

# 『ロシア、カムチャッカ半島南部、ゴレーリ火山 における溶岩洞窟の夏季結氷と地球温暖化』

大 橋 健

*The formation process of summertime freezing in lava tube(lava cave) at north slope of Gorely volcano, Southern Kamchatka Peninsula, Russia – special reference with Global-Warming–*

Tsuyoshi OHASHI

## Summary

The lava tube(cave) at north slope of Gorely volcano, in southern Kamchatka Peninsula was investigated. Summertime freezing(ice cave) was recognized in there. It glances at the fact and it is visible to the phenomenon which carried out opposite to advance of warming in the surrounding of the cave, in recent years. It is judged as a result of preliminary investigation that growth of the underground ice in a summer reflects surely the influence of warming. The appearance of summertime freezing is presumed that inflow of the melting-ice water from the glacier which developed in the collapsed hollow of the cave, and activity of the cave circulation accompanying increase of difference of temperature and inner-cave temperature are related. It is thought that a possibility that a similar example will be discovered in a surrounding area from now.

## 1. はじめに

大阪経済法科大学第1次日露合同カムチャッカ半島総合学術調査団のメンバーとして、2004年8月8日～8月15日の約1週間、短期間の現地調査を行った。

調査の主目的は地理学、地質学、洞窟学、水文環境学、地球物理学、考古学およびロシア史等の自然科学、人文・社会科学両分野の専門家を擁してのエリアスタディ Area Study であった。

筆者は北東アジアの火山洞窟・火山地形の国際比較という作業の一環として、カムチャッカ半島の溶岩洞窟に焦点を絞り、環境洞窟学の視点から調査を企画、遂行した。

島弧の北縁部に位置するカムチャッカ半島は日本列島と類似した地殻構造やなりたちを有しており、火山活動が活発でかつ地震が多い。

1992年まで、カムチャッカ州は外国人の立ち入りが禁止されていた。旧ソ連邦の崩壊、東西冷戦体制の瓦解によって、地政学的な位置の重要性の低下とともに、1992年以降は外国人が自由に立ち入ることが許可されるようになった。だが、学術調査が解禁されてからの年数も浅く、寒冷地であるという地域性もあり、現段階では Area Study をはじめとした学術調査は分野、件数ともに極めて限られたものにとどまっている。

カムチャッカ半島の火山洞窟 (lava tube/lava cave) に関しては、既に北部のトルバチク火山と南部のコレーリ火山の2箇所に存在することが明らかにされている (British Cave Research Association 1996、横山卓雄 1992、Sulezin Yurii 1996、富士山火山洞窟研究会1997)。しかし、一部の洞窟の実測作業を除いて本格的な洞窟の学術調査は実施されていない。

本半島の火山洞窟の地域的特異性は氷河・氷河洞窟と共存するという点である。

約二万年前の最終氷期の極相期、ゴレーリ山を中心とした南部火山地帯は大規模な氷河に覆われており、特に分水嶺付近から東海岸にかけての地区にはその事実を裏付ける見事な氷食地形群が残存している。

標高1000mを越える火山体斜面には現在でも小規模な氷河や圏谷など氷食地形群が発達している。しかし、半島南部山地の大部分は現在、氷河の消耗域となっており、氷久凍土層の分布限界(南限)からも外れた地域である。一方、地球温暖化の影響が各所で観察できる。

今回の調査において、ゴレーリ火山北麓の溶岩洞窟のひとつ (GO. No 12

洞）が氷穴化している事実を発見した。そうした現象は周辺地区で現在進行中の温暖化を反映する現象と一見して背反するように見える。

地下水（氷穴）はわが国において、富士山山麓をはじめ、東北や北海道地方においてすでに数ヶ所で検出されている（清水長生2004）。さらに、韓国の釜山北東約100キロの蜜陽 Milyang の報告もある（田中博 1997）。

富士山のように地下水が通年で見られる溶岩洞窟内の場合と東北日本の多くの事例やウルムゴル（韓国、Ice Cave の意）のように、外気の温度が高い（30℃以上）夏季に成長し（夏季結氷現象）、逆に秋から冬に消えてしまう場合（田中博、1997/2002）とがある。後者の事例はほとんど累積型（崖錘）氷穴である。

氷穴の形成については断熱膨張説・気化熱説・周水河説・対流結氷説などがあるが未だ定説はない。

今後、調査の進展に伴いゴレーリ火山周辺でさらに氷穴が検出される公算が大きい。

氷穴の成長を最近の地球温暖化との関連から検討した結果、氷穴の形成、成長が必ずしも最近の温暖化現象と矛盾するものではなく、むしろ温暖化に調和する現象である、と推論するに至った。

