

# 濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態

沢 勲 *Isao SAWA*  
大橋 健 *Tsuyoshi OHASHI*

*On Geologic Development and First Formation of  
Volcanic Caves in Cheju Island, Korea*

## 1 はじめに

溶岩洞窟の形成やそれぞれの規模、形態などの初生的な特徴は流出（噴出）時の溶岩の温度、噴出様式、成分特性と物性、流動場の起伏や傾斜などの環境条件に規定される。

火山洞窟の宝庫、濟州島には世界最大級の溶岩洞窟をはじめ多様な洞窟が発達している。とりわけ、表善里玄武岩地帯には集中的に溶岩洞窟が分布する。しかし、そうした分布の偏在性の原因についての科学的な分析はこれまで行われていない。さらに、既往の報告では火山洞窟の存在と現象的な記載にとどまり、形成プロセス、2次的変形の系統的な記載やモデル化などに関してはほとんど着手されていない。

筆者等は、洞窟形成層である溶岩の成分分析法である蛍光X線分析、K-Ar法による絶対年代測定、偏光顕微鏡写真による造岩鉱物識別、X線回折図形および洞窟の水質分析などの定量的測定や分析を試みた。その結果に基づき上記の問題について検討した。多くの注目すべき知見を得ることができた。同時に新たな問題点も明らかになった。以下報告する。

**Key words** : 火山洞窟、蛍光X線分析、X線回折、K-Ar年代測定、偏光顕微鏡写真、水質分析

[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 37-84*]

## 2 濟州島の火山地形・地質と溶岩洞窟の概観

### 2.1 地形・地質概観

濟州島は、韓半島の最南端に位置する (**Fig.1**)。大陸東縁部のプレート沈み込み帯という構造発達史上の位置と主として第三紀末から第四紀のはじめに噴出した溶岩からなる火山島である。**Fig.1** 中の○表示は都市名で、表示×は火山洞窟の所在地である。表示×の4が濟州火山島である。本稿では主として、濟州島の火山洞窟について考察した。

最近、北東の鬱陵島と濟州島、さらにその南方延長線上とを結んだ線上に長大な断層が認められ、日本列島はこの線に沿って大陸から分離し、東南方向に移動したと推論されている。第三紀から第四紀にかけてのマグマ作用・高地熱流れ・火山活動などの一連の現象は、この大陸と太平洋側の海洋プレートの遷移地帯で起こっているものと考えられる。濟州火山岩とその噴出順序の模式図を **Table1**、火山活動と地質層序を **Table2** に示した。

濟州島は南北約 31km、東西約 73km、北北東～南南西の長軸をもち、その面積は 1,845 km<sup>2</sup> とほぼ大阪府に匹敵する。

濟州島の火山活動 (**Table1**) は、第三紀末に開始し、第四紀前半に主要な活動は終息している。早期に流出した古期の溶岩層は、200m以下の海岸部のなだらかな台地—アスピーテ(楯状火山)地形—をつくっている。一方、濟州島の中央部に聳え韓国の最高峰でもある漢拏山(海拔 1950m)を構成する溶岩層はアスピーテを貫く新期の巨大な溶岩ドームであり、トロイデ鐘状火山の特徴を呈している。すなわち、濟州島は時代を異にする二つの火山体が形成する複成火山である。漢拏山の頂上の火口には白鹿潭(火口湖)を湛え、景勝地となっている (**Fig.2**)。また、山麓の台地上には 360 座を数える新旧の寄生火山群が発達しているのも本火山島の特色である。旧火口のひとつであり、島の最東端部に位置する城山日の出峰(Songsan Sunrise Peak)は濟州 10 景の第 1 位に挙げられる景勝地をなす (**Fig3**)。

濟州島の火山活動史と火山層序(元鐘寛、1975 と李文遠、1982) は、大きく 4 回の噴出期に区分できる (**Table1** と **Table2**)。各噴出期に堆積した溶岩

済州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

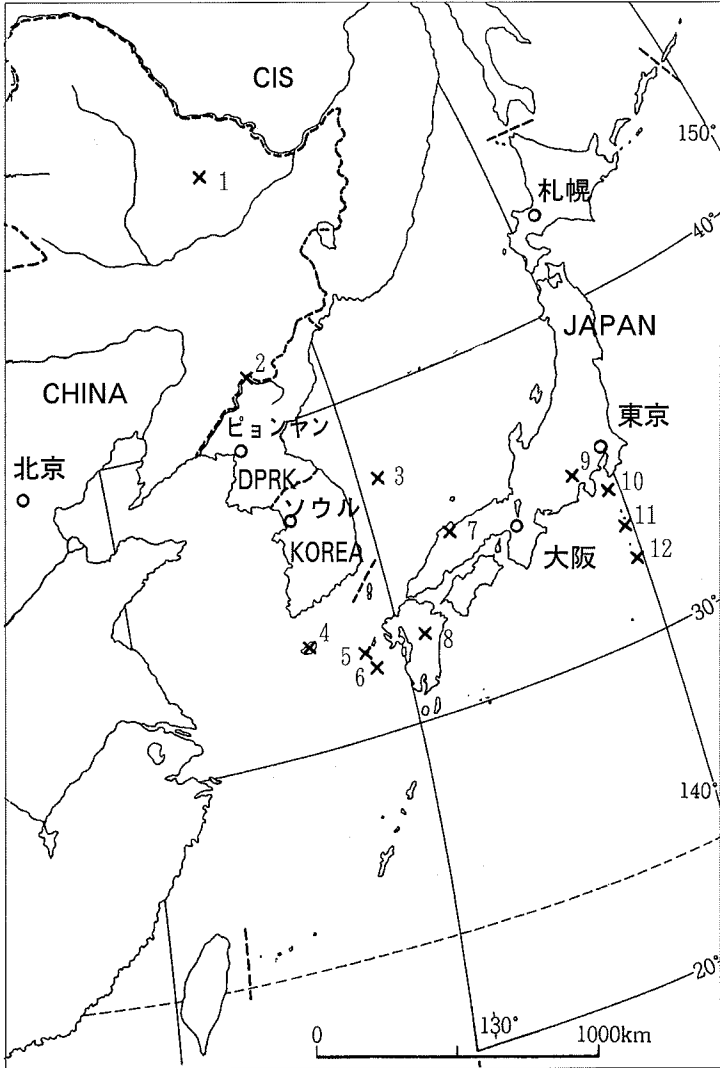


Fig. 1 日本周辺にある溶岩洞窟の分布

(Distribution of Lava Cavern in Japanese Island and its Environs)

1. 五大連池、2. 長白山 (白頭山)、3. 鬱陵島、4. 済州島、5. 福江島、6. 黄島、  
7. 大根島、8. 阿蘇山、9. 富士山、10. 大島、11. 三宅島、12. 八丈島、

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

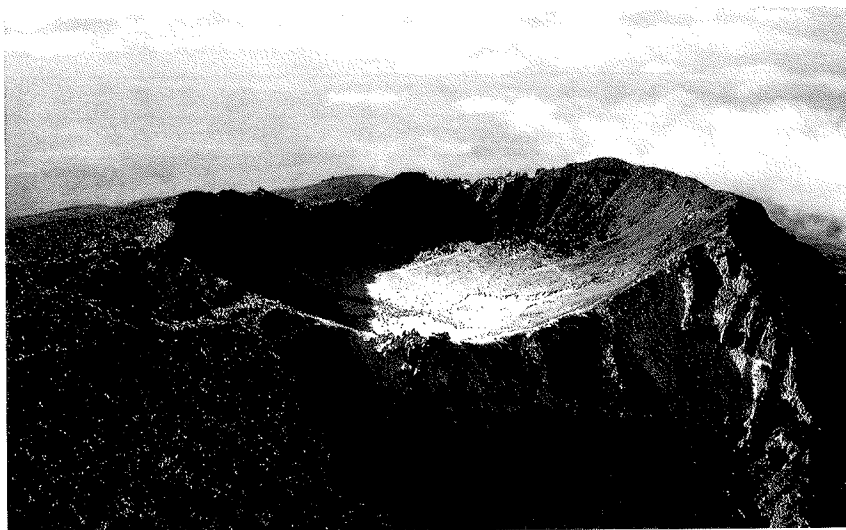
**Table1** 濟州火山類の噴出順序と概念(模式)図(李文遠、1982 噴出期区分参照)  
(The Gushing Order and Graphic Model in Cheju Volcanic)

地質年代	噴出期	模式図	地層
第3紀	第1期		西滷浦層(非火山岩) 基底玄武岩 (海底噴火) 花崗岩
第 四 紀	更新世 前期		新陽里層 中文粗面岩 西滷浦粗面岩 表善里玄武岩
	更新世 中期		法井里粗面岩 下孝里玄武岩 水望里玄武岩 濟州玄武岩
	更新世 後期		漢拏山粗面岩玄武岩 漢拏山玄武岩 城板岳玄武岩 始興里玄武岩
	更新世 後期		漢拏山玄武岩 噴石丘(スコリア) 白鹿潭玄武岩 (2万年前)
	更新世 後期		貝砂層

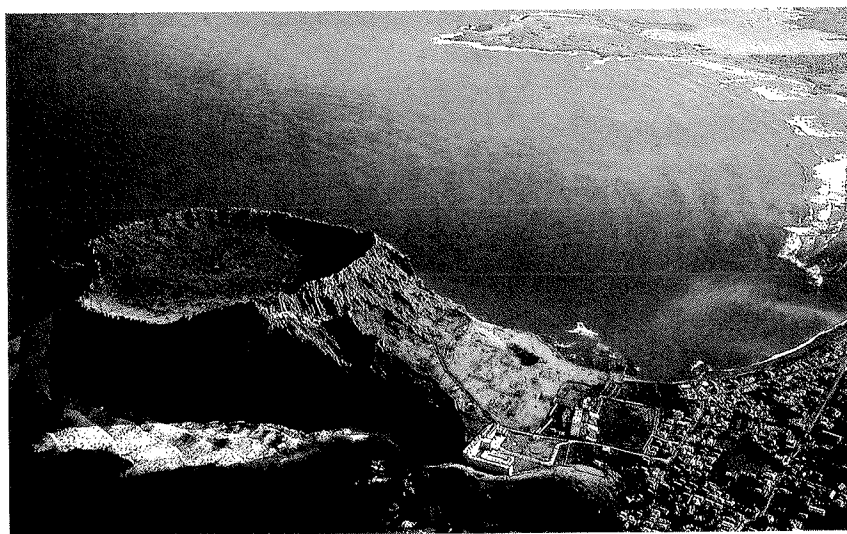
済州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

**Table2** 済州島の火山活動と(地質)層序 (李文遠、1982 噴出期区分参照)  
(*Volcanic Activity and Stratigraphic Units in Cheju Island*)

地質時代	噴出期	層序	記 事		
中生代		白亜紀の花崗岩	地表では確認されていない		
第三紀	第 1 期	基底玄武岩	粘性の大きい多量の溶岩噴出、下部に花崗岩の捕獲あり		
	末期	西帰浦層	砂質泥岩・泥岩・化石を含む海成層、基盤の北方への傾動的隆起		
170 万年前	更新世 前 期	第 2 期  (中心噴火、本島の火山活動中で最大規模)	表善里玄武岩	島の北東、北西、南東部へ流出 萬丈窟・金寧窟などの溶岩洞が形成	
			西帰浦粗面岩		
		中文粗面岩	山房山・虎山・森島などの形成		
		城山層および和順層	海岸沿いで水中破碎岩の噴出 溶岩台地(アスピーテ)の形成		
		新陽里層	砂質泥岩・泥岩・化石を含む海成層		
第 四 紀	更新世 中 期	第 3-1 期 ・ 初 期 (主活動が終息)	済州玄武岩	島の北部へ流出	
			水望里玄武岩	島の東南部へ流出	
			下孝里玄武岩	島の中部の南北両側へ流出	
		3 第 3-2 期 ・ 中 期	法井里粗面岩	島の南部へ多量のピクライト質玄武岩の噴出、全島にわたる溶岩台地形成	
			始興里玄武岩	島の中央部に海拔 500m 以上の溶岩ドームが成長	
			城板岳玄武岩	海拔 1100m 以上が形成	
			漢拏山玄武岩		
				漢拏山粗面玄武岩	海拔 1700m の漢拏山が完成
		更新世 後 期	第 3-3 期 ・ 後 期	白鹿潭玄武岩	漢拏山頂上に火口が形成(トロイデ)
				第 4 期	噴石丘(スコリア)
1 万年前	完新世	有史時代の噴火記録(1002、1007、1140、1570)	介(貝)砂層 沖積層	白鹿潭の火口湖形成	



**Fig.2** 漢拏山頂上にある噴火口と火口湖白鹿潭 (WOOJIN PRESS SEOUL)  
(White-Deer-Lake, the Volcanic Crater at Summit of Mt. Halla)



**Fig.3** 濟州の最東端にある噴火口の城山日出峰 (WOOJIN PRESS SEOUL)  
(Songsan Sunrise Peak, One of the Ancient Volcanic Crater in the East End of Cheju Volcanic Island)

