

カムチャツカの火口湖に硫黄の動きを探る —Maly Semiachik火山の調査—

高野 穆一郎¹⁾

プロローグ

古い火山も若い火山もその景観は人々を引きつける大きな力を持っている。多くの火山に囲まれて、いわば火山慣れしている我々でも、観光と言えば火山のあるところを選ぶことが多い。火山は自然の中に思いがけない地形の変化を与え、それに四季の変化が加わって、一層味わい深いものになるようである。そうした経験に富んだ日本人が見てもカムチャツカの火山の造る景観は見事というほかない。カムチャツカの中心都市であるPetropavrovsk-Kamchatky (現地で聞くとペテロポールスク)から30kmほどのところに富士山級のカリヤツキー(3,456m)、アバチンスキー(2,187m)、コゼルスキー(2,190m)の三体の火山(写真1)が見えるのもカムチャツカならではの見物である。とりわけ火山の山頂に青白色の水を湛える火口湖(写真2)は人目を引きつける。

1991年位からこの半島は要塞地帯という軀から

脱して世界に公開されるようになってきた。その前後からソ連の政治情勢の変化を見ていた私は国後島にあるGolovninカルデラの中の火口湖(日本名:一菱内湖)の調査をできないかと考えていたので、ソ連側との接触方法を模索していた。折しもそのころ国際誌(Takano, 1987)に発表した草津白根湯釜火口湖に関する論文の別刷り請求がカムチャツカの火山研究所の研究者から届いたのを奇貨として、国後島の調査を持ちかけた。先方の返事は国後は距離と費用の点で難があるのでカムチャツカ中部に位置するMaly Semiachik火山の火口湖(第1図)はどうかと言うもので、モノクロの写真が添えてあった。予備調査のため、1992年の1月17日に新潟から単身ハバロフスクへ飛び立った。

鼻の中まで凍る寒さの中、ヘリコプターでMaly Semiachik火山へ向かった。晴天のなか神々しいまでに白く輝くカリヤツキーとアバチンスキー火山の鞍部を飛越し、続く雪の平原にトナカイの大群が疾駆



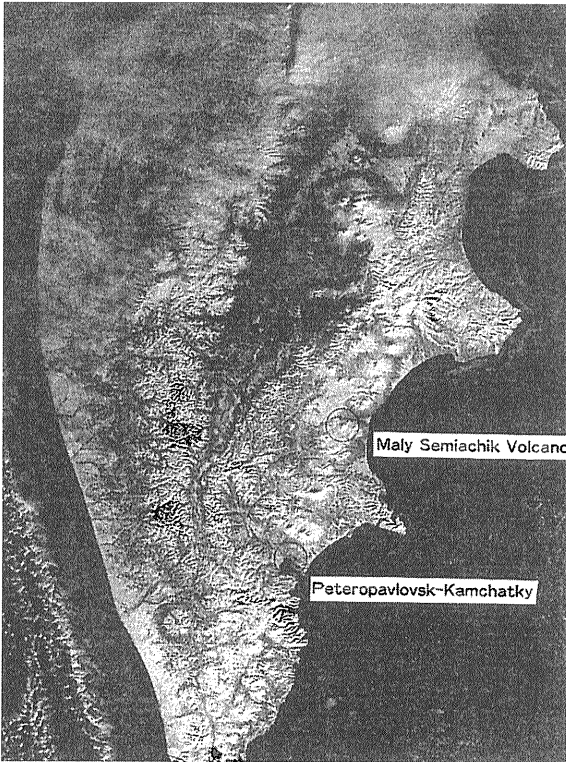
写真1 ペテロパブロフスク・カムチャツキー市内の丘から見た三山(左からKaryatsky, Avachinsky, Kozelsky火山)。



