# 溶岩洞窟の形成に関する地形学的研究

## ― 韓国済州道朝天邑橋来里巨文岳の事例 ―

大　橋　　健　　*Tsuyoshi　OHASHI*

*GEOMORPHOLOGICAL STUDY ON THE FORMATION PROCESS OF LAVA CAVE*

*In the case of Geomeun - oreum, Chochon - Up, Gyorae - Ri, Jeju-Do, KOREA*

## 1　はじめに

数～数10キロにおよぶ長大な溶岩洞窟はいったいどのようにして形成されたのか？　その科学的な説明は十分と言い難い。洞窟の計測、実態把握やフィールドワークに基づいた類型化の作業など基本的情報が圧倒的に不足しており、洞窟生成に纏わる多くの謎が、依然として長い闇の中に押し込められたままである。

韓国の済州道は世界的な「溶岩洞窟の宝庫」と呼ばれ、萬丈窟 Manjang-gul（cave）、挾才窟 Hhyopche-gul（cave）に代表される、長さ10キロにも達する世界最大級の溶岩洞窟が発達している。

本島の火山洞窟の大部分は、第一活動期[1]に形成された。[2]　そして、洞窟の二次的な変形－崩壊と解体－が著しく進み、侵食作用により形成当時の地形はほとんど原型をとどめておらず、溶岩の供給源や供給ルートも不明である。そのために洞窟内部の限られた観察や分析結果以外に形成過程や機構を解明する手がかりを得ることが困難となっている。

溶岩洞窟の生成はマグマの上昇・噴出、流動、冷却そして陥没といった火山活動（変動変形）に引き続く地表での溶岩の移動およびそれに対応した地形の

形成過程（除去変形と付加変形）を伴うはずである。まず、そうした具体的な火山活動の経過や火山地形の復元作業がそれぞれの火山洞窟の生成を明らかにしてゆく上で不可欠と考えられる。

筆者は、萬丈窟を形成する溶岩とその洞窟内部へ二次的に後から流入した溶岩層の K-Ar 年代測定結果（澤他、1989）[3] に注目した（写真 1 参照）。意外なことに後者は0.032～0.19 Ma という若い年代を示し、両者の間には数 10 万年以上の大きな年代差が認められる。そこで、特に第四紀後期（20万年前以降）という絶対年代値を示す新期溶岩流の供給源およびルートの解明を重点的に試みた。まず、有力な供給源の候補として、周辺の10キロメートル以内の地区に絞り、そこに卓越する単成火山（寄生火山）とりわけ、馬蹄形火砕丘をマークした。なぜなら、そうした火山地形は単成火山の成長と溶岩の噴出に伴って火口壁が破壊された結果出来上がったと推定される（長谷中他、1999）からである[4]。北済州郡の徳泉里 Tokucyon-Ri および橋来里 Gyorae-Ri に鎮座する体岳 Che-oreum（381m）と巨文岳 Geomeun-oreum（454m）、扶大岳 Puso-oreum、坪垈里 Pyonte-Ri の屯地峰 Tofunjibon、などの火砕丘はそうした特徴を備えている。すなわち、これらの火砕丘は、火口壁に連続した崩壊に起因するナマコ sea cucumber 状の盛り上がり（丘）を山裾に伴い、その中央部に延々と溶岩洞窟の陥没窪地と見なされる微地形－凹地／窪地帯－が検出される。

大縮尺図[5] の読図作業、図上計測および現地調査により確認作業を行った。その結果、溶岩洞窟の形成過程についていくつかの重要な新知見を得ることが出来た。今後さらに詳細な現地調査を計画しているが、本稿ではとりあえずこれまでの成果について報告し、先学の御叱正を乞うことにする。

## 2　溶岩洞窟形成に関する従来の知見と問題点

溶岩洞窟の地形学的研究は最近やっと端緒についたばかりである。既報のものは発見的報告や現象記載がほとんどであり、その生成過程／機構について論じたものが極めて少ない。

カルスト（石灰岩）洞窟の研究は世界的なネットワークのもとに活発に進められている。これに対して、火山洞窟研究 vulcanospeleology が等閑視されて

きた感がある。理由はその特殊性にあると言える。

溶岩洞窟は偏在的な世界の火山地帯のなかでも玄武岩地帯に集中している。カルスト洞窟やその他の海食洞窟、風化洞窟などの多くは数万～数10万年の長期間、生成と成長過程を持続し続けてきており、グローバルな地球環境変遷史との関りが密接で、学際的な研究課題となり得る。これに対して、火山洞窟は生成と同時に生成物も成長して、いったん冷却すると後は成長することがなく破壊・消滅過程をたどるのみであるという特異性をもつ。

わが国における溶岩洞窟の分布は、富士山（111箇所）、伊豆諸島の大島と三宅島、五島列島など極めて限られており、その規模も小さい。[6]

小川幸徳は富士山の溶岩洞窟について精力的なフイールドワークの成果を報告している。[7] 研究の視点と方法は、洞窟の内部形態やその特徴から洞窟のできかた、溶岩の流れ方、ガスの作用などを類推するというもので、国内の報告のなかではこれが最も詳細、かつ系統的である。なかんずく、一溶岩流としては富士山最大と見なされる青木ケ原溶岩[8]のなかに発達する火山・溶岩洞窟の詳細にわたる報告は白眉といえる。

山腹に発達する寄生火山体が溶岩洞窟の形成と密接に関るものと考えられるが、日本の火山で最も多いといわれる富士山の寄生火山について、分布の規則性、その内部構造から見たタイプ分け、溶岩組成、年代測定などの研究成果[9]との総合が今後の課題であろう。

寄生火山群は短期間に一時に生まれたものではなく富士山の成長にともなって新、中、旧期とさまざまな形成時期がある。火山地質学、地形学と溶岩洞窟形成との関りなどの共同研究やその成果とのスリアワセが必要かつ重要であろう。

原地形が平坦部であれば複雑で水平な天井をもつ洞窟が、傾斜地であれば単純な天井の尖がった洞窟が出来る。蛇行部の攻撃斜面での削りこみにより幅が広くなること、縦断面形から陥没と連結により長い洞窟が形成され、いわゆる洞窟系を形成していること、床面の溶岩の流れに伴う沈下が洞壁に溶岩棚を残すこと、ガスの影響とpit caveの形成、天井部の崩壊した溶岩塊に付着した珪酸鐘乳（沈殿物）から天井部の崩壊の多くが洞窟生成時のものである、とい

う推論[10] などは今後、検討されなければならないテーマである。さらに、溶岩洞窟の内部の観察からガス圧やその消長、方向から、従来地表調査だけでは困難と見なされていた過去の溶岩流の流動方向を察知できるという指摘なども興味深い。

済州島の溶岩洞窟に関しては、申裕泳（1981）が萬丈窟を事例として洞窟内部に見られる二次地形の詳細や洞窟形成過程について論じている[11]。現象記載を中心としたこれまでの報告[12] に対して、洪始煥（1988）の報告は火山洞窟の生成機構と発達段階を論じている点でユニークである[13]。