本報告では定性的な所見にとどまったが観測やモニタリングなどによる定量的な実証作業は次年度（第2次）以降の調査に委ねるとして、取り急ぎ氷穴の存在とその形成に関する問題点の整理、結氷現象のメカニズムについての大胆な仮説を提起するにとどめた。

謝辞：本稿をまとめるに際して調査隊長の澤勲教授をはじめ隊員の皆さんに多大なる協力とご教示を賜った。記して深謝の意を表します。

なお、この調査には本学の2004年度特別共同研究補助金を使用した。

## 1. 調査地の位置と地形・地質・気候の概要

### 1) 位置と概要

カムチャッカ半島の火山フロントは千島ーカムチャッカ海溝に平行する島弧沿いに、ほとんど第四紀前半に活動したやゝ古い火山群からなるスレージン

(中央) 山脈に見られる西側の火山列Ⅰ、ポストーチヌイ山脈のなかに見られる東部の活火山群からなる火山列Ⅱとの2つがある。さらに、中央低地(地溝)帯北部に見られる最も活動的な火山群をこれらと区別して火山列Ⅲと見なす考えもある(図1、図2)。

今回、調査したゴレーリ火山は火山列Ⅱに属し、ポストーチヌイ(東部)山脈南部の一角を占める。

ゴレーリ火山は州都ペテロパブロフスク・カムチャッキーから南西方にわず

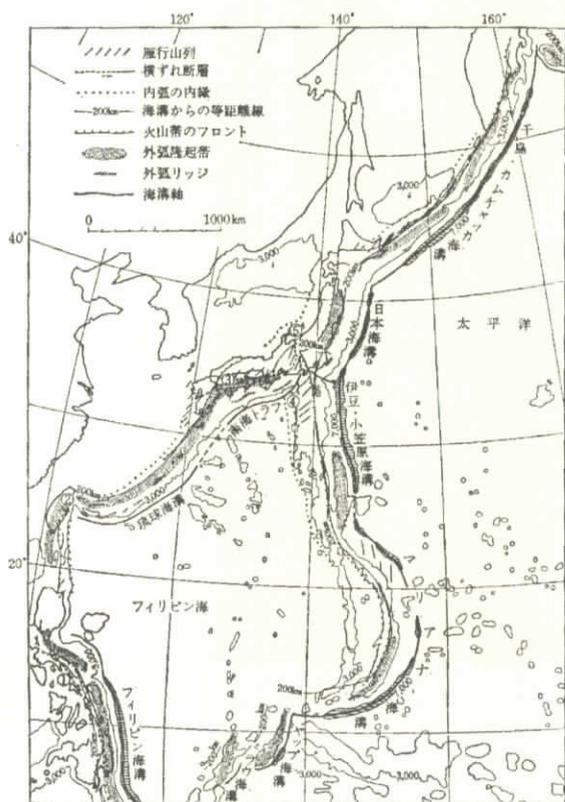


図1 島弧とカムチャッカ半島の位置(貝塚爽平1973)

海底地形は海図6901号による。

- ① フィリピン断層帯    ② 台東断層    ③ 中央構造線
- ④ 西七島断層帯    ⑤ 糸魚川静岡線

か70キロ余の高原上に位置する。周辺地帯はアネクメーネ(非居住地带)であり、ほとんど手付かずの大自然が残っている(図3、図4)。

近年、金山開発と地熱発電所の建設に伴い道路工事が進められ、悪路ではあるが六輪トラックを利用すればエリゾア空港から数時間で比較的容易にアクセスできる。

至近にはピリュチンスキー火山、ムトノフスキー火山さらにオペーラ

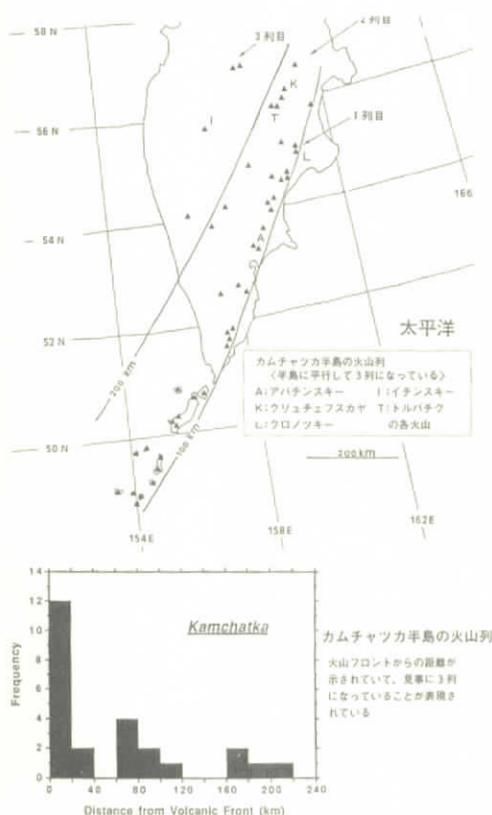


図2 カムチャッカ半島の火山列(横山卓雄1992)

