.005W_{\text{SiO}_2} (\text{wt.}\%) \dots (R^2=0.230) \dots (28)$$

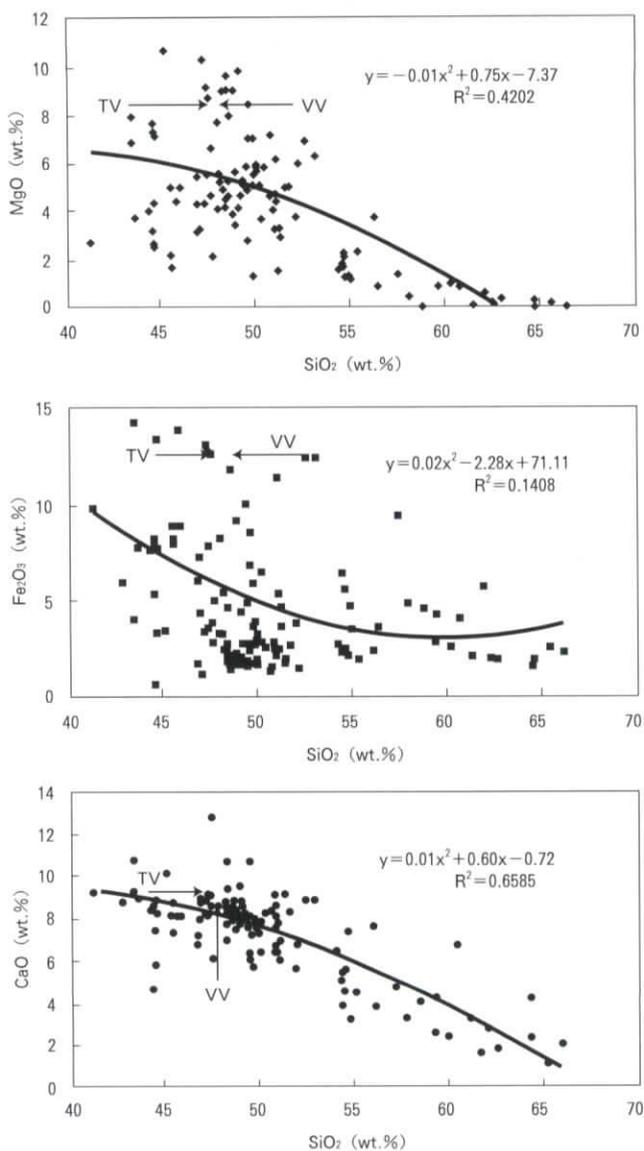
この関係式から SiO<sub>2</sub> (wt.%) の含有率が増大するにつれ、格子定数の  $A_m$  (Å) と  $C_m$  (Å) はわずかに大きくなるのに対して、格子定数の  $B_m$  (Å) は減少の傾向である。同様に傾向として、翰林溶岩樹型の格子定数の  $A_m$  (Å) と  $C_m$  (Å) は、濟州火山島における溶岩洞窟の成分の中では大きく、 $B_m$  (Å) は小さい。

## 5. おわりに

翰林溶岩樹型群における豎型 (VT) と横臥型 (TT) の溶岩樹型の分析の結果、以下のことが分かった。

1) SiO<sub>2</sub> の含有率について、翰林溶岩樹型群は平均 47.45wt.% で、双方とも玄武岩質 (塩基性岩) である。

2) SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の含有率は青木ヶ原溶岩樹型群の溶岩より小さく、TiO<sub>2</sub>、



**Fig.8** Relation between  $\text{SiO}_2$  Composition and Color Minerals ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}$ ) Contents of Lava Tree-Mold Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island

**Table 8** Representative Lattice Constants of Monoclinic Results (Å) for the Lava in the Tree-Mold (VT and TT) Samples from Hallim in Cheju Volcanic Island

格子定数 と角度	翰林溶岩樹型 (T)			萬丈窟 (MC)	富士火山	濟州火山
	豎型(VT)	横臥(TT)	平均			
Am(Å)	9.7799	9.7656	9.7728	9.8189	9.714~9.813	9.754~9.819
Bm(Å)	8.9286	8.9193	8.9240	8.8932	8.897~9.940	8.893~9.934
Cm(Å)	5.1968	5.1889	5.1929	5.2449	5.159~5.246	5.189~5.255
$\beta$ m(°)	106.30	106.46	106.38	105.86	105.49~106.95	105.72~106.62

MgO、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> の含有率は青木ヶ原溶岩樹型群の溶岩の方が高いが、その他の元素については含有率がほぼ同じである。

3) 双方の溶岩樹型とも高アルミナ玄武岩である。

4) 双方の鉱物は、X線回折によると斜長石(灰長石)、カンラン石、普通輝石が多い。偏光顕微鏡によるとかんらん石(OI)・輝石(Px)・単斜輝石(CPx)・斜方輝石(OPx)・斜長石(Pl)・石基(Matrix)・穴(None)および発砲(Pore)等が見られた。

5) VTとTTの結晶構造は、灰長石・曹長石・輝石の混合物であるため、三斜晶系・単斜晶系・立方晶系・斜方晶系の混晶である。

6) ケイ酸が増大するにつれ、K<sub>2</sub>O・Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・MgO組成をもつ有色鉱物は減少の傾向である。