洪（前掲、1988）は溶岩トンネル形成過程で溶岩中のガス体の役割を重視している。10 キロメートルもの長大な溶岩洞窟が形成されるためには厚さ10メートルを超える溶岩層が一時期に流動したもの（単成的）とみなさなければならない。しかし、起伏の大きい急傾斜地ならともかく比較的平坦な溶岩台地上での溶岩流の長距離にわたる移動の様式や営力との関りについて追究はなされていない。さらに、洞蓋（天井）の陥没・破壊の時期や実態に関しても不明な点が多い。そのトリガーとして地震・振動などの地殻作用を想定しているが、必ずしも、溶岩洞窟が生成当初より堅牢で単純な連続的なものではなく、もともと生成当初より脆弱であり陥没・連結や変形・消失過程を含んでいた可能性を看過できない。

以下、基本的な研究視点と課題について、整理しておくことにする。

①洞窟に集中するあまり、その形成環境や過程を看過した研究が多い。

②火山活動や火山地形形成過程の総体のなかで、洞窟の生成・破壊を位置づけることが重要である。この視点が従来の火山洞窟研究に欠如している。噴出時の地形復元と火山地質－とくに単成火山の生成や成長とその特徴－との対応の検討が不可欠である。済州島の場合、こうした視点から見た時に既往の諸報告には不統一や根本的な誤り、混乱が少なくない。

③統一的な基礎資料の整備。溶岩洞窟は必ずしも単純ではなく、さまざまな規模、形態やタイプ、形成時代がある。実証的な調査の不足、研究組織や体制などの制約から、その分布、計測や記載に関る用語等に不統一と混乱があり既存資料の見直しも含めて、統一的、国際的基準のもとに溶岩洞窟のデーター

ベース化が急がれる。

④火山地質学や年代測定など最近の情報を踏まえて既往の成果の見直しが必要である。

⑤数キロもの大規模な溶岩洞窟が形成されるメカニズム、単成的であるかか否かという問題、火山地形・地質の詳細とともに形成営力の分析が今後の重要な研究課題であろう。

## 3　巨文岳 Geomeun-oreum の現地調査および図上作業の結果とその考察

### 1）位置と地形の概要

調査地区は済州島の北東部、行政的には北済州郡の一角である。標高300m以下に、緩やかに北方の海岸へ向かって低下する溶岩台地が広がっている。そこは韓国最高峰である漢拏山（1950m）を中心とした雄大な Aspitholoide（盾状・鐘状火山）の裾野を形成している。

台地を構成する溶岩は第四紀初期の第一活動期に噴出した表善里玄武岩と、さらにそれを覆う第三期活動期（第四紀中期）に噴出した新興里玄武岩地帯からなる。

この地区は本島のなかで、大規模な溶岩洞窟が最も集中している地区として知られている。代表的な萬丈窟は国の天然記念物に指定され、一部が観光洞として一般に開放されている。

地形図（図1参照）をもとに、萬丈窟周辺、10キロ圏内の地形の概要と特色を記すことにしよう。

標高100～300mの北方ないし北東に最大傾斜をもつなだらかで単調な溶岩台地と点在する寄生火山群に特徴づけられる（写真2）。北東部の海岸地形は、連続的な海食崖が発達する島の南海岸と対照的にだらだらと漸次高度を下げていること、砂丘、浜堤防列（図中のドットマークで示した部分）が良く発達していることが特筆される。また、河川地形には峡谷、河岸段丘、瀑布（遷急点）などがほとんど見当たらない。こうした地形の特徴より、相対的に地盤が北方へ傾斜（沈降）していることが推定される。東金寧里地区では堆積基準面であ

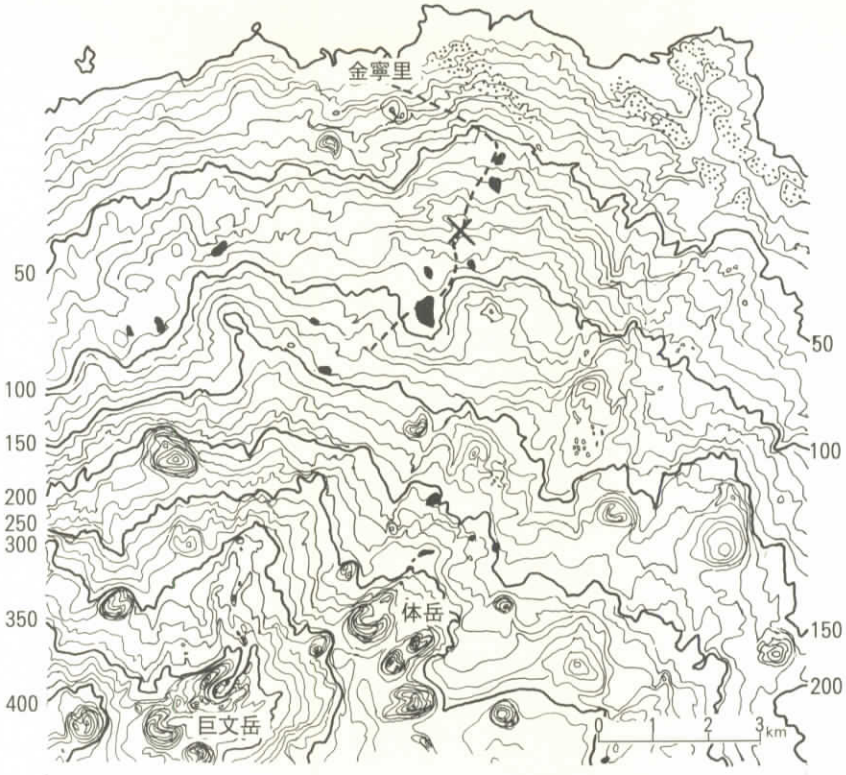


**図1　調査地の地形概観図**　（等高線の間隔は10m。図中の破線は萬丈窟システム、×印は入口、砂目は砂丘・浜堤を示す）

る海面より低いレベルに連続してゆく溶岩洞窟が確認された。[14]

本島のなかで、この地区は火山地形の原型が保存されている可能性の最も大きい地区と期待される。既往の地質図や報告では、表善里玄武岩（第一活動期）地帯に一括されてきたが、最近では新興里玄武岩（第三活動期）がさらに識別されている。後期火山活動と考えられている、最も新しい第四活動期の単成火山（寄生火山）から流出した溶岩やそれと関る火山地形については詳細が十分に明らかにされていない。現在、本地区の火山地質（層序）および火山地形発達史の再検討が進められていると聞く。

萬丈窟の主洞のなかに流入した新期の溶岩流が存在しているという事実などから、至近の単成火山群 cinder cones が注目される。とりわけ、馬蹄型火口をもつ火山体とその周辺に広がる、盛り上がった溶岩丘およびその上に発達する陥没窪地の実態や成因は興味深い。

### 2）萬丈窟洞窟系

**図 1** の中の×印は第一入口の位置を、太い実線は萬丈窟洞窟 system を示している。

洪（1988）の報告[15] によると、本洞の長さは 8928 m に達し、挾才窟に次ぐ本島最大級の規模をもつ溶岩洞窟である。ただし、計測の基準と推定の根拠にはいくつかの疑問がある。特に、萬丈蛇窟の北方で、地勢が示す最大傾斜の方向が NE であるのにもかかわらず、直角に90°左折しているが、それより北部の洞窟は新期溶岩がつくるものである可能性もあり、新旧の洞窟系が交差関係で重合していることも考えられる。　東金寧里の洞窟（2001. 9 調査）では洞窟と溶岩流が NE 方向を示しているのを計測した。溶岩の成分組成、年代測定などにより、これが表善里玄武岩の流下方向であるという確証をつかむ必要がある。さらに、洞窟の方向が NW－SE に伸びる北東部海岸の 3 列の砂丘／浜堤防列の高まり（最終間氷期、9 ～12万年前と推定）と交差しているが、後者を横切るものであるのか、それとも覆われる関係にあるのかという問題が指摘される。本洞窟は単一洞ではなく陥没や連結による洞窟系 cave system とみるべきものかも知れない。溶岩棚／溶岩橋／溶岩柱など繰り返し流入した溶岩流がつくる洞窟内部の微地形群の観察から、最初に大規模な主洞（初期洞）が形成された後、溶岩供給量が漸次、小規模になってきたと考えてよいものか、それとも供給ルートや洞窟形成様式が変化したものであろうか。