火山などの活火山がある(写真1・2)。

ゴレーリ火山の標高は1829m、数個の火口円錐丘の結合体からなり、11個の尖った頂上火口および30個の側火口(火山体斜面上の)をもつ。歴史時代に8回の噴火が記録されており、最終の噴火は1985年である。中央火口丘は直径13×12kmのカルデラの中に発達している。噴火形式は火山灰とガスを放出する爆発的なタイプである。Plio-PleistoceneのカルデラでありDaciteからなる。今回採取した溶岩洞窟の造洞層はカルデラ底に流動してきた普通輝

石安山岩 Augiye-andesite である(鹿島愛彦2004)。

溶岩原の西に聳えるオパーラ Opala 火山(標高2475m)は12×15kmのカルデラの中に出来た成層火山であり(写真3、4)、1776年、1827年、1854年および1894年に噴火している。

## 2) 地形・地質の概要

州都ペテロパブロフスク・カムチャッキーの市街からアバチャ湾を隔てて対岸(西方)の南部火山地帯を望むと、標高1000メートル前後の定高性山頂が見



図3 図4の作成範囲(アミの部分)

事であり、その上方に突出する「アバチャ湾の真珠」の異名をもつ孤峰、ピリュチンスキー火山が際立っている。

半島南部を構成する基盤岩は白亜紀の付加体とその上位に重なる古第三紀の堆積岩である。褶曲や断層変位をした複雑な地質構造を切って広がる定高性山頂—高山帯—は隆起準平原ではなく最終氷期に形成された氷食地形の可能性が大きい。

全体として半島中央部をなす高原面は緩やかに西方へ傾く傾動地塊状をなし、分水嶺が著しく東側に偏在している。その平坦な1000メートル前後の分水嶺付近にゴレーリ

火山とムトノフスキー火山の火山体が突出している。定高性山頂面と火山の切載関係など形成順序は不明である。

### 3) ゴレーリ・カルデラ北麓の広大な溶岩原と溶岩洞窟

カルデラ底の北から西部を埋めて、15×15キロの広大な溶岩原が発達している。

詳しく見ると、この溶岩流は Finger 状に西方へ広がっており、オパーラ川

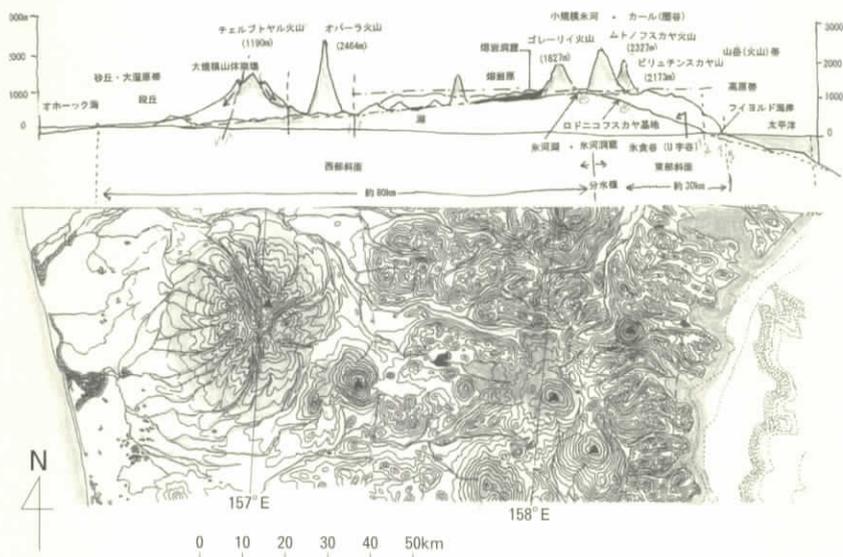


図4 カムチャッカ半島南部の東西地形投影断面図

上流部とブイストラヤ川の支流の河谷沿いに3方向へ分かれて流動したことが伺える。

北ゴレーリ火山の溶岩洞窟に関しては、BCRA (British Cave Research Association) が1996年に調査を行い、12本の溶岩洞窟が発見された。

この調査に参加したロシア科学アカデミー極東支部、火山研究所のユーリー博士等との共同作業による実測図が作成されている。今回、われわれが入洞し調査を行ったのはそれらのうちの3ヶ所である。なかでもGo-No. 12洞窟(図5)の実態は特筆すべきものがある。

