

ロシア、カムチャツカ半島の自然と洞窟

—ゴレーリ火山の溶岩洞窟について—

沢 勲

Isao SAWA 古山勝彦 Katsuhiko FURUYAMA

大橋 健

Tsuyoshi OHASHI 藤本和貴夫 Wakio FUJIMOTO

鹿島愛彦

Naruhiko KASHIMA 桑原武志 Takeshi KUWABARA

Nature and Cave in Kamchatka Peninsula, Russia

—*Speleological studies on the lava cave in Gorely volcano*—

ABSTRACT

In August 2004, a Speleological exploration was carried out in Kamchatka Peninsula, Russia by Japanese-Russian lava cave research group.

Gorely caldera is located at the southeastern part of Kamchatka Peninsula, about 75km southwest of Petropavlovsk- Kamchatkiy. Gorely lava caves are situated in NNE area of Mt. Gorely volcano (1829m). One of lava cave (Go-9612) lies at longitude 158°00' 22" E and latitude 52°36' 18" N. The altitude of cave entrance is about 990m and the main cave extends in the NNW direction for about 50m by 15m wide and 5m in depth. The cave of K3 is near the K1 cave.

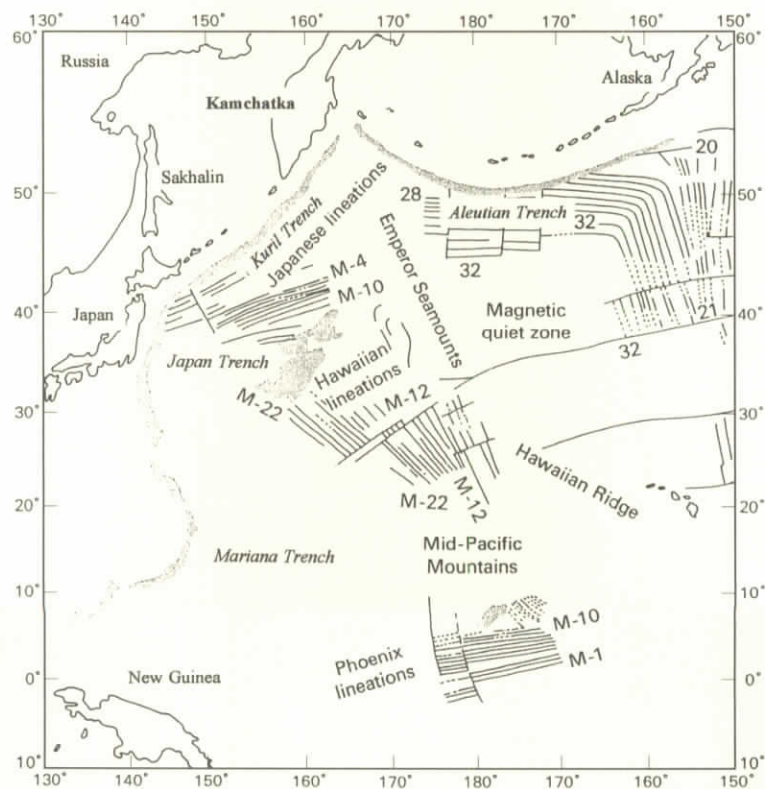
Lava hand-specimens K-1 and K-3 caves are studied by light microscope observation and X-ray fluorescence analysis. Thin section studies indicate that these specimens are described of Augite andesite. Average major chemical components of specimens from these caves are as follows (wt.%) ; ($\text{SiO}_2=55.11$, $\text{TiO}_2=1.25$, $\text{Al}_2\text{O}_3=15.96$, $\text{T-Fe}_2\text{O}_3=9.48$, $\text{MnO}=0.17$, $\text{MgO}=5.06$, $\text{CaO}=7.20$, $\text{Na}_2\text{O}=3.39$, $\text{K}_2\text{O}=1.942$, $\text{P}_2\text{O}_5=0.545$) and these values indicate that the Gorely basaltic andesite (lava) belong to calc-alkaline rock series.

Key words : Gorely volcano, Lava Cave, X-ray Fluorescence Analysis

[大阪経済法科大学論集 第90号] [The Review of Osaka University of Economics and Laws Vol. 90(2006), 1-24 pp.]

1. はじめに

世界地図を広げてみると、ロシアの東部にあるカムチャツカ半島の地理的位置は、ユーラシア大陸の東の端にある小さな半島である（図—1）。日本から見ると、この半島はマリアナ-日本-千島弧の北方の延長線上に位置しており、日本と共通したことは、活火山と地震が多い特徴を有することである。カムチャツカ半島の火山分布図は（図—2）のとおりである。



図—1 ロシア、カムチャツカ半島の地質学的位置（Kennett, 1982原図に追記）

Fig. 1 Geological Position of Kamchatka Peninsula, Russia.

本稿は、ロシア、カムチャツカ半島で行った日露共同洞窟総合学術調査（2004）の一部である。ゴレーリ火山はカムチャツカ州都であるペトロパブロフスクの南西側の、北緯 $52^{\circ}27'$ 、東経 $158^{\circ}07'$ に位置する。11箇所の火口と複数の噴火丘（溶岩ドーム）をもち、さらに山腹には30箇所の単成火山（寄生火山）が鎮座している。歴史時代に8回の噴火が記録されており、最後の噴火は1985年である。直径 $13\text{km} \times 12\text{km}$ のカルデラを形成し、爆発性の噴火をするタイプの火山である（図-3）。

ゴレーリ火山溶岩洞窟（K-1）は、ゴレーリ火山の北北西方向にあり、北緯 $52^{\circ}36'18''$ と東経 $158^{\circ}00'02''$ に位置している（図-4）。本格的な学術調査は行われていないが、BCRA(British Cave Research Association)は、1996年に Kamchatka Lavatubes の調査を行い South Tolbachik 火山で12本の、North Gorely 火山で14本の溶岩洞窟の測量図（図-5）を作成している（Slezin 提供）。