### 3）地形解析

**図 2** は、実測図である韓国国立地理院発行の縮尺5000分の 1 地形図（等高線間隔 5 m）をもとにして著者が再編集したものである

本図より、典型的な馬蹄型単成火山である給源山体の巨文岳とその周辺地区

に火山地形が明瞭に保存されていることがわかる。

まづ、微地形分類を行い、それに基づき、地形はそれを構成する物質（地質）と不可分であり、地形の分化と変化は物質の配置と移動を反映したものであるという視点から火山地形解析を試みる。すなわち、地形の形成過程から単成火山の火山活動の時系列変化やそれと関る山麓の地形形成営力の推測を試みる。

**・地形面（種）区分、記載とその形成順序および営力（地形発達史）**

巨文岳は西麓に残存している古い山体とそれに重合する現火山体の複合火山体からなりたっている。火山地形の発達はこれら給源山体である単性火山の成長過程との関りのなかで捉えなければなるまい。

図3は予察的作業図であり、今後修正すべき点も多いが、火山地形は単性火山体（火砕丘、火口壁、火口底、陥没窪地、中央丘）とその山麓の流出溶岩がつくる地形（新旧の火口壁崩壊に基づくナマコ状丘、溢れ出しと火山扇状地、溶岩流路、陥没凹地、ヒラメ状溶岩指丘、凹地など）に大別される（**写真3～7参照**）。これらの地形種は一気にできたものではない。

**各地形種の説明：**

①**火口壁**：火砕丘の底面は直径約1km。火口底からの比高は100m。北側に開いた馬蹄型をなす。斜面の開析はほとんど進んでいない。

②**火口底**：直径約300 m。

③**陥没凹地と中央丘**：溶岩流出の後、小規模な火口の陥没が起こっている。

④**ナマコ型溶岩丘と側端崖**：溶岩流出に伴い火口壁が破壊された時生産された岩屑と溶岩層がつくる地形。比高最大30 m。約2キロ。新旧2面が識別されることから2回にわたり崩壊が発生した。後の崩壊が大規模であったことが判る。

⑤**溶岩扇状地**：傾斜はかなり急。溶岩丘の両側に発達する。溶岩流路から溢れ出した溶岩流（分岐）がつくった地形。

⑥**溶岩流路**：幅が50～300 m。深さ15 m前後。部分的に陥没窪地が形成されている。④の丘の中心部を切り込みながら約2キロ連続する。狭窄部の手前で広くなる。凹地の内部に棚状（段丘）の微地形が認められる。ある時期に地表に開口した（オ-プンな）溶岩川となっ