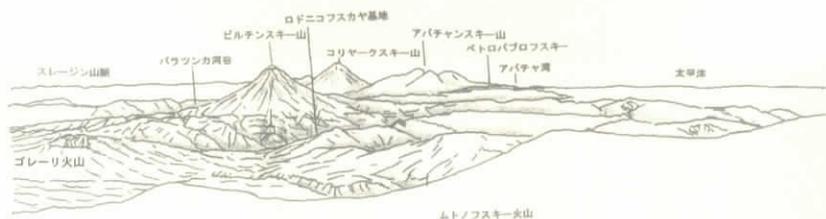
#### 4) 溶岩洞窟実測図について

筆者はこれまで国内外の多くの洞窟の実測図を通覧してきた。そして、劣悪極まる条件下での実測作業の困難さを熟知している。平面図、縦断面展開図、横断面図3点セットの精緻な実測図を見る度に痛感することがある。

BCRA が作成したゴレーリ火山北側の溶岩洞窟の実測図は通例に漏れず地



写真1：衛星画像(LANDSAT USA NASA提供)



南部火山地帯 ムトノフスカヤ火山の上空から北方のビルチンスキー火山、コリヤクスキー、アバチンスキー火山を望む。

写真2：南部火山地帯の航空写真



写真3、4：溶岩原とその西方に遠望されるオパーラ火山（写真 左下）

下空間（洞窟）のみが実測図作業の対象とされており、GPS による計測と思われるが洞口の数値位置が緯度経度（10進法）で記録されている。ただし、筆者が最も知りたい地形学的位置や GL 等に関しては全く記載されていない。造洞層の地質に関しても同様である。Speleologist（洞窟研究者・愛好家）達が穴やその内部にのみ興味を示し、それ以外のことには無関心であるはずはなかろう。

洞窟のなりたちや、特徴、変化等を総合的に考究するためには地下空間のみに止まっていたならば「ミイラ採りがミイラになる」の愚行に陥ってしまうであろう。

環境洞窟学を提唱する筆者が特に強調したいのは地表も含めた4次元の総合的な洞窟（地形）学図作製の必要性である。

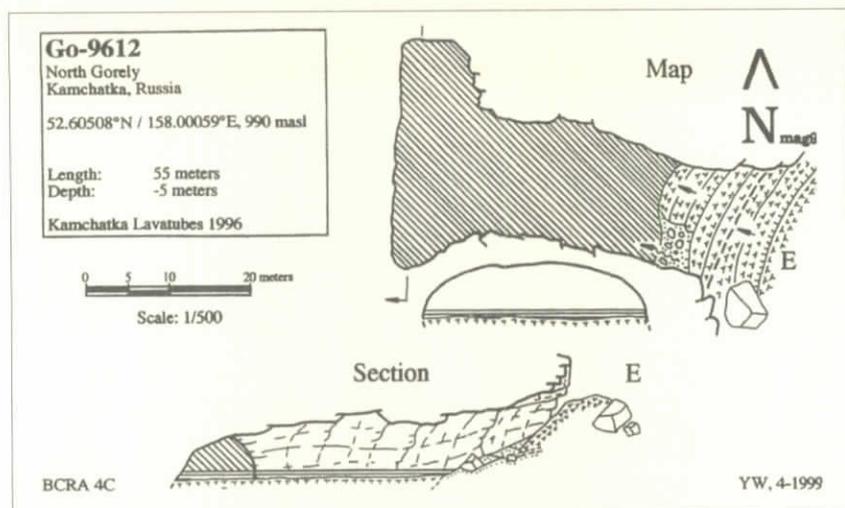


図5 ゴレーリイ NO.12洞窟の実測図 (Srezin Yulii 1996)

### 5) 氷穴の確認とその関連地形

注目の No. 12洞 (YW、4-1999洞) の洞口の位置は $52.60508^{\circ} \text{N} / 158.00059^{\circ} \text{E}$ である。1996年9月19日の調査結果によると、長さが55m、深さは5mとある。深さに関しては地表面からの洞窟天井または洞底面までの長さを目指すのか、それとも洞窟天井から洞底までの長さをさすのか不明である。

縮尺50万分の1のTOC航空地図上で判読すると、溶岩原の標高は1000m前後である。今回の調査によって、洞窟のGLは-7m~-10m、幅7~15m、高さ5~7mであることが明らかにできた。全体像から典型的な溶岩トンネルであると断定される。

保存状況はあまり良くなく、連続性が乏しい。溶岩鍾乳などの地物も凍結破砕の影響を受けて原型が損なわれており、二次的変形が著しく陥没や洞内の閉鎖が進んでいる。

洞口の分布と陥没凹地や陥没溝の分布とを繋ぐことにより少なくとも複数のcave systemが存在していることが伺える(写真6、7、8)。陥没崖では造洞層の断面が良く観察できる(写真9)。