写真2 Maly Semiachik火山, Troitzky火口。pH1, 10℃の湖水を湛える直径550m, 水深100m (最深部 117m)の火口湖。

1) 東京大学大学院総合文化研究科
〒153 目黒区駒場3-8-1

キーワード:カムチャツカ, 火口湖, 硫黄化合物, 硫黄バクテリア, Maly Semiachik火山, 溶融硫黄湖



第1図 Maly Semiachik火山の位置を示すカムチャツカ半島の衛星写真

するのを見て1時間ほどで火口湖の上空に達した。湖は氷結しており、湖底噴気上とおぼしき地点には黄色と黒の硫黄の斑点が見られた。火山研究所のKarpov博士によると湖面の氷結は観測以来初めてのことのようにであった。急峻な火口壁がことさら厳しい表情を見せているため、2回の巡回で降りるならあそこといえる1箇所によりやく気づくほどであった。この予備調査でこの地域が全く車の通る道路がなく人家もないことから、現地における長期のキャンプ以外に観測は不可能であることが理解でき、今後の調査のための準備がかなり大掛かりになることが予想された。

火口湖に何を求めるのか

ここでそもそも何のために火口湖を調べるのかについて述べておく必要があろう。活動的な火口湖は火山ガスを放出しつつある火口に水の蓋をしたものである。ガスは水にとけて一部は相互に反応する。

		NUMBER OF SULFUR ATOMS						
		1	2	3	4	5	6	7
FORMAL CHARGE ON SULFUR ATOM	-2	S^{2-}						
	-1		S_2^{2-}	S_3^{2-}	S_4^{2-}	S_5^{2-}	S_6^{2-}	S_7^{2-}
	0							
	+1			$S_3O_3^{2-}$	$S_4O_3^{2-}$	$S_5O_3^{2-}$	$S_6O_3^{2-}$	$S_7O_3^{2-}$
	+2		$S_2O_3^{2-}$			$S_5O_6^{2-}$	$S_6O_6^{2-}$	$S_7O_6^{2-}$
	+3		$S_2O_4^{2-}$		$S_4O_6^{2-}$			
	+4	SO_3^{2-}	$S_2O_5^{2-}$					
	+5		$S_2O_8^{2-}$					
	+6	SO_4^{2-}	$S_2O_7^{2-}$					
	+7		$S_2O_8^{2-}$					
+8	SO_5^{2-}							

第2図 さまざまな硫黄化合物。硫黄は炭素と同じように相互に結合して高分子化するうえに、さらに広い酸化数を取る元素である。これらは不安定なものも多く、分析化学的にも未知の部分が多い(原図はD. Rimstidtによる)。

二酸化硫黄、硫化水素は水中で反応して元素硫黄を生じる。コロイド状のこの硫黄は強電解質である湖水のなかでは次第に凝集して湖底に沈積する。火口湖水の人目を引く青白色は懸濁している微細な硫黄による。ところでこの硫黄を含む二つのガスは水中で互いに反応すると元素硫黄のほかに様々な硫黄化合物を作る。これらの大部分はふつう不安定であるため、地球環境におけるそれらの分布と、硫黄の地球化学サイクルにおける位置と役割についてはほとんど知られていないのである。第2図にさまざまな硫黄化合物を酸化数とそれぞれの化合物に含まれる硫黄原子数から見た関係を示した。この図から分かるように硫黄という原子は炭素原子と同じように自分自身が繋がり合って鎖状の高分子を作る性質がある。多硫化物イオン(S_x^{2-})、ポリチオン酸($S_xO_6^{2-}$)はその例である。これら一群の分子は個々の分析定量が難しいうえに、普通それらはほかの硫

黄化合物に混じっているため、分離する必要がある。しかしそれらが不安定であれば、正確な分析はさらに困難となる。このことが中間酸化状態にある硫黄化合物の地球化学の知識の蓄積を妨げてきたのである。