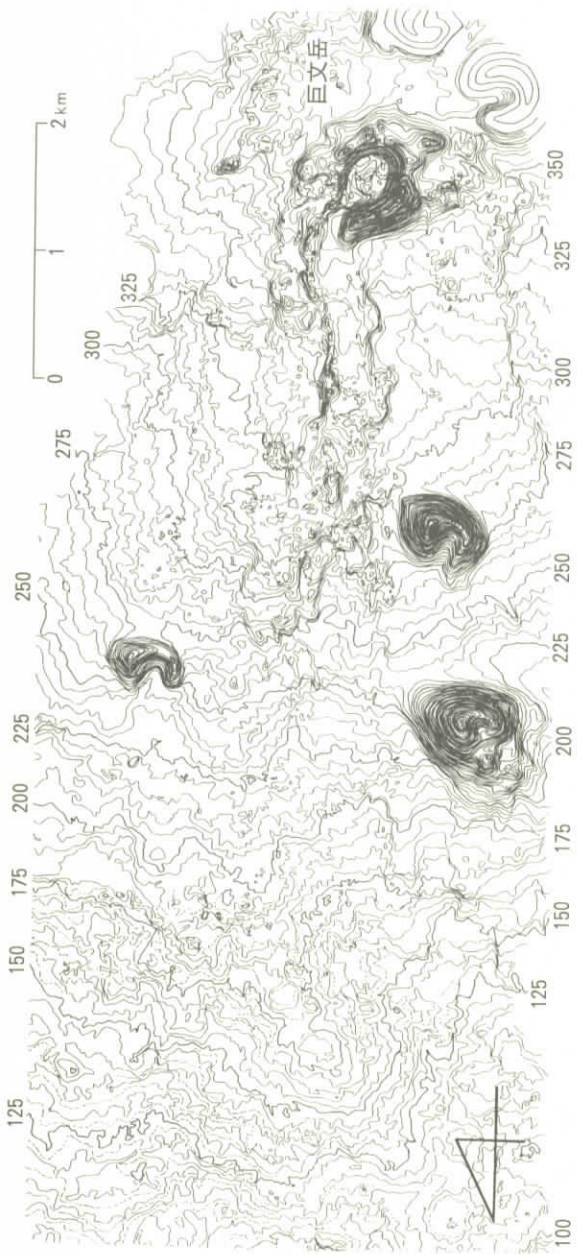


**図 2　巨文岳と火山地形**

等高線の間隔は 5 m。韓国国立地理院発行 5 千分の 1 実測図（1999 年）をもとに編集

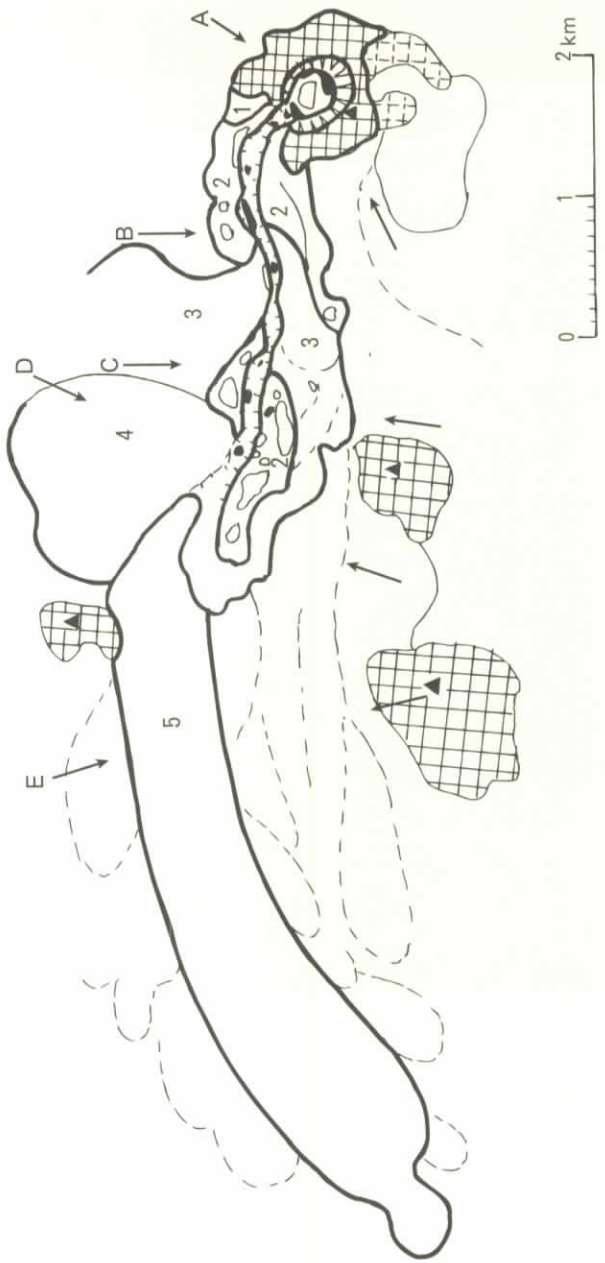


**図 3　微地形分類図**
図 2 と同一範囲で作成。1 ～ 5 は形成順序、A ～ E は横断面図の作成方向を示す。

たところ。火口底から連続的に発達している。

⑦**陥没窪地**：生成時またはその後に溶岩洞窟の天井が崩壊したために形成されたもの。

⑧**ヒラメ** sole **型溶岩丘** lava toe **と末端環丘**：幅 1000 m前後。長さ約 6 キロ。比高 10m 以下。分岐した形跡が認められる。中央部にわずかな盛り上がりが連続している。

⑨**凹　地**：成因は不明。数百メートルにもおよび規模が大きく、溶岩流の埋めの残し部分や溶岩洞窟の陥没などに起源するものと予想される。湿地をなす場合も見られる（徳泉里の例）。

⑩**旧火山体**：巨文岳の西麓に残存。火口が崩壊して西方に開口している。

⑪**古期溶岩台地（侵食面？）**：表善里玄武岩とその上に重なる新興里玄武岩。後者は原面を保存している可能性をもつ。前者については疑問である。一括して溶岩台地面とした。

鳥瞰図（**図 4**）・横断面図（**図 5**）から、山麓に発達する火山堆積地形の特徴を検討してみることにしよう。

① 全体として、舌状に延びる溶岩丘を形成しているが、その横断面形は底面幅に対して比高が大きい。粘性の小さい玄武岩質溶岩にもかかわらず側方拡散が小さい。20 ～ 30 mの比高を示す側端崖の形成は粘性の小さい玄武岩質溶岩流としては珍しい。また、70 パーミルを越える堆積面の勾配の大きさも上記の理由と密接に関係しているものと思われる。

馬蹄型火口は、溶岩流出に伴い給源体である巨文岳の火口壁の崩壊が発生したことを物語り、溶岩流のなかにその時生産された岩塊や岩屑が混入した結果、溶岩流の温度が低下し、組成の変化により粘性が大きくなり移動距離や側方への拡散が減じた、と考えられる。

② **S－5** シタヒラメ型 sole type と **S－1**，**S－2** ナマコ型 sea cucumber type

末端溶岩流の横断面は噴火口に連続した盛り上がった溶岩丘（**S－1**，**S－2**）と対照的で幅 1000 mに対して比高が 10 m以内と小さく、扁平な断面形を示している。中心部がわずかに高まっている。

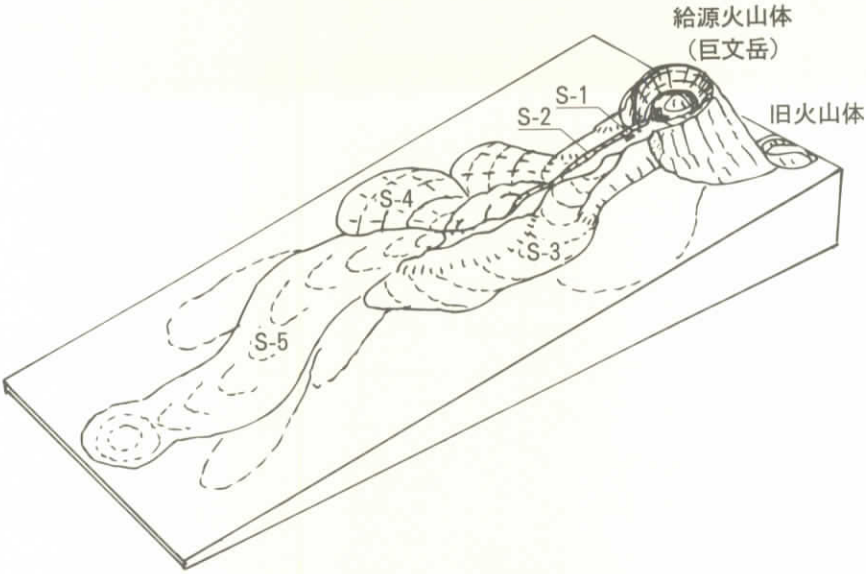


図4　巨文岳の火山地形（鳥瞰図）

③　陥没凹地としては幅が大きすぎるという問題と連続しているという特徴、その中にベンチ状の段化した微地形が発達することの意味は検討に値する。

ナマコ型溶岩丘の中心部に幅50 mから最大300 mの凹地が約2キロ連続的に形成されている。このような微地形が、溶岩洞窟の形成後にその天井部が陥没した結果形成されたものとしたのなら100 mを上回る広い幅と連続した凹地帯（10～20 mの連続崖をもつ）の形成機構の説明が困難である。二次的につくられたものではなく溶岩丘形成時にすでに存在したものと見なすべき地形と言える。すなわち、初生的な地形である。

この凹地帯は噴火口の火口底から連続している。注意深く観察すると、凹地帯のなかに段丘状の棚地形とさらにそのなかの陥没窪地が識別される。勾配の大きなナマコ型溶岩丘の北端で消失し、棚地形の上面がそのまま末端溶岩流の堆積面に連続してゆく。溶岩流路の幅と深さ、陥没地形と洞窟の関係をみると、特に陥没凹地（溶岩流路？）の幅と断面形、とりわけ幅が最大300mというのは溶岩洞窟の陥没にしては大き過ぎる？陥没後の変形として

もその営力の推定が困難である。二次的ではなくて初生的地形であると見なされる。

こうしたことから、火口壁の崩壊と同時に凹地帯が形成され、地表に開口した溶岩川となった、と判断される。そこを後続する溶岩流が前進的に移動したものであろうという推測を可能にする。成長（隆起）する給源火山体とともに初期に流出した溶岩流が傾動変位し勾配が増大した。これと溶岩流路のレール効果により流動方向を規定され、かつ加速された後続溶岩流が側方拡散をすることなく、まっすぐ長距離を流動した。溶岩流路から側端へ溢れ出した（分岐）一部の溶岩流が溶岩扇状地をその両側に形成した。このようなメカニズムで、溶岩扇状地や長大なシタヒラメ型溶岩丘の地形特性がつくられた理由が説明できよう。