写真5、6、7、8：陥没凹地・溝

溶岩洞窟／トンネルの内部の大部分は、崩落岩塊で埋積されている。溶岩原の中に洞窟の天井部の陥没に伴い形成されたと見なされる円形の凹地や、数10 mの長さをもつ陥没溝が何ヶ所も確認された。しばしば崩落岩塊群が洞口を閉鎖しており、其の上部に残雪や氷河水を載せている（写真10）。

GO-12洞の横断面形は典型的な溶岩洞のタイプで、カマボコ型をしている。平坦な洞床、ドーム型をなしている天井の岩壁が西方の先端部で交差していることよりトンネルの勾配が西方へ5～10°傾いていることが分かる。

ロシア科学アカデミー火山研究所の Srezin Yulii 等が1996年に調査した時、No. 12洞には地下水は見られず、洞内の湛水域をゴムボートで移動しながら実測作業を行ったという（Yulii 博士談）。ところが、今回我々がその No. 12洞に入洞したところ洞床の全面に地下水が見られ、まさに Ice Dancing Hall の状態であった。これが夏季氷結であるのか否かは必ずしも確定はできない。しかし、かつて、ユーリ氏が入洞した時期が9月16日であり、盛夏を過ぎて初



写真9：ゴレーリNo.12洞窟洞口



写真10：洞口を塞ぐ陥没溝の氷河

雪を迎える季節であつたという点を留意すべきであろう。

入洞した時にはモヤが立ち込め、視界がほとんど利かない状態であった。洞底から盛んに発生する水蒸気のためであり、それは洞外の気温と洞内の地温の差にもとづく洞窟循環が活発であることの証といえる。

最初に入洞した筆者は洞底に着地した瞬間に足をとられて転倒した。氷結の存在をまったく予測していなかったことと洞口を塞ぐように累積した岩塊基部から大量の融氷水が洞内に流入して氷盤の表面がビチャビチャに濡れていたことに気づけなかったためである。

## 6) 氷河平衡線高度と氷食地形

カムチャッカ半島北部には山岳氷河が現存する。これに対して半島南部には一部の山岳地帯に小規模な氷河が見られるに過ぎない。しかし、約二万年前の最終氷期には半島南部にも大規模な山岳氷河が覆っていた(図6A)。そうした事実は半島南部の中央部から東部の海岸にかけて顕著な氷河地形(U字谷とモレーン等)が発達している事実からも裏付けられる。すなわち、こうした氷河地形群は失われた過去の気候地形の置き土産である。

ムトノフスキー地熱発電所の南側の谷壁では、定高性山頂が50メートルを超える厚い氷堆石/氷食作用の産物の堆積面であることが観察された(写真15、16)。

標高1200m以上の山岳地帯(主に火山体斜面)には小規模な圏谷(カール)

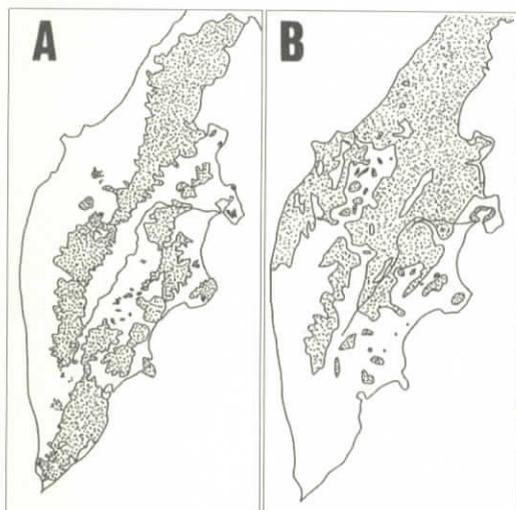


図6 (A) 後期更新世の氷河分布 (Olyunin, 1965) と (B) 現在の永久凍土分布 (Zamolodchikova and Smirnova, 1979)

や堆石、小規模な氷河湖などが発達しているがそこでも近年の氷河の縮小過程が読み取れる。

現在のカムチャッカ半島の永久凍土分布(図6A)を見ると $53^{\circ}$  Nが南限となっている。調査地区はその南に位置しているものの標高が1000mを上回る場所を占めていることより高度補正が必要であろう。