火山熱水環境における中間酸化状態の硫黄化合物を研究する契機となったのは米国留学時に手掛けた、黄鉄鉱の酸化の際にできるさまざまな硫黄化合物の分析化学であり、当時普及し始めたHPLC(高速液体クロマトグラフィ)およびIC(イオンクロマトグラフィ)による迅速分析法である。研究を促進するためにはどちらかの装置が必要であったが、すべてグラントで動く米国のプロジェクトにはもはやこれを購入する資金がなかった。坐して時間切れを待つわけにも行かなかったので高圧ポンプや分光器を寄せ集めてHPLCを組み立てた。これと当時最新の矩形波パルスポーラログラフを使って何とか微量の中間酸化状態の硫黄化合物の分析スキームを作ることができた。このときの孤立無援の苦闘経験は帰国後の研究に大いに役立った。つまり貧乏な研究者は如何にして生き延びるかを学んだのである。またこれまで温泉沈殿物を中心に研究してきた関係で、帰国後の仕事の対象として火山熱水系のなかの硫黄化合物に関心が向いたのは自分としては極く自然の成り行きであった。以前から硫化水素泉から硫黄が沈殿する過程の説明に納得がいかない自分を感じていたので、酸性泉を中心とした火山性水溶液のなかの硫黄化合物のキャラクタリゼーションを研究テーマとすることにした。そうした研究上の関心が自然に私を火口湖の研究に導いたのであろう。

ペトロパブロフスクから火口湖へ

カムチャツカでの長期のフィールドワークでは特定の場所以外、キャンピングは避けられない。ペトロパブロフスクからヘリコプターで約一時間北東に飛行しキャンプ地に着陸する。1992年には火山の西南麓にキャンプしたが、観測のたびに1,000 mほど登り降りを繰り返さなければならないと、天候によっては何日もキャンプ地に足止めされるため、観測の能率が極めて悪くなってしまふ。このため1993年にはロシア側の努力によって、Maly Semiachik火山の山頂に鉄製の観測小屋(4×3×2.3m:写真3)



写真3 火口湖を見下ろす旧火口内に設置された鉄製観測小屋。ヘリコプターで持ち運ぶ。内部にストーブを備えている。最大5人が寝泊まりできる。風雨に強いが、気温が下がると辛い。



写真4 小屋から湖面へのルートの難所。50mほどの垂直の壁に付けた固定ロープが見える。

が設置された。因みにロシアの火山研究所は重要火山にはKarymsky, Uzon, Geyser Valleyなどのように、10人以上の観測員の滞在が可能である木造二階建の観測所を設ける場合と、短期小人数の滞在のために鉄製小屋を設ける場合とが見られる。この小屋はヘリコプターで簡単に移動できるサイズである。これにより1993年の観測は極めて順調に進んだ。山頂は火口湖北側の浅い旧火口の底にあたり草木は一本もないが、火口壁に残る雪田からの水を利用することができる。暖房用の燃料は石炭、炊事用にはケロシンストーブが使用された。

この基地から湖面までは高低差が150mほどあり、そのうち50mは垂直の岩壁となっている。ここには固定ロープを付け、資材と人員の登降を補助した(写真4)。一日の観測が終わった後、このほとんど

