

韓国、済州道金寧里、海面下溶岩洞窟（ケウセツ窟） の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析

沢 勲

Isao SAWA 大橋 健 Tsuyoshi OHASHI

井上 央

Hisashi INOUE 金 炳宇 Byoung-Woo KIM

皇甫相源 Sang-Weon HWANGBO

金 昌植 Chang-Sig KIM

Geomorphological Analysis, X-ray Analysis and Water Analysis of Kaeuset-gul Cave in Kim-nyong-Ri, Jeju-Do, Korea

ABSTRACT

In September 2002 and 2003, a Speleological exploration was carried out by Japanese-Korean lava cave research group in Jeju Island, Korea.

Kaeuset-gul Cave (KC) is located on the northeast coast of Jeju Island, 33°33' 09" N in latitude and 126°45' 22" E in longitude. The coast belong Kimnyong-Ri, Kujwa-Up, Jeju Do. Altitude of the cave-entrance is 10m and length of the cave is 90m. KC is situated in NN area of the Manjang-gul cave (125m).

Lava specimens of KC are studied by X-ray fluorescence analysis (XRF). Thin section studies indicate that these specimens are described as Picro-basalt. Average major chemical component of specimen from KC are as follows (wt. %); .

$\text{SiO}_2 = 44.87$, $\text{TiO}_2 = 3.01$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17.56$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 12.91$, $\text{MnO} = 0.14$,

$\text{MgO} = 4.82$, $\text{CaO} = 8.26$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.67$, $\text{K}_2\text{O} = 0.64$, $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.53$ in KC.

COD was measured that KC. The result of measurement COD was 1.1 ppm. The data was compared with data of Japanese Industrial Standard (JIS-K-0102), Daikon-island in Japan, Manjyang-gul cave and that get coastal water of Jeju-Streight.

Key words : X-Ray Fluorescence Analysis, Cave Form, Formation Process, Water Analysis

[大阪経済法科大学論集 第89号] [The Review of Osaka University of Economics and Law, Vol. 89 (2005), pp 1-29]

1. はじめに

本稿は、韓国、済州島で行った日韓共同洞窟総合学術調査（2001-2003）の報告の一部である。ケウセツ窟は同島北東部海岸に位置し（Fig.1）、行政上は北済州郡旧左邑金寧里に属する。金寧里集落の南東端に洞口があり、その数理位置は北緯 $33^{\circ} 33' 09''$ 、東経 $126^{\circ} 45' 22''$ を示す。本洞窟に関してはこれまで本格的な学術調査は行われていない。海岸線からわずか100数十メートル足らずの位置にあり、海食洞もしくは溶岩洞窟との複合洞である疑いがもたれていた。さらに、海岸湧水や海底洞窟との関連性も興味深く、そうした点が本洞調査の最初の動機となった。

第1回現地調査（2001年9月）では、縮尺5000分の1大縮尺図上での正確な位置の確認をした。潜入調査と簡易測量調査により洞窟の規模と形態、成因等についての概要を把握し、主洞の北方延長部の湛水域が感潮現象を示す事実を明らかにした。そして、済州海峡に跨る溶岩洞窟（海底洞窟）の存在の可能性が大きいことを予測した。ただし、本島において、海底溶岩洞窟の存在に関する報告はこれまで皆無である。単に火山活動史だけでなく、済州海峡とその沿岸地域の海岸地形発達史や第四紀の環境変遷史との関わりで、ケウセツ窟がどのような位置づけや問題点を有しているかという検討が重要である。調査の成果と問題点についてはすでに、日本洞窟学会（大橋ほか、2002）において中間報告を行った（大橋、2002・沢、2002）。

第2回現地調査（2002年9月）はさらに類似条件を有する北村里の海岸にある海面下溶岩洞窟をマークし、日韓合同調査を試みた。だが、すでにそこは人為的な破壊が進み、潜入調査が不可能であった。ケウセツ窟の再調査は満潮時に重なり、探索装備の不足もあり正確な実測作業を遂行することが困難であった。造洞層（溶岩）の採取とその蛍光X線分析による組成、洞内水の汚染状況を明らかにする目的で水質分析を試みた。さらに、周辺地区の金寧寺窟などとの関連、海岸湧水との関連、海岸段丘や離水浜堤列などとの関連についても検討した。短時間の調査であつたため、未解明の事項が少なくない。今後も調

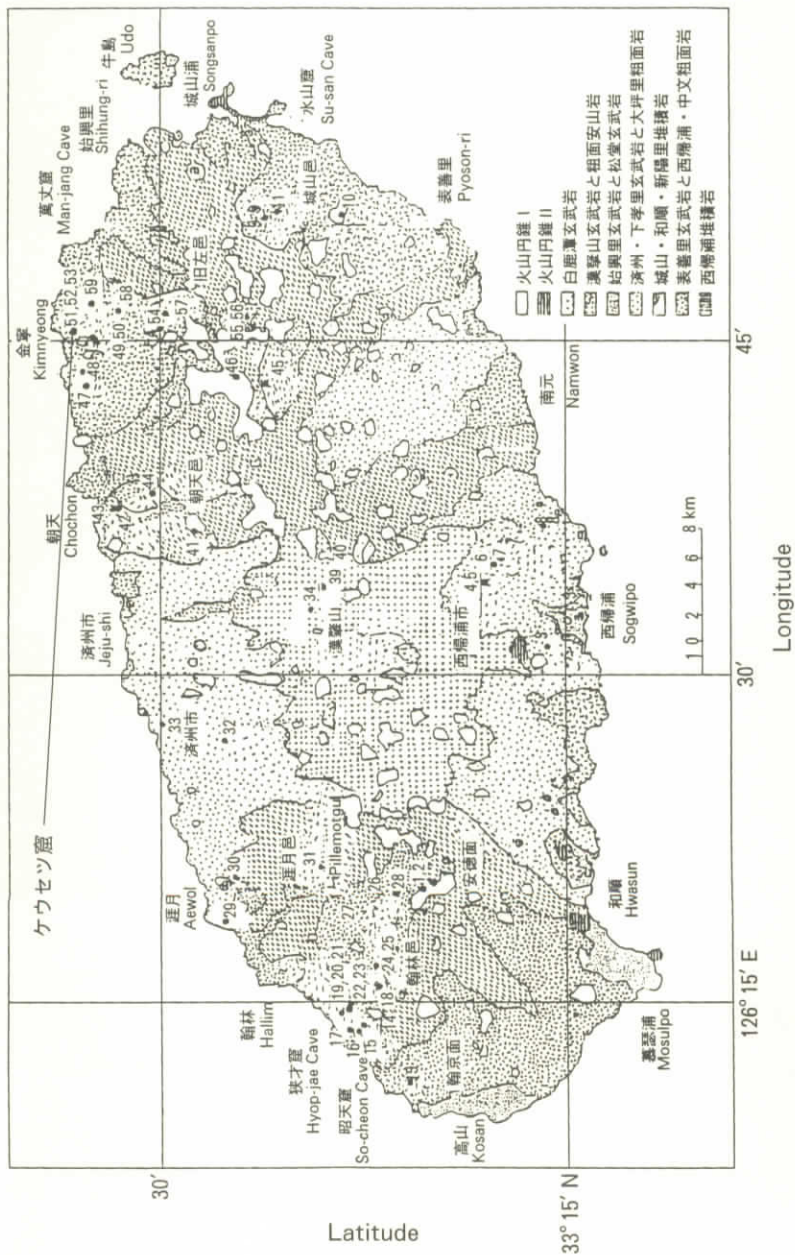


Fig. 1 済州道にある溶岩洞窟の分布と地質 (The Lava Cave Distribution and Geologic Map of Jeju-do)

査を継続する予定であるが、とりあえずこれまでの成果、今後の研究課題、そして本洞の保全問題などについて所見を整理した。方法としては、主として下記のような事項について検討した。すなわち、①簡易測量／特に平面と縦断面計測、②地形分析／海岸地形・海底地形との関係、③造洞層のX線分析／溶岩の組成、④水質分析／洞窟環境の破壊、⑤水文学的検討／海岸湧水・海底洞窟との関連性である。

2. 済州道の地形・地質概観

済州島は、韓半島の最南端に位置する。第三紀末から第四紀のはじめに噴出した玄武岩からなる Hot Spot 型火山島である。済州島の火山活動は、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、済州島の中央部に聳え韓国の最高峰、漢拏山（1950m）はアスピーテを貫く鐘状（トロイデ）火山の特徴を呈し、済州島は時代を異にする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。また、山麓の台地上には360座を数える新旧の単成火山群が発達している。