現在のカムチャッカ半島の年降水量(図7B)に示される南部半島東斜面の多



写真11、12：カルデラ底の氷河と温暖化の跡

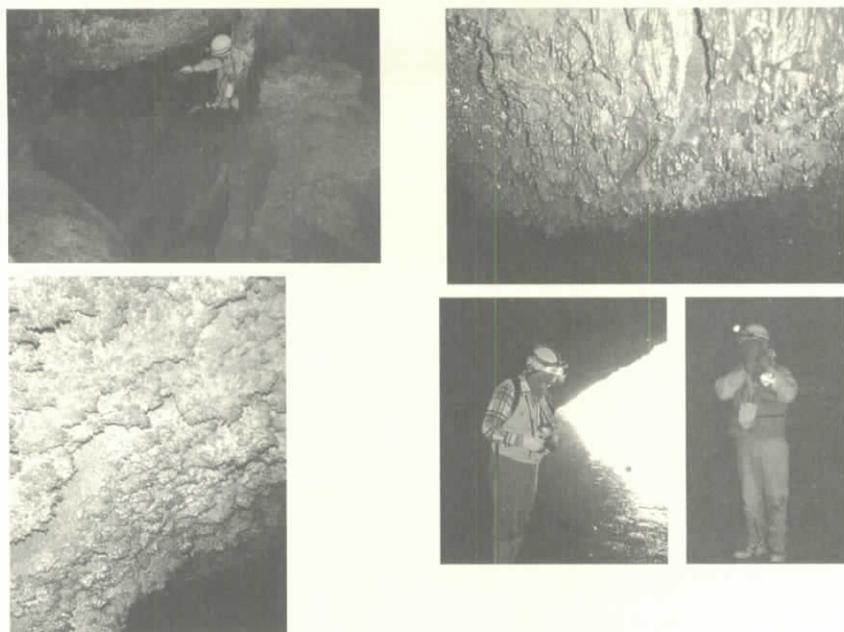


写真16、17：溶岩鍾乳2コマと調査中のケーバー

蒸発量が少ないためであり、逆に東側は北太平洋からの水蒸気の供給が活発であることに起因する考えられる。

今回の調査地区は氷河消耗帯である。小規模な現存氷河も後退が著しく、カルデラ底で観察されたその末端部には融水に伴ない氷河湖や氷河洞窟が形成されている(写真14)。

ゴレーリ火山のカルデラ底の小規模氷河は中央火口丘の斜面基部に最も良く保存されている。中央火口丘の斜面中には小規模な圈谷が認められる。基部の部分には浅い谷地形が刻まれ氷河がそこを埋めている。その両側の谷壁斜面上部分の5～7mが帯状に植生が着かず裸地化(写真11、12)している。氷河が後退したことに起因していると思われる。それが単に夏季特有の季節的融解による現象であるのか否かまでは確認できなかった。その部分がカルデラ底を流動した溶岩原を削り込むベンチの高度と同じレベルを示すことより気候段丘

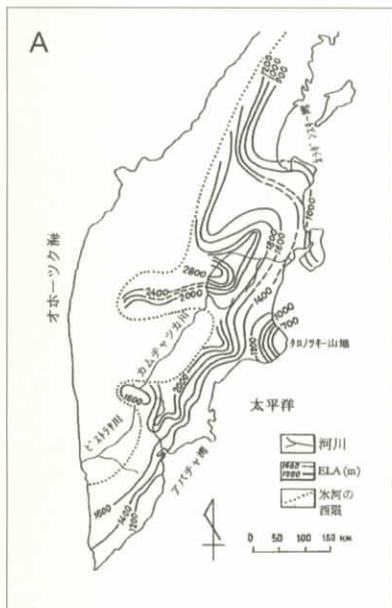


図7A 年降水量分布(mm)  
(Kondratyuk 1974)

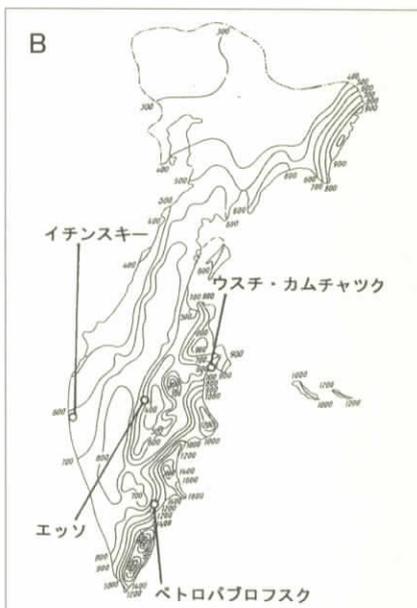


図7B 氷河平衡線高度 (ELA : m)  
(Muravyev 1999)

と見なすべき地形であろうと判断される。



写真14：氷河洞窟

### 3. 考察

#### 1) 氷穴／結氷／地下水形成とそのメカニズムについて

GO - No. 12洞の氷穴が夏季氷結であるのかそれとも通年氷結かという点に関しては今回の調査では確定できなかった。しかし、地下結氷が認め



写真13：気候段丘



写真15、16：平坦面とそれを構成する氷堆石／ムトノフスキー地熱発電所付近

られなかった前回の調査が9月中旬であった点より前者である公算が大きいと考えられる。

カムチャッカ半島南部の夏は20～30℃近くまで気温が上昇する。洞内を閉鎖したり、洞口を塞ぐようにして陥没溝の底に積成した崩落岩塊の上面を覆う水河水は、夏季の気温上昇にともない急速に融解する。入洞時に、崩落岩塊下部から多量の融氷水が洞内に流入している事実が観察されたことは先述した。