区分された各地形型が溶岩流の移動の空間的配列を反映したものであるとし

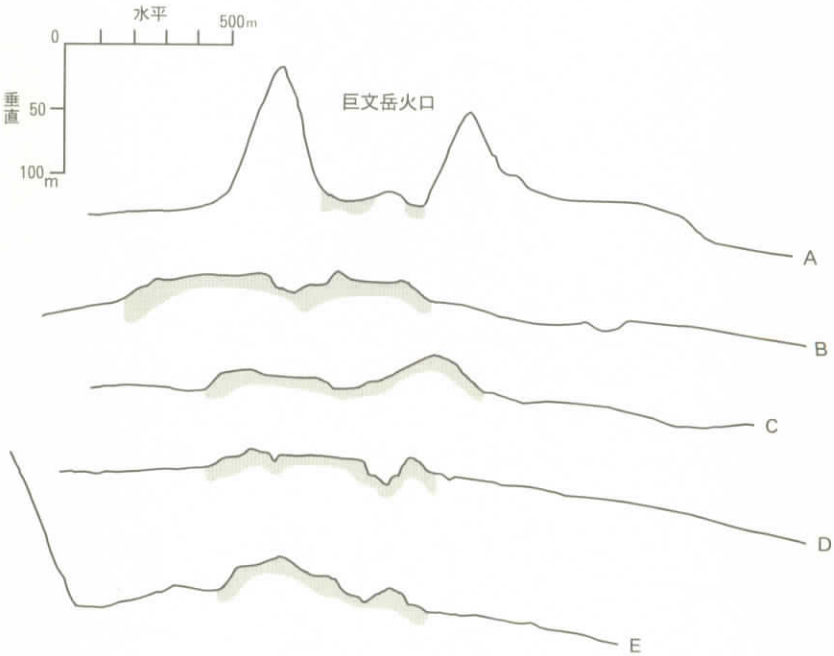


**図5**　横断面図（断面位置は図3に示した。アミの部分が溶岩丘）

たら、それをもとに溶岩流の移動方向、移動距離さらに営力とその推移を解析できるはずである。

縦断面図（図6a）およびセグメント区分（図6b）をもとに溶岩噴出源となる、火口を中心として初期のものから順に流出溶岩の堆積面高度およびその勾配を整理してみると

①S－0面（初期溶岩流面）：緩やかな扇状溶岩原をなしていたものとおもわれるが後続の溶岩流によって埋没しており詳細はよくわからない。巨文岳の西側山麓に変形した古い火砕丘が認められ、複合した火山体からなることが読み取れる。本面を構成する溶岩流の起源がどちらの火口からのものであるのかはっきりしない。

②S－1面（初期崩壊層面）：単成火山体の裾野に断片的に残されているのみである。最高位で最も急傾斜な地形面で、勾配は71.42パーミル。火口壁の初期崩壊に伴い生産された岩塊との混合流・岩塊相からなり、温度、組成の粗さが粘性と関係していることが考えられる

③S－2面（sea cucumber 型崩壊丘面）：火口の大規模な崩壊時の押し出し層がつくる、盛り上がった丘の堆積面で勾配は、11.11～36.36パーミルと急である。末端までの距離は2km以内である。

④S－3面（分岐溶岩面）：中央部の盛り上がり丘の中央部に形成された溶岩流路からの溢れ出しによってつくられた堆積面で、東西に分岐しながら、溶岩扇状地の形態をもつもの。勾配は13.51～24.00パーミル、末端部では溶岩流路の凹地内の棚（段丘）面から連続しているように見える。

⑤S－4面（sole 型末端溶岩指 lava toe）：陥没火口底から、②、③、を切り込みながら発達した溶岩流路に連続してその下方側に細長く堆積した溶岩指の上面高度を示し、標高250m付近の遷急部を境に2つのセグメントに分かれる。勾配は28.57パーミルで基盤をなす古期の溶岩台地面より大きい。

このように、全体として①～⑤のセグメントが区分され、火口に近い古い時期のものほど傾斜が急となる傾向をもつ。給源火山体の成長過程（隆起）に対応しているものと考えられる。特に②S－2、③S－3面が36～71パーミルと急であり、それ以下の④、⑤とは形成環境が異なっていることが読み取れる。

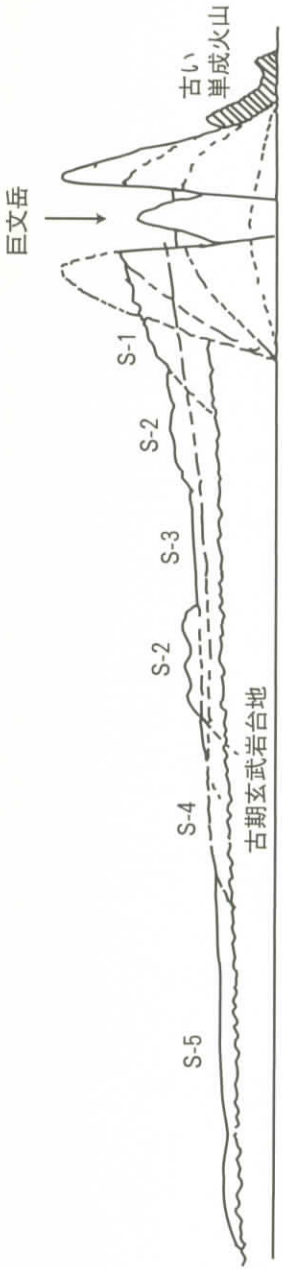


図6a　縦断面図

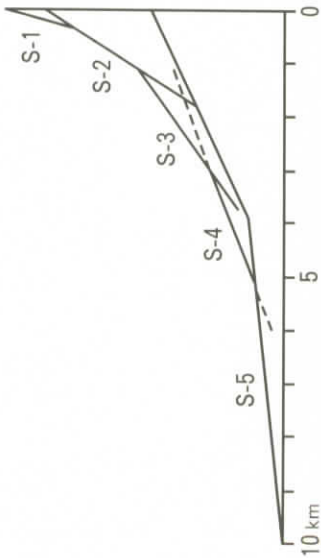


図6b　セグメント区分図

前者は火口壁の崩壊と関連しており、溶岩の流出量や粘性の変化によるものとは必ずしも考えられない。

溶岩丘上に Lava stone やホルニト状の高まり（流れ山地形，hummock topography）が各所に残されているところから崩壊層中に岩塊が多量に含まれているものと推定される。比高が大きく、明瞭な側端崖を伴うのは溶岩流の温度が相対的に低く粘性が大であったことを伺わせる。移動距離が火口から2キロ程度までであり小さいことも同様な理由によるものであろう。火山体で発生する岩屑流の移動距離は比高の10倍以内に収まるといわれている[16]。

火口底から連続的に発達する溶岩流路の様子と火口付近の地形の特徴から、火口壁の崩壊の後、大量の溶岩が次々と静穏に流出し、その後に火口の小規模な陥没が起こり、火山活動が終息したことが推測される。

比較的平坦な溶岩台地上に重なる末端溶岩流の移動距離の大きいことは給源火山体の成長に伴うセグメントの分化－古急・新緩－と前進、そして、溶岩流路のレール機能による側方拡散の制御によるものであると考えられる。

### 6）地形解析結果

① 本地区には火山地形の保存が良好であり、古期溶岩台地（侵食面）と区別されるべきである。新期の溶岩流と火山地形は大縮尺地形図の読図からも容易に判読できる

② 新期溶岩流の供給源として単成火山群、特に馬蹄型火口をもつグループが注目される。そこから連続する舌状の盛り上がった溶岩丘（比高10～30m）の形成は火口壁の崩壊と関係した地形である。

古い単成火山とそれを壊わしながら形成された新しい火砕丘が識別され、後者の成長（隆起）と溶岩流出に伴い形成された微地形群の地形解析から、長大な溶岩流の形成される機構が明らかにされる。