済州島の地質は、主として、玄武岩からなり南部の一部に堆積岩が見られる。**Fig. 1** の表のなかの空白と数字は、寄生火山と洞窟番号である。島の中心から東北と西南を結ぶ線、西北と東南を結ぶ線および東西の中間線で区分すると多くの特徴が見られる。この東西の中間線の南側と北側は、それぞれ寄生火山と多くの洞窟が存在している。規模が大きい洞窟は、漢拏山を中心にした西北と東北方向に分布し、現在まで確認されている火山溶岩洞窟数（済州道・洪、1987・Sameshima, 1988）は、1960年前後、そのうち洞窟が調査されたものは約60個である。洞窟の大部分は、北東部の旧左邑（**Fig. 2**）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。萬丈窟・狹才窟およびビレモツ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。単位面積（1 km²）あたりの洞窟分布密度という点では、済州島は世界最大級である。また済州島には

韓国、済州道金寧里、海面上溶岩洞窟（ケウセツ窟）の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析（沢、大橋、井上、金炳宇、皇甫、金昌植）

世界の最大級規模の火山洞窟が多数ある。

ケイセツ窟（KC）の簡易測量位置を **Fig. 3** とその周辺の洞窟分布を **Table 1** に表した。

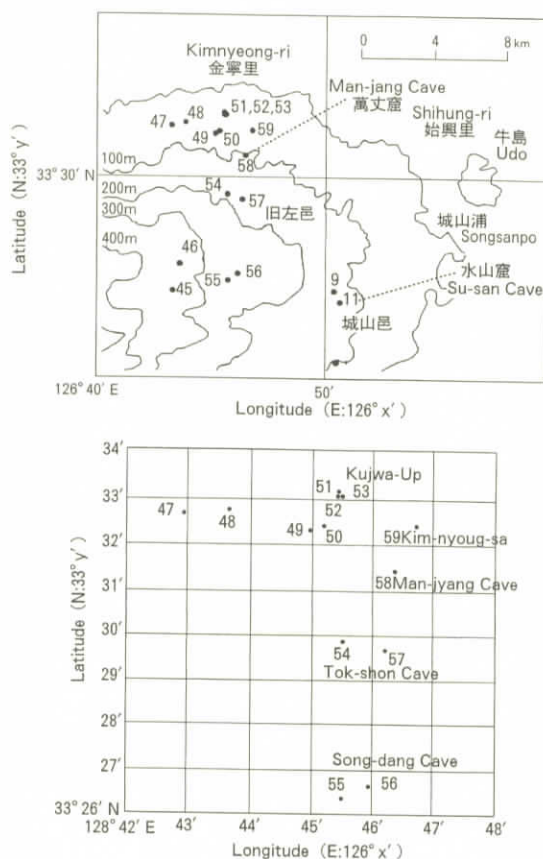


Fig. 2 済州道、旧左邑にある溶岩洞窟の分布（等高線は100 m 間隔）(The Distribution Map of Lava Caves in Kujwa-Up, Jeju-do (Contour Interval is 100m))

韓国、済州道金寧里、海面下溶岩洞窟（ケウセツ窟）の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析（沢、大橋、井上、金炳字、皇甫、金昌植）

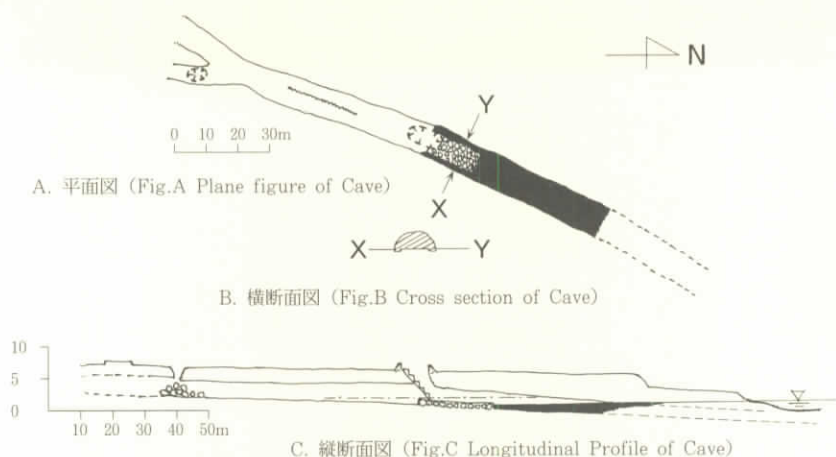


Fig. 3 ケウセツ窟の簡易測量図（大橋 健、2004）（Simple Plane of Ke-U-Set Gul Cave : T.OHASHI, 2004）

Table 1 済州道、旧左邑にある溶岩洞窟の分布（The Distribution Map of Lava Caves in Kujwa-Up, Jeju-do）

No	洞窟名	東経 (E)	北緯 (N)	所在地	延長 (m)	標高 (m)	地質
47	ケヨモ窟	126° 42' 58"	33° 32' 38"	北済州郡 旧左邑 東福里	170	10	表善里玄武岩
48	ドネボナ窟	126° 43' 36"	33° 32' 45"	北済州郡 旧左邑 金寧里	80	30	表善里玄武岩
49	グエネギ窟	126° 44' 58"	33° 32' 18"	北済州郡 旧左邑 金寧里	200	30	表善里玄武岩
50	ボナムミ窟	126° 45' 09"	33° 32' 24"	北済州郡 旧左邑 金寧里	100	150	表善里玄武岩
51	ケウセ窟	126° 45' 22"	33° 33' 09"	北済州郡 旧左邑 金寧里	414	10	表善里玄武岩
52	金寧寺窟	126° 45' 22"	33° 33' 04"	北済州郡 旧左邑 金寧里	不明	10	表善里玄武岩
53	金寧バ窟	126° 45' 27"	33° 33' 04"	北済州郡 旧左邑 金寧里	不明	10	表善里玄武岩
54	徳泉窟Ⅰ	126° 45' 30"	33° 29' 52"	北済州郡 旧左邑 徳泉里	232	155	表善里玄武岩
55	松堂窟	126° 45' 31"	33° 26' 22"	北済州郡 旧左邑 松堂里	850	265	表善里玄武岩
56	松堂窟Ⅱ	126° 45' 58"	33° 26' 39"	北済州郡 旧左邑 松堂里	138	255	表善里玄武岩
57	徳泉窟Ⅱ	126° 46' 10"	33° 29' 40"	北済州郡 旧左邑 徳泉里	-25	160	表善里玄武岩
58	萬丈窟	126° 46' 18"	33° 31' 26"	北済州郡 旧左邑 金寧里	8,924	125	表善里玄武岩
59	金寧窟	126° 46' 38"	33° 32' 26"	北済州郡 旧左邑 金寧里	705	60	表善里玄武岩

3. 実験方法

3.1 蛍光X線分析の試料採取と調製法

蛍光X線分析による造洞層の全岩組成分析の試料は洞窟の入口階段付近にある崩落層の岩片である。本研究に用いた岩片（200 g）は、ハンマーを用いて試料を約1 cmのチップに荒砕きし、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、タングステンカーバイト製容器を用い、ヘキサシによる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℃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0.400 g：融剤 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ （無水四ホウ酸リチウム）：4.0 g）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℃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℃で4時間以上乾燥したものを使用した。隔離剤としてはLiFを用いた。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F P法にて行った。測定条件は **Table 2** のとおりである。

Table 2 蛍光X線分析の測定条件（Measurement Condition of X-Ray Fluorescence Analysis）

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	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 α				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 ϕ		
アッテネータ	Out				スリット			Std.		
PHA	微分法				X線通路			真空		

3.2 水質分析における試料採取とその条件

洞窟内にある水の採取は、洞窟の中央にある階段付近と海面下溶岩洞窟の外側（洞窟内の最北端に近い所）の海水である。水質分析の試験方法は、JIS K 0102のとおりである（Table 3）。島津製作所の原子吸光分析装置（AA-6800）は、銅含有量（Cu）、亜鉛含有量（Zn）、溶解性鉄含有量（Fe）、溶解性マンガン含有量（Mn）、カドミウム及びその化合物（Cd etc.）、鉛及びその化合物（Pb etc.）、6価クロム化合物（Cr₆ etc.）、砒素及びその化合物（As etc.）や水銀及びその化合物（Hg etc.）の測定を行った。宮本理研工業株式会社のCOD測定電気湯煎器（CD-4の16987）で化学的酸素要求量（COD）の測定を行った。堀場製作所のpH/DOメーター（D-25）で水素イオン濃度と溶存酸素（O）の測定を行った。大洋科学工業（株）のBOD恒温循環装置（COOLNITのBOD GL-19）で生物化学的酸素要求量（BOD）の測定を行った。電気化学計器株式会社の（MODELのHC-3）で弗素含有量（F）とシアニ化合物（CN etc.）の測定を行った。