層と非火山堆積岩の層序は、古い方から新しい方への噴出期順に説明すると、下記のようなのである。

①濟州島の地質の屋台骨をなし第三紀に噴出した第1期は、基底玄武岩とその上に不整合で堆積した非火山岩である西帰浦層の時代である。基底玄武岩は、橄欖石・輝石の班晶等の集合体から構成され、特に、橄欖石が多く含有されていることが特徴である。

②第四紀の更新世前期に噴出した第2期は、城山層及び和順層、表善里玄武岩・西帰浦粗面岩・中文粗面岩など古期の溶岩層とその上に堆積した新陽里層の時代である。白鹿潭付近に散在していた火口から大量の溶岩が噴出し、大規模なアスピーテが形成された。城山層は主に火山砕屑物で構成されており、城山日の出峰をはじめ、東と西海岸の低地帯に局部的噴火活動の旧火口の名残が見られる。和順層は東と西海岸の低地帯を除いた地区に分布し、西帰浦と中文粗面岩に細分される。さらに、玄武岩の岩片が含有されているのが特徴である。表善里玄武岩は、主として東と西海岸の低地帯に分布し、橄欖石と針状長石の班晶が含有され、溶岩流の表面には柱状節理が発達し、多孔質である。西帰浦粗面岩は、南海岸の低地帯の中文面大坪里付近に分布し、細粒の橄欖石と輝石の班晶を含有する。中文粗面岩は、橄欖石・輝石・長石の班晶を含有している。

③第四紀の更新世中期に噴出した第3-1期(初期)には、濟州玄武岩(カンラン石と普通輝石)・水望里玄武岩・下孝里玄武岩・法井里粗面岩(粗面岩質溶岩と普通輝石)が流出した。濟州玄武岩は、南と北海岸の低地帯と中山間地帯に分布し、班晶輝石玄武岩と班晶長石玄武岩に区分できる。下孝里玄武岩は、漢拏山を中心に南と北海岸、山間地帯に分布し、多孔質な粗粒の長石班晶を多量に含有しているのが特徴である。法井里粗面岩は、西帰浦と中文間にある中山間地帯に分布し、大きい班晶からなる斜長石類と輝石を含有する。

④第四紀の更新世中期に噴出した第3-2期(中期)には、始興里玄武岩(海拔500mが形成)・城板岳玄武岩(海拔1100mが形成)・漢拏山玄武岩・漢拏山粗面岩質玄武岩(海拔1700mが形成)が流出した。始興里玄武岩は、東と西海岸の低地帯に広く分布し、溶岩流の表面にロピ構造が発達し、溶岩流の方向にした

がって棒状の気孔が発達し、末端は安山岩に移化する。城板岳玄武岩は、東と南の高山地帯から海岸の低地帯に広く分布し、城板岳火口から噴出した痕跡があり、斜長石と輝石の班晶が見られる。漢拏山玄武岩は、漢拏山中心に山岳地帯に分布し、著しく多孔質で班晶構造が見られ、鮮明な黒色の斜長石を多に含む。漢拏山粗面岩質玄武岩は、漢拏山頂上の近くに小規模に分布し、五百羅漢の絶壁のような火口壁は粗面岩質玄武岩からなる。

⑤第四紀の更新世後期に噴出した第3-3期(後期)には、白鹿潭玄武岩が流出した。この時期には漢拏山の現火口付近が噴出の中心となりトロイデ状の新期火山体が成立した。白鹿潭玄武岩は、白鹿潭西側の山頂付近に小規模に分布し、多孔質の粒状構造が発達し、斜長石と長石を含有している。

⑥第四紀の更新世後期に噴出した第4期は、後期火山活動の産物である寄生火山群から噴出した火山砕屑層が形成された。寄生火山噴出物は、濟州火山島の全域にわたって、360個余の火山丘を形成した。

⑦第四紀の完新世における活動は、貝砂層(海成と風成の2種がある)と沖積層が堆積し、白鹿潭の火口湖が形成された。本島面積の90%を玄武岩類が占めており、多くは粗面岩質の特性をもつ。火山活動はどの噴出期においても、まず多量の玄武岩の流出で始まり、安山岩質または粗面岩質に変わり、溶岩の流出の減少、そして、多量の火山砕屑物の噴出という推移が見られる。濟州島の火山活動は第四紀後半にほとんど終息しているが、きわめて最近まで余韻があったことも史料から伺える。すなわち、高麗期中葉に2回(1002年と1007年)の爆発(新增東国輿地勝覧第38巻)、さらに端宗甲戌年12月、甲辰(AD1445)年1月24日、顯宗、庚戌年10月、丁亥(AD1570)年11月15日に火山爆発と地震が起こって人畜に多くの被害があったという記録が残っている(李朝烈聖実録)。ただし、そうした記録の地質学的検証は十分とはいえない。濟州島の地理、火山活動と火山層序が理解できるように、位置総面積や長さの諸元を **Table 3** に示した。

## 2.2 世界の溶岩洞窟の分布と濟州島の溶岩洞窟



濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

**Table3** 濟州道の地理 (*The Geographical Feature of Cheju-do*)

(2001年1月1日現在)

項 目		規 模	
総面積	Total Areas	1,845 km <sup>2</sup>	
総人口	Total Population 男(267,723名)女(271,770名) (全国1.3%)	539,493 人	
人口密度	Population Density	292 人/km <sup>2</sup>	
世帯数	The Number of Households	174,000 世帯	
東西の長さ	Length of Island	73.0 km	
南北の長さ	Width of Island	31.0 km	
海岸線の長さ	Length of Total Coastal Line	253.0 km	
年降水量	Annual Precepitation 濟州市 西帰浦市	1,426 mm	
		1,771 mm	
年平均気温	Average Temperature	16.0 °C	
位置	地名	経度	緯度
極東	北濟州郡 牛島面 チョイル里 (Choil) ビヤン島 (Biyang)	126°58' 20"	33°30' 41"
極西	北濟州郡 翰京面 チャキ島 (Chagwi)	126°08' 43"	33°18' 28"
極南	南濟州郡 大静邑 マラ島 (Mara)	126°16' 10"	33°06' 31"
極北	北濟州郡 楸子面 シルヨ (Siluyeo)	126°22' 10"	34°00' 00"

世界の主要な溶岩洞窟の分布を整理したものが **Table 4** (Sameshima 他、1986) である。大陸ごとにその主要なものを列挙すれば下記のようなものである。

(1) 南北アメリカ: USA には約 186 個の洞窟が知られている。その大部分はハワイ島に集中している。主要な洞窟としてハワイ島の①世界1位Kazumura Cave、②世界3位Pahoa Cave、③世界7位Huehue Cave、④世界第9位Keala Cave、⑤世界11位Ainahou Ranch Cave、⑥世界17位John Martin's Cave、カリフォルニア州の⑧世界13位Labyrinth Cave、ワシントン州の⑨世界18位Dead Horse Cave、ユタ州の⑩世界22位Duke Creak Caveなどであり、その他に、メキシコ・アラスカ・カナダにも多くの火山・溶岩洞窟があ

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

**Table4** 世界の長大火山洞窟のリスト  
(The List of the Long Lava Caves in the World )

(小川孝徳提供 1998)

No	Country	Cave Name	Location	Extention
1	USA	Kazumura Cave	Waikahahehe, Puna, Hawaii	61,420m
2	Spain	Cueva del Viento	Icod de los Vinos, Tenerife, Canaria	18,249m
3	USA	Pahoa Cave	Puna, Hawaii	16,000m
4	Kenya	Leviathan Cave.	Kibwezi Chyule Hills	12,500m
5	Korea	Billemot gul	Aewol-up, Chejudo,	11,749m
6	Kenya	Mt.Susua Cave system	Mt. Susua.	11,000m
7	USA	Huehue Cave	Hawaii	10,282m
8	Korea	Man Jang gul	Kujwa-up, Tonggimnyong-ri, Chejudo	8,924m
9	USA	Keala Cave	Hawaii	8,690m
10	Spain	Cueva de Don Justo	Restinga, Hierro, Canaria	7,565m
11	USA	Ainahou Ranch Cave	Kalanaokuaiki, Hawaii	7,110m
12	Spain	Cueva de los Verdes	Arrecife, Lanzarote, Canaria	6,100m
13	USA	Labyrinth Cave	Siskiyou Co., California	5,661m
14	Portugal	gruta das Torreas	Pico. Acores	5,214m
15	Korea	Susan gul	Songsan-up, Susan-ri, Chejudo	4,675m
16	Rwanda	Ubuvumo bwa Musanze	Ruhenggueri, Musanze	4,560m
17	USA	John Martin Cave	Waikahahehe, Puna, Hawaii	4,158m
18	USA	Dead Horse Cave	Skamania Co., Washington	4,100m
19	Iceland	Kalmanshellir	EieiksjokuII, Kalmanstunga	4,035m
20	Iceland	Hallimundarhraun	Kalmanstunga	4,000m
21	USA	Ape Cave	Skamania Co., Washington	3,904m
22	USA	Duke Creek Cave	Kane Co., Uta	3,674m
23	USA	Sexton's Cave	Puna, Hawaii	3,588m
24	Samoa	ana Pe'ape'a de Salamumu	Salamumu, Upolu	3,487m
25	USA	Keaou Trail Cave	Kilauea, Hawaii	3,481m
26	USA	Gypsum Cave	Lincoln Co., Idaho	3,220m
27	Korea	Sochon gul	Hallim-up, Hyopchae-ri, Chejudo	3,074m
28	Spain	Cueva de Felipe Reventon	El Ampara, San Pablo, Tenerife, canaria	3,030m
29	Ecuador	Cueva del Cascajo	Santa Cruz, Garapagos	3,010m
30	Kenya	Rainbow s End Cave	Mt. Silali	3,000m
30	Kenya	Pango Ya Hoshi Cave	Chyulu Hills	3,000m
30	Mexico	Cueva de la Iglesia	San Juan Tlacotenco	3,000m
33	USA	Lower Lava Lake system	North Kona, Hawaii	2,900m
34	USA	Lower Uilani Cave	Ainaloa, Puna, Hawaii	2,800m
35	USA	Falls Creek Cave	Skamania Co., Washi ngton	2,797m
36	Portugal	gruta dos Balcoes	Biscoitos, Plaia de Vitoria, Terceira, Acores	2,713m
37	USA	Sexton s Cave	Puna, Hawaii	2,588m

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

No	Country	Cave Name	Location	Extention
38	USA	Kaumana Cave	South Hilo, Ponahawai Kaumana, Hawaii	2,544m
39	USA	Mammoth Cave	Modoc Co., California	2,490m
40	USA	Catwalk Cave	Shasta Co., California	2,434m
41	USA	Gaping Holes Cave	Siskiyou Co., California	2,406m
42	USA	Dynalmited Cave	Skamania Co., Washington	2,388m
43	USA	Lava River Cave	Deschutes Co., Oregon	2,370m
44	USA	Post Office Cave	Siskiyou Co., California	2,357m
45	Ecuador	Cuevade Gallardo	Santa Cruz, Galapagos	2,331m
46	USA	Pot'O Gold Cave	Lincoln Co., Idaho	2,250m
47	Spain	Cueva de los Naturalistas	Masache, Lanzarote, Canaria	2,250m
48	Japan	Mitsuike Ana	Nisigahara, Hitoana, Fujinomiyasi, Shizuoka	2,202m
49	USA	Catacombs Cave	Siskiyou Co., California	2,103m
50	Korea	Wa Hol gul	Chochon-up, Wahul-ri, Chejudo	2,066m
51	USA	Pukalani Cave	Puna, Hawaii	2,048m
52	Spain	Cueva del Poris	La Palma, Canaria	2,000m
52	Mexico	Cueva del Diablo	San Juan Tlacotenco	2,000m
52	Mexico	Cueva del Ferrocarril	San Juan Tlacotenco	2,000m
52	Ecuador	Cueva de la Finca Kastdalen	Santa Cruz, Galapagos	2,000m
52	Portugal	gruta das Arrifes	Arrifes, Sao Miguel , Acores	2,000m
57	USA	Catwalk Cave	Shasta Co., California	1,950m
58	Reunion	cavernes Bateau	Le Tampon	1,910m
59	Kenya	Vathaioni Cave	Kibwezi, Chyulu Hills	1,900m
60	Iceland	Surtshellir	plateau de Hallmundarhraun, Kalmanstunga	1,881m
61	USA	Ole's Cave	Skamania Co., Washigton	1,768m
62	Spain	Tunel de la Atlantida	Arrecife, Lanzarote, Canaria	1,680m