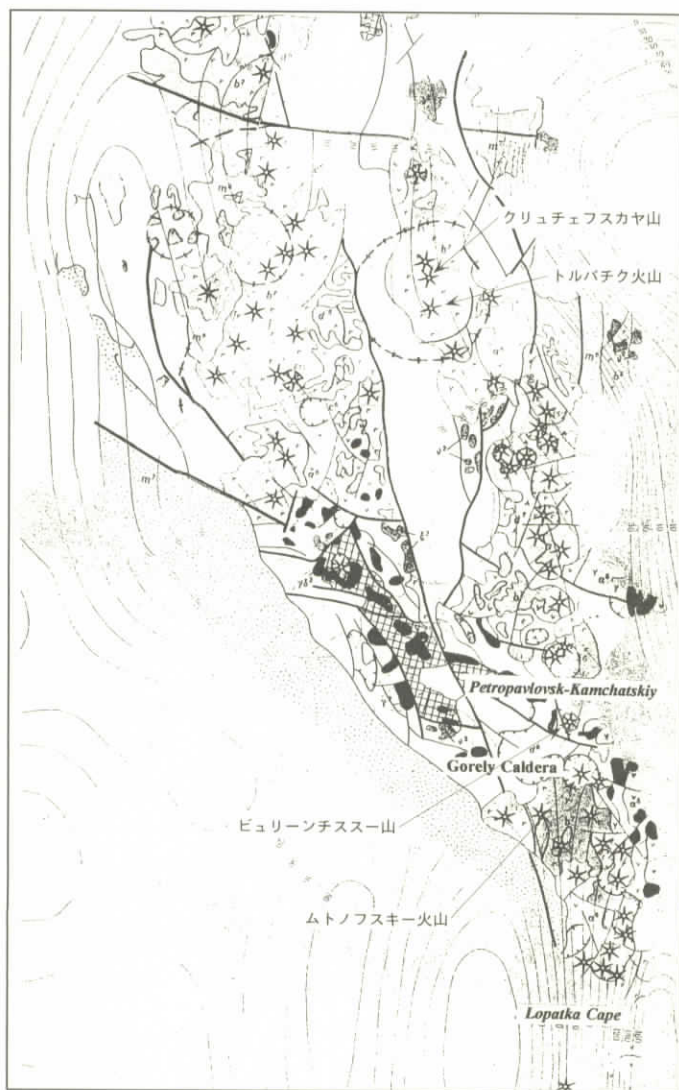
本報告においては、カムチャツカ半島の活火山の概要、溶岩洞窟・雪渓洞窟について述べると共に、ゴレーリ洞窟の溶岩試料(K-1とK-3)の偏光顕微鏡観察と蛍光X線分析を行った結果について述べる。

今回は短時間の調査であったため、未解明の事項が少なくない。今後も調査を継続する予定であるが、とりあえずこれまでの成果について所見を整理した。

2. カムチャツカ半島の活火山概観

カムチャツカ半島(Kamchatka Peninsula)は、ユーラシア大陸の東端部に位置するロシア連邦カムチャツカ州に属しており、州都はペトロパブロフスク・カムチャツキー(Petropavlovsk-Kamchatskiy)である。カムチャツカ半島は南北延長約 $1,200\text{km}$ ・東西幅 $485\text{km} \sim 95\text{km}$ ・面積 $370,000\text{km}^2$ の南北に長い紡錘形をしており、その最南端のロパトカ岬(Lopatka Cape)は千島列島占守島に面し、東側は太平洋・ベーリング海に西側はオホーツク海に接している。

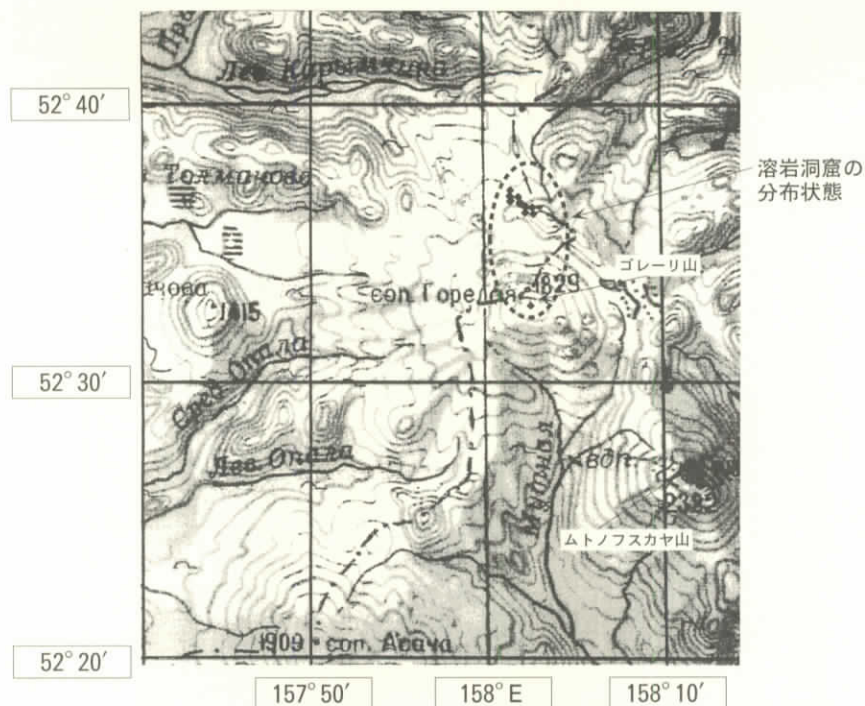
カムチャツカ半島の地質学的特徴の一つは、環太平洋のマリアナ・日本(Mariana and Japan)弧-千島・カムチャツカ(Kuril and Kamchatka)-



図—3 ロシア、カムチャツカ半島の地質図 (Shilo, etc., 1992)

Fig. 3 Geologic Map of Kamchatka Peninsula.

a5 (Andesites : Paleogene), a6 (Andesites : Miocene~Pliocene),
 d6 (Dacite : Miocene~Pliocene), b7 (Tholeiites : Pliocene) および網目模様
 (Rocks of microcontinents with old consolidated lithosphere)



図—4 ロシア、カムチャツカ半島のゴレーリ・カルデラにある溶岩洞窟の分布
 Fig. 4 Distribution Map of Lava Caves on the North Slope of Gorely Caldera, Kamchatka Peninsula.
 ※ ◆マークは、溶岩洞窟の表示である。

アリューシャン・アラスカ(Aleutian and Alaska)弧と連続する島弧-海溝系の一部に属しており、太平洋プレートが北アメリカプレートに沈み込む地帯に相当していることから、地球上で火山活動の最も激しい地域の一つとなっている(図—1)。

コマンドルスキー島(Komandorskiye Island)を西端とするアリューシャン・アラスカ弧は、カムチャツカ半島の東海岸中央部附近でほぼ直角に交差しているが、この部分は太平洋プレート上の天皇海山の北東延長部が衝突する場所となっており、これ以北のカムチャツカ半島に活火山は分布していない。カムチャツカ半島の第四紀の火山列は、カムチャツカ川の流れるカムチャツカ中央低地

（大地溝）の両側を並行して南北に走る、西側のスレジンヌイ山脈（Shredinnng Ridge-中央山脈：延長900km）と東側のボストーチヌイ山脈（Vostochny Ridge-東部山脈：延長600km）に分布しており、約300個の休火山と29個の活火山が存在する（図—2）。