4. 分析結果

4.1 定量分析の結果と結晶構造

KCの造洞層結晶系には、 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ というAnorthiteの三斜晶系、 $(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{Si}_2\text{O}_8$ というAnorthiteの三斜晶系、 $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$ というAugiteの単斜晶系、 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ というForsteriteの斜方晶系および $(\text{Ca}, \text{Na})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})_3\text{O}_8$ というAlbiteの三斜晶系。定量分析値（重量百分率 wt.%）はグループ分析によると10成分が検出された。すなわち、 $\text{SiO}_2=44.87$, $\text{TiO}_2=3.01$, $\text{Al}_2\text{O}_3=17.56$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=12.91$, $\text{MnO}=0.14$, $\text{MgO}=4.82$, $\text{CaO}=8.26$, $\text{Na}_2\text{O}=2.67$, $\text{K}_2\text{O}=0.64$, $\text{P}_2\text{O}_5=0.53$ である。

4.2 水質分析の結果

KCの水質分析の試験結果は、Table 3のとおりである。すなわち、水素イ

Table 3 済州火山島、旧左邑にあるケウセツ窟と萬丈窟の水質分析値（Water Analysis Data of Ke-U-Set Gul Cave and Man-Jyang Gul Cave, in Kujwa-Up, Jeju Volcanic Island）

	測定項目	単位	萬丈窟	Ke-u-set窟	金寧海水	排水基準	環境基準	JIS Kによる測定方法と規準
1	水素イオン濃度	-	8.0	7.8	8.0	5~9	7.8~8.3	0102 - 12.1
2	生物化学的酸素要求量 (BOD)	mg/l	26.0	1未満		160		0102 - 21
3	化学的酸素要求量 (COD)	mg/l	1.5	1.1	1.4	160	2	0102 - 17
4	銅含有量 (Cu)	mg/l	0.3未満			3		0102 - 52.2
5	亜鉛含有量 (Zn)	mg/l	0.5未満			5		0102 - 53.1
6	溶解性鉄含有量 (Fe)	mg/l	1未満			10		0102 - 57.2
7	溶解性マンガン含有量 (Mn)	mg/l	1未満			10		0102 - 56.2
8	弗素含有量 (F)	mg/l	0.01未満			8	0.8	0102 - 34.2
9	カドミウム及びその化合物 (Cd etc.)	mg/l	0.01未満			0.1	0.01	0102 - 55.1
10	シアン化合物 (CN etc.)	mg/l	0.1未満			1		0102 - 38.4
11	鉛及びその化合物 (Pb etc.)	mg/l	0.01未満			0.1	0.01	0102 - 54.1
12	6価クロム化合物 (Cr ₆ etc.)	mg/l	0.05未満			0.5	0.05	0102 - 65.2.2
13	砒素及びその化合物 (As etc.)	mg/l	0.01未満			0.1	0.01	0102 - 61.2
14	水銀及びその化合物 (Hg etc.)	mg/l	0.0005未満			0.005	0.0005	0102 - 65.1.1
15	溶存酸素 (O)	mg/l		9.5	7.9		7.5以上	0102 - 32.3
	測定年度		1996	2002				

	分析装置	項目番号
1	島津製作所 原子吸光分析装置 AA-6800	4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14
2	宮本理研工業株式会社 COD測定電気湯煎器 CD-4 16987	3
3	堀場製作所 pH/DOメーター D-25	1, 15, 2
4	大洋科学工業(株) BOD恒温循環装置 COOLNIT BOD GL-19	2
5	電気化学計器株式会社 MODEL. HC-3	8, 10

オン濃度は7.8、生物化学的酸素要求量（BOD）は1（mg/l）、化学的酸素要求量（COD）は1.1（mg/l）である。銅含有量（Cu）、亜鉛含有量（Zn）、溶解性鉄含有量（Fe）、溶解性マンガン含有量（Mn）と弗素含有量（F）の含有量については、それぞれ基準以下である。溶存酸素（O）は9.5（mg/l）の基準以上である。

5. 考 察

5.1 全岩化学組成および考察

済州火山における溶岩の化学組成の分析は、李商萬(1966)・元鐘寛(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、蛍光 X 線分析による分析値は沢ほか（1989）と沢ほか（1996）によって報告されている（Table 4）。さらに、表善里玄武岩である萬丈窟の溶岩ブリッジに関する成分分析（蛍光 X 線分析）について、既に沢（1999）、沢・井上（1999）、沢・川村（2000）と沢・井上・河野（2000）の報告がある。

富士火山における洞窟内の火山噴出物の 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、済州火山島における火山噴出物の SiO_2 組成範囲は、41.20～66.31wt.%で、さらに、萬丈窟の溶岩（沢・井上、1990・1996・1999・2000）の SiO_2 組成範囲は、50.99wt.%である。富士火山と済州火山島における火山噴出物の SiO_2 組成範囲を比較した。その結果、翰林溶岩樹型試料の SiO_2 は、最小含有量の47.45wt.%で玄武岩質（塩基性岩）である。富士火山において 2 番目に多い化学組成の噴出物（ Al_2O_3 ）は13.19～25.20wt.%の範囲である。

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

済州火山島における火山噴出物の（ $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ）組成範囲と平均値は2.30～13.03wt.% と6.26wt.%で、ハワイのキラウエアや富士火山より広い範囲である。

Table 4 済州火山島、ケウセッ窟の造洞層の蛍光 X 線分析値 (XRF Analysis Data of Lava Cave included Ke-U-Set Gul Cave, Jeju Volcanic Island)

組成	萬丈窟洞窟系 ²⁾				西帰浦 ²⁾		翰林溶岩樹型 ²⁾		挾才窟洞窟系 ³⁾				済州溶岩洞窟	
	溶岩石柱	溶岩橋1F	溶岩橋2F	溶岩橋3F	ケウセッ窟	ケンセッイ窟	堅型	横臥型	挾才窟	双龍窟	黄金窟	昭天窟	最小値	最大値
SiO ₂	50.99	50.60	53.10	52.60	44.87	48.80	47.50	47.40	47.50	46.20	48.70	47.20	44.87	53.10
TiO ₂	2.15	1.93	1.79	1.74	3.01	2.50	2.58	2.58					1.74	3.01
AlO ₃	15.17	14.40	14.30	14.30	17.56	13.96	14.40	14.60	19.30	19.80	18.80	18.50	13.96	19.80
Fe ₂ O ₃ ¹⁾	12.56	12.40	12.40	12.40	12.91	12.21	12.60	12.60	10.80	11.70	10.70	12.30	10.70	12.91
MnO	0.16	0.16	0.15	0.15	0.14	0.16	0.16	0.16					0.14	0.16
MgO	6.15	6.39	6.23	6.89	4.82	7.55	8.63	8.57	8.80	9.10	7.80	9.30	4.82	9.30
CaO	8.06	9.59	8.85	8.84	8.26	8.99	9.12	9.13	6.80	6.20	7.50	6.20	6.20	9.59
Na ₂ O	3.27	3.71	2.64	2.54	2.67	2.88	2.95	2.93	3.20	3.40	3.10	3.50	2.54	3.71
K ₂ O	1.04	0.63	0.38	0.36	0.64	1.22	1.54	1.48	0.80	0.70	0.70	0.60	0.36	1.54
P ₂ O ₅	0.30	0.20	0.16	0.18	0.53	0.44	0.51	0.60					0.16	0.60
	経法論集36・76、洞窟20・21、日本洞窟学会15・21	経法論集36・76、洞窟20・21、日本洞窟学会29、	経法論集76、KOFST 99,日本洞窟学会29、	経法論集76、洞窟2000年	経法論集89 2005年	経法論集86 2004年	経法論集79 2001年	経法論集79 2001年	洪始煥著『韓国洞窟大観』三柱出版社、1990年					