③ 異常に広い（500～1000m）凹地帯は溶岩流路 lava channel・lava river であり当初から形成されていたものである。なぜなら、陥没地形起源とするには幅が大きすぎるものであり、火口底から連続していること、底面が末端溶岩流の堆積面に続いていることなどの特徴をもち、二次的変形によるとい

う説明が困難である。

④　狭窄部、プール、溢れ出し、流れ山、流道封鎖丘、側端崖、末端環丘、溶岩扇状地、蛇行など溶岩流路沿いに多様な地形型が認められる。

⑤　溶岩流の堆積面勾配を見ると複数のセグメントに区分され、古い面ほど傾斜が急である。新しい面が古い面を切り込みながら、溶岩流路に沿い前進的に発達している（地形面交差）、溶岩流路 channel の閉鎖、dam up、closed された部分（遷急部 gorge）で急、その上流側の溶岩溜まり pool プールで緩いなど地形形成との対応が読み取れる。

⑥　火口崩壊後に中心流路 channel が形成され、その後の溶岩の移動は channel flow を中心として進んだ。

⑦　open lava channel を溶岩流と一緒に崩壊岩屑や冷却化した溶岩ブロック群が移動した。その一部が溶岩流の表層部に寄せ集まり、冷却した結果天井（溶岩皮殻）をつくった。下部の溶岩流が移動した後に溶岩洞窟が残された。

⑧　もともと脆弱な天井の陥没・崩壊は生成当時から発生していた。

### 7）溶岩流路と溶岩筏を中心とした溶岩洞窟系の形成モデル
### －巨文岳型溶岩洞窟系の事例－

**既往のモデル**：洪（1988）のモデル（**図7a**）が代表的なものであり、その他の洞窟研究者も基本的にはこうした考え方と大同小異である[17]。溶岩流内部の流動とガスを重視したものであり、いずれも数mから時には数10 mもの深い地中において溶岩洞窟が形成されると見なしている。但し、数十キロもの長大な溶岩洞窟の実在する事実が示す[18]ように溶岩流の移動距離の異様な大きさは、堆積前の地形が急傾斜地の場合ならともかく比較的平坦な場合、その営力の説明が難しく観念的説明の批判を免れない。そして、この他にも多様なモデルの構築の必要性がある。

本調査において、具体的な火山地形の分析結果から、溶岩流内部だけでなくその表層部において地表の溶岩流路の形成と密接に関係した表層型の溶岩洞窟系の形成モデルが可能となった。

これまで、まず、比較的単純で連続的かつ安定した溶岩洞窟が形成され、そ

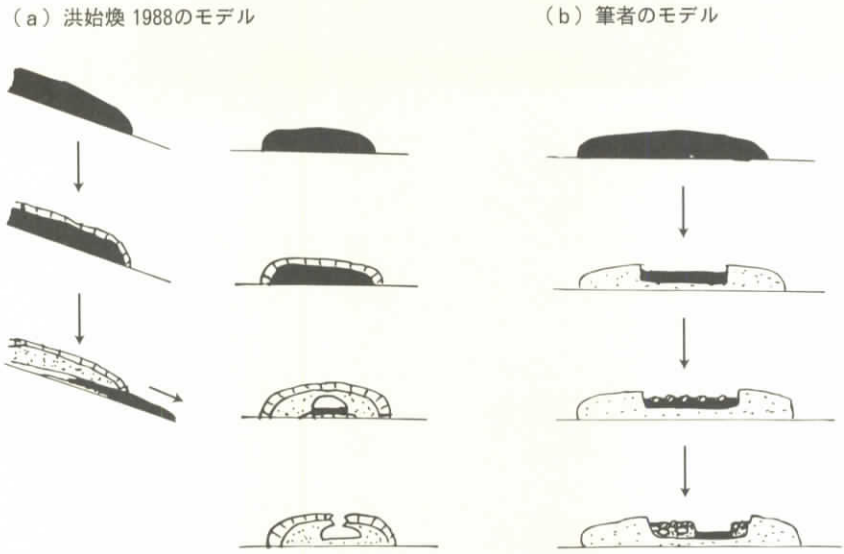


**図7**　溶岩洞窟形成に関する既応のモデル（a）と新モデル（b）

の後に二次的に崩壊・変形してきた、と考えられてきた。しかし、同窟の崩壊・陥没の結果とみなした場合それに見合う幅の大きさをはるかに超えていることや、連続性などより別の説明が必要であることが判明した。**図7**の右側のモデルは溶岩川 lava river，溶岩筏 lava raft を中心として構築したモデルである。

萬丈窟、挟才窟、徳泉窟での洞窟天井部を観察（写真8）したかぎりでは洞壁部の溶岩層と天蓋部の溶岩層の構造に大きな差異が認められる。

洞壁部分がマッシブな溶岩層とガス穴の多い多孔質で脆い層との互層からなり、熱変性の跡をとどめているのに対して、天井部分はブロック群が膠着した不規則な構造が特徴的で lava raft に起源するものであることを伺わせる。

Open channel を流動する溶岩流の表層に冷却した溶岩片・岩塊群が寄せ集まり筏状に集合体となって移動してゆく、それらが静止して互いに膠着したものが冷却して不安定な天井を形成し、その下部の溶岩流が流動して抜けたあとに空洞が形成される。その間、天井の陥没と空洞の連結が繰り返し、結果として洞窟系がつくられてゆく。すなわち、このタイプの溶岩洞窟は複雑な形態を

もち、いったん形成された後に崩壊・陥没したものではなく、形成中にも崩壊・陥没を繰り返し、もともと脆弱で不安定なものであった。溶岩流路の末端に連続する長大な溶岩流がセットとして確認され、それが溶岩流路のレール効果と給源火山体の成長に基づくセグメントの前進によってもたらされた現象であるという点がこれまで看過されていた。

このモデルは溶岩洞窟の崩壊、保全問題を考える場合に重要な示唆を与え、溶岩洞窟研究の応用的課題とも関るものと考える。

**8）地形発達史と溶岩洞窟の形成／破壊**

第一段階

第四紀初期から中期、割れ目噴火により大量の古期（第四紀初期）溶岩の流出と溶岩台地が形成された。この時期に、萬丈窟等の大規模な溶岩洞窟が形成された。当時の地形はその後の侵食期にほとんど消失して保存されていない。溶岩洞窟の大部分は破壊された。特に隆起現象が卓越する本島の南部地区にその傾向が著しい。しかし、相対的に傾動／沈降している北部地区には古期の溶岩洞窟の保存が良好であり、その一部は海底洞窟をなしている。第四紀中期以降に、中心噴火により漢拏山が形成されてくる。新興里玄武岩が古期の溶岩台地の上に重なり、その一部は古い洞窟のなかに流入し、二次的微地形や地物群を生成した。

第二段階

第四紀後期に、ホットスポット型火山の後期火山活動と見なされる単成火山群が噴出する。その大部分は、微量の溶岩、スコリアを噴出するものであった。一部の単成火山は溶岩流を噴出させ、その成長と火口の崩壊を伴った。初期の崩壊／破壊の産物がS－1面、大規模な火口の崩壊に伴って形成されたのが、ナマコ型溶岩丘の形成　S－2面である。これらの表面を切り込みながら、凹地帯（溶岩流路 channel）が形成された。そこでの流路の封鎖・プール・溢れ出しなどが繰り返され、セグメントの前進が起こる。供給源となる火山体の成長に引きづられて山麓の溶岩堆積面は古いものほど持ち上げられて急勾配となる。交差しながらより新しい堆積面が前進的に発達していった。溶岩流路のな