スレジンヌイ山脈の活火山はイチンスキー火山（Ichinsky Volcano：標高3,631m）1個のみで、他の28個の活火山はボストーチヌイ山脈に分布する。最高峰のクリュチェフスカヤ火山（Kluchevskoy Volcano：標高4,750m）は過去300年間で50回の大爆発をし、年間平均5,500万tの玄武岩溶岩を噴出している（シュミット，2001）。

Short, N. M. & Blair, R. W. (1986)は、スレジンヌイ山脈の基盤岩類は、第三紀鮮新世に強い褶曲作用を蒙った中生代の片麻岩類・花崗岩類、白亜紀～第三紀晩新世の火山岩類・砕屑性及び珪質堆積物及び中新世の凝灰岩類から構成されていること、その後に第四紀～現世に至る火山活動が続いていることを述べている。また、カムチャツカ半島の地質構造は、第四紀の隆起運動による背斜状地壘・向斜状地溝の雁行状システムを有する地背斜の火山島弧帯であり、現世の火山活動はそれらの地溝に集中しており山脈間凹地には沖積堆積物が分布している。そして最古の火山活動はカムチャツカ半島の西半分を占め、第四紀火山の主要部分は東側山地に分布している。東側帯の構造は山脈の北東方向に一直線のリニアメントに並行であり、第2のリニアメントはアリュージャン海溝方向と同じく北西方向であること、多くの火山は複合成層火山であり頂上にカルデラを有するものもあり、輝石安山岩質テフラと溶岩流との混成で構成されていると述べている（図—3）。

横山(1992)は、カムチャツカ半島の活火山列は海溝に平行な3列が認められることを述べ、1列目にはアバチンスキー火山（Avachinsky Volcano）・クロノツキー火山（Kuronotsky Volcano）などが、2列目にはトルバチク火山（Tolbachik Volcano）・クリュチェフスカヤ火山（Kluchevskoy Volcano）などが、そして3列目はイチンスキー火山（Ichinsky Volcano）だけであるとしている。

3. カムチャツカ半島における溶岩洞窟の調査概要

Andraichuk, V.N.(1991)は、Kamchatka および Kurile Islands の現世 (Recent)の溶岩流中に tube-like and sphere-like Caves の存在すること、最大のものは Kamchatka にあり延長約500m の規模を有するものであることを報告している。横山卓雄(1992)は、トルバチク(Tolbachik)火山の1975～1976年に割れ目噴火した玄武岩溶岩中の溶岩洞に入洞している。スコリア原にある四角柱状の塔から下部に2m 降り直径30～40cm の穴から入洞、内部で人の歩けるのは約100m であること、溶岩つらら(lava stalactite)の存在・コウモリの生息していることなどを記している。

Slezin, Y.B. & Tsyurupa, A.I.(1996)は、トルバチク(Tolbachik)火山の1975～1976年噴火で生じた玄武岩質～安山岩質玄武岩溶岩よりなる Zvezda 火山円錐丘中の溶岩洞の調査報告を行っている。富士山火山洞窟研究会は1995年9月に、ニュー・トルバチク(The Nemassolbachinsky)火山の南西山麓(標高1,199m～340m 附近)の噴丘列群から1973年に流出した溶岩流中の3本の溶岩洞窟を調査している。そのうちの2本について測量図を作成し、Yuri Cave No.1、- No.2と命名した。Yuri Cave No.1は3層構造を示し総延長は576m、縄状溶岩床・溶岩球・A タイプ溶岩棚が観察されている。Yuri Cave No.2は総延長213.4m あり、洞床は平坦面で支洞にはA タイプ溶岩棚が認められている(小川ほか, 1997)。BCRA(British Cave Research Association)は、1996年に Kamchatka Lavatubes の調査を行い South Tolbachik 火山で12本の、North Gorely 火山で14本の溶岩洞窟の測量図を作成している。

大阪経済法科大学「日露共同洞窟総合学術調査」は、2004年8月ロシア・アムネイ・クラブの協力を得て、ゴレーリ火山の溶岩洞窟の調査を実施することが出来た。BCRA の報告した Go-9612洞(図-4の◆表示)の他、これに連結した洞窟系を構成すると考えられる溶岩洞 K-3も調査した。

カムチャツカ半島のゴレーリ洞窟K-1 (Go-9612) および K-3洞窟は溶岩洞窟であり、氷穴でもある。K-1洞窟は標高990m、長さ55m、幅約15m、深さ

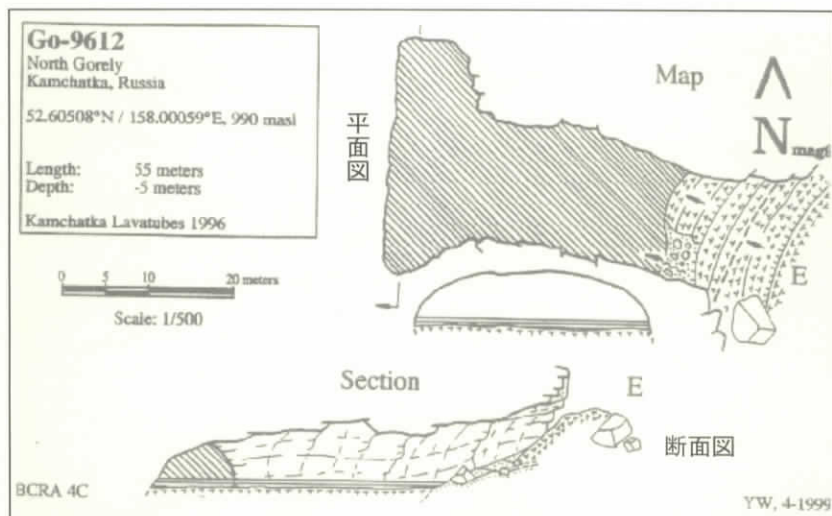


図-5 ロシア、カムチャツカ半島のゴレリ火山にある洞窟(Go-9612)の平面図・断面図

Fig. 5 Plane and Sectional View of Cave (Go-9612) in Gorely Caldera of Kamchatka Peninsula, Russia.