1) Total Iron as Fe₂O₃, 2) Sawa and Others, 3) Hong

済州道にある溶岩洞窟のアルカリ成分($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)組成範囲と平均値は2.90～5.25wt.%と3.91wt.%である。KCのアルカリ成分は、済州道における溶岩洞窟と比べるとより小さい方の値である。

ケイ酸とアルカリ成分との関係を究明するため、Table 4とFig.4は、横軸に SiO_2 (wt.%)、縦軸に($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)(wt.%)をとり、それぞれの溶岩の化学組成(Miyashiro, 1978 ; R.W.Le Maitre, 1938)をプロットした。Fig.4上図は済州火山島における全体の成分である。図中2本の境界線はKUNO(1966)によるものでアルカリ玄武岩(A線)と非アルカリ玄武岩(AH線)である。すなわち、AH線は非アルカリ玄武岩系で、A線はアルカリ玄武岩系である。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ある。Fig.4下図は済州火山島の溶岩洞窟を含めたKCの成分である。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、KCの造洞層は高アルミナ質玄武岩であることが分かる。横軸に SiO_2 (X: wt.%)、縦軸に($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)(wt.%)から回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = -0.01X^2 - 0.88X + 3.81X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (1)$$

$$Y(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = -0.07X^2 + 6.56X - 155.08X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (2)$$

KCにおける横軸に SiO_2 (44.87wt.%)、縦軸に($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)(3.31wt.%)は、左側にある矢印の所である三角形表示である。KCは高アルミナ質玄武岩で双曲線の中央にある。KCのアルカリ性は、ケイ酸が SiO_2 (約48wt.%)まで増加すると多くなり、それから減少の傾向である。

5.3 ケイ酸と酸化カリウムとの関係

済州火山島の火山噴出物の(K_2O)組成範囲と平均値は0.05～5.63wt.%と2.06wt.%で、ハワイのキラウエアや富士火山より広い範囲である。済州火山島の溶岩洞窟の K_2O 組成範囲と平均値は0.36～1.54wt.%と0.84wt.%で、済州火山島より狭い範囲で、小さい平均値である(Table 4)。ケイ酸と酸化カリウム成

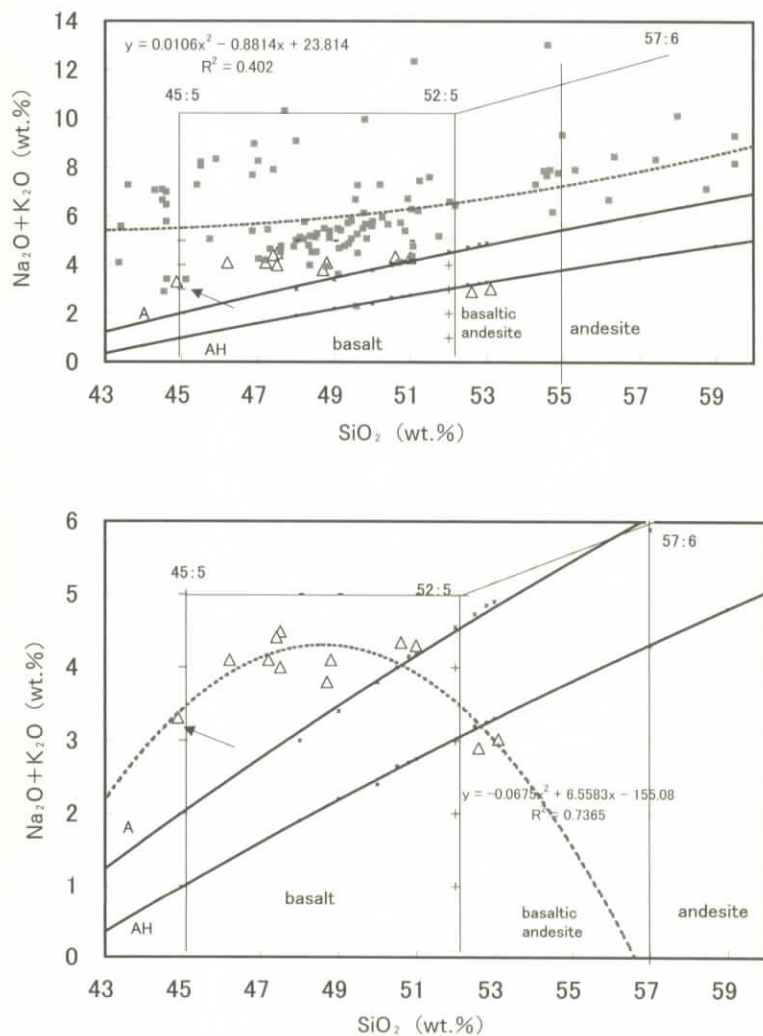


Fig. 4 済州火山島の溶岩洞窟を含む火山噴出物（上図）とケウセツ窟を含む溶岩洞窟（下図）におけるケイ酸とアルカリ性との関係（Plot of SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ contents of Lava in Jeju Volcanic Island (Upper Figure) and Lava Cave included Ke-U-Set Gul (Lower Figure). Chemical Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks using the Total Alkali Versus Silica (TAS) Diagram (after Le Bas et al., 1986, Fig.2). The Letter A denotes for Alkali Basalt Rock-Series; AH, High Alumina-Basalt Rock-Series; X-Indicate and Solid Triangle Square Rocks from GC. The Thick Vertical Lines indicate the Equivalent Position of the Fields in the TAS Diagram.)

分との関係を究明するため、**Fig.5** は、横軸に SiO_2 (X: wt.%)、縦軸に K_2O (Y: wt.%) をとり、それぞれの溶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.5** の上図と下図は済州火山島の全体と洞窟の成分である、多くは高いカリウム成分である。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y(\text{K}_2\text{O}) = -0.01X^2 - 0.58X + 13.2X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (3)$$

$$Y(\text{K}_2\text{O}) = -0.03X^2 + 3.33X - 79.6X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (4)$$

済州火山島における噴出物の広い範囲では、X の SiO_2 が多くなるにつれ、Y の酸化カリウムも増大の傾向である。一方、済州火山島における溶岩洞窟の成分のみをプロットしたのが **Fig.5** 下図である。

KC における横軸に SiO_2 (44.87wt.%)、縦軸に (K_2O) (0.64wt.%) は、左側にある矢印の所である○表示である。KC の K_2O 組成は、回帰曲線の値と近い酸化カリウム成分である。KC の酸化カリウム成分は、 SiO_2 組成とアルカリ成分 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 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.3** 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。

境界線は、Miyashiro(1978) ; R.W.Le Maitre (1938) に基づいている。KC は medium-K の高アルミナ玄武岩であることが high-K に近いことが理解できる。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。KC は medium-K の高アルミナ玄武岩であることが high-K に近いことが理解できる。KC は、双曲線の中央にある。KC の酸化カリウムは、ケイ酸が SiO_2 (約 48wt.%) まで増加すると多くなり、それから減少の傾向である。

5.4 ケイ酸対する有色鉱物 ($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) の関係

済州火山島における火山噴出物の MgO (wt.%) 組成範囲と平均値は 0.00~10.61 と 4.73 である。 Fe_2O_3 (wt.%) 組成範囲は 0.67~14.24 と 5.50 で、富士火山より