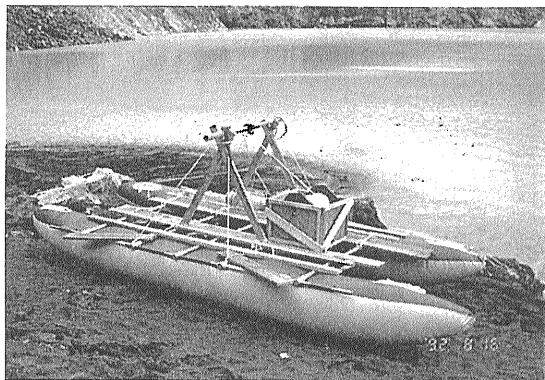


写真5 湖畔で組み立てた双胴ボート(カタマラン)。中央に採水器揚降のためのマストを備えている。最大5人はこのうえで仕事ができる。

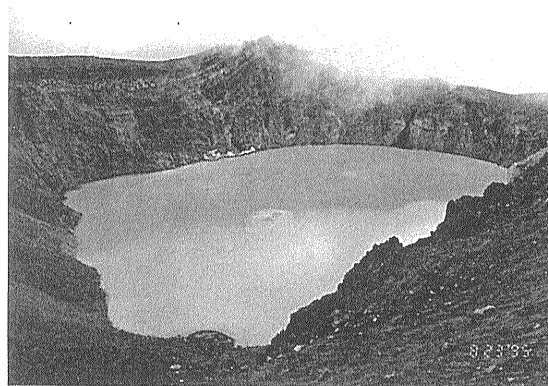


写真6 火口湖表面に浮遊する硫黄。硫化水素、二酸化硫黄を溶解しているのでゴムに対する反応性が高い。相互に付着し、マットを作る。

垂直の火口壁を登るのは年齢にかかわらず苦しい労働であった。火口湖の測深や深度別採水および各種パラメータの測定にはロシア製のカタマラン(双胴型ゴムボート:写真5)を使用した。このボートは150×250cmのプラットホームを持っているので、湖面上で採水作業をしたり、各種の測定をするのに安定した場所を提供してくれた。4～5人が同時に乗船可能である。このボートはゴム製の空気の入ったチューブの外側を樹脂繊維で織った布にプラスチック加工を施したキャンパスで作った袋でカバーしたものである。活発な火口湖では反応性の強い硫黄が湖面を浮遊している(写真6)。これがゴムボートに付着するとゴムに溶け込み、やがて穴を開けることになるので、プラスチック加工のボートは火口湖の観測には最適である。のちに我々もこのボートを購入した。Maly Semiachik火山のTroitsky火口湖はほぼ円形の直径550m、最大深度117m、水温10℃である。カムチャツカにはいくつかの火口湖があるが、湖底から活発に火山ガスを放出している火口湖はこの湖だけである。極く最近1996年1月2日に噴火した16kmほど南のKarymsky火山の5km東南に位置するKarymsky Lakeは直径約4kmの淡水湖であるが、このとき同時に湖底から噴火した。鮭、鱒類の生息するこの湖のほとりにヘリコプターから降り立ち、湖畔の温泉の調査を行ったのは昨年1995年の9月であった。湖畔から見るKarymsky火山は小型の若い富士山といった趣のある秀麗な姿を湖面に映じていたのが思い出される(写真7)。この湖の今後の形態および水文学的变化はSergei Fazlullin

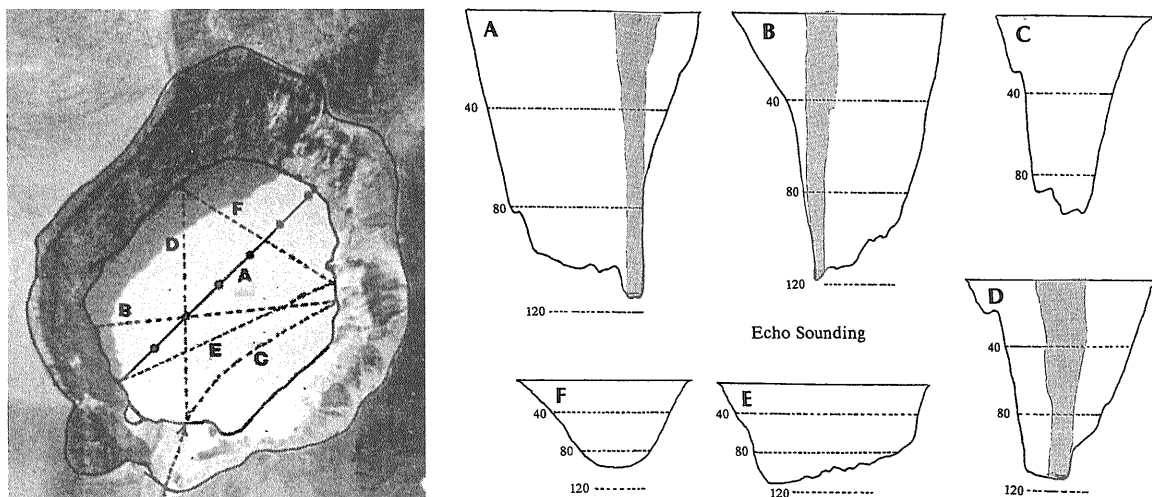


写真7 Karymsky火山とKarymsky Lake。このときから4カ月後の1月2日にこの火山と湖が突然同時に噴火した。16 km 北西に位置するMaly Semiachik火口湖に何らかの変化が現われていることが予想される。