5 m、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。主洞の方向は北北西の方向を示し、傾きながら低下し、洞幅も大きくなっている。その下部には流動した溶岩流が沈下した跡や陥没口があり、崩落岩塊が洞底に堆積したままで、洞底・洞壁・天蓋部には水が見られる。溶岩鍾乳などの地物の発達は不良である。周囲には枝洞があり、洞窟系を構成しているものと考えられる（付録-1）。

K-3洞窟は、K-1洞窟の延長線上あり、主洞の方向は北北西の方向を示し、傾きながら低下している。K-1洞窟よりの下部には流動した溶岩流が沈下した跡や陥没口があり、崩落岩塊が洞底に堆積したままで、洞壁・天蓋部には水が見られない。溶岩鍾乳などの地物の発達は不良である（付録-2）。付録-3でムトノフスカヤ火山の水河洞窟と雪溪洞窟について報告する。

付録－１　ゴレーリ火山の溶岩洞窟（K－１）



天井や壁面、溶岩流内部が完全に見える洞窟の方向を撮影。



床面は、氷結しており、アイススケートリンク状になっている（氷穴）。



ゴレーリ火山の溶岩洞窟の洞口。溶岩流の断面方向から撮影。



ゴレーリ火山の溶岩洞窟の天井部に見られる溶岩鍾乳石。



奥の両側に分岐洞が見える、洞奥に向かって撮影。

付録－２　ゴレーリ火山の溶岩洞窟（K－３）



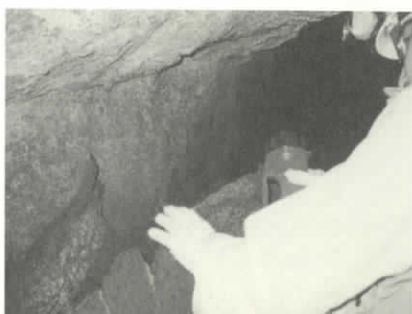
天井や壁面は、劣化が激しく、天井はドーム形から変形している。



壁面は、ひび割れが激しく、壁面が崩れ落ちた痕跡がある。



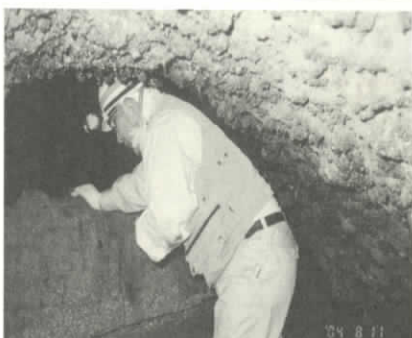
溶岩流が流れる時、洞窟天井の弱い所に生じた陥没口である。



床面は、2次溶岩流が流れた後に生じた溶岩流路が見られた。



洞窟の噴気孔である入口から、中央の床面は周囲より高く、落石が多い。落盤の上に立つ、カムチャッカの隊員。



霜状の天井（溶岩鍾乳が凍結破砕を受けて劣化したもの）と崩落岩塊の間に入って、洞窟形態を調査している隊員。

付録－3 ムトノフスカヤ火山の水河洞窟・雪溪洞窟



ムトノフスカヤ火山の中央火口丘北側の水河洞窟。滅前線に形成された水河洞窟。



洞窟内部。天井の位置や形態が「水縞」の層面に支配されている様子が伺える。



ロシア・カムチャツカのムトノフスカヤ火山。60フィートを越える厚い断面には「年縞/水縞」の発達が見事である。黒色部分にはしばしばテフラが挟まれている。



水河洞窟内部。天井から落ちるいくつもの白いロート状の筋は融水水である。雪溪水のなかに2次的に発生したムーラン *mulin* から放出されたもので小さな孔状から次第に拡大しポットホール状の垂直洞窟へと発達する。



ムトノフスカヤ火山は、標高2324m、北緯52°21'、東経158°16'である。20世紀に起った複雑な火山の噴出は10回以上の溶岩流が流れた。活発な高い地熱対流を反映して沸騰泉や間歇泉が各所に見られた。



ムトノフスカヤにある温泉付近の溪床のフィレン(万年雪)のなかにつくられた雪溪洞窟。周辺部には活発な高い地熱対流を反映して沸騰泉や間歇泉が各所に見られる。

4. ゴレーリ溶岩洞窟の溶岩

今回調査を行った溶岩洞窟を構成する岩石として採集した、K-1及びK-3について偏光顕微鏡観察および蛍光X線分析を行い、既存試料と共に検討した。

4.1 偏光顕微鏡観察

試料（K-1）は、BCRA の Go-9612洞窟より採取されたものと思われる。Slezin Yuri Borisovich 氏の提供によるものである。

岩石名：普通輝石安山岩

肉眼的特徴：多孔質な黒色の岩石で、数 mm 以下の白色の斜長石斑晶が目立つ存在である。

偏光顕微鏡観察：斑状組織をしている。斑晶は、1～数 mm の自形～半自形の斜長石、数 mm 以下の半自形～他形の普通輝石からなる。斜長石は集片双晶をなし、累帯構造の顕著なものが多く、集斑状をなすものも見られる。普通輝石は自形をなすものは少なく、不定形の普通輝石のみでの集斑状や斜長石と普通輝石とで集斑状をなすものが見られる。石基はインターサタル組織（填間状組織）をなし、0.1～0.3mm 程度の細長い斜長石や不定形の普通輝石の間を、褐色のガラス状・粒状の不透明鉱物などが充填している（写真—1,2,3）。

試料（K-3）は、Slezin Yuri Borisovich 氏の提供によるものである。

岩石名：普通輝石安山岩

肉眼的特徴：多孔質な黒色の岩石で、数 mm 以下の白色の斜長石斑晶が目立つ存在である。

偏光顕微鏡観察：斑状組織をしている。斑晶は、1～数 mm の自形～半自形の斜長石、数 mm 以下の半自形～他形の普通輝石からなる。斜長石は集片双晶をなし、累帯構造の顕著なものが多く、集斑状をなすものも見られる。普通輝石は自形をなすものは少なく、不定形の普通輝石のみでの集斑状や斜長石と普通輝石とで集斑状をなすものが見られる。石基はインターサタル組織

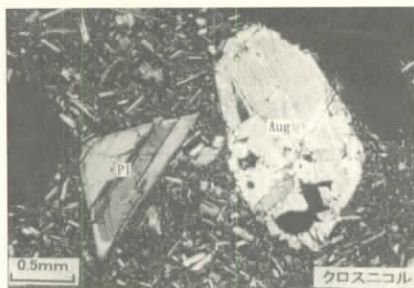
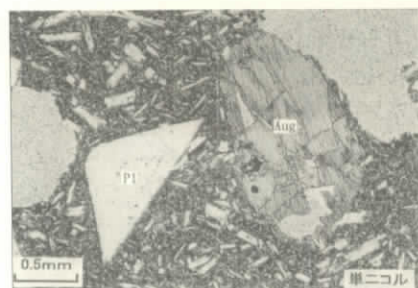


写真-1 試料 K-1の偏光顕微鏡写真(左側：単ニコル，右側：クロスニコル)。Pl=斜長石，Aug=普通輝石

Photo 1 Microphotographs (Left Side:Open Nicols, Right Side:Cross Nicols) of Sample K-1 from Gorely Caldera Cave. Abbr. Pl:Plagioclase and Aug:Augite.