強調文字はアジアにある火山洞窟である。

り、エクアドルの⑩世界11位Cueva del Cascajo も著名である。

(2) ヨーロッパ：イタリアの約186個が最多である。なかでも地中海の火山島であるシシリア島の溶岩洞窟はよく知られている。その他スペインの①世界2位Cueva de los Viento (Canarias)、②世界10位Cueva de Don Justo (Canarias)、③世界12位Cueva de los Verdes (Canarias)、④世界28位Cueva de Felipe Reventon (Canarias)、アイスランドの⑤世界19位Kalmanshellir、ポルトガルの⑥世界14位Gruta das Torreas等が代表的な長大溶岩洞窟である。

(3) アフリカ：ケニヤの①世界4位Laviathan cave、ルワンダの②世界16位Ubuwumo bwa Musanze の他、ウガンダ・カメルーンにも多くの火山・溶岩洞窟がある。

(4) オセアニア：ニュージーランド・オーストラリアに多い。

(5) アジア：韓国と日本に代表的なものが見られる。日本における火山洞窟は、①富士山の世界48位三ヶ池穴等111個を筆頭に(小川、1971・Sameshima、1986)東京都の②大島や三宅島・島根県の③大根島および長崎県の福江島・黄島等が有名である。

韓国における火山洞窟は、濟州火山島と鬱陵島に多い(申、1981・韓国洞窟学会、1986・洪、1987・Sameshima、1986)。なかでも、濟州島の④世界5位ビレモッ窟・世界8位萬丈窟・世界15位水山窟・世界27位昭天窟などは世界最大級である。その他、中国の黒龍江省や⑤長白山(白頭山)、⑥フィリピンに多くの火山・溶岩洞窟がある。

## 2.3 濟州島の火山/溶岩洞窟の分布と特徴

### 2.3 a 高い分布密度と表善面玄武岩地帯への集中的分布

濟州島で現在まで確認されている火山溶岩洞窟数(濟州道・洪、1987・Sameshima, 1988)は、**Table 5**のように約60個である。表中の洞窟番号は、**Fig. 4**の洞窟分布図における丸表示中の番号と一致している。単位面積あたりの洞窟密度という点では濟州島は世界第1位であろう。濟州島の火山洞窟には、世界火山洞窟の中で、最大級規模のものが多数ある(**Table 6**参照)。

**Table5** 濟州火山島における洞窟分布  
(The Caverns Distribution in Cheju Volcanic Island)

	洞窟名	北緯 (E)	東経 (E)	所在地	延長 (m)	標高 (m)	地質
1	ビレモッ窟	33° 24' 01"	126° 21' 08"	北濟州郡涯月邑於音里	11.74	255	表善里玄武岩
2	萬丈窟	33° 31' 26"	126° 46' 18"	北濟州郡旧左邑東金寧里	8,924	125	表善里玄武岩
3	水山窟	33° 25' 30"	126° 50' 37"	南濟州郡城山邑水山里	4,674	140	表善里玄武岩
4	昭天窟	33° 21' 53"	126° 15' 38"	北濟州郡翰林邑挾才里	2,980	130	表善里玄武岩
5	臥屹窟	33° 30' 10"	126° 38' 10"	北濟州郡朝天邑臥屹思	2.066	130	表善里玄武岩
6	美千窟	33° 23' 03"	126° 50' 27"	南濟州郡城山邑三逢里	1,695	100	表善里玄武岩
7	ハンドル窟	33° 22' 28"	126° 13' 56"	北濟州郡翰林邑金陵里	1,400	30	表善里玄武岩
8	チョギワ窟	33° 22' 56"	126° 14' 50"	北濟州郡翰京面月令里	1,289	50	表善里玄武岩
9	新昌窟	33° 20' 48"	126° 11' 20"	北濟州郡翰京面新昌里	850	20	表善里玄武岩
10	松堂窟	33° 26' 22"	126° 45' 31"	北濟州郡旧左邑松堂里	850	265	表善里玄武岩
11	ユッチギ窟	33° 31' 36"	126° 37' 27"	北濟州郡朝天邑新村里	800	70	表善里玄武岩
12	金寧窟	33° 32' 26"	126° 46' 38"	北濟州郡旧左邑東金寧里	705	60	表善里玄武岩
13	ケウセッ窟	33° 33' 09"	126° 45' 22"	北濟州郡旧左邑東金寧里	414	10	表善里玄武岩
14	双龍窟	33° 23' 00"	126° 14' 38"	北濟州郡翰林邑挾才里	392	30	表善里玄武岩
15	玉山窟	33° 21' 58"	126° 16' 34"	北濟州郡翰林邑月林里	391	140	表善里玄武岩
16	クリン窟	33° 24' 19"	126° 32' 45"	濟州市梧登洞	380	760	漢拏山玄武岩
17	イモル窟	33° 31' 25"	126° 37' 26"	北濟州朝天邑新村里	350	70	始興里玄武岩
18	徳泉窟	33° 29' 52"	126° 45' 30"	北濟州郡旧左邑徳泉里	232	155	表善里玄武岩
19	グェネギ窟	33° 32' 18"	126° 44' 58"	北濟州郡旧左邑東金寧里	200	30	表善里玄武岩
20	ケイビム窟	33° 32' 38"	126° 42' 58"	北濟州郡旧左邑東福里	170	10	表善里玄武岩

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

**Table5** 濟州火山島における洞窟分布  
(The Caverns Distribution in Cheju Volcanic Island)

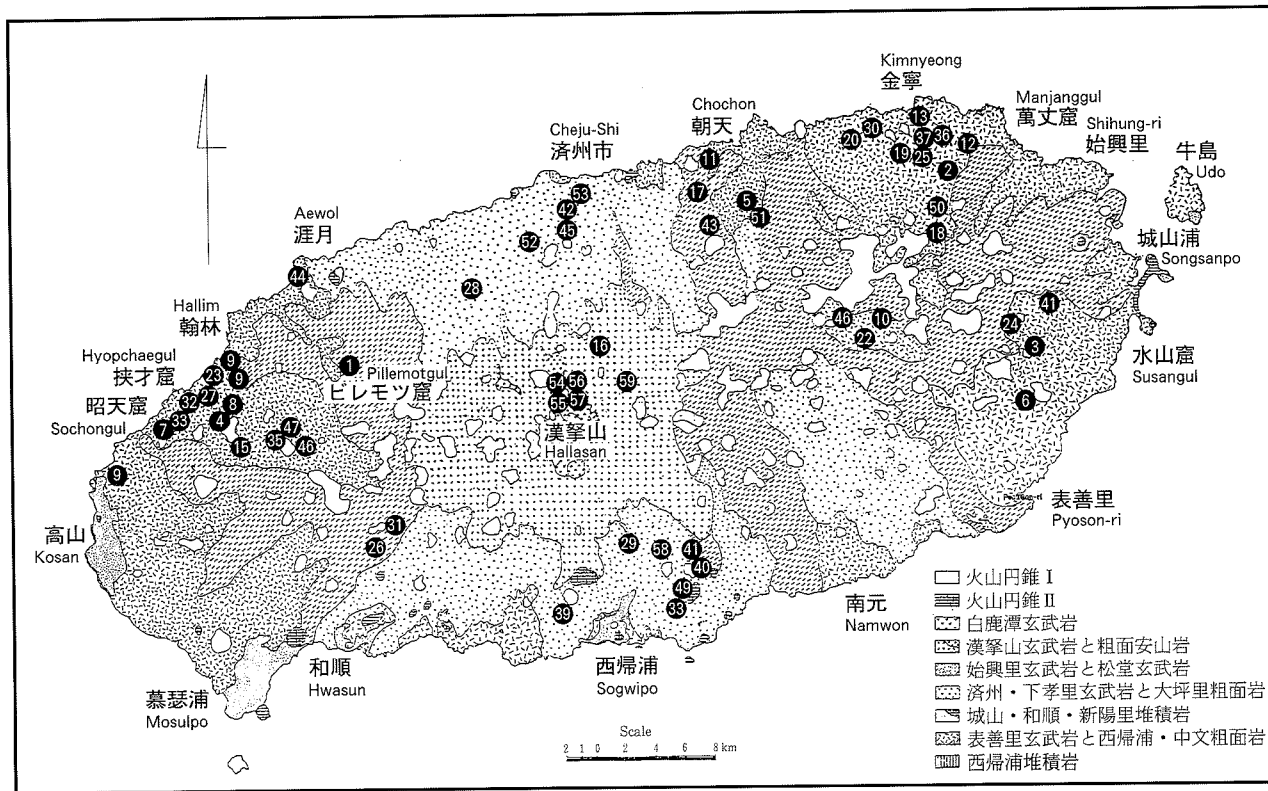
	洞窟名	北緯 (E)	東経 (E)	所在地	延長 (m)	標高 (m)	地質
21	黄金窟	33° 22' 59"	126° 14' 39"	北濟州郡翰林邑挾才里	140	35	表善里玄武岩
22	松堂窟Ⅱ	33° 26' 39"	126° 45' 58"	北濟州郡旧左邑松堂里	138	255	表善里玄武岩
23	財岩泉窟	33° 23' 18"	126° 14' 28"	北濟州郡翰林邑挾才里	114	10	表善里玄武岩
24	水山窟Ⅱ	33° 25' 57"	126° 50' 21"	南濟州郡城山邑水山里	100	150	表善里玄武岩
25	ポッナムミツ窟	33° 32' 24"	126° 45' 09"	北濟州郡旧左邑東金寧里	100	150	表善里玄武岩
26	ダンオルム窟Ⅰ	33° 19' 48"	126° 20' 19"	南濟州郡安德面東広里	91	434	表善里玄武岩
27	挾才窟	33° 22' 59"	126° 14' 38"	北濟州郡翰林邑挾才里	99	20	始興里玄武岩
28	松林窟	33° 22' 58"	126° 14' 44"	北濟州郡翰林邑金陵里	367	30	濟州玄武岩
29	観音窟	33° 17' 32"	126° 34' 43"	西帰浦市吐坪洞	80	280	濟州玄武岩
30	ドネボクナン窟	33° 32' 45"	126° 43' 36"	北濟州郡旧左邑東金寧里	80	30	表善里玄武岩
31	ダンオルム窟Ⅱ	33° 19' 57"	126° 20' 24"	南濟州郡安德面東広里	58	370	始興里玄武岩
32	金陵窟	33° 22' 39"	126° 13' 39"	北濟州郡翰林邑金陵里	50	30	表善里玄武岩
33	チョロン窟	33° 23' 00"	126° 13' 43"	北濟州郡翰林邑金陵里		10	表善里玄武岩
34	パッ窟	33° 22' 58"	126° 13' 42"	北濟州郡翰林邑金陵里		10	表善里玄武岩
35	クンアク窟	33° 21' 14"	126° 19' 50"	北濟州郡翰林邑今岳里	100	350	表善里玄武岩
36	金寧パッ窟	33° 33' 04"	126° 45' 27"	北濟州郡旧左邑東金寧里		10	表善里玄武岩
37	金寧寺窟	33° 33' 04"	126° 45' 22"	北濟州郡旧左邑東金寧里		10	表善里玄武岩
38	金岳山窟Ⅰ	33° 17' 53"	126° 33' 54"	西帰浦市吐坪里		425	濟州玄武岩
39	ケンセンイ窟	33° 15' 33"	126° 30' 57"	西帰浦市西好里	41	280	下孝里玄武岩
40	ヨウ窟	33° 15' 41"	126° 36' 28"	西帰浦市新孝里	45	50	下孝里玄武岩

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

**Table5** 濟州火山島における洞窟分布  
(The Caverns Distribution in Cheju Volcanic Island)

	洞窟名	北緯 (E)	東経 (E)	所在地	延長 (m)	標高 (m)	地質
41	無名窟	33° 25′ 00″	126° 54′ 00″	南濟州郡城山邑水山里		100	下孝里玄武岩
42	コネンイスル窟	33° 28′ 39″	126° 36′ 22″	濟州市奉蓋洞		210	表善里玄武岩
43	高禪味窟	33° 27′ 12″	126° 20′ 45″	北濟州郡涯月邑下加里		70	表善里玄武岩
44	ハンダム窟	33° 27′ 36″	126° 18′ 42″	北濟州郡涯月邑涯月里		10	表善里玄武岩
45	ピエンナム窟	33° 27′ 34″	126° 26′ 53″	濟州市海安洞	200	140	濟州玄武岩
46	夫宗窟	33° 25′ 57″	126° 43′ 00″	北濟州郡朝天邑臥山里	19	300	表善里玄武岩
47	チョンムル樹型Ⅰ	33° 20′ 12″	126° 20′ 03″	北濟州郡翰林邑今岳里	6	350	表善里玄武岩
48	チョンムル樹型Ⅱ	33° 20′ 12″	126° 20′ 03″	北濟州郡翰林邑今岳里	16	350	表善里玄武岩
49	米岳山窟Ⅱ	33° 17′ 50″	126° 33′ 54″	西婦浦市吐坪洞		420	濟州玄武岩
50	徳泉窟	33° 29′ 40″	126° 46′ 10″	北濟州郡旧左邑徳泉里		160	表善里玄武岩
51	コムンオウム窟	33° 27′ 02″	126° 43′ 19″	北濟州朝天邑橋来里	-25	350	始興里玄武岩
52	南天水オウム窟	33° 29′ 55″	126° 27′ 37″	濟州市蓮洞	60	15	濟州玄武岩
53	トルヤン窟	33° 23′ 45″	126° 33′ 45″	濟州市一徒里	70	15	濟州玄武岩
54	サンクェ窟	33° 24′ 00″	126° 33′ 00″	濟州市梧登洞		1,450	漢拏山玄武岩
55	ノルブンサンケ窟	33° 24′ 00″	126° 33′ 00″	濟州市梧登洞		1,700	漢拏山玄武岩
56	ピョンクェ窟	33° 24′ 00″	126° 33′ 00″	濟州市梧登洞		1,600	漢拏山玄武岩
57	ドントジンケ窟	33° 24′ 00″	126° 33′ 00″	濟州市梧登洞		1,750	漢拏山玄武岩
58	モンモル窟 プ	33° 17′ 15″	126° 35′ 00″	西婦浦市上萌里		310	漢拏山玄武岩
59	トンクェ窟	33° 23′ 00″	126° 34′ 43″	濟州市梧登里		1,600	漢拏山玄武岩
60							