博士を中心としたカムチャツカ火山研究所の科学者によって近々報告されるであろう。このような特殊な火口湖を除けば千島列島に2～3の同種の火口湖がある事が知られているが、それらについては戦前の断片的な報告があるのみである。この地域は低気圧の墓場であるため天候が安定せず、また船に頼るしか交通手段がないのが調査を難しいものになっている。

観測のひとこま

いずれの湖にせよ調査のために広大な湖面上の特定地点にボートを固定するのは難しい。ニュージー



第3図 Maly Semiachik火口湖の音響測深図。最深部から盛んに発泡していることが分かる。この部分に溶けた硫黄の溜まり(166℃)がある。

ランドのRuapehu火山では火口壁上から湖面のボートを監視することによって位置の修正を行っていたが、多数の人員と機材および良好な視界が必要であるため、ここでは採用することができなかった。代わりに長いロープと漁網用のプラスチック製のブイを使って、火口湖の発泡点と湖心を結ぶ固定索を設置した。文字にすると簡単なこの作業は実際にはかなりの重労働である。水にぬれた550m以上の長い重いロープを絶えず落石の危険がある火口壁の湖岸にまっすぐに張り渡すのは、垂直の岩壁に固定ロープを張るのと同様登山技術と体力が必要である。このような作業はロシア人によって行われたが、彼らのフィールドにおけるたくましさ強く印象付けられる場面であった。この固定索に湖心で直交する索をもう一本固定したかったが、固定予定点の火口壁では頻繁に落石が観察されたため断念した。1992年の観測で湖心にボートを浮かべていたとき、突然何の前触れもなく大砲を発射したときのような轟音がしたかと思うと大小の岩が崩れ落ち、数十メートルの水柱をつぎつぎに上げるのが見られ、私とSergeiはつぎに来るはずの大波を乗り越えるため、急いでボートの舳先を落下点に向けて辛うじて転覆を免れたことを思い出したためである。我々には各深度における採水を一度に行う採水器の用意がなかったため、1地点で複数回採水器を降ろさねばならなかった。深度が100mを越える場合、ウインチを使ってもその労力は相当なものであった。こうした採

水作業のほか超音波測深を行った。ロシア側の装置を使用した。装置そのものは日本の古野電気製であった。これは漁船の魚群探知器として用いられており、最新式のものではCRT画像が得られるが、湖盆形態の調査には旧型の紙に記録するタイプの方が都合がよい。湖面に張り渡したロープに沿った測深プロフィール(第3図)には、湖底の噴気孔から立ち昇るガスの広がりをはっきりと示されている。最深部は117mを示した。

湖底の溶けた硫黄の溜まり

最深部では湖面に黒や黄色の球状硫黄が浮き上がってくる(写真8)ので、この直下の湖底に熔融硫黄の溜まりがある事は確実である。この液状硫黄の温度は噴気ガスの湖底における温度を示唆するので、草津白根湯釜で測定を繰り返した経験がある(写真9)。内径10mmのステンレススチールのチューブのなかに溜点温度計を納め、鉛の重りを付けてロープで硫黄の溜まりの中に降ろすのであるが、水深が増すとこの液体硫黄の池に温度計を入れることがむずかしくなる。温度計が着底するときの感触で大体捕えることができるのであるが、50mを越えるとロープの伸びがあるので感触がぼやけてくる。Maly Semiachikでは117mもの深度があるのでとりわけむずかしい思いがした。平衡温度を得るため10分間待ったのち引き上げるが、温度計が水面に現

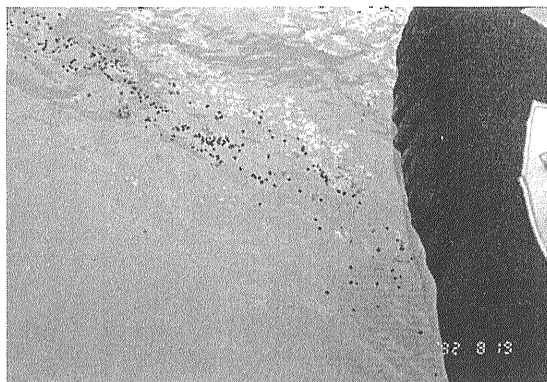


写真8 水深117mの湖底の溶けた硫黄の溜まりから湖底噴気ガスによって水面に運ばれてくる球状硫黄。黒色と黄色のものが見られる。黒色の硫黄はより高温部からもたらされたと考えられる。