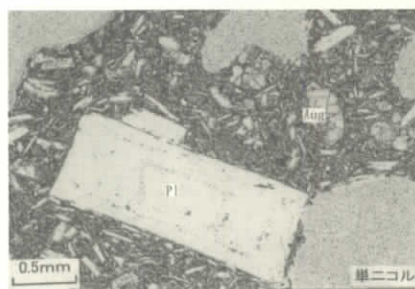


写真-2 試料 K-1の偏光顕微鏡写真(左側：単ニコル，右側：クロスニコル)。Pl=斜長石，Aug=普通輝石

Photo 2 Microphotographs (Left Side:Open Nicols, Right Side:Cross Nicols) of Sample K-1 from Gorely Caldera Cave. Abbr. Pl:Plagioclase and Aug:Augite.

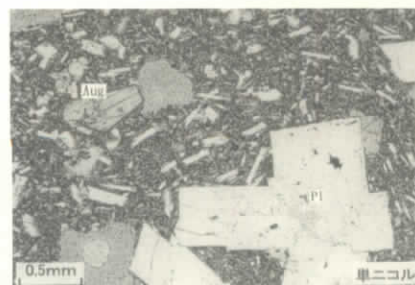


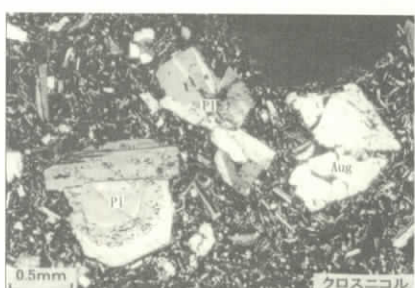
写真-3 試料 K-1の偏光顕微鏡写真(左側：単ニコル，右側：クロスニコル)。Pl=斜長石，Aug=普通輝石

Photo 3 Microphotographs (Left Side:Open Nicols, Right Side:Cross Nicols) of Sample K-1 from Gorely Caldera Cave. Abbr. Pl:Plagioclase and Aug:Augite.



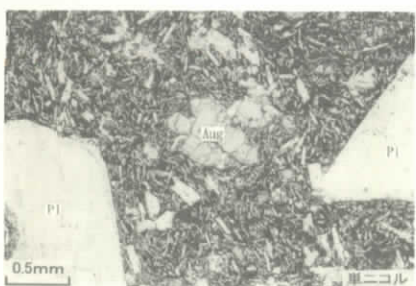
写真—4 試料 K-3の偏光顕微鏡写真(左側：単ニコル，右側：クロスニコル)，Pl=斜長石，Aug=普通輝石

Photo 4 Microphotographs (Left Side:Open Nicol s , Right Side:Closs Nicol s) of Sample K-3 from Gorely Caldera Cave. Abbr. Pl:Plagioclase and Aug:Augite.



写真—5 試料 K-3の偏光顕微鏡写真(左側：単ニコル，右側：クロスニコル)，Pl=斜長石，Aug=普通輝石

Photo 5 Microphotographs (Left Side:Open Nicol s , Right Side:Closs Nicol s) of Sample K-3 from Gorely Caldera Cave. Abbr. Pl:Plagioclase and Aug:Augite.



写真—6 試料 K-3の偏光顕微鏡写真(左側：単ニコル，右側：クロスニコル)，Pl=斜長石，Aug=普通輝石

Photo 6 Microphotographs (Left Side:Open Nicol s , Right Side:Closs Nicol s) of Sample K-3 from Gorely Caldera Cave. Abbr. Pl:Plagioclase and Aug:Augite.

（填間状組織）をなし、0.1~0.3mm 程度の細長い斜長石や不定形の普通輝石の間を、褐色のガラス状・粒状の不透明鉱物などが充填している。組織や鉱物組成は K-1 とほぼ同じであるが、石基中の不透明鉱物の割合が K-1 より多い（写真—4,5,6）。

4.2 蛍光 X 線分析

溶岩試料は新鮮な部分を純水にて超音波洗浄後、タングステンカーバイド製振動粉碎機により粉末とした。試料粉末は110℃にて乾燥後、山田ほか（1994）に従い高周波ビードサンプラーにより試料と融剤（Johnson Matehey 社製 Spectroflux 100B）の量比が1：2のガラスビードとして蛍光 X 線装置（リガク社製 RIX2100）により分析した。定量分析に使用した検量線は、地質調査所標準試料で作成したガラスビードを用いて装置内蔵プログラムにより作成した。

主化学成分の分析値を表—1 に示す。両試料とも SiO_2 約55wt%の安山岩であり、その他の成分においても大差なく、採取位置も接近していることから同一溶岩流に属すると考えられる。Gorely 火山はカムチャツカ半島における海溝側からの1列目の火山列に属している。得られた分析値を同じ火山列の玄武岩、 SiO_2 の55.82と55.85は安山岩（玄武岩）からの玄武岩質安山岩（Tatsumi et al.,1995）とともに図に示した。これら両火山は約200km 離れているが両図で同一トレンドを形成している。今回得られた Gorely 火山試料は他の2火山の試料に比べ、同程度の SiO_2 で比較したときの K_2O が著しく高く、また全アルカリ量も多い。一方で MgO 含有量は5%と比較的高い（アバチンスキー火山からの2試料では SiO_2 約55.5%に対し MgO 約3.9%）。ノルム計算ではノルム石英が約4%算出される SiO_2 に過飽和な岩石である。これらの化学的性質は、他の2火山試料が沈み込み帯一列目の火山列に特有の低 K_2O のソレアイトである（Tatsumi et al.,1995）のに対し、K-1、-3がカルクアルカリ岩であることを示している。島弧の火山において同一成層火山が活動時期を異にしてソレアイト、カルクアルカリ岩系のマグマの活動が繰り返していることは東北

表—1 カムチャツカ半島のゴレーリ火山洞窟の溶岩試料(K-1とK-3)の蛍光X線分析値
Table. 1 XRF Analysis Data of Lava Caves included of Gorely Caldera, Kamchatka Peninsula.

| 試料名 | Gorely K-1 (wt.%) | Gorely K-3 (wt.%) | 試料名 | Gorely K-1 (ppm) | Gorely K-3 (ppm) |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|-----|---------------------|---------------------|
| SiO ₂ | 55.12 | 55.09 | Ba | 521 | 527 |
| TiO ₂ | 1.25 | 1.25 | Cr | 134 | 142 |
| Al ₂ O ₃ | 16.07 | 15.85 | Cu | 80 | 84 |
| T-Fe ₂ O ₃ | 9.41 | 9.54 | Nb | 7 | 7 |
| MnO | 0.16 | 0.17 | Ni | 59 | 58 |
| MgO | 5.01 | 5.10 | Pb | 7 | 8 |
| CaO | 7.21 | 7.19 | Rb | 34 | 36 |
| Na ₂ O | 3.39 | 3.39 | Sr | 392 | 393 |
| K ₂ O | 1.92 | 1.96 | V | 316 | 314 |
| P ₂ O ₅ | 0.45 | 0.45 | Y | 33 | 35 |
| Total | 100.00 | 100.00 | Zn | 77 | 80 |
| | | | Zr | 200 | 208 |

