
 温泉紹介

Ruapehu Crater Lake 50歳の終焉と再生

東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻広域システム科学

高野 穆一郎

1995年から1996年は火口湖に携わっている私にとって忘れ難い年になった。1995年の9月23日にはニュージーランドのRuapehu火山の火口湖(写真1)がほとんど突然消失した¹⁾(写真2), またカムチャツカのKarymsky火山と、隣接するKarymsky Lakeが同時に噴火したのが96年の1月2日である²⁾。後者には95年夏に訪れ, その湖畔からKarymsky火山を眺め, 採水を行った。人里を遠く離れて空にそびえ立つ円錐火山と, 透明な水をたたえる淡水湖のたたずまいは, ほとんど理想的な火山風景であったが, それらが突然火に焼かれて山容を変え, 湖のサケ, マス類が絶滅する湖底噴火を起こしたのだから, 聞いたときにはマサカと思った。この噴火の様子はその後, 96年1月12日に来日したS.M. Fazlullin博士のもたらしたビデオで知ることが出来た。

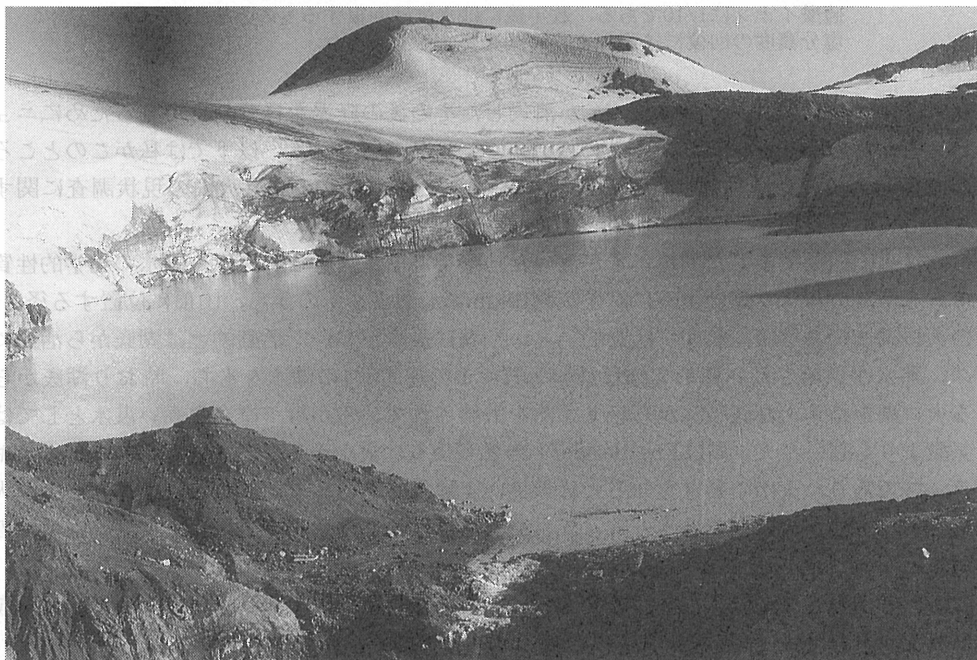


写真1 Ruapehu Crater Lake

Crater Lakeは固有名詞である。写真は筆者が1991年2月9日に訪れた折, ヘリコプターから撮影したもの。南半球の夏であるが山頂には氷河がある。手前は湖の出口であるが, 火山活動と連動した水位の変動により放水が止まったり始まったりする。このときには放水していた。この放水量はモニターされている。