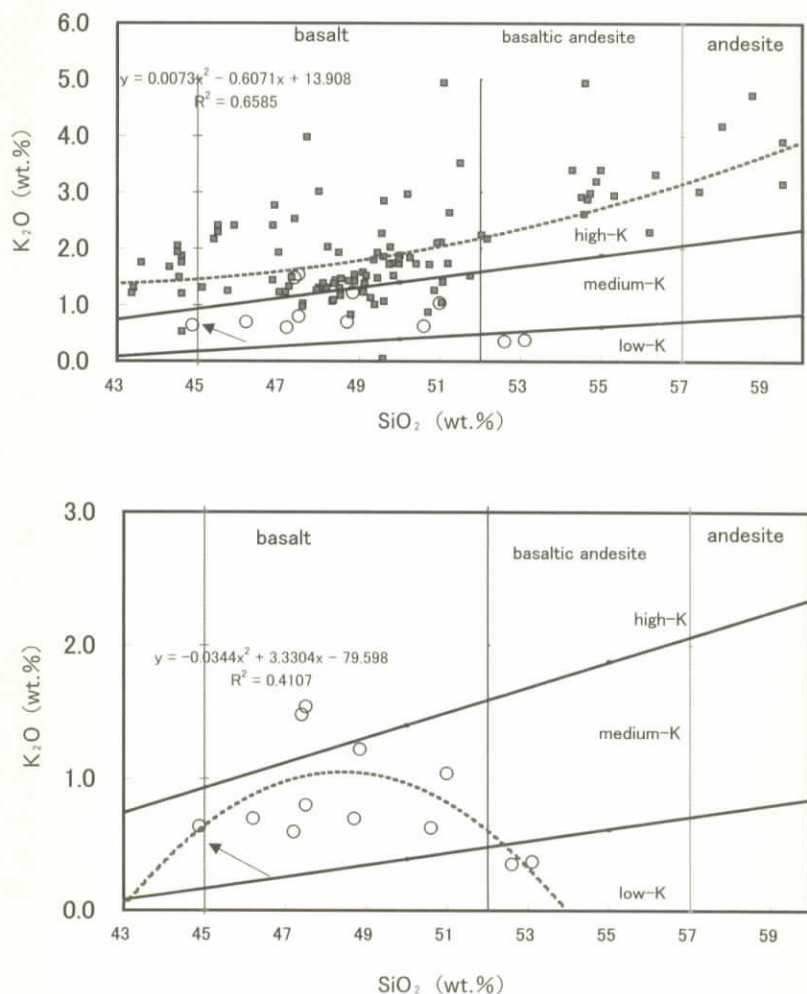


Fig. 5 済州火山島の溶岩洞窟を含む火山噴出物（上図）とケウセツ窟を含む溶岩洞窟（下図）におけるケイ酸と酸化カリウムとの関係（Plot of SiO_2 vs. K_2O contents of Lava in Jeju Volcanic Island (Upper Figure) and Lava Cave included Ke-U-Set Gul Cave (Lower Figure). Division of Basalts (with SiO_2 :48%, Basaltic Andesites and Andesites in Low-K, Medium-K and High-K Types. Note that High-K is NOT Synonymous with Potassic. Solid Circle Rocks from GC. The Thick Vertical Lines indicate the Equivalent Position of the Fields in the TAS Diagram.)

広い範囲であり、平均値より多い含有率である。CaO(wt.%)組成範囲と平均値は1.07~12.76と7.25である(**Table 4**)。一方、富士火山における火山噴出物の Fe_2O_3 (wt.%)組成範囲は1.60~13.70(八幡穴)wt.%である。

島全体のケイ酸と有色鉱物($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$)成分との関係を究明するため、**Fig.6**は、横軸に SiO_2 (X:wt.%)、縦軸に($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$)(Y:wt.%)をとり、それぞれの溶岩の化学組成をプロットした。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y(\text{MgO}) = -0.01X^2 + 0.80X - 8.27X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (5)$$

$$Y(\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.02X^2 - 2.27X - 71.93X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (6)$$

$$Y(\text{CaO}) = -0.01X^2 + 0.70X - 3.41X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (7)$$

上図にある済州火山島におけるKC有色鉱物成分は、回帰方程式線より多い。済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_2O_3 は異なった傾向である。

済州火山島における溶岩洞窟の MgO (wt.%)組成範囲と平均値は4.82~9.30と7.52である。 Fe_2O_3 (wt.%)組成範囲は10.70~12.91と12.13で、富士火山より広い範囲であり、平均値より多い含有率である。CaO(wt.%)組成範囲と平均値は6.20~9.59と8.13である。一方、富士火山における火山噴出物の Fe_2O_3 (wt.%)組成範囲は1.60~13.70(八幡穴)wt.%である。

KCを含む洞窟全体のケイ酸と有色鉱物($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$)成分との関係を究明するため、**Fig.7**は、横軸に SiO_2 (44.87wt.%)、縦軸に($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$)(12.9・4.82・8.26wt.%)をとり、それぞれの溶岩の化学組成をプロットした。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y(\text{Fe}_2\text{O}_3) = -0.13X^2 + 12.15X - 286.12X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (8)$$

$$Y(\text{MgO}) = 0.05X^2 - 4.54X - 123.04X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (9)$$

$$Y(\text{CaO}) = -0.001X^2 + 0.10X + 0.65X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (10)$$

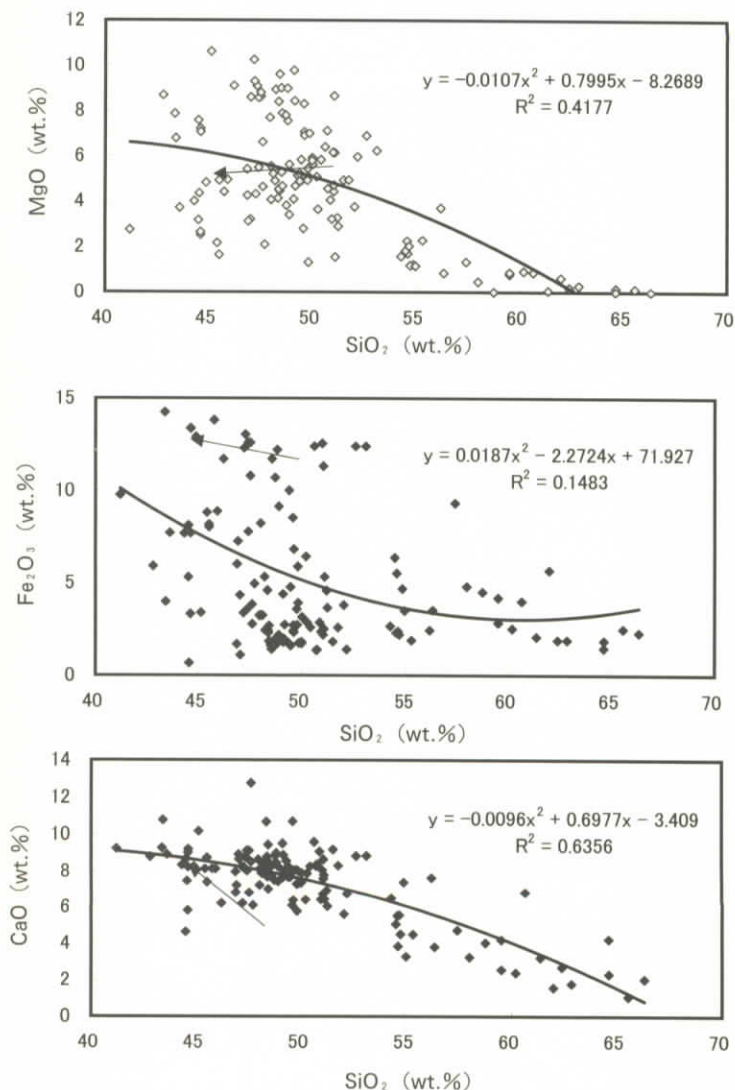


Fig. 6 済州火山島の溶岩洞窟を含む火山噴出物におけるケイ酸と有色鉱物 (MgO , Fe_2O_3 と CaO) との関係 (Plot of SiO_2 vs. the Colored Mineral (MgO , Fe_2O_3 and CaO) in a Volcanic Product including the Lava Cave, Jeju Volcanic Island.)