われたとき溶融硫黄がチューブなどに付着していなければ失敗である。さらに内部の温度計を取り出してみないことには本当に成功したかどうか分からない。冷たい湖面で成功するまでこの作業を繰り返すのも根気のいる仕事であった。1993年に得られた最高温度は166℃であった。Takano et al. (1994) はこのような湖底の溶融硫黄の様々な性質について論じた。最近ニュージーランドのRuapehu火山のCrater Lakeでサーミスタ温度計を用いて深度が6mもある溶融硫黄の温度プロファイルが測定された(Christenson, 1996)。この結果は最高温度177℃であり、液体内部は対流していることを示している。溶融硫黄溜まりの物理化学的状況は湖水温、ガス放出量などに大きな影響を与えるので、湖水の化学的変化をモニターして火山活動を監視するうえで重要な観測パラメーターである。さらにこの溶融硫黄は黄鉄鉱を始めとし、energite, bismuthinite など浅熱水金鉱床を示唆する鉱物を胚胎している(Delmelle and Bernard, 1995)ことから分かるように湖底硫黄溜まり下部の熱水系を知るうえでの情報源となりうるのである。

先にも述べたようにMaly Semiachik火口湖は周囲を絶壁で囲まれ、湖畔へのルートは北側の融雪水が落ち込む流れに沿った一箇所のみであるが、このルートの東側はかなりの頻度で落石がおこる岩壁である。落石の堆積物は湖畔までせりだしている。この堆積物のなかに石膏の美しい結晶が見つかる。絶



写真9 湖底の溶けた硫黄の溜まりの温度を測定する手製の道具。先端部は真鍮製の重りで、上部にステンレス管に入れた溜点温度計を挿入する穴が開けてある。腐食によるロープの切断を避けるため、鎖で保持する。写真は草津白根湯釜における使用直後を示す。鎖上部の黒色ブロックは硫黄溜まりの上部クラストが付着したものの。



写真10 火口壁の熱水活動部。美しい石膏の結晶を含む。

壁のこの部分はかつて熱水の通路であり、変質が進んでいるので崩れ易いのであろう(写真10)。同様の石膏の美晶はインドネシアのKawah Ijenに見られる。湖岸の岩の割れ目を埋める幅10cm位の石膏脈は往時の熱水活動を物語っている。さらに湖水からも矢車のような大型の石膏の結晶が成長していた。どうやら活動的の火口湖の水の化学組成は時と共に同じ変化の経路をたどるものらしい。すなわち噴火

直後のEl Chichon火口湖のようにCl>SO₄, Ca>AlからSO₄>Cl, Al>Caへの変化である。CaとSO₄の濃度は温度と石膏の溶解度により規制されるまで増加するのである。他方Alはalum, aluniteなどの硫酸塩の溶解度が高いため、1946年のKawah Ijenのように4550mg/lものAlを溶解するようになる。Maly Semiachikも1970年代にはこの方向をたどっていたが、その後湖底噴気活動が弱まり現在に至っている。