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)



**Fig.4** 濟州島の地質図(姜相培、1988)と溶岩洞窟分布  
(The Lava Cave Distribution and Geologic Map in Cheju Island)



**Table6** 濟州火山島における溶岩洞窟の特徴  
(The Characteristic of the Lava Cavern in Cheju Volcanic Island)

洞窟名称と項目	規 模	所 在 地
萬丈窟の双子溶岩柱(世界最大級)	760 cm	北濟州郡 旧左邑 金寧里
萬丈窟の三段溶岩橋(世界最大級) 萬丈窟の溶岩橋数	700 cm 21 個	北濟州郡 旧左邑 金寧里
萬丈窟の溶岩球の密集分布	21 個	北濟州郡 旧左邑 金寧里
萬丈窟の溶岩棚の形 (A,B,B'、C、D、E モデル)	5 形	北濟州郡 旧左邑 金寧里
萬丈窟の天井の高さ (単層) (上層)	18.1 m 25.0 cm	北濟州郡 旧左邑 金寧里
萬丈窟の上層の洞窟構造	5 多層段階	北濟州郡 旧左邑 金寧里
萬丈窟のMini Tube (米国 1、日本 2、昭天窟 1 個)	4 個	北濟州郡 旧左邑 金寧里
昭天窟のMini Tube	1 個	北濟州郡 翰林邑 狹才里
昭天窟の Coffin 現象	4 個	北濟州郡 翰林邑 狹才里
世界最大級の Billemot 窟の溶岩球	700 cm	北濟州郡 涯月邑 於音里

洞窟の大部分は、北東部の旧左邑と北西部の翰林邑および涯月邑に集中的に分布している。そこはいずれも古期の溶岩—表善里玄武岩層—の分布地域であり、萬丈窟、狹才窟およびビレモッ窟洞窟システムなど本島の代表的な洞窟もそこに発達している。すなわち、溶岩洞窟は特定の溶岩地帯—粘着性が弱く、流動性が高いアルカリ性玄武岩層—のなかに形成されていることがわかる。

### 2.3 b 多彩な種類の地形と構造

多彩な種類の地形と構造物が認められることが濟州島の溶岩洞窟のもうひとつの特徴といえる。

洞窟は、水平洞窟・垂直洞窟および非系統洞窟の 3 系統に大きく分類できる。3 系統の洞窟は、洞窟の没落・崩落などの 2 次的変形を受けている場合があり、同一系統のものであっても変化してゆく場合が多い。したがって総合的に考察する必要がある。

溶岩流の表面形態は流動横断面がドーム状の構造を成し、その微地形や構造が溶岩流の流動方向を復元するのに役に立つ。さらに溶岩表層に形成された微

細な陥没窪地が溶岩流動方向の推定のみならず地下の洞窟の存在を予測することに役立つ。溶岩洞窟の空洞破壊の結果、地表面の自重による沈下によって形成された没落窪地が注目される。

萬丈窟システムには小さな背斜構造をもつ溶岩や傾斜構造をもつ溶岩、縄状溶岩などが多様なものが観察される。萬丈窟(申、1981)から流動した溶岩流が下方の金寧窟方面へ達し、その途時において曲流(Meandering)したため異方向の支洞群を形成している。

萬丈窟内部には世界最大級の双子溶岩柱(760cm)や三段溶岩橋(700cm)、多数の溶岩橋数(21個)さらに溶岩球数(21個)、多層構造をもつ洞窟(5層段階)およびミニ洞窟(4個)などが形成されている。また、昭天窟では、Coffin現象(4個)、ピレモッ洞窟では、貴重な溶岩球(700cm)および珪酸柱(28cm)が見られる。

濟州島の溶岩洞窟内に発達する洞窟微地形や構造を五十音順に並べてみると①珪酸柱(Silica Rod)・②珪酸華(Siliceous Sublimates)・③コビン現象(Coffin Phenomenon)・④鐘乳管(Stalactite Tube)・⑤石灰質鐘乳管(Silica Straw)・⑥石灰質石筍(Silica Stalagmite)・⑦石灰質鐘乳石(Silica Straw)・⑧噴気球(Gas Ball)・⑨噴出鐘乳(Extrusion Stalactite)・⑩ミニ洞窟(Mini Cave)・⑪ミニ・チューブ(Mini Tube)・⑫ロビ・ラバ(Ropy Lava)・⑬溶岩球(Lava Ball)・⑭溶岩橋(Lava Bridge)・⑮溶岩子(Ropy Lava)・⑯溶岩橋(Lava Bridge)・⑰溶岩樹型(Lava Tree-mold)・⑱溶岩鐘乳石(Lava Stalactites)・⑲溶岩石筍(Lava Stalagmite)・⑳溶岩棚(Lava Ledge)・㉑溶岩柱(Lava Pillar)・㉒溶岩瀑布(Lava Wall)・㉓溶岩壁(Lava Wall)・㉔溶岩床(Lava Bottom)および㉕溶岩流(Lava Stream)と実に25種にもおよび、その多様性が特筆される。

### 3 溶岩の各種分析とその結果

#### 3.1 絶対年代測定

洞窟の形成時代を確定する方法は、これまで地質学の一層序学的一手法を用

いて行われてきた。石灰岩地域に発達する鐘乳洞のケースでは、石灰岩の成因が海棲の微生物の遺骸や生活跡が集積したものであることより、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。

火山洞窟は火口から噴出・流動した溶岩流の内部に形成されるものである、したがってその溶岩の噴出した時代を火山層序学的に明らかにすれば洞窟の形成時代が判明するわけである。しかし、そうした方法ではおおまかな地質時代がわかることにとどまる。最近ではさまざまな岩石の絶対年代測定法が開発されている。

筆者等は、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、濟州島の溶岩の絶対年代測定を試みた。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变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、 $K_{40}$ - $Ar_{40}$ 法と呼ぶべきであろう。便宜的に両方の 40 を省き K-Ar 法と呼んでいる。時系列による K-Ar 法測定は、次のような原理に基づいている。自然界には、 $K_{39}$  (93.258%)、 $K_{40}$  (0.012%) および  $K_{41}$  (6.730%) のカリウム同位体をもっている。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  $Ar_{40}$ は壊変する。壊変周期がわかっていることより、 $K_{40}$ - $Ar_{40}$ 法は、時間の関数として微分方程式によって解明できる。

### 3.1 a 年代測定試料の調整

試料は萬丈窟洞窟内で採取した溶岩双子石柱と溶岩ブリッジを形成する溶岩である。K-Ar 法の作業手順は、以下の通りである。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、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整粒したイオン交換水で超音波洗浄機を用いて洗浄・乾燥、④乾燥後、電磁分離機を用いて斑晶と強磁性鉱物を除去、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、⑥その一部をアルゴン (Ar) の測定用とする、そして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。

**Table7** 済州火山島における溶岩のK-Ar年代測定結果  
(K-Ar Age Determination of Lava in Cheju Volcanic Island)

名称	所在地	年代 (万年前)
白鹿潭 粗面岩(Trachyte)	漢拏山頂の白鹿潭 (White-Deer-Lake of Mt.Halla)	0.025±0.008(Ma) 2万5千万年前
萬丈窟洞窟 表善里玄武岩(Basalt)	双子溶岩柱 Lava Twin Column(A)	0.032~0.05(Ma) 3万2千万年前
	三段層の溶岩ブリッジ(3F) 3F Lava Bridge(Tholeiite)	0.19±0.03(Ma) 19万年前
	双子溶岩柱 Lava Twin Column(B)	0.032~0.42(Ma) 42万年前
翰林溶岩樹型 玄武岩(Basalt)	翰林邑月林里(金龍哲所有地) Lava Tree Mould	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ =292.9±5.0(Ma) $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ の比率のため に年代測定は不明
山房山 粗面岩(Trachyte)		0.74±0.023(Ma) 74万年前

### 3.1b カリウム (K) 定量分析

カリウム (K) は、分光光度計を用いて蛍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。

### 3.1c 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  $\lambda e=0.581 \times 10^{-10}$  /year、 $\lambda \beta=4.962 \times 10^{-10}$  /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  $\text{K}$  の中に  $^{40}\text{K}$  の含有率を示している。このようにして得た溶岩の  $\text{K}-\text{Ar}$  年代測定結果は、**Table 7** に示した。

濟州島の南西海岸にある噴火口、山房山 (395m) の形成年代は予想外に古く 74 万年前と、更新世前期末～中期を示している。本島の多数の寄生火山 (側火山) 群の形成は一見して、同時期のもののように見えるのにもかかわらず、さまざまな時代のものがあることが伺える (Won et al、1986)。

漢拏山頂の火口湖である白鹿潭周辺の溶岩の年代 (Won et al、1986) は、約 2 万 5 千年前を示している。このことは、更新世後期の最終氷河期に漢拏山の火山活動が、まだ継続していたことを物語っている。萬丈窟内の双子溶岩柱の年代値が 42 万年前 (Okada、1991)、三段溶岩橋の 3F の年代値 (沢・井上、1999・2000) が 19 万年前である事は既報の地質学的年代推定と大きく食い違っている。正確な年代測定値は **Table7** のとおりである。

### 3.1 d 測定結果についての検討と問題点の整理

まず、火山層序学的手法による既往の年代推定との著しい齟齬について検討してみよう。これまで、表善里玄武岩は前期更新世/第 2 噴出期のもものと推定されてきた。そのなかに形成されている萬丈窟の双子溶岩柱の年代が 42 万年前、三段溶岩橋が 19 万年前である。この測定結果は、その噴出期が中期～後期更新世であることを示しており、従来の推定値より著しく若い。さらに、同一溶岩層でありながら、そのなかで 23 万年もの年代幅が出てきているが、その年代差が流出期間とみなすことには問題が残る。

結果の解釈として、①年代測定方法、試料の保存や処理の問題。②測定に用いた試料の外部は、溶岩流の硬化過程に窪みや凸凹が多いため測定面を切り出すところが少ないこと。さらに、③既往の層序の信憑性および見直しにかかわる問題がある。後者の問題は、単に溶岩洞窟を形成している玄武岩の年代決定という問題にとどまらず、東アジアのプレート沈み込み帯開始時期、当時の火山フロント (VF) やその位置との関連という大問題にも発展しかねない。一方、溶岩洞窟の形成層となる玄武岩が表善里玄武岩ではなく、それを覆うより

新しい側火山から、もたらされた溶岩であるという可能性の検討も必要となる。これらの問題を解明するためには、この測定値を参考しながら、さらに多くのデータが必要である。

### 3.2 蛍光X線分析からみた溶岩の化学組成

溶岩の化学組成分析は、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F P法にて行った。測定条件は **Table8**のとおりである。

萬丈窟溶岩と濟州火山島の溶岩に対する定量分析の検討も行った。**Table 9**の周期律表からその成分が説明できる。すなわち、第Iの軽金属では、①原子番号11のナトリウムと②原子番号19のカリウムがあり、第II族の軽金属では、③原子番号12のマグネシウム、④原子番号20のカルシウムおよび⑤原子番号38のストロンチウムがある、さらに、第IV a族の重金属では、⑥原子番号22のチタンおよび⑦原子番号40のジルコニウムなどが含まれている。他は各族に対し

**Table8** 蛍光X線分析の測定条件  
(Measurement Condition of X-ray Fluorescence Analysis)

	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	40秒	40秒	40秒	40秒	40秒	40秒	100秒	40秒	40秒
BG	20	20*2	20	20*2	20*2	20	20	50	20	20
スペクトル	K $\alpha$				X線管			縦型Rh管		
管電圧	50kV				管電流			70mA		
フィルター	Out				分析径			30mm $\phi$		
アッテネータ	Out				スリット			Std.		
PHA	微分法				X線通路			真空		