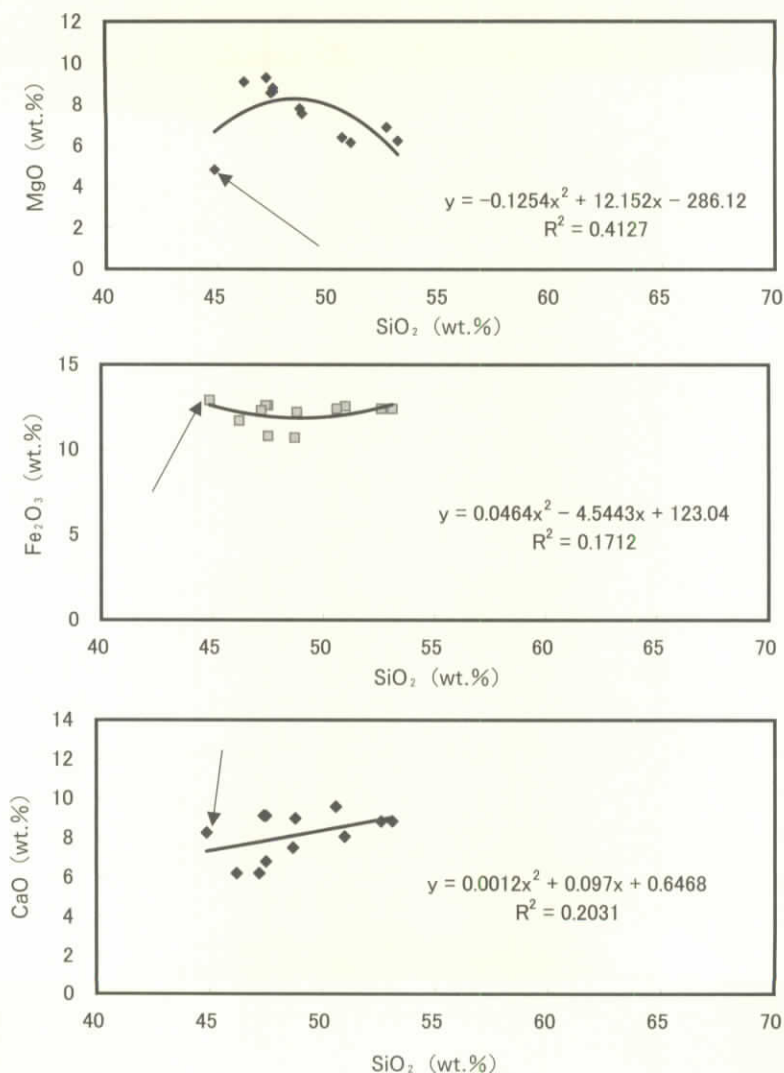


Fig. 7 済州火山島の溶岩洞窟におけるケイ酸と有色鉱物(MgO, Fe_2O_3 と CaO) との関係 (Plot of SiO_2 vs. the Colored Mineral (MgO, Fe_2O_3 and CaO) in the Lava Cave, Jeju Volcanic Island.)

K C の MgO と CaO は回帰方程式線より少ない含有量で、ケイ酸が増大するにつれ減少の傾向である。K C の Fe_2O_3 は回帰方程式線より多い含有量で、ケイ酸 SiO_2 (約40～60wt.%の範囲) では減少の傾向である。

5.5 ケイ酸に対する TiO_2 と Al_2O_3 との関係

済州火山島の火山噴出物の TiO_2 (wt.%) 組成範囲と平均値は0.00～3.57と1.76で、K C の含有量は平均値に近い値である。 Al_2O_3 (wt.%) 組成範囲は13.19～25.20と17.52で、K C の含有量は最小値に近い値である (Table 4)。ケイ酸と鉱物 ($\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) 成分との関係を究明するため、Fig. 8 は、横軸に SiO_2 (44.87wt.%)、縦軸に ($\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) (3.01・17.56wt.%) をとり、それぞれの溶岩の化学組成をプロットしたのが左側の矢印方向である。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y(\text{TiO}_2) = -0.01X^2 + 0.92X - 20.77X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (11)$$

$$Y(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.02X^2 - 2.63X - 87.93X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (12)$$

上図にある済州火山島のK C 無色鉱物成分は、回帰方程式線より多い。済州火山島の噴出物の広い範囲では、ケイ酸が増大し、それから減少の傾向である。 Al_2O_3 の成分は TiO_2 と逆の傾向である。

済州火山島の溶岩洞窟の TiO_2 (wt.%) 組成範囲と平均値は1.74～3.01と2.28である。 Al_2O_3 (wt.%) 組成範囲は13.96～19.80と16.26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. 9 は、横軸に SiO_2 (44.87wt.%)、縦軸に ($\text{TiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) (3.01・17.56wt.%) をとり、それぞれの溶岩の化学組成をプロットした。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y(\text{TiO}_2) = 0.001X^2 - 0.26X + 12.47X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (13)$$

$$Y(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0.017X^2 - 2.21X + 83.70X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (14)$$

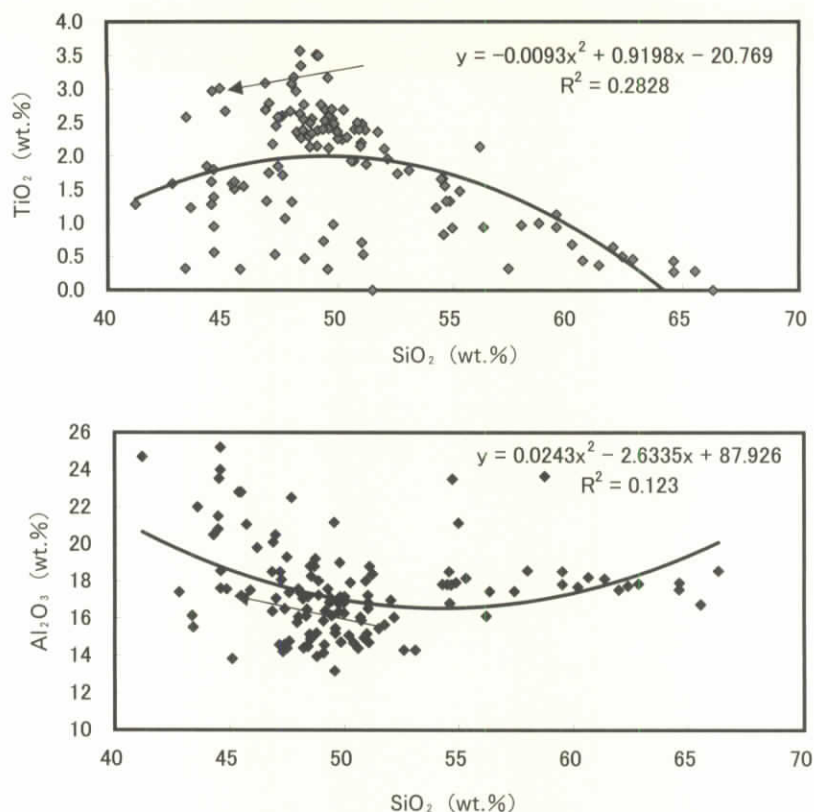


Fig. 8 済州火山島の溶岩洞窟を含む火山噴出物のケイ酸と鉱物 (TiO_2 と Al_2O_3) との関係 (Plot of SiO_2 vs. the Mineral (TiO_2 and Al_2O_3) in a Volcanic Product including the Lava Cave, Jeju Volcanic Island.)

K C の TiO_2 と Al_2O_3 は回帰方程式線より多い含有量で、ケイ酸が増大するにつれ、減少の傾向である。 TiO_2 の決定係数は Al_2O_3 より大きい。

5.6 無色鉱物と有色鉱物との関係

無色鉱物 ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) と有色鉱物 ($\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) との関係を検討した。Fig. 10 の上図と下図は、それぞれ済州火山島の全体成分と K C

韓国、済州道金寧里、海面下溶岩洞窟（ケウセツ窟）の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析（沢、大橋、井上、金炳宇、皇甫、金昌植）

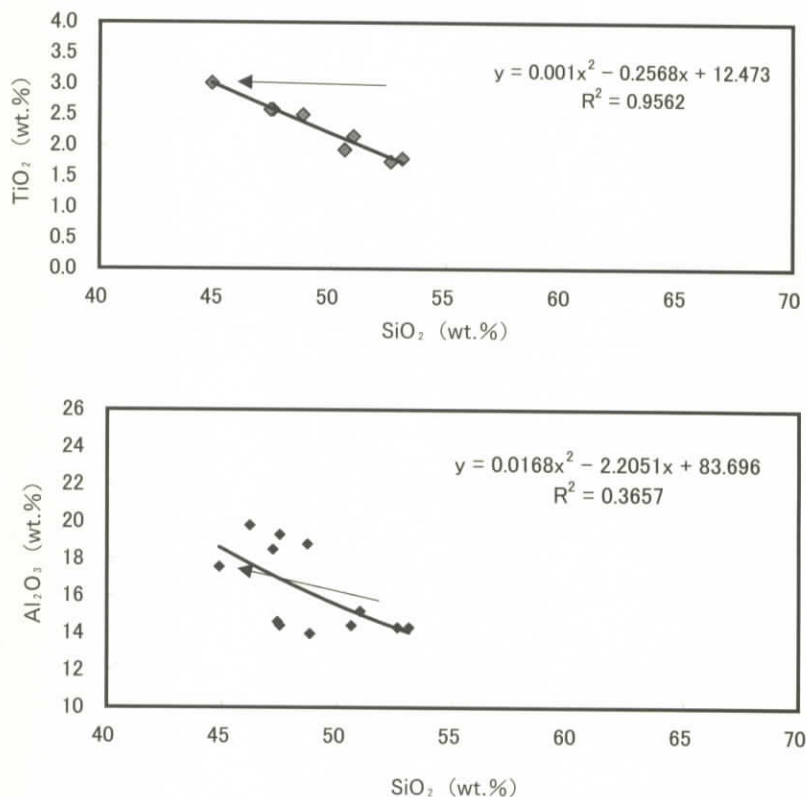


Fig. 9 済州火山島のケウセツ窟を含む溶岩洞窟におけるケイ酸と鉱物(TiO_2 と Al_2O_3) との関係 (Plot of SiO_2 vs. Minerals (TiO_2 and Al_2O_3)) Contents of Lava Cave included Ke-U-Set Gul Cave, Jeju Volcanic Island.)