かでの溶岩筏 lava raft の流下、寄せ集まり、その冷却化と天井（皮殻）の形成、その下に空洞（溶岩洞窟／トンネル）が形成された。その結果形成された洞窟は複成的な成長過程をもち、陥没と連結による溶岩洞窟系 system をなすもので、連続的な単一洞ではない可能性が高い。ガス圧（量）と溶岩の高温、粘性のみで一般的に説明されるものではなく、形成場としての、（長大な溶岩トンネルが形成される）地形学的条件（火山物質の移動のプロセスとその営力）が無視できない。

① 凹地帯の下流側に、わずかに蛇行を伴いながら溶岩扇状地、末端溶岩指が延長して形成される(S－３、４面)。

②溶岩流末端の埋め残し部に凹地地形 pseudo－karst が形成される。そこが人工改変され、村落の中の貯水池として活用された事例も多い。

溶岩流路や溶岩流出後の火口底のなかに陥没孔が形成される（狭義の陥没窪地)。

## ４．さいごに－まとめと今後の課題－

1）済州島北東部には古期の溶岩台地上を覆う新期溶岩流がつくった火山地形が明瞭に保存されている。単成火山-巨文岳の火山地形の復元とその地形解析によって火山活動の推移、溶岩流出と洞窟の形成過程について推論した。

2）本地区では基本的に付加変形（堆積）地形が卓越し、除去変形（侵食）がほとんど進行していない。そうしたことより、巨文岳の噴火活動は決して第四紀の中期または初期という古い時期ではなく、後期の極めて新しい時期のものであると予想される。至近の体岳等についても同様な推測がなりたつ。単成火山の活動は、0.032Ma という萬丈窟 Mannjang cave 内部への二次溶岩の流入と密接な関係を有するものである。

3）巨文岳の北麓に付着するナマコ状溶岩丘は溶岩の流出、火口壁の崩壊に伴って押し出された岩屑と溶岩流の混合物から成り立つ火山地形である。その中央部に残されている広い帯状の凹地帯の存在は溶岩洞窟の陥没に起因す

るものではなく、初生的な地形であり、地表に開口した溶岩川流路跡の可能性が大きい。そこの表面を溶岩と一緒に移動する溶岩塊の集合体が溶岩筏を形成し、下部の溶岩流が移動した後に天井を形成した結果溶岩空洞が形成された。天井の陥没や連結が繰り返されて長大で複雑な溶岩洞窟 system が完成された。溶岩洞窟が溶岩流内部（封圧下）で形成されたという従来の考えに対して、地表で形成された、特異なタイプ＝表層／開放型＝のモデルである。

3）側方拡散が予想外に小さく、10 キロにおよぶ長大な距離を溶岩が流動するのは単に玄武岩の粘性の小さいことだけにその理由を求められるものでない。溶岩流の堆積面勾配（セグメント）の変化、前進が、噴出源となる給源火山体の成長（隆起）と山麓の溶岩流路による誘導（レール効果）と方向付け、加速が重要な要因となったことを示唆している。

4）今後の課題として、溶岩洞窟の陥没／連結の実証、地質との対応、単性火山（巨文岳）の成長過程と溶岩流の流出量や範囲との関係についての検証が挙げられる。さらに、体岳等、周辺の馬蹄型単成火山群の比較調査が必要である。

## 謝　辞

小論は大阪経済法科大学「環境地圏研究会」が実施した第 1 次（2001. 5）、第 2 次（2001.9）済州火山島現地調査の成果の一部である

火山洞窟研究の契機と済州島調査計画に対する全面的な支援とご指導をいただいた澤　勲博士、2 度の現地調査に同行した同僚の溝上　瑛教授、現地の済州大学、金泰鎬博士には案内や助言、特に体岳の陥没地形を最初に教示いただいたことが本研究の重要な動機となった。記して深謝の意を表します。

## 註記・参考文献

1）第四紀の初期から中期、およそ 200 万年前

2）S.M. Lee（1966）：Volcanic Rocks in Cheju Island.J.Geological Society

of Korea. 2，1－7
李文遠（1982）：韓国、済州火山島の地質、岩石鉱物鉱床学会誌、第77巻第2号、55－64

3）澤勲他（2000）：X-ray Analysis and K-Ar Age Determination of Lava Bridge in Manjang-gul Cave、大阪経済法科大学論集76、37－56、（1989）：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、等一連の研究、本田力（1997）：富士山を事例としてビンガム流体力学を応用し火山洞窟の二次生成地形モデル、澤勲は一連の成分分析と二次変形モデル、洞窟生成岩（母岩となる溶岩）の成分特性とその傾向を論じているが初期洞窟の生成については論及していない。地学、火山関係のテキストや辞典には観念的な生成機構が簡略に記載されているにとどまる。

4）長谷中利昭他（1997）：韓国、済州島の単成火山の地形学的特徴、東北大学東北アジア研究センター編「東北アジア研究」第2号、21－40　長谷中利昭他（1997）：韓国、済州島の単成火山の火山カタログ、東北アジア研究、第2号、41－74

5）韓国国立地理院発行、縮尺5千分の1地形図、1999

6）澤　勲・大橋　健（2001）：済州島の火山形成過程と溶岩洞窟の初期形態、大阪経済法科大学論集、79.37－83

7）小川孝徳（1980）：富士溶岩洞穴・溶岩樹型の地質学的観察、洞人、2（3）、42－47，（1971）：溶岩洞穴と溶岩樹型、『富士山総合学術報告書』（財）堀内浩徳会、72－127，（1971）：溶岩洞穴、溶岩樹型、『富士山の自然』（株）富士重工・スバル所収、98－127

8）貞観6年（864）に流出。厚さ5m。最大25m＋。体積は0.15立方キロメートル。

9）津屋弘達（1971）：富士山の地形・地質、前掲　7）所収、2－97

10）前掲　7）

11）申裕泳（1981）：溶岩洞窟の構造と形成過程に関する研究－萬丈窟を中心に－、漢拏山10（漢拏山岳会創立20周年特集号）

12）権重国編（1986）：済州島洞窟の特集地形観、韓国洞窟学会誌、洞窟. 13、24－36（1991）済州道の火山と洞窟、洞窟24、30－68

元　鐘寛（1986）：済州島の形成史、韓国洞窟学会誌、同窟 6 － 7 、 2 － 6

李洙珍（1986）：済州島の寄生火山の形成と分布に関する研究、洞窟、 6 － 7 、 8 －14

朴炳守（1986）：済州島溶岩洞窟の成因と特殊性、洞窟、 6 － 7 ，15－

13）洪始煥（1988）：済州島の洞窟、立正大学日韓合同済州島学術調査団『済州島の地域研究』、69－82（1988）：済州島の洞窟、漢拏山（済州山岳会）10. 70－79

14）2001. 9 . 11. 大橋・澤・佐藤による実測結果

15）前掲　13）

16）宇井忠英（1987）：火山体で発生する岩屑流の流動プロセス、地形. 8 － 2 、83－93

17）溶岩洞－溶岩トンネル lava tunnel、lava tube 溶岩流の中央部に生じたトンネル状の空洞。玄武岩質のパホイホイ溶岩に特徴的に発達。流動時の溶岩流は,底面,側面とともに表面も空気に触れて冷却固化するので中央部を通じて下流へ溶岩を供給する。供給源からの供給が終わった後、中央部が本流部へ流れ去るとあとに横穴状の空洞が残る。空洞の底面は平坦なことが多い。内径10m以上,長さ数キロに達することがある。富士山の風穴、胎内などは著名。月のシニュアスリル sinuou s rill も一部はこれである。溶岩チューブ、溶岩洞ともいう。（中村一明）『地形学辞典』1982、二宮書店、p620

18）Clistina.H.（1990）：Volcanic and Seismic Hazards on the Island of Hawaii. USGS

Macdonald.G.A, Abbott.A.T. and Pterson, F.L.（1983）Volcano in the Sea：The Geology of Hawaii. Univ. of Hawaii Press.