冬季の気温の降下に伴い重力流として冷気が洞内と洞口の岩塊層の空隙を充

填し、それが夏の融雪期においても低温な地下の安定層をなし、ここを通過する融氷水が洞内の氷結—地下水—の成長を促進した、と推定される。さらに、気温と洞内の地温との較差が大きい夏季には洞窟循環が活発化し、洞床からの水蒸気の蒸発に伴う気化熱の損失が地下水の形成に大きく関与しているものと考えられる。

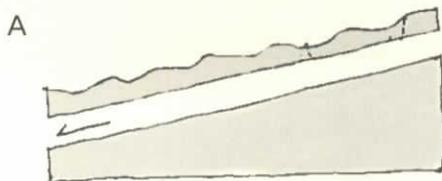
8年間の洞窟環境の変化が地球温暖化 Global Warming と逆向するものではないか、という疑問に対して、対流説による説明を適用したならば決して逆向する現象であるとは言い難い。

狭い洞口と陥没凹地が煙突状の空気の通路（噴出し口と吸い込み口）となり、空隙が風脈をなし、対流が起こる。

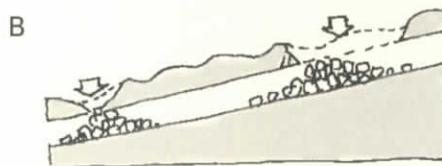
冬季には洞内の気温・気圧より洞外の気温が低く、気圧が高いそのため陥没凹地は冷風の吸い込み口となる。逆に、夏季には冷風が吹き出す際に水分を多く含んだ気流とともに水分が蒸発し熱が奪われて冷却され、氷結が起こる。こうした現象はすでに宮城県七ヶ宿町の渡瀬風穴での観測調査で実証されている（Suzuki and Sone, 1914／曾根・鈴木1915）。すなわち、夏季の結氷は地中の、空隙内の対流の結果とする説である。ただし、風向の交替がない風穴もあるので対流説だけでは説明できない、という批判もある（清水長生2004）。

累積（岩屑）風穴の場合、冬季に氷点下の空気が地中に入り込んで地下の岩屑を冷却させ、冷えた岩屑は吸い込んだ冷たい空気をさらに冷却して降下させ、冬季にも風穴から冷気が吹き出すという。溶岩洞窟の場合には岩屑層に相当する機能を演じる媒体はなにかという点が不明であるが、陥没溝に累積し、ほとんど洞口を塞いでいる岩塊内部の空隙または洞窟空洞が地下に吸い込まれた冷気の温度降下の役割を果たしていると推定される（図8）。

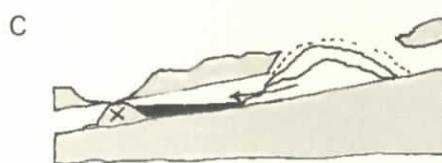
津田・石川（2002）は西ブカウシヌプリの岩塊斜面で冷風穴からの吸い込みと温風穴からの吹き出しという対流の存在を認め、永久凍土層をつくる地下水が冬季よりも春の融雪水によって成長することを確認している。さらに、地下に対流が生じるような空隙や空洞が存在すること、そこの地形・表層地質条件も大きく関与するという見解を明示している。韓国蜜陽郡の ice valley でも、春から秋にかけて長期間にわたり風穴内に氷が存在する。



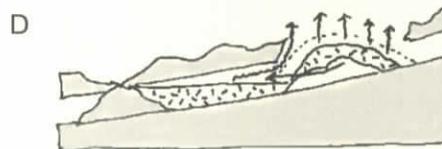
溶岩流と溶岩洞窟の形成



天井部が陥没し、小さな円形凹地と大規模な陥没溝が形成。崩落岩塊による洞内および洞口の閉鎖が起る。



冬季に洞窟内と岩塊空隙に冷気層が蓄積される。  
春～夏季に崩落岩塊層を覆う雪渓、氷河水の融解水が洞内へ流入し湛水域が形成される。



温暖化とともに融氷水が安定した冷気層の蓄積される岩塊空隙の中を通過して洞内へ流入する。  
外気との温度差が洞窟循環を促進し、洞底からの蒸発の活性化、その際の気化熱により洞内の結氷が進む。

図8 溶岩洞窟内の夏季氷結プロセス(大橋健原図)

風穴内部の低温は、夏季と冬季で逆転する風穴循環により説明される。これは地温と気温の差によって対流が励起される（対流説）。夏季には外気が高温で崖錐内部が相対的に低温となるため、両者の間に気圧傾斜度力が生じて崖錐下部の冷気が吹き出す。その空気を補償しうるために、崖錐上部の温風穴からは外気が吸い込まれる。逆に冬季には外気が低温で崖錐内部が相対的に高温となるため冷風穴から外気を吸い込み温風穴から暖気を噴出するようになる。こ