を含む洞窟である。無色鉱物と有色鉱物の成分との関係を究明するため、横軸に無色鉱物($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (X:wt.%)、縦軸に有色鉱物($\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) (Y:wt.%)をとり、それぞれの溶岩の化学組成をプロットした。この関係は次のような回帰方程式と決定係数として与えられる。

$$Y_1 = 0.01X^2 - 2.23X + 105.05X \cdots \cdots (\text{島全体}) \cdots \cdots (15)$$

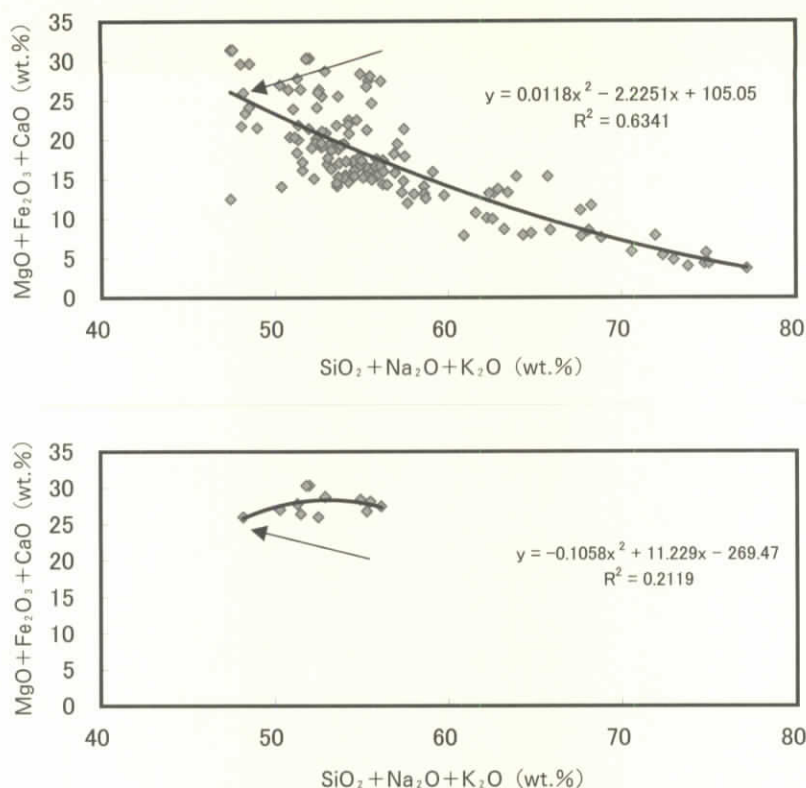


Fig. 10 済州火山島、有色鉱物($\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$)と無色鉱物($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)との関係、溶岩洞窟を含む火山噴出物（上図）とケウセツ窟を含む溶岩洞窟（下図）。(Plot of Color Minerals ($\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) vs. Colorless Minerals ($\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$), the Lava Cave containing a Volcanic Product including a Lava Cave (above figure), and Lava Cave included Ke-U-Set Gul Cave (the following figure), Jeju Volcanic Island.)

$$Y_2 = -0.11X^2 + 11.23X - 269.47X \cdots \cdots (\text{島内洞窟}) \cdots \cdots (16)$$

Fig. 10 の上図と下図の式は、式 (15) と式 (16) である。上図ではKCを含む洞窟の無色鉱物の含有率(48~58wt.%)は、有色鉱物の含有率が最大になっている。周期律から見ると、無色鉱物のナトリウムとカリウムおよび有色鉱物

のマグネシウムとカルシウムが共にaに属している。島全体の決定係数は洞窟より大きく、信頼性が高いことが確認された。

5.7 水質分析の結果と考察

KCの水質分析の結果は、Table 3のとおりである。すなわち、水素イオン濃度は7.8、生物化学的酸素要求量（BOD）は1（mg/l）、化学的酸素要求量（COD）は1.1（mg/l）で基準以下である。亜鉛含有量（Zn）は、排水基準10（mg/l）未満の1（mg/l）であるのに対して、原子吸光法により0.2（mg/l）である。水質の溶解性鉄含有量（Fe）は、排水基準10（mg/l）未満の1（mg/l）であるのに対して、溶岩の $\text{Fe}_2\text{O}_3=12.91$ （wt.%）である。水質の溶解性マンガン含有量（Mn）は、排水基準10（mg/l）未満の1（mg/l）であるのに対して、溶岩の $\text{MnO}=0.14$ （wt.%）である。

蛍光X線分析によると沢（1997）、ニッケル（Ni）、鉄（Fe）および亜鉛（Zn）が検出された沢（1997）。原子吸光法によると、鉄（Fe）と亜鉛（Zn）が検出された。ゆえに、ケウセツ窟（KC）の水質成分は、干潮と満潮による湧泉量あるいは降雨量によって海底中にある溶岩洞窟内の水に影響されることが理解できる。

最後に、化学的酸素要求量（COD）の試験方法と基準はJIS K 0102と17（mg/l）以下である。環境基準は2（mg/l）以下である。化学的酸素要求量（COD）に関する洞窟内の水質試験分析値を比較した。KC（COD：1.1（mg/l））に対して済州道の萬丈窟（1.5（mg/l）：沢、1997）、大根島の旧称幽霊洞である第1溶岩洞（1.3（mg/l）：沢、2003）、旧竜溪洞の第2溶岩洞の値は（0.5（mg/l）：沢、2003）である。次に、化学的酸素要求量（COD）に関するKCと洞窟周辺の海水について水質試験分析値を比較した。KCの（COD：1.1（mg/l））に対してKC周辺の海水である金寧里海岸（1.4（mg/l））、大根島の旧称幽霊洞である第1溶岩洞周辺の海水（1.5（mg/l）（沢、2003））である。一方、水道水質基準は10（mg/l）であるのに対して、大阪の水道水0.9（mg/l）である。これらの測定値から比較すれば、KCの水質は良好であることが理解できる。

6. おわりに

韓国、済州道金寧里、海面下溶岩洞窟（ケウセツ窟）の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析については、次のように要約できる。

(A) 洞窟の地形調査は、次のように要約できる。

- ① ケウセツ窟の成因は溶岩洞窟であり、海食洞ではない。
- ② 長さは90メートル以上、幅5～6メートル、高さ2.5メートル、ラバ・チューブの典型的形態をとどめており、断面は半円型をなす。その下部には流動した溶岩流が沈下した跡、洞底には流水が見られる。洞壁と天蓋部は黒色をなし熱による溶融跡が明瞭に残る。溶岩鍾乳などの地物の発達は不良である。南側に枝洞があり、連結洞である。
- ③ 主洞の方向はSW-NEを示し、北東方に5～10°傾きながら低下し、洞幅も大きくなっていることから、給源火口の位置は南西のサンゲンブリ方面に求められる。したがって既往の報告にあるように、金寧寺窟、金寧蛇窟さらには萬丈窟洞窟系と同一視することには疑問がある。
- ④ 2つの陥没口があり、北側のものが出入り口として利用されている。南側のものは新しい時期のもので崩落岩塊が洞底に堆積したままである。
- ⑤ 洞口は階段が設置されており、かつて生活洞として活用されたことが伺われる。洞内の一部は整地され、両側には排水溝が設けられ、人工改変が相当に進んでいる。
- ⑥ 金寧里の集落が立地する5～7 mの海岸段丘面の地下約2 mに洞の天井があり、洞の縦断面勾配は段丘面傾斜より大きく、交差関係にある。洞窟が段丘形成に先行する時期にすでに出来上がっていたものであることがわかる。比較的広い段丘面は最終氷期の低海水準期直前に形成された中位段丘期（9～13万年前）もしくは最終氷期前半の時期（5～6万年前）に形成されたものであると推定される。
- ⑦ 主洞の北端部は湛水域となっており、そのレベルは北方の海水面と同一