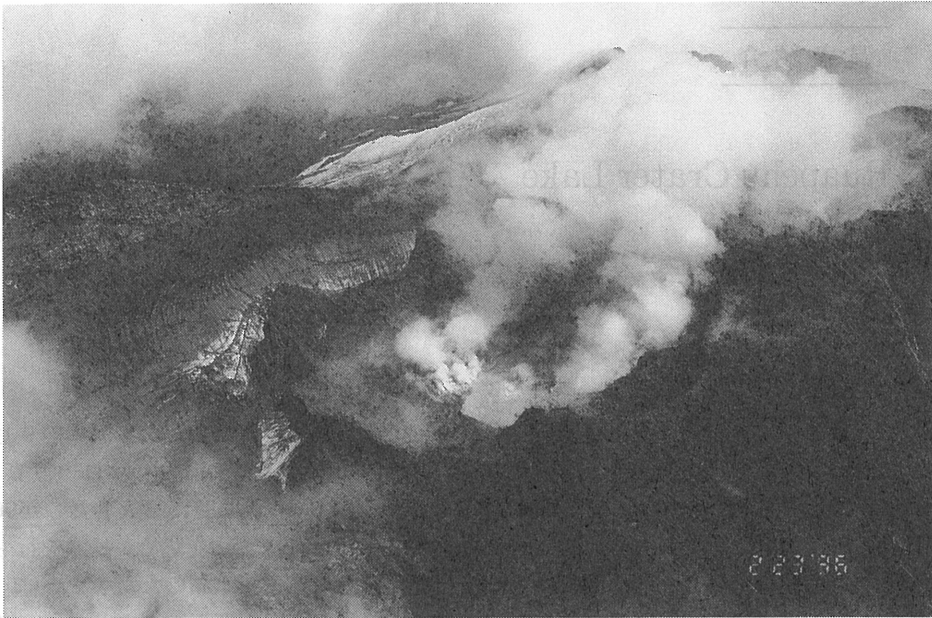


写真2 セスナ機より見たCrater Lake

1996年2月23日撮影。手前左側がかつての出口である。湖底にはわずかな湖水が見える。湖周囲の雪は火山灰で黒く変色している。これが雪解けを促進し、水は湖底に流れ込んでいる。この湖水の塩化物濃度は以前の1/5、硫酸イオンは1/10である。数年後には水位は回復するものと思われるが、塩分濃度の回復にはそれより時間を要するであろう。

現在私はRuapehu火山のCrater Lakeが消失したその後の経過を自分の目で見るためにニュージーランド北島のTaupoに来て、そこのmotelでこれを書いている。以下では私がこのところ10年ばかり係わってきた活動的火山湖の研究を基にして今回のRuapehu火山の現状調査に関することを記しておきたい。

火山湖は火山活動で生じた凹地に水が溜った地形である。大きさ、深度、湖水の化学的性質も様々であるが、カルデラ湖のように直径が数10kmにもおよぶものから、山頂に位置する径2 km以下の火山湖までであるが、私が“活動的”という湖は後者が多い。活動的とは湖底から活発に火山ガス、熱水が供給され、極めて酸性(時に $\text{pH} < 1$ に達する)の湖水をもち、時おり湖底から噴火する火山湖を指す。湖底噴気から絶えず熱を供給されているから、標高の高い湛水としては水温は気温よりも高い。火山湖はFriedlander³⁾の言うように火山から放出される物質、エネルギーのトラップであり、火山の動きを知るための良い実験場である。火山による温泉活動が山頂火山に集約されたものが火山湖であると言ってよいであろう。この意味で温泉と火山湖には多くの共通点がある。

活動的火山湖の水はどのような性質をもっているだろうか。表1には代表的な活動的火山湖の化学組成を示した。Java島の東端に位置するIjen火山湖では湖岸に石膏の沈澱が見られる。直径が200mを超える活動的火山湖としては世界最強の酸性度を示す湖である。これに次ぐのはNew Zealand北島の中心に位置するRuapehu火山のCrater Lakeである。直径約500m、深さは130m程である。この火山湖はしばしば湖底噴火を起す。1945年の噴火の際には湖が消失しマグマ噴火を起したが、1995年の噴火はそれ以来はじめて湖を消滅させた。その間に1969, 1971, 1975, 1988年に大きな噴火があったが、湖の消失はなかった。

表1 世界の代表的な活動的火山湖の化学組成 (mg/L)

Location	Ruapehu ⁸⁾	Kawah Ijen ¹⁵⁾	Kusatsu-Shirane ¹⁰⁾
date	1973	1941	1969
temperature	40	43	20
pH	1.18	0.18	1.00
Cl	12650	20175	4010
SO ₄	16800	50555	3770
Na	1110	1685	20
K	202	1892	16
Mg	1590	742	16
Ca	1750	883	150
Al	1750	4550	171
Fe	400	2000	150
total	36252	82482	8303

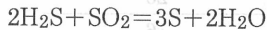
この火山は大きな噴火の際湖水を押し出して、大規模なlahar (泥流)を惹起し下流に災害を起すことで知られている。1953年のTangewai Disasterと呼ばれる泥流災害では噴火が直接の引き金ではなかったが、それまでの噴火で積み重った湖水の出口の堤が決壊し、泥流が鉄橋を破壊したため、ちょうどそこを通過しようとした急行列車が泥流に転落して151名が死亡した⁴⁾。以後Ruapehuに発する泥流の流路にはlaharを検知する施設が施されている。