**Table9** 濟州火山島における溶岩の金属元素  
(Periodic Table of Elements for Lava in Cheju Volcanic Island)

	I A	II A	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII	I B	II B	III B	IV B	V B	VI B
1	1 H 1.008													
2														8 O 15.999
3	11 Na 22.990	12 Mg 24.305									13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	
4	19 K 39.098	20 Ca 40.080		22 Ti 47.88			25 Mn 54.938	26 Fe 55.847						典型金属元素 (水素包含)
			遷移金属元素											
			典型金属元素											

でそれぞれ1元素しか含まれていない。一方、第3周期には、⑧原子番号11のナトリウム、⑨原子番号12のマグネシウム、⑩原子番号13のアルミニウム、⑪原子番号14のケイ素、⑫原子番号15のリンおよび⑬原子番号16のイオウの6元素が含まれている。同様に、第4周期には、⑭原子番号19のカリウム、⑮原子番号20のカルシウム、⑯原子番号22のチタン、⑰原子番号24のクロム、⑱原子番号25のマンガン、⑲原子番号26の鉄および⑳原子番号30の亜鉛の7元素が含まれている。さらに、第5周期には、それぞれ㉑原子番号38のストロンチウムおよび㉒原子番号40のジルコニウムが含まれている。この中から、グループ定量分析には15個のコンポネントを用いた。ここでは、小さい含有率は省略して10個を選んだ。この10個のファンダメンタル・パラメーター法によって測定を行った。これらの成分分析の結果は下記のようにまとめることができる。

(A) 化学周期律表から分類すれば、第3周期では①ナトリウム、②マグネシウム、③アルミニウム、④珪素、⑤磷および⑥イオウの6元素であり、第4周期では⑦カリウム、⑧カルシウム、⑨チタン、⑩クロム、⑪マンガン、⑫鉄

および⑬亜鉛の7元素である。この両周期の元素を合わせると13である。そして、その他を含めると18元素である。

(B) この2元素以上含まれている典型金属元素は、第I A族の①水素、②ナトリウムおよび③カリウムであり、第II A族の④マグネシウム、⑤カルシウムおよび⑥ストロンチウムおよび第VI A族の⑦酸素と⑧イオウが含まれている。

(C) 2元素以上が含まれている遷移金属元素では、第IV A族の①チタンおよび②ジルコニウムである。

萬丈窟双子溶岩柱(沢・片山、1989・沢・高、1989・沢・洪ら、1989・沢、1990)、挾才窟・双龍窟・黄金窟・昭天窟(洪、1990)および濟州火山島の溶岩(Lee、1966・Won、1975・Lee、1982)に対する定量分析は、**Table 10**のとおりである。ここでは、グループ定量分析および化学分析値についてまとめられた平均値と濟州火山島における約70試料を参照して比較を行った。萬丈窟の双子溶岩柱や三段溶岩橋ならびに翰林溶岩樹型の成分( $\text{TiO}_2$ と $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )は、濟州島の溶岩の中では大きい含有率である。一方、 $\text{K}_2\text{O}$ と $\text{P}_2\text{O}_5$ も大きい含有率を占めている。これらのデータにより、萬丈窟での分析値が濟州島の溶岩群のなかの下位の範囲における、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ および $\text{P}_2\text{O}_5$ 等の第3周期を占めている。一方、上位の範囲の値は $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$ および $\text{MnO}$ 等の第4周期によって占められていることが認められた。さらに、第4周期の $\text{Fe}_2\text{O}_3$ は、その分布範囲を越えていることが認められた。さらに、萬丈窟溶岩の分析値は、周期律表の周期と原子番号が大きくなるにつれ、濟州島の溶岩群の平均分析値の下限値から上限値へ変化していることが発見された。この上限の範囲は、白鹿潭の溶岩に多く、下限の範囲は山房山の溶岩に収まる。

なお、萬丈窟の水質分析値のなかで、 $\text{LiF}$ 結晶による回折角度と回折強度からニッケル(Ni)、鉄(Fe)および亜鉛(Zn)の3元素が検出された。

### 3.3 ケイ酸( $\text{SiO}_2$ )含有量と斑状組織

ケイ酸の含有率を基準として斑状組織との関係を、**Table 11**に示した。ケイ酸含有率の度合いによって、火山岩の性質から色調、組成や構造、噴出様式、物性の特徴および岩石分類などができる。造岩鉱物の組成によりケイ酸の含有



**Table10** 濟州火山島における溶岩の蛍光X線分析の結果  
(X-Ray Fluorescence Analysis Results of Lava in Cheju Volcanic Island)

組成	萬丈窟	萬丈窟溶岩橋			翰林溶岩樹型		狹才窟	雙龍窟	黄金窟	昭天窟	全測定値	
	溶岩柱	1 F	2 F	3 F	豎型	横臥型					最小値	最大値
SiO <sub>2</sub>	50.99	50.60	53.10	52.60	47.50	47.40	47.50	46.20	48.70	47.20	45.10	65.50
TiO <sub>2</sub>	2.15	1.93	1.79	1.74	2.58	2.58					0.10	2.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.17	14.40	14.30	14.30	14.40	14.60	19.30	19.80	18.80	18.50	13.80	19.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	12.56	12.40	12.40	12.40	12.60	12.60	10.80	11.70	10.70	12.30	1.10	12.60
MnO	0.16	0.16	0.15	0.15	0.16	0.16					0.10	0.30
MgO	6.15	6.39	6.23	6.89	8.63	8.57	8.80	9.10	7.80	9.30	0.10	10.60
CaO	8.06	9.59	8.85	8.84	9.12	9.13	6.80	6.20	7.50	6.20	1.10	10.10
Na <sub>2</sub> O	3.27	3.71	2.64	2.54	2.95	2.93	3.20	3.40	3.10	3.50	2.10	6.40
K <sub>2</sub> O	1.04	0.63	0.38	0.36	1.54	1.48	0.80	0.70	0.70	0.60	0.63	5.60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.30	0.20	0.16	0.18	0.51	0.60					0.10	1.00
	沢勲他 (1989,1990、1991、1996、1998、2000)						洪始煥 (1990)					

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

率が異なっているので、それを基準にして酸性岩とアリカリ性岩の区分が Miyashiro (1978) と Maitre (1978) によつて行われている (**Fig.5**)。すなわち、溶岩中のケイ酸の含有率から、玄武岩は約 45wt.%、玄武岩質安山岩は ~53wt.% の範囲とされる。火山岩の化学成分特性と物性、噴出温度、噴火様式の間には次のような関係が得られている。

玄武岩質…極小噴火・SiO<sub>2</sub>(45~52wt.%)・高い温度(1200°C)・低い粘性  
安山岩質…小噴火・SiO<sub>2</sub>(57~67wt.%)・中間温度(1000~1200°C)・中間粘性  
流紋岩質…大噴火・SiO<sub>2</sub>(69~ wt.%)・低い温度(800~1000°C)・高い粘性

### 3.4 偏光顕微鏡による溶岩の造岩鉱物組成の鑑識

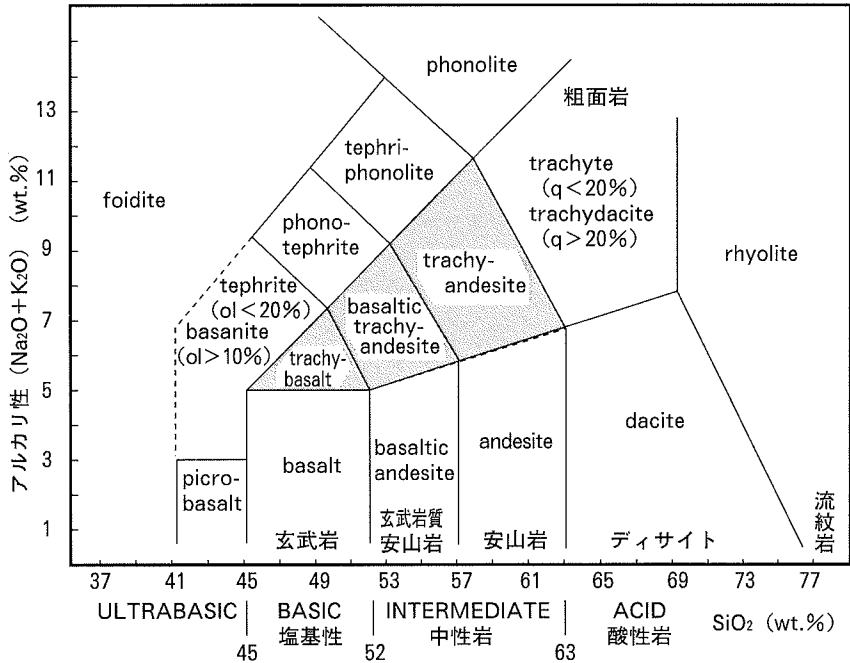
富士火山や濟州島の溶岩について、岩石薄片を作製し検鏡観察と偏光顕微鏡写真撮影を行った。検鏡用プレパラート作成手順は次のようである。まず、岩石を切断してから、薄片の厚さを 30 μm 程度まで研磨し、カバーガラスへの貼り付けを行った。

撮影はオープンニコルとクロスニコルの2種とした。検鏡の結果、かんらん石・輝石・単斜輝石・斜方輝石・斜長石・石基・穴および発泡等が鑑別された。それから **Table 12** に照合し、偏光顕微鏡写真から、有色鉱物のかんらん石・輝石および無色鉱物の斜長石など、造岩鉱物の組成を確認した。組成については、X線回折図形からも判明できる。残念ながらX線回折では、色調・表面および形状の観察は不可能である。

**Fig.6**は世界5位ビレモツ洞窟(洞窟番号①)にある溶岩の造岩鉱物を観察するために撮った偏光顕微鏡写真である。上段はオープンニコル写真であり、下段はクロスニコル写真である。クロスニコル写真のなかから記号OIはかんらん石、Matrixは石基、PIは斜長石を示している。かんらん石は、黄色やオレンジ色の色彩であり、樹脂状光沢した表面および丸い短柱状や四角米粒状の形状をした多彩な有色鉱物である(**Table12**)。斜長石は、無色や白色の色彩であり、シマ状の柱をしている表面および柱状、累帯のシマ状の柱に見えやザラメ短柱状が多い形状をした無色鉱物である。有色鉱物と無色鉱物間にある磁鉄鉱・褐鉄鉱は、無色の色彩であり、不透明な表面および球状や正八面体

**Table7** ケイ酸と斑状組織との関係  
(Relation between  $SiO_2$  and Porphyritic System)

項目	$SiO_2$ の45wt.%~	$SiO_2$ 52wt.%~	$SiO_2$ 66wt.%~
性質	苦鉄質 塩基性	中性 中性岩	珪長質 酸性岩
色彩	濃い色	中間色	淡い色
半深成岩	粗粒玄武岩 (輝緑石) (Dolerite)	玢(ひん)岩 (Porphyrite)	石英斑岩 (Quartz Monzonite)
火山岩 (斑状組織)	玄武岩 (Basalt) 済州火山 富士火山	安山(あんざん)岩 (Andesite)	流紋(りゅうもん)岩 (Rhyolite)



**Fig.5** ケイ酸 ( $SiO_2$ ) とアルカリ性 ( $Na_2O+K_2O$ ) との関係  
(Relation between the  $SiO_2$  and  $Na_2O+K_2O$ )

状磁石からなっている。ピレモツ洞窟の方面ある挾才洞窟(洞窟番号⑦)地帯の溶岩の観察は、鄭昌熙(1991年)によっ行われた。すなわち、かんらん石、長石類、火山ガラス質および磁鉄鉱等である。両者を比較すれば、かんらん石、長石類および磁鉄石・褐鉄鉱は共通しているが、石基と火山ガラス質はわずかに異なっている。黒色からなる多気孔の部分は、地表が近いため、急に冷却したからであると思われる。柱状の部分は、約47分の1cmである。


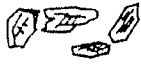





### 3.5 電子顕微鏡による溶岩の造岩鉱物組成の鑑識

**Fig.7**は世界8位萬丈窟(洞窟番号②)にある溶岩の造岩物を観察するために撮った写真である。電子顕微鏡の装置は、日本電子工業JIS-35型である。測定条件は、加速電圧15kV、電流50mAである。測定の前処理として、サンプルの基盤は、銀ペスト粉末を有機物に溶解させてから塗りつぶした。それから接着の度合いを確認してから撮影を行った。**Fig.7A**は、1200倍に拡大した写真である(沢・片山、1989)。この写真は、細かい粒子状が多く、しかも気孔が多いため明確な結晶面が得られなかった。この結晶面を鮮明に観察するために撮影したのが**Fig.7B**である。この写真は、**Fig.7A**の3倍で、3600倍に拡大した写真である。この写真の中で、三角形状の図が左右にある。これはシリコン(Si)であると考えられる。その理由としては、火山洞窟の中にあるケイ酸の含有率約50wt.%であり、ケイ酸の中にある純粋なケイ素は単結晶に成長されやすく、(111)面があるからである。