火口湖は無生物界か

緑ひとつ見えない荒涼とした火口内に極めて無期的な青白い強い酸性を示す湖水を見た人は、そこに生き物がいるとは信じられないに違いない。私もその一人であった。世の中に好酸性菌が存在することは知っていたので、当時草津白根火山湯釜火口湖の研究を始めたとき、東邦大学の高柳・杉森両氏にそのような細菌がいるかどうか確認を依頼した。そのときはじめて硫黄酸化細菌 *Thiobacillus thiooxidans* がこの湖に生息していることを知ったのである。この細菌は湖水系の硫黄の動きと同位体組成に少なからぬ影響を与えることがその後の研究で明らかになった(Takano et al, 1996)。室内実験ではpH=1を境にバクテリアの活動はほとんど認められなくなる。Maly Semiachik火口湖水のpHは1992～93年の時点では0.8～1.1の範囲であったから、硫黄バクテリアが活動しているかどうか、その活動はどの程度かという点に興味があった。また水温が5度まで下がるとこのバクテリアは増殖しない事が分かっている。1992年の時点では硫黄バクテリアは湖底噴気孔の近辺の水のみから少数検出されたに過ぎなかったが、1993年の調査ではほぼ全域の湖水からこのバクテリア(写真11, 第4図)が検出された。このような劇的な変化をもたらした原因のひとつにpHの上昇が考えられる。New ZealandのRuapehuでは水温は例外を除いて>10℃であるが、pHが0.6～0.8であるため今のところ硫黄バクテリアは検出されていない。これらの事実はBrock and Darland (1970)によるバクテリアの生息環境調査の結果と調和的であるが、近年今までの常識では考えられない高塩濃度、高温、低pH環境に生息するバクテリアが報告されるようになってきているので、火口湖環境でpH 1が生息のための一つの限界条件である

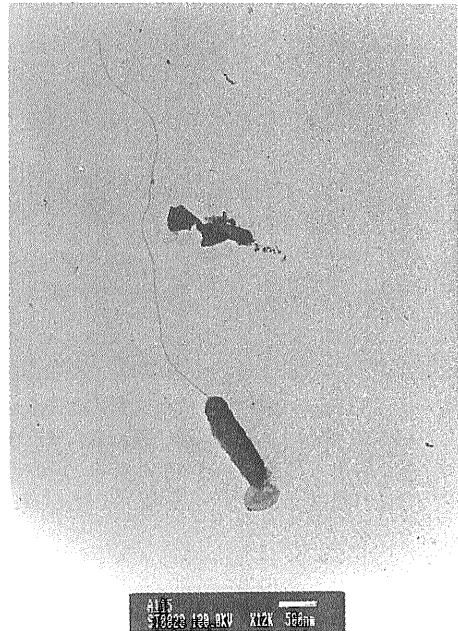
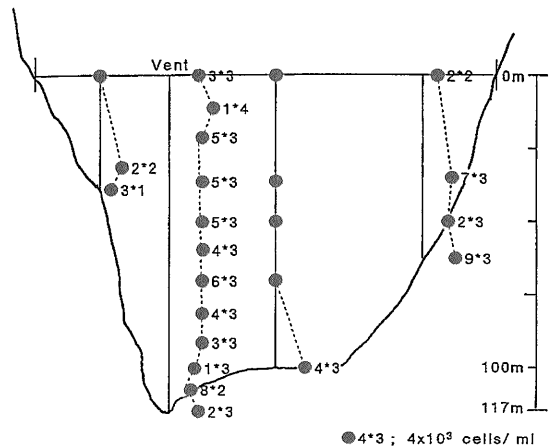


写真11 湖水に生息する硫黄酸化細菌, *Thiobacillus thiooxidans*。おもに硫化水素を硫酸に変えることで代謝エネルギーを得ている。



第4図 1992年のMaly Semiachik火口湖における硫黄酸化細菌 *Thiobacillus thiooxidans* の分布。草津白根湯釜より2桁ほど少ない。恐らく水温の差によるのであろう。