である。そのため感潮現象が認められる。こうした事実より、洞窟がさらに北方に連続していることは疑う余地がない。そして、金寧里海岸の地先に海底洞窟として存在する可能性がきわめて大きいと予測される。

- ⑧ 最終氷期の極相期、済州海峡では130メートル前後海面が低下しており（大場、1995）、古黄河の河道が北西から南東へ対馬南部の海岸線に向けて流下していたことが明らかにされている。こうした古地理との関連から旧石器時代に、大河沿いの低地は人類や動植物の移動ルートとなったことが容易に想定できる。遺跡洞窟が沈水していることも十分に期待できる。今後の済州道の洞窟調査を進める上でこうした視点を留意すべきであろう。
- ⑨ 周辺海岸の湧水地点とケウセツ窟との関連は明らかにすることができなかった。
- ⑩ 北東部の月汀里から坪垈里にかけて、北西－南東方向の3～4列の隆起（離水）浜堤防列の高まりは溶岩洞窟群を覆いながら発達するものである。その地下に伏在する溶岩洞窟には貝砂層から供給される石灰分の容食に基ずく石灰鍾乳石が複合しているケースが予測される。浜堤列の形成時期は最終間氷期の高海水準期であろう。それらの表層部には薄く風成砂（砂丘砂）が覆っているが、内部にはかつて浜堤列間に形成された潟湖（ラグーン）堆積物が各所で露出している。こうした事実は、北西部の挾才里海岸の砂丘形成と飛揚島大噴火説および歴史津波、溶岩洞窟の地史との関係を論じる上で重要な示唆を提供するものと思われる。既往の見解ではケウセツ窟の造洞層が表善里玄武岩であるとされているが、火山層序の再調査が進行中であり、その特定は慎重を要する。地形学的には古期溶岩原の原地形はほとんど保存されておらず、それを覆う新規単成（寄生）火山群がつくる地形によって変形されていると見なされる。
- ⑪ 済州道の北半部に比較的大きな規模の古期の溶岩洞窟が良く保存され、単成火山群の密度が大きく、緩勾配の斜面や海岸地形が卓越しているのに対して、南半部の溶岩原には擬似カルスト群（その一部は溶岩洞窟の陥没）が卓越し、風化・劣化が進行した溶岩洞窟が多い。河流は水無川

と下流部の下刻、遷急点（滝）を形成し、海岸段丘や海食崖がよく発達している。中央部には河川争奪跡や新規溶岩流による河流の堰止め跡が各地に認められる。上記のような南北の地形の非対称性は更新世中期以降のネオテクトニクスによる南側隆起・北側沈降の島全体の傾動運動に支配されている可能性が大きい（大橋、2002）今後、海岸段丘面や離水海食洞の位置の系統的調査による旧汀線の復元調査によって実証されるであろう。

- ⑫ 表善里玄武岩が中央噴火によるものとは即断し得ない。サングンプリの巨大凹地は古期の給源火口である公算もあるものと考えられる。
- ⑬ 洞窟環境の破壊・汚染が懸念されるが水質分析の結果は意外と良好な値が得られた。南側の陥没口で廃棄物の投棄が行われていたのを目撃した。現在では洞口に施錠をして入洞禁止の策が講じられている。そうしたことが適切であるか否かの問題については稿を改めて議論したい。

(B) 洞窟の組成分析は、次のように要約できる。

- ① SiO_2 の含有率は、48.80wt.%の玄武岩質（塩基性岩）で、済州火山島内の最小値である。
- ② KC サンプルの $\text{TiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ は、済州火山島内において最大級の含有率である。
- ③ KC サンプルの $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ は、済州火山島内において中間級の含有率である。
- ④ KC サンプルの $\text{SiO}_2 \cdot \text{MnO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ は、済州火山島内において最小級の含有率である。
- ⑤ KC サンプルは、 SiO_2 とアルカリ性の関係から高アルミナ玄武岩であることが確定された。済州火山島の萬丈窟（沢ら、1990）、白頭山の鹿蹄洞（沢ら、1996）の溶岩洞窟は玄武岩である。一方、萬丈窟にある溶岩橋を除くと、済州火山島の噴出物や洞窟は、高アルミナ玄武岩である。これらは、環日本海玄武岩の共通した特徴とする。
- ⑥ KC サンプル周辺の洞窟分布から2通りの溶岩流が推定される。

6a 洞窟番号から見ると49から48および47の溶岩流の中に形成した洞窟システム。

6b 洞窟番号から見ると50から52および51の溶岩流の中に形成した洞窟システム。

- ⑦ KC サンプルの水質分析値、水素イオン濃度が7.8、生物化学的酸素要求量（BOD）が1（mg/l）、化学的酸素要求量（COD）が1.1（mg/l）である。銅含有量（Cu）、亜鉛含有量（Zn）、溶解性鉄含有量（Fe）、溶解性マンガン含有量（Mn）と弗素含有量（F）の含有量については、それぞれ JIS の基準以下である。溶存酸素（O）は9.5（mg/l）でJIS の基準以上である。その他の化合物についてもJIS の基準未満である。

謝 辞

本研究の現地調査は2002年9月に実施したものである。なお本研究は本学研究補助金による成果の一部である。この論文におけるX線分析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いた。済州文化放送 MBC の呉東燦局長・宋昌佑部長、さらに数値解析やグラフ作成に関するデータ処理には藤田浩史、上原章弘と肥塚義明君の手をわずらわした。関係各位に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 元鐘寛「済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
- 2) A.Miyashiro「Nature of Alkali Volcanic Rock Series」Contrib. Mineral. Petrol 66/, 94-104, 1978年
- 3) K.J.Won, J.I.Matsuda 他「Paleomagnetism and Radiometric Age of Trachytes in Jeju Island, KOREA」J.K.I.M.G 19/, 25-33, 1986年
- 4) 沢 勲・片山佐一「済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

- 5) 沢勲・村田守・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
- 6) 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
- 7) 高柄鍊「A Study on Groundwater Flow using Groundwater Level in Volcanic Island」済州専門大学論文集 15/, 429-444, 1994年
- 8) 大嶋和夫「第四紀後期の海峡形成史」第四紀研究 29-3/198-208, 1995年
- 9) 沢勲・村田守・河野久征「白頭山の鹿蹄洞と済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
- 10) H.KUNO「Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island area」Bull. Volcanol., (2), 29/, 195-222, 1996年
- 11) 高柄鍊 / Hyeon-Kyeong CHO「An Investigation of Hydrologic by Spring Mechanism in Cheju Island」韓国環境科学雑誌 6/, 303-311, 1997年
- 12) 沢勲「済州島 萬丈窟の環境保全と水質分析」韓国洞窟学会誌 51/, 15-17, 1997年
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 沢勲「Quantitative Analysis and K-Ar Age Determination of a Lava Bridge in Manjang-gul Cave」KOFST 739-746, 1999年
- 16) 沢勲・井上久・河野久征「X-ray Analysis and K-Ar Age Determination on Lava Bridge in Manjang-gul Cave」大阪経済法科大学論集 76/, 37-56, 2000年
- 17) 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集集 153-157, 2000年
- 18) 沢勲・大橋健・鹿島愛彦ほか「韓国 済州島の火山・溶岩洞窟の分布」大阪

韓国、済州道金寧里、海面下溶岩洞窟（ケウセツ窟）の地形解析、造洞層のX線分析と水質分析（沢、大橋、井上、金炳宇、皇甫、金昌植）

経済法科大学論集 81/, 67-122, 2000年

- 19) Takahiro. Miyaguchi 「Late Quaternary Regional Crustal Movement in Korea Peninsula and Japanese Islands through Paleoshoreline Analysis」 地形 22-3, 277-285, 2001年
- 20) 大橋 健「宇宙衛星画像から見た済州島（その1）北東部溶岩台地上の旧河道群と河川争奪」大阪経済法科大学論集 84/, 47-58, 2002年
- 21) 沢勲「大根島の水質試験分析の結果」富士山火山洞窟学研究会編（島根県大根島、特別天然記念物 第1 溶岩洞 緊急調査報告書）, 29, 2003年
- 22) 沢勲・大橋健ほか「済州道西帰浦市西北、ケンセンイ窟の形態と蛍光X線分析」大阪経済法科大学論集 86/, 1-35, 2004年