### 3.6 X線回折による溶岩組成および結晶構造の解明

X線回折には1次検索の測定条件がある。今回の測定には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(30mm $\phi$ )を使用した。測定装置は、理学電機製のX線回折装置RINT-2500(湾曲グラフィット・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(50

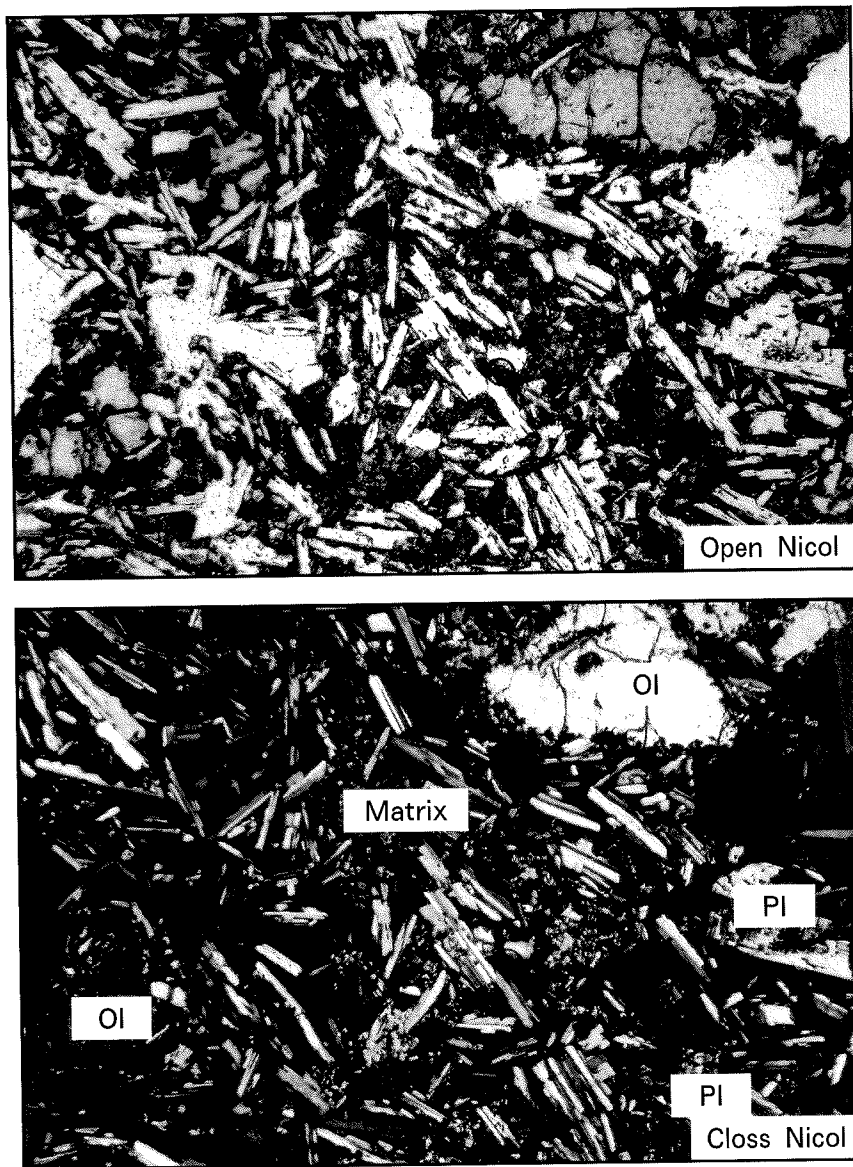
**Table12** 造岩鉱物の検索方法  
(*Searching Method of Rock-forming Minerals*)

		鉱物名	色・形・表面などの特徴	スケッチ	
主な造岩鉱物	有色鉱物	橄欖石	黄～緑褐色やオレンジ色で樹脂状光沢、丸みのある短柱状や四角米粒状の形。		
		輝石	うすい緑～黄褐色の短柱状の形、2方向にへき開があり、ずんぐりしている。		
		角セン石	濃い緑～緑黒色で六角柱柱状や平板状、2方向(120°)のへき開があり光沢もある。時に針状。		
		黒雲母	黒褐色平板状で、へき開著しくうすく一方方向にはげやすい、面は光沢が強い。		
	無色鉱物	石英	無色透明でガラス状断口、形は不規則でまれに六角錐状もある。		
		長石類	斜長石	無色～白色柱状で顕微鏡観察すると累帯のしま状の柱のように見える。ゼラメ短状が多い。	
			正長石	乳白色～桃色、短柱状で風化が著しく透明さを欠く。	
	その他	不透明鉱物	磁鉄鉱 褐鉄鉱	黒色不透明、球状や正八面体状磁石につく。褐鉄鉱は黄褐色塊状。	
			火山ガラス 軽石	白色～黄灰色不透明で、表面によく穴がみられる。	

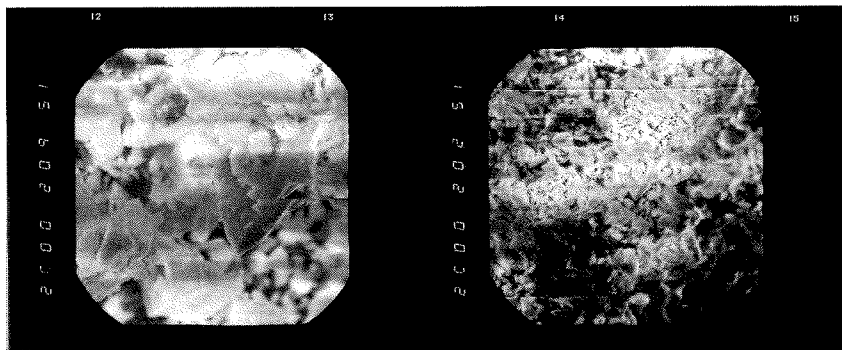
(国立青年の家『富士山周辺の地質と自然』P.11 1996年参照)

kV)、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 (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 ( $1.54056\text{\AA}$ ) である。

一次検索の定性分析を行うための検索条件は下記の通りである。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%、④一致



**Fig.6** ビレモッ窟 (洞窟番号①) の溶岩の偏光顕微鏡写真  
(Polarized Light Microscope Photograph of Lava in Pillemot Cave)  
(OpenとCrossの偏光顕微鏡写真、47倍で表示)PI (斜長石)、OI (橄欖石) Matrix (石基)



A (Magnification 3600倍)      B (Magnification 1200倍)

**Fig. 7** 萬丈窟(洞窟番号②)の溶岩柱の電子顕微鏡写真  
(Electron Microscope photograph of Lava Column in Manjang-gul Cave)

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。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( $n\lambda = 2d\sin\theta$ )によって決定する。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。

X線回折における二次検索の測定条件としては、次の通りである。全自動分析を行った二次検索の定性分析の測定条件は、①X線の管球(Cu)、②発散スリット(1 deg.)、③散乱スリット(1 deg.)、④管電圧(50 kV)、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。

X線回折の結果として、済州島の玄武岩の結晶構造は、**Table 13**の通りで

ある(沢ら、1990・沢・洪・河野、1998・沢・川村、2000)。主として、立方晶系では萬丈窟の双子溶岩柱、六方晶系では萬丈窟の三段溶岩橋、単斜晶系では萬丈窟の双子溶岩柱・三段溶岩橋と翰林溶岩樹型、三斜晶系では萬丈窟の双子溶岩柱・三段溶岩橋と翰林溶岩樹型である。

格子定数は、**Table 14**のように要約できる。単斜晶系の格子定数 A 軸では、萬丈窟の双子溶岩柱は大きく、三段溶岩橋の 1 F は小さい。単斜晶系の格子定数 B 軸では、萬丈窟の三段溶岩橋の 2 F は大きく、双子溶岩柱は小さい。単斜晶系の格子定数 C 軸では、萬丈窟の双子溶岩柱は大きく、翰林溶岩横臥型樹型は小さい。最後に、単斜晶系の軸角は、萬丈窟の三段溶岩橋の 3 F は大きく、三段溶岩橋の 1 F は小さい。三段溶岩橋の 1 F は、洞窟形成の過程において、天井部より落下したものであろう。

### 3.7 溶岩洞窟の水質分析と保全問題

萬丈窟の興味深い地形的な特徴として、洞窟が上層洞窟と下層洞窟の上下 2 層から形成されている事実が挙げられる。これは数回に渡って、多量の溶岩が流動したため、大規模な多層構造をもつ洞窟が形成されたものと考えられる。

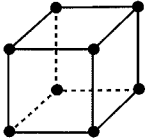
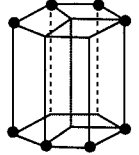
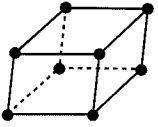
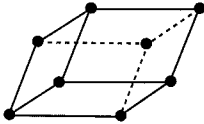
洞窟上部を地表から浸透した雨水が溶岩の割れ目の隙間を通して洞窟の上層天蓋部に蓄積され、それが水滴として集合落下する。その後、下層天蓋部に溜まり、水滴が集合して落下する巨大な 2 重洞窟である。その結果、洞窟床面は、2 重の天井部より落下した水が、最後に地下の小さい流路(川)や池を形成したものと考えられる。

洞窟の保存環境としては、温度と湿度、特に水量と水質の状態が重要な要因となる。過剰な照明が洞窟内の湿度を低下させ乾燥化が進み、緑色公害を助長と、溶岩球・溶岩柱等の化学的分解作用を助長している。これらの問題を解決するための基礎的情報のひとつとして、水質分析(沢、1997)が挙げられる。

筆者はその結果と水質汚濁防止法排水基準(1997)との比較を行った(単位: mg/l)。①生物化学的酸素要求量(BOD)の分析値は、基準 120(日間基準)・160(最大)以下よりはるかに小さい 26.0 である。②化学的酸素要求量(COD)の分析値は、基準 120(日間基準)・160(最大)以下よりはるかに小



**Table13** 萬丈窟と翰林溶岩樹型における溶岩の結晶構造  
(Crystal Structure of Lava in Manjang-Gul Cave and Hallim Lava Tree)

結晶系	結晶軸	ブラベー 格子と記号	特徴を表わす図形
立方晶系 (cubic)	$a=b=c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	単体 面心 純心 P I F	
六方晶系 (hexagonal)	$a=b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	単体 純心 P	
単斜晶系 (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	単底 純心 P C	
三斜晶系 (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	単体 純心 P	

さい 1.52 である。③Phenol 類の分析値は、基準 5 以下よりはるかに小さい 0.001 である。④Hexane 抽出物質含有量の分析値は、基準 5 (鉱油類)・30 (鉱植物油類) 以下より小さく 1.7 である。⑤原子吸光法による濃度分析値は、亜鉛 (Zn) 基準 5 以下より小さく 0.2 で、鉄 (Fe) 基準として 10 以下より小さい 0.5 である。⑥水素指数の分析値は、基準 5.8~8.6 の範囲で、その中間より大きい 8.0 である。

すでに観光洞化している洞窟の内部には、さまざまな問題がある。まず、照明による緑色公害、洞内の落盤など、多くの洞窟環境の破壊を引き起こしかねない状況が生まれている。多くの観光客によって、洞窟外からいろいろな物質

**Table14** 濟州火山島における溶岩の結晶構造と格子定数  
 (Crystal Structure and Lattice Constants of Lava in Cheju Volcanic Island)

結晶構造	萬丈窟	萬丈窟溶岩橋			翰林溶岩樹型		濟州火山	富士火山
	溶岩柱	1 F	2 F	3 F	豎型	横臥		
単斜晶系 Am (Å)	9.8189	9.7544	9.8036	9.7665	9.7799	9.7656	9.754~9.819	9.714~9.813
単斜晶系 Bm (Å)	8.8932	8.9080	8.9336	8.9084	8.9286	8.9193	8.893~9.934	8.897~9.940
単斜晶系 Cm (Å)	5.2549	5.1974	5.2149	5.2102	5.1968	5.1889	5.189~5.255	5.159~5.246
単斜晶系 $\beta$ m (°)	105.86	105.72	106.46	106.62	106.30	106.46	105.72~106.62	105.49~106.95
立方晶系 Ac (Å)	8.549							
三斜晶系 At (Å)	8.146							
三斜晶系 Bt (Å)	12.785							
三斜晶系 Ct (Å)	7.111							
三斜晶系 $\alpha$ t (°)	96.10							
三斜晶系 $\beta$ t (°)	115.00							
三斜晶系 $\gamma$ t (°)	88.30							

濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)

(花粉等)が運び込まれ、洞窟内部の環境の悪化を招いている。さらに、洞窟周辺地区で行われている道路工事などが、洞窟の天井部の破壊や地下水浸透など洞窟の破壊に結びつかないという保証はない。世界的な天然記念物を保存すべき責務を忘れてはなるまい。