その他火山地形、火山洞窟に関する文献として、本多力（1997）富士山溶岩洞穴の溶岩棚形成に対する熱力学的解釈. J.Speleol.、Soc, Japan. 22、

81－88、Charles.V.Loason（1993）：An illustrated Glossary of Lava Tube features、Western Speleological Survey Bulletin No.87、荒巻重雄・白尾元理・長岡正利（1995）：『空からみる世界の火山』、丸善株式会社、日本火山学会編『空中写真による日本の火山地形』、東京大学出版会、1992、守屋以智雄（1983）『日本の火山地形』、東京大学出版会、町田洋・白尾元理（1998）：『写真でみる火山の自然史』東京大学出版会、横山泉編『地震と火山』（地学団体研究会）、東海大学出版会、1976

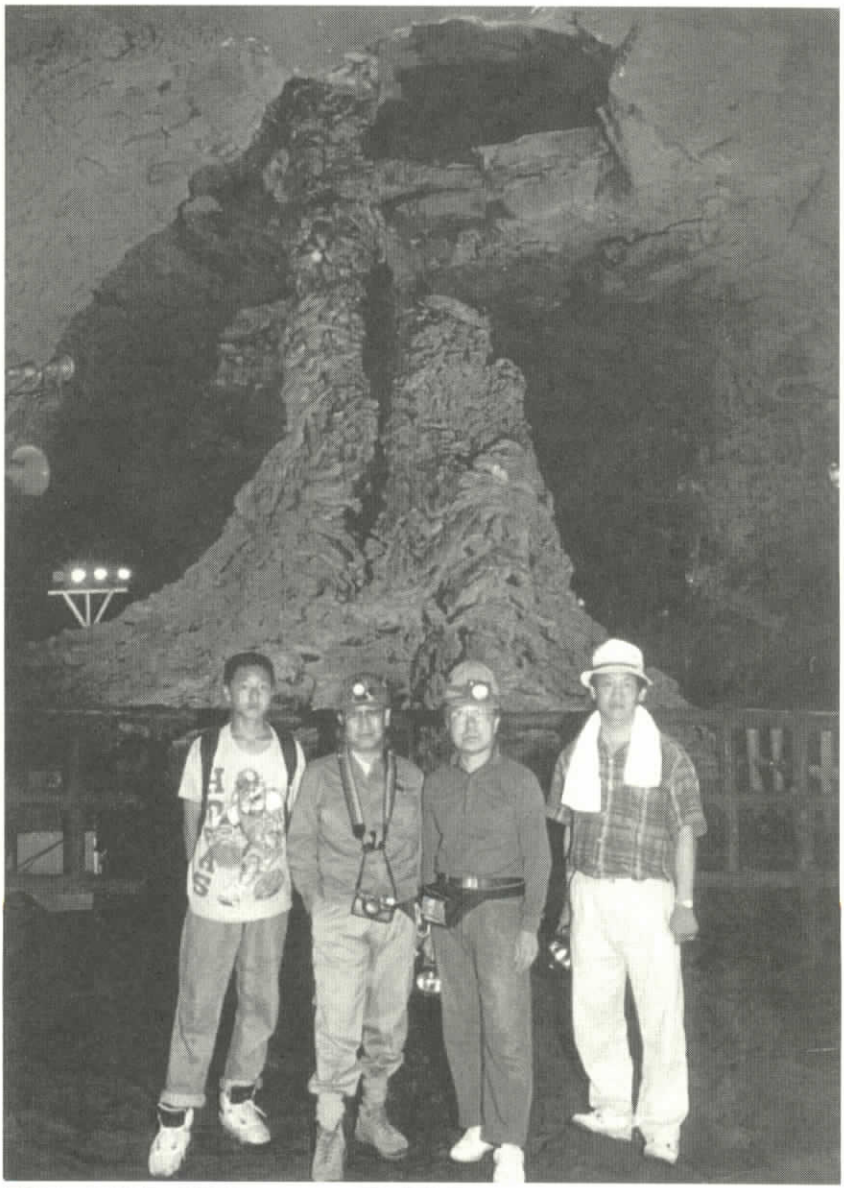

**写真 1**：萬丈窟の双子岩柱。洞窟の天井部陥没口から流入した新期溶岩が作ったもの（1982、澤勲撮影）。主洞を作る溶岩の K-Ar 年代測定値は 0.4Ma、双子岩柱を形成する溶岩は 0.19～0.032Ma を示し、両者の間には大きな年代差がある。

**写真 2**：北済州郡の広大な溶岩台地。主として、表善里玄武岩からなる。遠方の孤立丘はそれを貫入した新期単成火山群

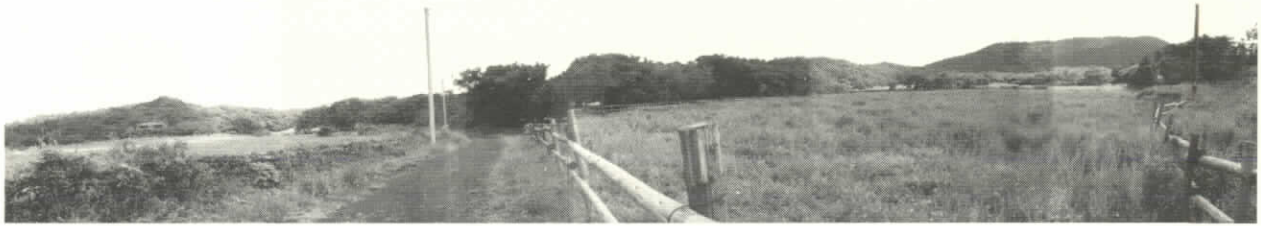

**写真 3**：巨文岳（右端の丘）の火口から流出した溶岩のつくる丘。北方（写真左手）に約 8 キロ続く。比高は 10～30m。手前は松堂牧場。

**写真 4**：体岳の火口に連続する溶岩丘上に形成された凹地帯

**写真 5**：陥没窪地の一部が湛水して小さな池沼となったもの

**写真 6**：陥没凹地は溶岩台地を開析する谷の初生形態を規定している。

**写真 7**：体岳山麓の溶岩洞窟

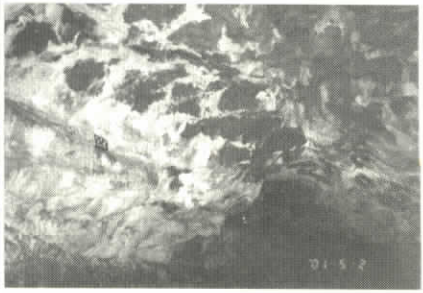

**写真 8**：溶岩筏の膠結を思わせる溶岩洞窟の天井部の構造（挟才窟）