1960年代からRuapehu火山の継続的な測地学的、物理、化学的観測が行われているのは、この泥流災害、火山灰の周辺農牧地への影響の他に、この火山が絶好のスキーリゾートとなっており、多数の観光客を招き寄せているためでもある。この点では我国の草津白根火山と似通ったところがある。約30年の観測データの蓄積があるのは草津白根を除けば此処だけである。筆者は1984年に草津白根湯釜火山湖水の化学的研究を開始し、湖水の硫黄の化学が火山活動と密接な関係があることに気が付き、その現象が湯釜のみの特殊なものかどうかに興味を持った。以来世界の火山湖に目を向けたのであるが、RuapehuのCrater Lakeは第一のターゲットであった。前述のようにこの火山湖ほど各種のデータと情報の充実した火山はほかに見当たらなかったからである。

湖水試料は1968年からニュージーランドのInstitute of Geological and Nuclear Sciences (ING)に保存してあった。当研究所のR. B. Glover博士の協力により、現在まで総数260を超える試料水の提供を受けてS_xO₆²⁻ (ポリチオン酸: x = 4 ~ 6)の分析を行い、火山、地震、測地学的データ及び目視情報と突き合わせて、火山活動との関連を解析することができた⁵⁾。その火山湖が今回消失してしまったのである。このような現象はたぶん半世紀に1回であろうから、人間の一生の研究活動の間に1回見られるかどうかの機会が今回訪れたことになる。調査費の工面がつかないままに公務の合間を縫って日本を飛び出したのはこのためである。これまでに得られた情報によれば、今回の噴火に関与したマグマ量は1945年以後これまでに起ったマグマ性噴火のいくつかより少ないそうである⁶⁾。なぜ今回の噴火でそれまでに見られなかった火山湖の消失という表面的には大きな噴火を生じたのか。現地の科学者達は多方面から今回の噴火の研究を精力的に続けているので、1~2年のうちに洪水のように論文が出てくるであろう。これまでの行き懸かり上、私なりの立場から今回の噴火に取り組んで見たいと思ひ、そのためには少なくとも一度はこの火山の、噴火後間もない姿を自分の目で見ておきたいと思ったのである。

Ruapehu火山は安山岩質の火山であるが、この岩質の火山のみならず玄武岩質の火山の火山

湖も、活発な湖底噴気がある場合、湖底に熔融硫黄の溜まりがある。RuapehuのCrater Lakeの場合、この溜まりの深さが約6 mもあり⁶⁾、測定されたなかでは最も深度がある。筆者が草津白根湯釜で測定したさいには1.2 mくらいであった。同様の熔融硫黄の溜まりはCosta RicaのPoas火山、KamchatkaのMaly Semiachik火山でも見い出され、温度は120~177℃などが観測されている。Poasの場合、火山活動の活発化ともなって湖水は徐々に減少し、湖底が現れた。この段階で湖底に熔融硫黄の溜まりが見られ、流態硫黄の噴泉が観察された。この様子は雑誌Natureの表紙を飾る写真に示されている⁷⁾。火口湖底の熔融硫黄は湖底噴気ガスの相互反応、



を主な反応として生じた元素硫黄が、そのガスの高い温度のために溶解して液体硫黄の溜まりになったものであろう。そのほか、



も、SO₂の濃度が高まれば熔融硫黄の溜まりの形成に寄与するであろう。

今回の噴出物には初生マグマからもたらされた両輝石安山岩スコリアが含まれていたが、現在までのところマグマの貫入量は大きくないらしい。測地学的データも火山体の大きな歪みを示していない⁸⁾。しかしまだこの活動は終わったわけではないので、小規模噴火と決めてしまうのは早計であろう。噴出物のうち< 2 mmの火山灰の主要成分は硫黄(60~80%)であった⁹⁾。目撃者の報告によると9月に生じた噴煙は黄色を帯びていたという。湖底や火道に堆積した硫黄が加熱され蒸気となって噴出したのであろう。湖が消失した10月8日以後数日の噴煙中のSO₂の放出量はCOSPEC測定によれば最大15,800 ton/dayであった⁶⁾。わずか数日であったがその放出量はきわめて大きかった。おそらく前述の火道及び湖底硫黄の放出によるものと思われる。