#### 4 第1段階の洞窟形態

濟州島は、アスピーテ式とそれを貫く新期のトロイデ式の複成火山地形を呈す。地下のマグマが火道に沿って上昇し、火口から噴出して地表に押し流されたものを溶岩という。この溶岩が冷却し固結した後に、さらに、新たな溶岩がその上に流出して重なり、山地の斜面に沿って低地に流動する過程で冷却さる。粘性の低い溶岩ほど、火口から遠い距離にまで流動する。その結果なだらかな裾野をもつアスピーテ式の火山が形成される。このような溶岩が、地表面を流動する時にその中に溶岩溝、すなわち、堀・溝・溶岩洞を形成する。マグマが地表に噴出する温度は、900~1200℃の高熱状態である。溶岩流の表面は、大気に接して急速に冷却する。けれども、内部は冷却されにくく、高熱を維持しながら流動を続ける。その結果、溶岩層内部に、空白状態になった溶岩溝が形成される。

溶岩は粘性が大きい程、火口より遠くまで流動する。濟州島の場合(元、1975・洪、1990・権、1991・洪、1991)、東北と西北斜面地域の沿岸地帯に大部分の火山洞窟が形成されている。火口の位置と溶岩の流動方向やその位置条件に関連がある。山頂付近から噴出した溶岩が急傾斜面を流出したため、そこに古期(下層部)の溶岩堆積物が残らなかったのであろうか。ただし、洞窟形成期の火口位置、すなわち、溶岩噴出口が漢拏山の山腹の寄生火山であったのか現漢拏山山頂部付近であったのか不明である。

溶岩流は、沿岸低地まで流出し、そこに大規模な洞窟を形成している。火山洞窟形成場において一定の層厚をもつ溶岩が流動し続けるためには、溶岩の物性や温度条件とともに堆積場の高度・起伏・傾斜などの原地形条件も無視できない。

東北と西北斜面の低地へ流動した溶岩のなかに形成された洞窟群は、大きく

東北の旧左邑にある厚い溶岩層からなる萬丈窟・金寧窟・松堂窟および月汀鐘乳窟などの萬丈窟システムと西北の涯月邑にあるピレモッ窟および翰林邑には昭天窟・黄金窟および挾才窟などの挾才窟システムに区分される。

従来、火山洞窟は52wt.%以下のケイ酸を含む粘性の小さな玄武岩にしか形成されないものと考えられてきた。最近では、52wt.%以上のケイ酸を含む粘性の大きい安山岩さらには凝灰岩でも形成されるという報告がある。

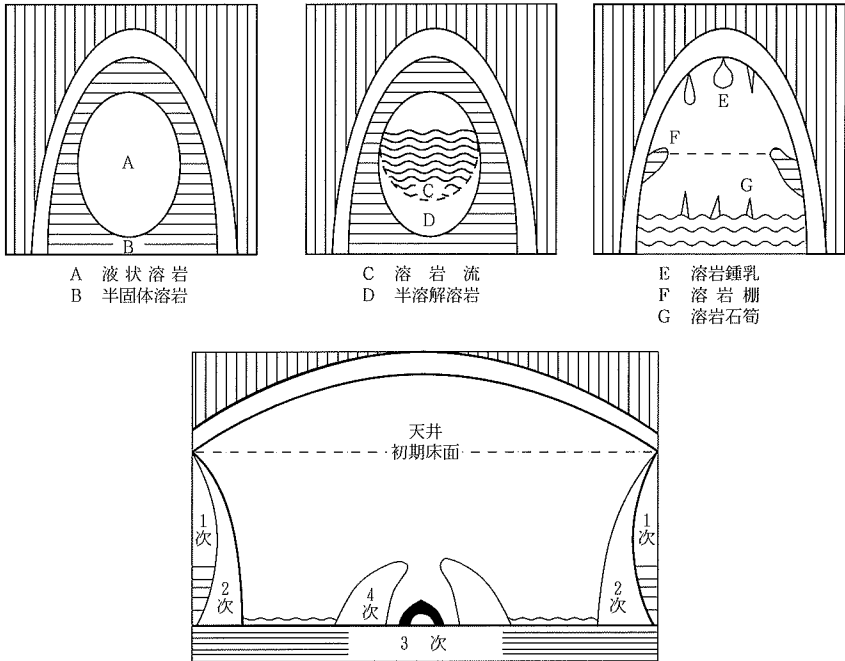
この問題を検証するためには火山洞窟形成層(溶岩層)の鉱物組成を分析することが不可欠となる。火山洞窟の内部(**Fig.8** 上図)における洞窟生成物(n次的変形物)と洞内空間構成形態も溶岩の成分と緊密な関係をもつものと推定される(**Fig.8** 下図)。その溶岩の成分と場所によって生成物が異なるのは、**Fig.8**のモデルから理解できる。これらを撮影したのが**Fig.9**である。すなわち、上図は天井部分で鐘乳石などの洞窟生成物である。中図は壁面部分でn次回にわたって形成された溶岩流の痕跡や溶岩棚等が見られる1次・2次洞内空間構成形態である。下図は床面部分でn次回にわたって形成された溶岩流の痕跡から、組成群によって異なる溶岩の3次・4次洞内空間構成形態である。

洞窟生成物には、①溶岩鐘乳石、②溶岩鐘乳管、③ヘリクタイト、④溶岩石筍、⑤溶岩柱、⑥溶岩水平線、⑦ヘリグマイト、⑧カーテン、⑨縄状溶岩洞床、⑩浪状溶岩洞床、⑪ラミナ、⑫溶岩球(ラバボール)、⑬チューブインチューブなどである(済州道、1987・洪、1991)。さらに、洞内空間構成形態には、①溶岩棚、②溶岩橋、③コッフィン(棺桶)、④溶岩滝(ラバホール・ラバカスケット)、⑤溶岩洞窟殻(ラバケイブクラスト)、⑥ライニング(内張り層)などがある。

ピレモッ窟内の溶岩球(700cm)とケイ酸柱(28cm)は世界最大級のものである。**Fig.10**の上図と下図はこのピレモッ窟の外部と内部を示したものである。上図は、森林の中で発見されたガス噴出孔であり、洞窟の内側から撮影した。下図は、洞窟の天蓋部の弱線部を抜いてガス体が噴出した崩壊部の痕跡である。

#### 4.1 原段階の形成期

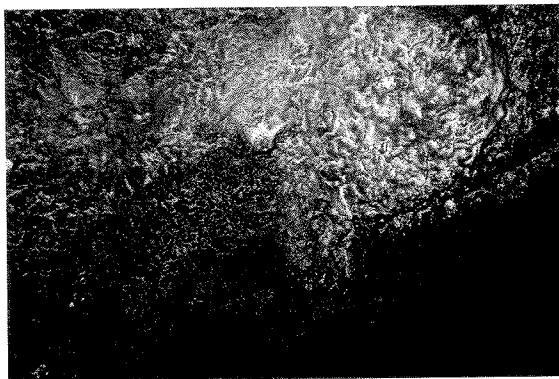
濟州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態(沢、大橋)



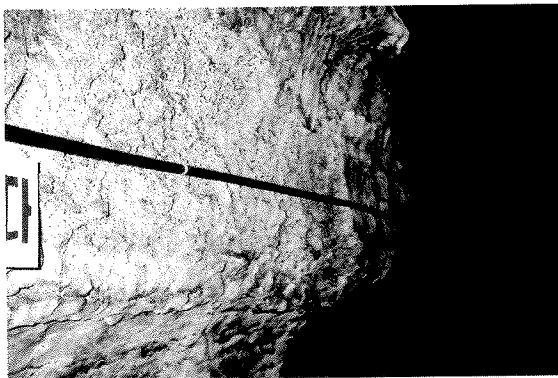
**Fig.8** 溶岩洞窟の形成過程のモデル  
(Model of the Formation Process of the Lava Cave)

濟州火山島の大規模な溶岩洞窟は、大部分が表善面玄武岩層内に発達している。表善面玄武岩層は、累層層厚が厚く、流動性が大きいため、大きな洞窟を形成するのに有利な条件を有している。溶岩主成分であるケイ酸の含有量は、52wt.%以下であり、塩基性玄武岩といえる。溶岩洞窟の皮殻は、赤熱状態である溶岩の噴出口から低い所に向かって流れる間に、外気の影響により外部が停止してから、固くなって形成する。溶岩洞窟の内部には、熔融状態の溶岩流は、継続して上方から流動し続け、内部溶岩欠損により空洞が生じる。すなわち、この段階では、溶岩流の表面に皮殻が形成され、溶岩の供給量が減少あるいは中断している段階である。

金寧窟の通路と出入口は、**Fig.11** のとおりである。上図は、天井部分の南側と北側が崩れる前後に開口した通路である。



洞窟内の天井  
(Ceiling)

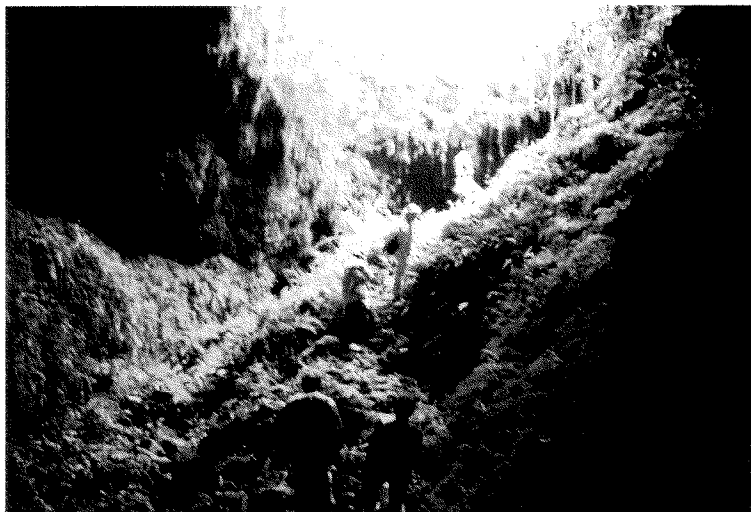


洞窟内の壁  
(Wall)

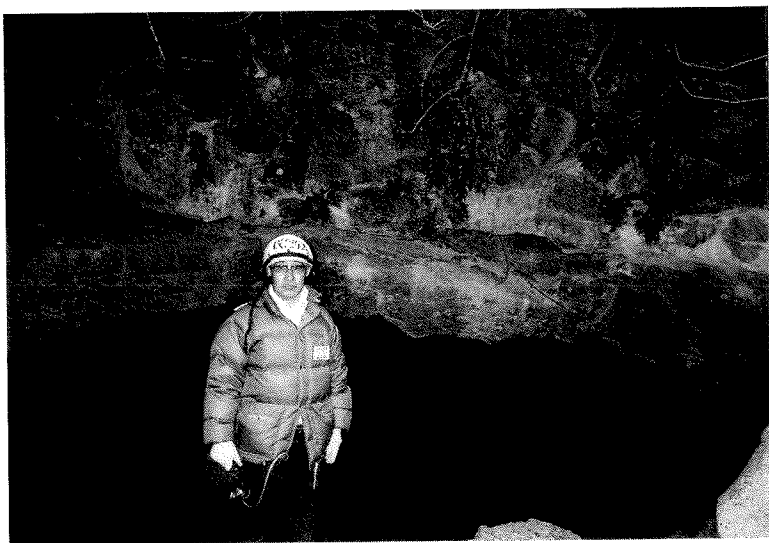
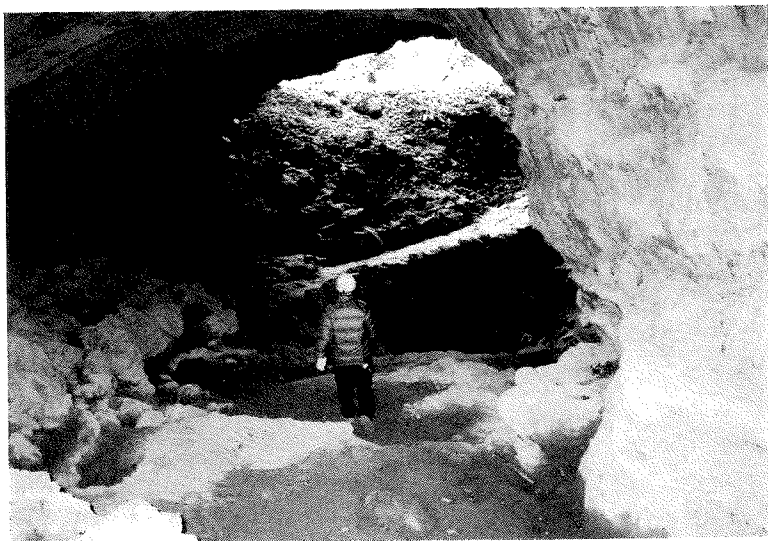


洞窟内の床  
(Floor)