ここで、夏季の風穴循環は空気の成層状態が極めて不安定であり、活発な対流混合により外の寒気が崖錐内部まで一気に進入して短期間に岩全体を冷やす。このように、大気の力学的な成層不安定により生じた対流が、寒気だけを効率よく崖錐内部に蓄積するという熱フィルタの効果をもたらす、風穴の冷気が形成維持される（横井みずほ1999）という。

夏季に冷風穴から噴出する冷気は、冬季に蓄積された寒気によってまかなえる。

風穴循環を励起するのは崖錐内部と外気の温度差で、夏季には崖錐内部で下降流が生じ、冬季は崖錐内部の温度が外気より高くなるため上昇流が生じる。

風穴循環は気化熱や周氷河説のように特別の冷源や熱源でなくても、対流説のみで説明がつく。それが起こるには、山の斜面の崖錐内部に十分な空隙が存在すること、その斜面の上部と下部に、外気と空気のやり取りを行うことが出来る穴が存在すること、そして崖錐内部の熱容量が大きいことの3点が必須である。

外気温の日変化によって温度差がなくなれば循環は止まる。逆に温度差が大きくなれば循環は強まる。夏季循環で循環が止まるのは早朝のわりにわずかな時間だけであり、日中外気温が上がると風穴循環が強まり、冷風穴は活発化する。また、暑い夏ほど風穴循環が強まり、冷風穴の水が成長し、冬季に活発な対流混合で蓄積された寒気が、夏季に重力流として穏やかに流出するということが観測によって定量的に実証され(田中 et al 2004)、氷穴形成のメカニズムは対流説が最も有力視される。

## 2) 今後の検討課題

まづGO-12洞の結氷現象が通年現象かそれとも夏季氷結かの確認作業が急務である。さらに、可能なら洞窟循環の通年変化のモニタリングを試みる必要がある。その際、調査地の条件や調査方法などからして、今後、現地研究者との共同作業の緊密化が不可欠といえる。

そして、周辺地区においても類似現象—氷穴—が存在することが十分に予測される、今後その探索が重要であろう。その上で、観測地点の選定、定量的な

実証作業やシュミレーション等を具体的に検討すべきであろう。

### 3. さいごに

地球温暖化というグローバルな現象と氷河と併存する地域であり氷河の消耗現象が急速に進行しつつある中で氷穴が形成されているというローカルな現象。一見して矛盾しているように見えるが、温暖化にともない陥没溝の融氷が活発になり、溶岩洞窟天井部からの崩落岩塊層中の空隙に形成された安定した冷気層を通過した融氷水の洞内への流入が結氷を促進し、夏季に洞底から蒸発する水蒸気の気化熱が温度降下をもたらした可能性が大きい。したがって、ゴレーリの No. 12洞の夏季結氷現象は地球温暖化傾向と調和する現象であると見なす。

類似の氷穴が No. 12洞窟の至近に存在する可能性が大きい。その探索は第2次調査（2005）の課題であり、同時に氷結の観測と実証作業が今後、重要な課題となろう。

#### <参考文献>

- 1) 清水長生（2004）日本における風穴の資料—地形条件・永久凍土などとの関連から—、駒沢地理 第40号、121-148
- 2) 富士山火山洞窟研究会（小川・立原・川村・広瀬・平野・鈴木明）（1997）カムチャッカの溶岩洞窟、日本洞窟学会 学部報・会報合併号 vol2, No. 1、20-28
- 3) Srezin Y. B. Tsyurupa. A. L. (1996) Lava Cave in Kamchatka, 7th International Symposium on Vulcano Speleology Proceedings 113-120
- 4) 月刊地理（1999）カムチャッカ特集号 第44巻第7号、19-65  
座談会：カムチャッカの魅力 19-35  
山縣耕太郎・曾根敏夫：火山と寒冷地形 44-47  
松元高峰：気候と氷河 48-51

白石孝行・藤田卓也・永山ゆかり：文献と機関 64-65

- 5) 田中博・村規子・野原大輔（2004）福島県下郷町中山風穴における風穴循環の成因、地理学評論77-1,1-18
- 6) 田中 博（1997）韓国ウールムゴルにおける夏季氷結現象の数値実験、地理学評論70-A-1,1-14
- 7) 横井みずほ（1999）福島県下郷町中山風穴の成因に関する観測および理論的研究(筑波大学第一学群自然科学類卒業論文)
- 8) BCRA(British Cave Research Association)（1996）Kamchatka Lava Tubes BCRA 4C.
- 9) 横山卓雄（1992）『カムチャッカ学術紀行』, 京都自然史研究所