従来からこの湖に対してCl、SO₄濃度のみならず、Mgもかならず分析され、Mg/Cl比の推移が観測されてきた。Mgは湖水環境では特定の鉱物として除去、再溶解などの二次的変化を起こさないイオンと考えられ、新たに貫入したマグマや火道の拡張による新たな熱水-岩石相互作用があれば増大すると考えられている⁸⁾。今回の噴火ではその初期からMg/Cl比は増大し始め、急速に約2倍の値にまで上昇した。このような上昇は1971年、1975年、1981年にも観測されている⁹⁾。今回Mg/Cl比は95年5月4日前から上昇を開始したが、奇妙なことにSO₄/Cl比は7月18日ごろから上昇し始めている。この約2カ月半の遅れが何を意味するかは興味のあるところである⁹⁾。

硫黄は-IIから+IV価までの、さまざまな酸化状態をとり、ガス、イオン、固体の三態で出現するためその存在状態はきわめて複雑である。特に低温領域では中間酸化状態の化合物の寿命が比較的長いので、その化学は複雑となり分析も困難なので、この元素の低温酸化還元領域における研究は地球化学者の間で意図的に避けて来られた感がある。この状況は、それらの動きが環境を鋭敏に反映するだけに、逆にこれらの不安定硫黄化合物が捕えられれば、それらの存在環境についてこれまでより格段に立ち入った議論が可能になることを示している。筆者がこれまで研究してきたポリチオン酸はそのような硫黄化合物の一つである¹⁰⁾。この硫黄化合物は温泉で見つけることは少ない。登別温泉大正地獄や、地獄谷の一部の温泉で少量のポリチオン酸が確認されている¹¹⁾。大正地獄の場合、初生の間酸化硫黄化合物はチオ硫酸であり、その酸化分解生成成分がチオ硫酸として出ているのである。火口湖は中間酸化硫黄化合物の生成と消滅の場であるため、硫黄の低温酸化還元領域の研究にはたいへん適した対象なのである。

さて、Ruapehu登山の日を待ちながら、この火山の最近の活動状況に関する情報を集めるうち、昼食会で話題を提供することになった。事前にその可能性があることを示唆されていたので、火口湖におけるバクテリアの活動に関する我々の研究を紹介した。草津白根湯釜には硫黄酸化バクテリアが生きている。Thiobacillus thiooxidansとThiobacillus ferrooxidansである。これらの細菌

が湯釜火口湖の SO_4^{2-} の硫黄同位体にどのように影響しているか、その結果何がわかるかという内容である¹²⁾。これらのバクテリアの存在は、筆者の依頼を快く引き受けて下さった東邦大学

高柳進之輔、杉森賢司両氏によって確認された。火口湖を非閉鎖系として見た場合、そこにおける硫黄の収支に及ぼすバクテリアの寄与を評価することは重要である。Ruapehu火口湖の水について以前同種の培養実験を行ったが、*Thiobacillus*系のバクテリアの培養条件下では菌の存在は認められなかった。この談話会でニュージーランド北島北のBay of Plenty海上に浮かぶWhite Islandでは $\text{pH} < 1$ 、温度 $> 100^\circ\text{C}$ の条件下で生息するバクテリアが見つかったとの情報を得た。培養条件に工夫を加えればCrater Lakeにもある種のバクテリアが見つかるかもしれない。これまで古細菌に属する種々の菌が温泉に見い出されてきたが、強酸性火口湖については佐竹¹³⁾の報告があるものの、 $\text{pH} < 1$ の条件でのバクテリア検出の報告はまだ無いようである。

さて肝心のRuapehu登山であるが、予定日を2日取ったが両日とも天候不順のため登山は断念しなければならなかった。Ruapehuは小康を保っているとはいえ現在も危険であるので、現地を熟知したINGSのスタッフの同行無しで登山を強行することは出来ない。Rainmanという私へのニックネームはここでも適切であることが証明された。止むを得ず観光用のセスナ機の客となって上空から現状を観察することにした。Taupoからレンタカーを駆って1時間半、牧場の一画の草地に建つ小さな平屋のオフィスに到着。先日曇天の際訪れ、顔見知りになっていたパイロットに頼んで離陸の頃合を待った。Ruapehu山頂は相変わらず雲に隠れていたが、すぐ北側のNgauruhoe火山は姿を現わした。Ruapehu山頂以外は夏の終りの明るいさわやかな上天気になった。しかし南方から雲が押し寄せてくる気配があり、持参した昼食のサンドイッチをゆっくり食べる間もなく単発の機体の後部座席に収まって飛び立った。牧草地を助走して上昇するが、火山側から吹く強い東風にもまれて、まるで荒地を疾駆する四輪駆動車に乗った気分を味わうことになった。