日本の第1列目の火山である、恐山、八甲田、十和田、八幡平、岩手、秋田駒ヶ岳、荷葉岳、船形、蔵王、那須、安達太良など多くの火山で認められる（藤縄、1991）。詳細はGorely火山の層序に基づく化学的データ、岩石記載資料を未入手のため不明であるが、今回の溶岩洞窟が最近の火山活動時に形成されたものであるならば、最近の火山活動はカルクアルカリ岩系マグマの活動時期にあたっているのかもしれない。

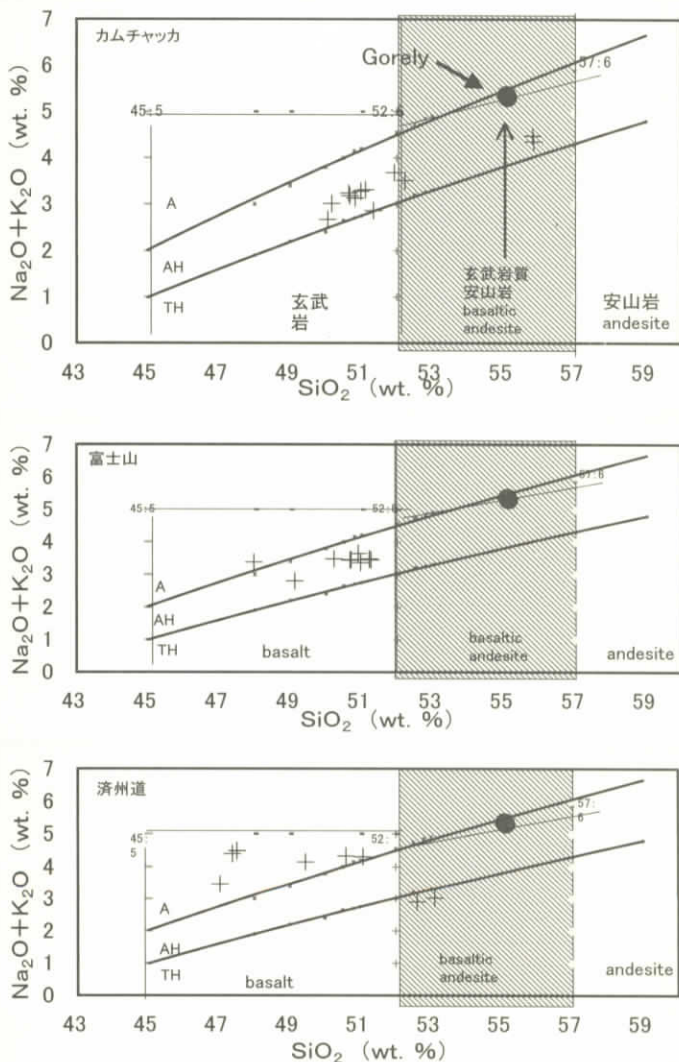
4.3 ケイ酸とアルカリ成分(Na₂O+K₂O)との関係

沢ほか（2003）は富士火山における洞窟内の火山噴出物、沢ほか（2004）は済州火山島における火山噴出物の蛍光X線分析結果を報告している。この富士火山、済州火山島およびカムチャツカ半島における火山噴出物について今回得られた試料および実験データの化学組成について検討した（表—2）。

ケイ酸とアルカリ成分との関係を究明するため、SiO₂-(Na₂O+K₂O)図を用い、それぞれの溶岩値をプロットした（図—6）。図中の2本の境界線（太線）

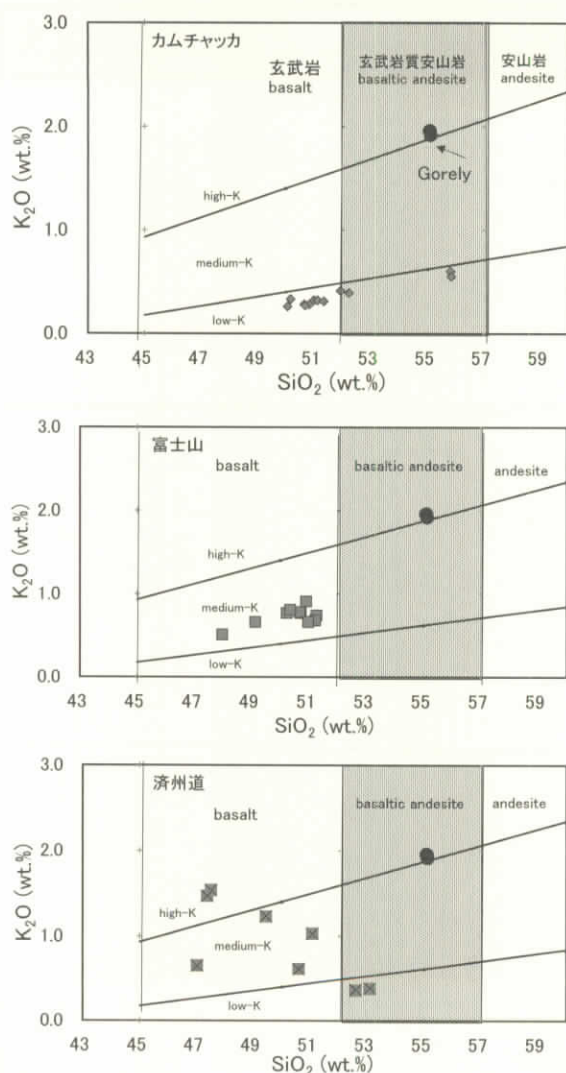
表-2 カムチャツカ半島（上表）、富士火山（中表）および済州火山島（下表）にある噴出物と溶岩洞窟の蛍光X線分析値
 Table. 2 Representative XRF Analysis Results of Effusive and Lava Caves of Kamchatka Peninsula (Upper Berth), Fujii Volcano (Middle Berth) and Jeju Volcanic Island (Lower Berth). (Tatsumi et al, 1995, 沢ほか (2003)、沢ほか (2004)および本文)