と言いきるのは危険であろう。

必死の撤収

カムチャツカの夏は短い。1993年の調査は8月末に終える予定であったから、ほぼ所期の調査を終え

たこともあって、撤収の用意を整えてヘリコプターを待った。しかし折悪しく天候が崩れ始め、ヘリは飛んでこない。食料は小麦粉、砂糖、若干の油、ニンニクのカケラと飲用のアルコールのみとなった。燃料も乏しくなっているのに、気温はどんどん下がり、昼間でも5℃以下となる。テント内も湿気と冷気で居住性は最悪になってきている。おまけに唯一の外部連絡手段である軍用無線機が故障してしまった。内心悪い事態が来るのを予期したが、口や顔には出せない。冷たい霧と風に雪が加わる。この時点でロシア人三人、日本人四人が山頂にいたが、皆この状況に良く耐えている様子が分かった。持参したトランプでのゲームが時間を忘れさせてくれたのは有り難かった。幸いにSergeiの努力で無線が生き返った時には正直ほっとした。天候がやや回復しても視界が効かないとヘリは飛ばない。ひたすら待つのみである。山頂における食事賄いの実質的責任者である杉森氏から食料の絶望的状态を告げられる。霧のなかに明るみを感じられるころヘリの爆音が聞こえ皆一斉に小屋を飛び出す。山頂を旋回しているのが分かるが姿は見えない。やがて爆音は遠ざかっていった。皆の落胆が身にしみた。心身の疲労はほぼ限界に達しているのだ。気を取り直して小屋でトランプをしていると、窓の外を黒い影が横切ったかと思うとドアを開けて人が現われた。続いて続々と人が現われる。ヘリが着陸できる最高点に降り、救援の人々が雪と霧のなかを歩いて来たのである。それから戦場のような騒ぎとなった。必要最低限のもの、特に日本側の資材、サンプルを優先してこれらを人力でヘリの待機地点まで運び降ろすのである。このためロシア側の試料は雪に埋もれることになった。皆自分にできる最善のことをしている。最年長のGeorgeと私で重い水試料の詰まった大型のプラスチック箱を手を持ち、背中には背負える限りの個人装備を背負った。風と霧の急な雪渓を転がるようにして下る。先行した人々が雲の下に達し、信号弾を打ち上げ発煙筒を炊く。息切れでGeorgeも私も頻繁に休まざるを得ない。やがてはるか下の方からヘリの爆音が聞こえてきたが姿は見えない。先行したSergeiが救援に斜面を登ってきた。Are you OK? Sure, I'm enjoying it! 互いに笑顔を交わす。両責任者の安堵の笑顔だった。はるか下方からヘリが斜面を這い上がってきた。我々を吹き飛ばすようにして猫の額

より狭いガリーの間の平地に着陸した。頼もしいパイロットの腕前だ。一斉に荷物を注ぎ込む。安定を保つためローターは回転したままだ。飛び立ったヘリのなかの顔は皆明るかった。雲のなかのMaly Semiachikが視界から遠去かる。応援に来たのは直線で16km離れたKarymsky火山観測所にいた研究者たちであった。

エピローグ

こうしたロシア側の手配りと協力のおかげで一人の故障者や病人も出さずに調査を終えることができた。今考えてもロシアの人々の野外調査における忍耐強さと適応力には驚く。手付かずの自然のなかに若々しく秀麗な火山群がずらりと並ぶKamchatkaは今後も日本のみならず世界の火山研究者を引きつけるであろう。ロシアの火山研究の環境は現在かなり困難な状況にあるように見える。若い研究者の研究離れもあるように聞いている。そのような状況のなかで我々の接したロシア人研究者は火山を科学する灯を吹き消さないように懸命に努力している様が良くわかった。同じRing of Fireの上に生きている両国の地球科学者はそのことだけをとっても接点のない研究者ではありえないのだ。今後ますます両国の人的科学的交流が盛んになることが望まれる。

参考文献

- Brock, T.D. and Darland, G.K. (1970): Limits of microbial existence: temperature and pH. *Science*, 169, 1316-1318.
- Delmelle, P. and Bernard, A. (1995): Geochemistry, mineralogy, and chemical modeling of the acid crater lake of Kawah Ijen Volcano, Indonesia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 2445-2460.
- Takano, B. (1987): Correlation of volcanic activity with sulfur oxyanion speciation in a crater lake. *Science*, 235, 1633-1635.
- Takano, B., Saitoh, H. and Takano, E. (1994): Geochemical implications of subaqueous molten sulfur at Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan. *Geochem. J.*, 28, 199-216.
- Takano, B., Koshida, M., Fujiwara, Y., Sugimori, K. and Takayanagi, S. (1996): Influence of sulfur-oxidizing bacteria on the budget of sulfate in Yugama crater lake, Kusatsu-Shirane volcano, Japan. Submitted to *Biogeochemistry*.
- TAKANO Bokuichiro (1996): Field Survey of Sulfur Compounds in Crater Lake in Kamchatka.

<受付: 1996年5月17日>