7) 翰林溶岩樹型の格子定数のAm(Å)とCm(Å)は、濟州火山島における溶岩洞窟の成分の中では大きく、Bm(Å)は小さい。

濟州火山島の萬丈窟(沢ら、1990)、白頭山の鹿蹄洞(沢ら、1996)の溶岩洞窟には、アルカリ玄武岩が分布している。一方、富士山の翰林樹型における今回分析した双方の溶岩樹型は、高アルミナ玄武岩であった。これらの違いは、溶岩樹型の成因研究において重要な意味があると考えられる

## 謝 辞

この研究は、本学研究補助金による成果である。この論文のデータ作成にあたっては(株)リガクの中村和樹氏に多くのご協力を頂き、関係各位に感謝の意を表します。この試料採集と助言にあたっては、全南大学校師範大学の康勝三教授ならびに济州火山洞窟協会の申祐泳会長、さらに、データ処理には藤田浩史と肥塚義明の両君に感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) 石原初太郎『*史跡名勝天然記念物調査報告書 IV*』山梨県 1929年
- 2) 津屋弘達「*富士火山の地質学的並に岩石学的研究(II)*」東京大学地震研究所彙報,16/, 638-657 1938年.
- 3) S.M. Lee「*Volcanic Rocks in Cheju Island*」J. Geological Society of Korea,2/, 1-7 1966年
- 4) 小川孝徳『*富士総合学術調査報告書*』(財)堀内浩庵会 120-128 1971年
- 5) 津屋弘達『*富士総合学術調査報告書*』(財)堀内浩庵会 2-127 1971年
- 6) 元鐘寛「*济州島の形成過程と火山活動に関する研究*」建国大学校地学論集, 1/, 7-48 1975年
- 7) A. Miyashiro,1978.「*Nature of Alkali Volcanic Rock Series*」. Contrib. Mineral. Petrol 66/,94-104 1978年
- 8) R. W. Le Maitre『*A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*』Blackwell Scientific Publications 1978年
- 9) M.W. Lee「*Petrology and Geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea*」The Science Reports of the Tohoku University Series III 15/,177-250 1982年
- 10) K.J. Won, J.I. Matsuda, K.Nagao, K.H.Kim and M.W.Lee「*Paleomagnetism and Radiometric Age of Trachytes in Jeju Island, KOREA*」J.K.I.M.G 19/,25-33 1986年

- 11) 沢勲・片山佐一 「濟州火山島における萬丈窟双子石柱の化学分析」  
大阪経済法科大学論集 36/,1-26 1989年
- 12) 沢勲・高文玉 「Fundamental Parameter 法による萬丈窟の溶岩双子石柱  
の蛍光X線分析」 洞窟 20/,29-62 1989年
- 13) 沢勲・洪始煥・村田守 「物理定数法による蛍光X線分析と萬丈窟石柱の年  
代測定」 洞窟 21/,34-43 1989年
- 14) 沢勲 「Fundamental Parameter 法による萬丈窟溶岩石柱の蛍光X線分析」  
洞窟 22/,17-56 1990年
- 15) 沢勲・村田・洪始煥 「大韓民国萬丈窟双子溶岩石柱についての二、三の知  
見」 日本洞窟学会誌 15/,42-46 1990年
- 16) T. Okada, T. Itaya, I. Sawa and S.H. Hong 「K-Ar age determination  
of lava stalagmite in Manjang gul, Jeju island, Korea」 J S A E S  
6/,127-130 1991年
- 17) KUNO, H 「Lateral variation of basalt magma type across continen-  
tal margins and island area」. Bull. volcanol., (2), 29/, 195-222 1996  
年
- 18) 沢勲・村田守・河野久征 「白頭山の鹿蹄洞と濟州火山島の萬丈窟における  
溶岩洞窟の成分比較」 洞窟学雑誌 21/,65-70 1996年
- 19) 国立中央青年の家 『富士山周辺の地質と自然』 国立中央青年の家 1996  
年
- 20) 立原弘編 『山梨県富士山北麓, 柏原溶岩樹型群観察報告書』 日本洞窟学会  
火山洞窟学部サカエプリント社 126 1997年
- 21) 立原弘 『溶岩樹型の観察』 ケイプフェスティバルガイドブック 45-62  
1998年
- 22) 沢勲・井上久・立原弘 「富士火山の柏原と青木ヶ原溶岩樹型の成分比較」  
洞窟学雑誌 23/,39-45 1998年
- 23) 沢勲・洪始煥・河野久征 「濟州火山島の萬丈窟の双子溶岩石柱の単斜晶系  
と立方晶系」 大阪経済法科大学論集 70/,55-78 1998年
- 24) 沢勲 「Quantitative Analysis and K-Ar Age Determination of a Lava

- Bridge in Manjang-gul Cave*」KOFST 739-746 1999年
- 25) 沢 勲・井上久「*X-ray Fluorescence Analysis and K-Ar Age Determination of a Lava Bridge in Manjang-gul Cave, Korea*」洞窟学雑誌 29/,57-63 1999年
- 26) 沢勲・川村一之「萬丈窟と富士山の溶岩に関する成分の比較」愛媛大学鹿島愛彦教授退官記念論文集 153-157 2000年
- 27) 沢勲・井上久・河野久征「*X-ray Analysis and K-Ar Age Determination on Lava Bridge n Manjang-gul Cave*」大阪経済法科大学論集 76/, 37-56 2000年
- 28) 沢勲・井上久・立原弘「富士火山の青木ヶ原溶岩樹型の蛍光X線分析とX線回折法(豎型と横臥型溶岩樹型の成分と単斜晶系)」大阪経済法科大学論集 77/,31-56 2000年