**Fig.9** 萬丈窟（洞窟番号②）の内部にある天井・壁面・床面（沢勲 82.2）  
(Ceiling, Wall and Floor of Inside in Manjang-Gul Cave)



**Fig.10** ビレモッ窟（洞窟番号①）の外部と内部（沢勲 92.3）  
(Outside and Inside Entrance in Pillemot Cave)  
(上) 洞窟の内部から撮影したところのガス噴出孔の全景。  
(下) 洞窟内の天井部にガス体が、抜けようとした痕跡がある。



**Fig.11** 金寧窟(洞窟番号⑫)の通路と出入口 (沢勲 88.11)

(Passage and Entrance of Kimnyeong-gul Cave)

(上)天井部分の南側と北側が地震等によって崩れる前後に落下した洞窟の通路  
(下)最初は玄武岩、後に貝砂。薄い天井部分の地震等により崩れて落下した入口



金寧窟の通路には、崩落したままの状態が残されている。薄い天井部分の崩落を契機として発見された入口である。すぐ近くの、人がやっと通れる程度の地底の狭い通路を抜けたところに貝砂が堆積しているのが観察できる。下図は、洞窟が形成後にいったん沈水し、再び離水する以前に、洞窟内に流入し、表善里玄武岩の上を覆っていた貝砂であろう。洞壁や洞窟天蓋部を構成する溶岩のひび割れ、風化作用が進行している。洞窟の環境保全という視点から、水の浸透層となる洞窟上での駐車場建設工事は問題があろう。

#### 4.2 第1段階のラバ・ケイブ形成

ラバ・ケイブについて、Charles V. Larson (1993) は、「A general term for any cave within lava, regardless of how formed (成因という視点から溶岩中の空洞を表す一般的な用語。)」 See also: cave; lava tube; lava tube cave. Aka: volcanic cave.と説明している。筆者らは溶岩洞について次のように説明する。すなわち、溶岩内のある洞窟を表示するための一般的な用語で、使用される。溶岩が流れた後に、洞窟の内外に温度差が生じる。その時、外側は冷却固結し、内側はガスが充満し厚い流動性を保ち、内部の溶岩が外側に流れ出る、溶岩の空洞現象が生じた洞窟である。Difference in temperature results to the interior and exterior of cave, after lava flowed. That moment, the outside is hardened while cooling. Inside effuses to the outside because gas fills. At the later time, the cave phenomenon (lava cave) of lava happened. 参照：洞窟；溶岩管；溶岩管洞窟。別名：火山/溶岩洞窟。とも言える。

溶岩洞には多くの形態があるが、主に、溶岩洞ボックスワーク (Lava Tube Boxwork)、溶岩洞空洞 (Lava Tube Cave : or Simple" Lava Tube), 溶岩洞システム (Lava Tube System) などがある。

#### 4.3 第1段階のLava Tube 形成

溶岩洞とは、ラバ・チューブとも言うのである。ラバ・チューブについて、Charles V. Larson (1993) は次のように説明する。すなわち、「A conduit

formed of hardened lava, on or within a lava flow through which lava flows to an advancing flow. Also, A cavernous segment of the conduit remaining after flow ceases. Only two variants, surface tube and tube-in-tube are literally tubes. A lava tube may be active (carrying fluid lava), abandoned (see primary), filled with solid lava (did not drain), reactivated (invaded by a subsequent eruption), or filled to some degree with deposits like sand or water. (勝間田明男訳によると：溶岩流の上、あるいは、内部の固化した溶岩でできた暗渠。その溶岩流の中を通過して、溶岩は流れの先端部分に進んで行く。流れが止まった後に残されている暗渠の空洞部分のことと呼ぶ。2つの別形：表面洞窟とチューブ・イン・チューブが文字通りの洞窟である。溶岩洞は、①アクティブで（流体溶岩を運んでいる）ある場合、②放棄された場合、③固体溶岩で満たされた場合、④再活性化された場合および⑤堆積物や水などである程度満たされた場合などがある。

ここで、玄武岩火山にできる溶岩洞窟 (<file:///¥¥center sv¥¥kyoutuu¥¥澤¥¥勝間田明男洞窟用語¥¥lava cave doc.htm>) について理解する必要がある。まず、ケイ酸の含有量が少ないほど粘性が小さく、ガス ( $H_2O$ ) の含有量が多い。マグマの生成は、溶岩の溶融が高い温度 ( $1200^{\circ}C$ )、圧力の減少および融点を低下させる組成を混合させることによって、ケイ酸 ( $SiO_2$ ) の含有量 (45~52wt.%) になる可能性がある。マグマの中には、8%のガス ( $H_2O$ ) を含む揮発性物質が、飽和点に達する。その時から発泡し始めたものが、噴火の前兆である。溶岩中の水は、低い温度 ( $374^{\circ}C$ ) で 218 気圧以上になると、超臨界水 (気体) になり、噴火時に、溶岩は減圧されビールの開栓時のように発泡するのである。カトマイ火山 (アラスカ) の噴火時の調査では、溶岩流中のガスの 99% が水であることが分かっている。このように、減圧によって盛んに発泡し、溶岩流中の揮発性物質を放出する。放出された揮発性物質は、溶岩流中に集合し空洞 (Cavity) を形成する。ここで、液体では、発泡を生じやすい条件にある上に、溶岩流のように減圧による盛んな発泡は、空洞 (Cavity) を形成しやすくと考えるべきである。空洞 (Cavity) が形成すると、その周囲にや早い時点で殻 (Crust) ができる。殻 (Crust) は、ほとんど気

泡の見られない緻密な溶岩でできているので、空洞部にガスを放出したことを示している。

## 5 おわりに

濟州島は火山洞窟の宝庫・博物館である。世界の火山・溶岩洞窟のなかで、濟州島における火山・溶岩洞窟の分布および特徴を検討した。さらに、洞窟形成層となる溶岩の各種分析を試みた。その結果と考察を要約すると以下のようになる。

### 5.1 濟州島の火山・溶岩洞窟の分布とその規定条件

濟州火山島の各地で現在まで確認されている火山溶岩洞窟数は約 60 個である。世界最大級規模の火山洞窟が多数存在し、単位面積当たりの洞窟密度としては、世界第 1 位とみなされる。溶岩洞窟の内部では、溶融状態の溶岩流は継続して上方から流動し続け、内部溶岩欠損により空洞が生じる。

溶岩洞窟の大部分は、旧左邑・翰林邑および涯月邑に分布している。いずれも第四紀更新世初期の第 2 噴出期の溶岩—表善里玄武岩層—の中に形成されており萬丈窟・狭才窟およびピレモッ窟洞窟システムなどが代表的なものである。その主要な分布地域は標高 200m 以下のアスピーテ状溶岩台地の末端部にあたる。溶岩層の流出源となった火口の位置や当時の古地理については不明な点が多い。一方、島の中央部に聳える溶岩ドーム、漢拏山の山頂とその周辺急斜面中の標高 300m から 1700m の高所に分布する溶岩洞窟群は形成時代、特徴を異にするものであろう。漢拏山玄武岩の分布地域と対応しており、第 4 噴出期すなわち第四紀の中期のものと推定される。それらの詳細に関する調査は今後の課題である。

### 5.2 濟州島の火山洞窟の特徴と各種の分析結果との関係

濟州島における火山・溶岩洞窟の発達やその特徴は、粘着性が弱く、流動性が高いアルカリ性玄武岩層の物性と密接に関係している。洞窟には、水平洞窟・

垂直洞窟および非系統洞窟の3系統が大きく分類できる。萬丈窟システムには、特に、背斜状の溶岩や傾斜状の溶岩から始まり、縄状溶岩などが観察される。溶岩流の曲流 (Meandering) のため、方向変更にともない多くの支洞が形成されている。萬丈窟の地形的な特徴として多層構造が挙げられる。すなわち、上層洞窟と下層洞窟の上下2層の洞窟から形成されている。

### 5.3 K-Ar 法絶対年代測定

本島における溶岩の絶対年代測定に関しては、結果と既往の見解との対比を試みた。溶岩形成年代の推定に著しい食い違いが認められた。本稿ではその意味の分析と今後の課題を整理した。

### 5.4 溶岩の組成、特にケイ酸含有量および結晶構造

溶岩のケイ酸の含有率を測定した。その結果から、本島の溶岩はその値が約45 (玄武岩) ~53 (玄武岩質安山岩) wt.%であると判定した。濟州島の火山洞窟を形成する溶岩について偏光顕微鏡写真を撮影し、富士火山の溶岩との比較を試みた。さらに、X線回折図形の結果から、立方晶系は萬丈窟の双子溶岩柱に、六方晶系は三段溶岩橋、単斜晶系は萬丈窟の双子溶岩柱と翰林溶岩樹型で、三斜晶系は萬丈窟の三段溶岩橋と翰林溶岩樹型において卓越していることを明らかにした。

### 5.5 水質分析と洞窟保全

萬丈窟の水質分析値は、①BOD分析値は26.0、②COD分析値は1.52、③Phenol類の分析値は0.001、④Hexane抽出物質含有量は1.7、⑤濃度分析値は、亜鉛 (Zn : 0.2) 0.2 で、鉄 (Fe : 0.5) および⑥水素指数の分析値は8.0である。

### 5.6 洞窟の地形・構造の系統的記載

#### — 第1段階の洞窟形態の形成モデル化 —

濟州島は、アスピーテ式とトロイデ式の複成火山地形を呈している。溶岩が、

地表面を流動する時にその中に溶岩溝、すなわち、堀・溝・溶岩洞を形成する。その結果、溶岩層内部に、空白状態になった溶岩溝が形成される。

火山洞窟内部における生成物としては、①溶岩鐘乳石、②溶岩鐘乳管、③ヘリクタイト(曲鍾乳石)、④溶岩石筍、⑤溶岩柱、⑥溶岩水平線、⑦ヘリグマイト(曲石筍)、⑧カーテン、⑨縄状溶岩洞床、⑩浪状溶岩洞床、⑪ラミナ(葉理)、⑫溶岩球(ラバボール) および⑬チューブインチューブ(洞中洞)などが認められる。それらの発達過程や位置、相互関係などを系統的に記載し、模式図を作製してモデル化を試みた。

## 参 考 文 献

- 1) S.M. Lee 「*Volcanic Rocks in Cheju Island*」 J. Geological Society of Korea 2/, 1-7 1966
- 3) 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
- 4) 元鐘寛「濟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
- 5) A.Miyashiro 「*Nature of Alkali Volcanic Rock Series*」 *Contrib. Mineral. Petrol* 66/,94-104 1978
- 6) R. W. Le Maitre『*A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*』Blackwell Scientific Publications 1978
- 7) 申裕泳『溶岩洞窟の構造と形成過程に関する研究(一萬丈窟を中心に一)』1981
- 8) M.W. Lee 「*Petrology and Geochemistry of Jeju Volcanic Island, Korea*」 The Science Reports of the Tohoku University Series III 15 /,177-250 1982
- 9) 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
- 10) 学会編集部「濟州島の火山洞窟」洞窟 13/,11-36 1986

- 11) 濟州道『濟州島の火山洞窟』濟州道庁 1987
- 12) S. Sameshima, T. Ogawa and N.Kashima 『5<sup>th</sup> International Symposium on Vulcanospeleology Excursion Guide Book』 5<sup>th</sup> International Symposium on Vulcanospeleology 1988
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 沢勲・村田・洪始煥「大韓民国萬丈窟双子熔岩石柱についての二、三の知見」日本洞窟学会誌 15/, 42-46 1990
- 18) 洪始煥『韓国洞窟大觀』三柱出版社 1990
- 19) 権重国「濟州道の火山と洞窟」洞窟 24/, 30-68 1991
- 20) 洪始煥「濟州島の洞窟概觀」洞窟 25/, 15-28 1991
- 21) 鄭昌熙「挾才洞窟地帯の地質觀察」洞窟 25/, 29-81 1991
- 22) 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
- 23) Charles V Larson 「An Illustrated Glossary of Lava Tube Features」Western Speological Survey Bulletin No.87. 1993
- 24) 都城秋穂・久城育夫『岩石学Ⅲ』共立全書 214、1995
- 25) H. KUNO 「Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island area」. Bull. Volcano (2) 29/, 195-222 1996
- 26) 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熔岩洞窟の成分比較」洞窟学雜誌 21/, 65-70 1996
- 27) 沢勲「濟州火山島の萬丈窟の環境保全と水質分析」洞窟 51/, 15-18 1997

- 28) 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
  - 29) 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
  - 30) 沢勲「*Quantitative Analysis and K-Ar Age Determination of a Lava Bridge in Manjang-gul Cave*」KOFST 739-746 1999
  - 31) 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
  - 32) 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
  - 33) 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
- \* 大橋 健：「韓国、濟州島の漢拏山火山体の開析過程と Pseud-Karst—表善里玄武岩台地の事例—」、大阪経済法科大学論集 60 2001予定