| 試料名 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | T-Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Total |
|-----------------|------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|------|------|-------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------|
| カムチャツカKL1 | 51.94 | 1.00 | 19.37 | 10.00 | 0.16 | 4.13 | 9.56 | 3.28 | 0.40 | 0.16 | 100.00 |
| カムチャツカKL2 | 50.06 | 0.78 | 17.97 | 10.63 | 0.18 | 6.77 | 10.84 | 2.42 | 0.26 | 0.10 | 100.00 |
| カムチャツカKL3 | 50.66 | 0.93 | 19.41 | 10.17 | 0.17 | 5.07 | 10.21 | 2.96 | 0.28 | 0.14 | 100.00 |
| カムチャツカKL4 | 51.00 | 0.92 | 19.58 | 10.20 | 0.17 | 4.65 | 10.05 | 2.96 | 0.33 | 0.15 | 100.00 |
| カムチャツカKL5 | 50.17 | 0.93 | 18.17 | 10.78 | 0.18 | 6.03 | 10.60 | 2.67 | 0.33 | 0.14 | 100.00 |
| カムチャツカKL6 | 52.24 | 0.95 | 18.93 | 10.33 | 0.18 | 4.29 | 9.43 | 3.12 | 0.39 | 0.14 | 100.00 |
| カムチャツカKL10 | 51.12 | 0.92 | 18.95 | 10.34 | 0.17 | 5.05 | 9.99 | 2.99 | 0.32 | 0.14 | 100.00 |
| カムチャツカKL12 | 50.84 | 0.85 | 18.88 | 10.06 | 0.17 | 5.58 | 10.37 | 2.85 | 0.28 | 0.13 | 100.00 |
| カムチャツカKL13 | 50.69 | 0.93 | 20.87 | 9.69 | 0.15 | 3.92 | 10.43 | 2.91 | 0.27 | 0.14 | 100.00 |
| カムチャツカKL14 | 51.34 | 0.87 | 19.62 | 10.85 | 0.17 | 4.53 | 9.83 | 2.55 | 0.31 | 0.12 | 100.00 |
| カムチャツカAV1 | 55.82 | 0.80 | 19.04 | 7.19 | 0.13 | 3.89 | 8.48 | 3.88 | 0.60 | 0.16 | 100.00 |
| カムチャツカAV1.2 | 55.85 | 0.80 | 19.13 | 7.16 | 0.13 | 3.87 | 8.53 | 3.81 | 0.56 | 0.16 | 100.00 |
| Gorely K-1 Cave | 55.12 | 1.25 | 16.07 | 9.41 | 0.16 | 5.01 | 7.21 | 3.39 | 1.92 | 0.45 | 100.00 |
| Gorely K-3 Cave | 55.09 | 1.25 | 15.85 | 9.54 | 0.17 | 5.10 | 7.19 | 3.39 | 1.96 | 0.45 | 100.00 |
| 試料名 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | T-Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Total |
| 柏原溶岩樹型型型 | 50.22 | 1.51 | 17.31 | 12.20 | 0.18 | 5.07 | 9.71 | 2.71 | 0.77 | 0.31 | 100.00 |
| 青木ヶ原溶岩樹型型型 | 50.71 | 1.44 | 17.20 | 11.80 | 0.18 | 5.18 | 9.74 | 2.69 | 0.77 | 0.29 | 100.00 |
| 青木ヶ原溶岩樹型型型 | 50.67 | 1.47 | 17.09 | 11.99 | 0.18 | 5.22 | 9.63 | 2.66 | 0.79 | 0.30 | 100.00 |
| 大涼山風穴第1 | 50.90 | 1.56 | 16.00 | 12.10 | 0.18 | 5.86 | 9.38 | 2.74 | 0.91 | 0.37 | 100.00 |
| 須走胎内の外側 | 51.27 | 1.33 | 17.99 | 10.99 | 0.17 | 4.73 | 9.79 | 2.71 | 0.75 | 0.27 | 100.00 |
| 須走胎内の内側 | 51.22 | 1.30 | 17.91 | 10.90 | 0.17 | 4.86 | 9.90 | 2.80 | 0.68 | 0.26 | 100.00 |
| 須走胎内の上部 | 50.98 | 1.27 | 17.49 | 11.30 | 0.17 | 5.64 | 9.54 | 2.70 | 0.67 | 0.25 | 100.00 |
| 厚原風穴第1 | 49.13 | 1.44 | 16.41 | 12.61 | 0.19 | 6.35 | 10.38 | 2.55 | 0.66 | 0.28 | 100.00 |
| 八幡穴 | 47.97 | 1.56 | 16.99 | 13.69 | 0.20 | 6.76 | 9.76 | 2.29 | 0.52 | 0.26 | 100.00 |
| こどもの国溶岩樹型 | 50.35 | 1.55 | 16.38 | 12.49 | 0.19 | 5.70 | 9.59 | 2.57 | 0.82 | 0.36 | 100.00 |
| 試料名 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | T-Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | Total |
| 済州カンケンイ洞窟 | 49.45 | 2.53 | 14.14 | 12.37 | 0.16 | 7.65 | 9.11 | 2.92 | 1.23 | 0.44 | 100.00 |
| 済州ケウセツ洞窟 | 47.03 | 3.16 | 18.40 | 13.53 | 0.14 | 5.05 | 8.66 | 2.81 | 0.67 | 0.55 | 100.00 |
| 萬丈窟石柱 | 51.07 | 2.15 | 15.19 | 12.58 | 0.16 | 6.16 | 8.08 | 3.27 | 1.04 | 0.30 | 100.00 |
| 萬丈窟溶岩橋1 F | 50.59 | 1.93 | 14.40 | 12.40 | 0.16 | 6.39 | 9.59 | 3.71 | 0.63 | 0.20 | 100.00 |
| 萬丈窟溶岩橋2 F | 53.10 | 1.79 | 14.30 | 12.40 | 0.15 | 6.23 | 8.85 | 2.64 | 0.38 | 0.16 | 100.00 |
| 萬丈窟溶岩橋3 F | 52.60 | 1.74 | 14.30 | 12.40 | 0.15 | 6.89 | 8.84 | 2.54 | 0.36 | 0.18 | 100.00 |
| 翰林溶岩樹型（型型） | 47.50 | 2.58 | 14.40 | 12.60 | 0.16 | 8.63 | 9.12 | 2.95 | 1.54 | 0.51 | 100.00 |
| 翰林溶岩樹型（傾型型） | 47.38 | 2.58 | 14.59 | 12.59 | 0.16 | 8.57 | 9.13 | 2.93 | 1.48 | 0.60 | 100.00 |



図一六 カムチャツカ半島（上図）、富士火山（中図）および済州火山島（下図）の溶岩についての SiO_2 対 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 図

Fig. 6 Plot of SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ contents of Lavas in Kamchatka Peninsula (Upper Figure), Fuji Volcano (Middle Figure) and Jeju Volcanic Island (Lower Figure).



図一七 カムチャツカ半島（上図）、富士火山（中図）および済州火山島（下図）の溶岩についての SiO_2 対 K_2O 図

Fig. 6 Plot of SiO_2 vs. K_2O contents of Lavas in Kamchatka Peninsula (Upper Figure), Fuji Volcano (Middle Figure) and Jeju Volcanic Island (Lower Figure).