いったん山群の北側に出てTongariro火山からNgauruhoe, Ruapehuと南下する。高度は3000m近くであったと思われる。Tongariroの山腹には1991年に訪れたKetetahi温泉群が見える。この温泉は弱酸性から中性であり、Dr. J. Websterによればチオ硫酸が含まれている¹⁴⁾。温泉中のチオ硫酸についてはその由来、挙動に関する面白い研究が期待できるが、本邦ではこれまでさしたる注目を得ていない硫黄化合物である。Ngauruhoeの火口を直下に見て、機はいよいよRuapehuの火口に近づく。山体西側には淡い青色の火山ガスが流れている。Ruapehuの山頂は約2500mであるが氷河がある。夏期でも雪を踏むこと無しに湖岸に達することは出来ないが、今はその雪が黒い火山灰に覆われてしまっている。見えた！ 白い噴煙の中に灰白色の湖面が噴流のため激しく動いているのが、平常の水位から90m以上下がっているという。必死にカメラのシャッターを押す。急な旋回のため気分が悪くなったが、耐えながら写真を撮り続ける。初めて見る荒々しい湖底の姿であった。火山ガスと水と岩石の激しい相互作用の場を1~2分の短い時間であったが直接に観察することが出来た。この光景は阿蘇中岳火口の湯だまりに似通っているのではないだろうか。山体外側斜面には幾筋もの黒いlahar(泥流)の跡が見える。この噴火で放出された変質岩石には約70ppmの金が含まれていたという⁵⁾。この火口下部は遠い将来開発されるかもしれない鉱床の揺籠となっているのであろう。

強い横風のなかを機体を斜めにしながら草地に着陸する。お客が増えて今や順番待ちである。エアフィールド前の道路沿いの看板には高崎山のサルよろしく、“ただいまCrater Lakeが見えます”と記したボードが懸けられ、強風で飛んでしまうたびにパイロットが懸け直している。兎にも角にも火口湖の現状を自分の目で見る事が出来たことで満足して、対向車のほとんど無い草原の道を研究所へ戻って行った。翌早朝オークランド行きの飛行機を待つエアフィールドからTaupo

湖の向こうにTongariro, Ngauruhoe, Ruapehuの三山が山頂をくっきり見せて並んでいるのを見て悪態をつきながら機上の人となった。今日のうちに自宅に戻れるほど地球は狭くなったのだから、成長した火口湖の姿を見にまた来ることにしよう。

文 献

- 1) Immediate Report: RUA 95/06. Inst. Geol. Nucl. Sci., New Zealand.
- 2) Fazlullin, S.M.: Personal communication, 1996.
- 3) Friedlander, B.: Trans. N.Z. Inst., **31**, 498-510, 1898
- 4) Blong, R.J.: Volcanic Hazards, pp.47-49. Academic Press, 1984
- 5) Takano, B., Ohsawa, S., Glover, R.B.: J. Volcanol. Geotherm. Res., **60**, 29-57, 1994
- 6) Christenson, B.W.: Personal Communication, 1996
- 7) Oppenheimer, C., Stevenson, D.: Nature, **342**, 790-793, 1989, Cover Photo of 14 December 1989
- 8) Giggenbach, W.: New Zealand J. Sci., **17**, 33-45, 1974
- 9) Takano, B., Christenson, B.W., Glover, R.B.: Abstract for International Symposium. Bull. Lab. Earthq. Chem., No.7, 49-51, 1996
- 10) Takano, B.: Science, **235**, 1633-1635, 1987
- 11) 高野穆一郎, 我孫子 勤: 未発表データ
- 12) Takano, B., Koshida, M., Fujiwara, Y., Sugimori, K., Takayanagi, S.: Submitted to Biogeochemistry
- 13) Satake, K., Saijo, Y.: Limnol. Oceanogr., **19**, 331-338, 1974
- 14) Webster, J.G.: Appl. Geochemistry, **2**, 579-584, 1987
- 15) Poorter, R.P.E., Varekamp, J.C., Van Bergen, M.J., Kreulen, R., Sriwana, T., Vroon, P.Z., Wirakusumah, A.D.: Chem. Geol., **76**, 215-228, 1989