は Kuno(1966)によるもので、上部境界線より上の領域がアルカリ玄武岩系列 (A)、下部境界線より下の領域がソレアイト系列 (TH)、2本の境界線に挟まれる部分が高アルミナ質玄武岩系列 (AH) に属するものである。

ゴレーリ洞窟 (K-1と K-3) 試料は、図中左側にある矢印で示した●表示である (表-1と図-6)。ゴレーリ洞窟の溶岩は高アルミナ玄武質安山岩であることが分かる。

4.4 ケイ酸と酸化カリウム(K_2O)との関係

ケイ酸と酸化カリウム成分との関係を究明するため、 SiO_2 - K_2O 図に、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) に基づいた。

ゴレーリ洞窟 (K-1と K-3) における左側にある矢印のある●表示で示した (表-1と図-7)。カムチャツカ半島のクロノツキー火山の溶岩は Low-K の低アルミナ玄武岩にアパチンスキー火山の溶岩は Low-K の玄武岩質安山岩である。ゴレーリ洞窟 (K-1と K-3) を造る溶岩は high-K の高アルミナ玄武岩質安山岩である。

5. お わ り に

ロシア、カムチャツカ半島の自然と洞窟において、ゴレーリ火山にある洞窟については、次のように要約できる。

まず、洞窟を胚胎する母岩は蛍光X線分析結果によると玄武岩質安山岩である。次に、偏光顕微鏡による観察によると普通輝石安山岩である。

一方、溶岩の化学組成分析によると

- ① ゴレーリ洞窟の試料 (K-1と K-3) における SiO_2 の含有率は、それぞれ 55.12と 55.09wt.% の玄武岩質安山岩で、富士火山 (玄武岩) や済州火山島 (玄武岩と安山岩) の溶岩より高い含有率を示している。
- ② ゴレーリ洞窟の試料 (K-1と K-3) における Na_2O と K_2O 含有率は、富士

火山や済州火山島の溶岩より大きい。

③ グレーリ洞窟の試料（K-1と K-3）における TiO_2 と $\text{T-Fe}_2\text{O}_3$ 含有率は、富士火山や済州火山島の溶岩より小さい。

④ グレーリ洞窟の溶岩は、 SiO_2 と $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ の関係からカルクアルカリ岩であることが確定された。

謝 辞

この研究は2004年9月に本学研究補助金によって行われた調査の成果の一部である。本文作成にあたっては、特定非営利活動法人カムチャツカ研究会橋井宣二専務理事、カムチャツカ国立教育大学の広瀬健夫教授、環境保護団体“アムネイ・クラブ”の Shevtsov Vladimir（シェブツォブ・ブラジミル）会長とリラ様、カムチャツカ インツール社の通訳 Chuguev Alexey（チュグーエフ・アレクセイ）様、（財）益富地学会館藤原卓氏および籠正二先生と桑原武志先生に多くのご協力を頂いた。さらにデータ処理には藤田浩史、上原章弘と肥塚義明君の助力を得た。記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) R.W.LeMaitre(1938 and 1978). A Classification of Igneous Rocks and Glossary of terms. Blackwell Scientific Publications.
- 2) H.Kuno(1966 and 1996). Lateral Variation of Basalt Magma Type Across Continental Margins and Island Area. *Volcanol.*, (2), 29, 195-222
- 3) A.Miyashiro(1978). Nature of Alkali Volcanic Rock Series. *Contrib. Mineral.Petrol*, 66, 94-104.
- 4) Kennett, J.P.(1982) *Marine Geology*. 813p. Prentice-Hall Inc.
- 5) Short, N.M. & Blair, R.W.(1986) *Geomorphology from Space. A Global Overview of Regional Landforms*. NASA. <http://daac.gsfc.nasa.gov/www/geomorphology/>
- 6) Andraichuk, V. N.(1991) *The State of Speleological Investigation of*

ロシア、カムチャツカ半島の自然と洞窟 (沢、古山、大橋、藤本、鹿島、桑原)

Volcanic Voids in the U.S.S.R. 6th International Symposium on Vulcanospeleology Proceedings, 176. National Speleological Society.

- 7) 藤縄明彦 (1991) 東北日本, 安達太良火山におけるソレアイト, カルクアルカリマグマ系列: その進化メカニズムと成因関係. 火山, 36, 255-254.
- 8) Shilo, N., Murakami, N. and Bakulin, Y. (Editores in Chief) (1992) Volcanic Belts and Volcano-Tectonic Structures of the East Asia. Scale 1:3,000,000. Pacific Science Association, Solid of the Earth Committee.
- 9) 横山卓雄 (1992) 『カムチャツカ学術紀行-激動のソ連を行く-』. 282p. (NPO)京都自然史研究所.
- 10) 山田康治郎・河野久雪征・村田 守 (1994) 低希釈率ガラスビード法による岩石の主成分と微量成分分析. X線分析の進歩, 26, 33-44.
- 11) Tatsumi, Y., Kogiso, T. and Nohda, S. (1995) Formation of a third volcanic chain in Kamchatka: generation of unusual subduction-related magmas. Contrib. Mineral. Petrol., 120, 117-128.
- 12) BCRA (British Cave Research Association) (1996) Kamchatka Lavatubes. BCRA 4C.
- 13) Slezin, Y. B. & Tsyurupa, A. I. (1996) Lava Caves in Kamchatka. 7th International Symposium on Vulcanospeleology Proceedings, 113-120.
- 14) 小川孝徳・立原 弘・川村一之・広瀬敏通・平野賢一・鈴木 明・石橋修平・荒川久美子・根元一徹 (1997) カムチャツカの溶岩洞窟. 学部報・会報合併号, 学部報, 2, 20-28.
- 15) メイヤーホフ, A.A.ほか著: 西村敬一・小玉喜三郎・矢野孝雄・小室裕明訳 (1998) サージテクトニクス-地球ダイナミクスの新仮説-. 174p. 共立出版株式会社.
- 16) ジュミット・ジェレミー (2001) カムチャツカ半島 氷河に覆われた活火山. 『ナショナルジオグラフィック(日本版)』, 2001-8, 40-59.
- 17) Nechayev, A. (2003) Kamchatka, hot land at the cold sea. 157p. Novaya Kniga, Petropavlovsk-Kamchatsky.

ロシア、カムチャツカ半島の自然と洞窟（沢、古山、大橋、藤本、鹿島、桑原）

- 18) 沢勲・立原弘・井上央・金炳宇（2003）富士火山、柏原溶岩樹型の蛍光 X 線分析と X 線回折法. 大阪経済法科大学論集, 85, 1-35.
- 19) 沢勲・大橋健・井上央・金炳宇・金周煥・皇甫相源・裴斗安・洪忠烈・金源振・呉映宙（2004）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.
- 20) 大橋健（2005）ロシア、カムチャツカ半島南部、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. 大阪経済法科大学論集, 89, 37-57.
- 21) 鹿島愛彦（2004）「カムチャツカ紀行」. 愛媛地学調査研究会, 8-2, 44-50.