

接近困難な強酸性火口湖における観測技術 —水温モニタリング・湖水および湖底泥の採取—

京都大学大学院理学研究科

寺田 暁彦*・吉川 慎

*現所属 東京工業大学火山流体研究センター

1. はじめに

活動的火山の火口には、水温が気温よりも明らかに高く、様々に呈色した火口湖がしばしば形成される。このような火口湖の湖底では、噴気活動や温泉湧出が長期にわたり継続し、それらの主要成分の多くは湖水に溶解する。すなわち、火口湖は火山の熱的活動を直接的に反映していると考えられ、湖水量や水温、溶存化学成分を定期的に測定することで、火山学的に極めて貴重な情報がもたらされる^{1), 2), 3)}。

火口湖の湖面まで容易に接近できる草津白根火山や New Zealand の Ruapehu 火山では、湖水温の直接測定や湖水採取が繰り返し行われてきた^{4), 5)}。その一方、現地観測が困難な環境に存在する火口湖もいくつか存在する。例えば阿蘇火山(図 1(a))の中岳第一火口には、湯だまりと呼ばれる直径 200 m 以上の湖が形成されている(図 1(b))。第一火口の火口径は 400 m 以上あり、全周にわたり最大 150 m に達する急峻な壁に囲まれているほか、同火口の南側にはときに温度 800 °C に達する噴気孔が存在し、SO₂ を多量に含む火山ガスを盛んに噴出している。さらに、湖水の pH は 1 を下回る強酸性を示し⁶⁾、比較的耐酸性を有するとされるステンレス素材も、直ちに腐食する。このような厳しい環境のため、人が湯だまりの湖面まで降下することはほぼ不可能で、これまで何らかの測定装置が湯だまりに設置されたことはない。

阿蘇火山の湯だまりは、火山性微動や地震活動などから示唆される火山活動の消長に応じて、湖水量や水温が増減するほか、湖面の色彩も複雑に変化する。従って、接近困難な火口湖を簡便に観測する技術を確立することは、火口湖の理解に留まらず、火口湖周辺に発達している熱水系や、熱水系と火山活動の関係など、ひろく火山現象の研究に貢献する。また、阿蘇火山のように火口縁まで重機を持ち込めず、険しい地形と気象条件、高濃度火山ガスなどの特に厳しい環境でも実行可能な観測技術は、活動的火山に限らず、観測条件の厳しい地熱地域などの調査活動にひろく応用できるであろう。

今回、厳しい環境に対応した水温計測システムを構築し、湯だまりへ設置することを試みた。さらに、滑車と紙紐で繋いだ重しを用いることで、湖水を従来よりも簡便に採取したほか、阿蘇火

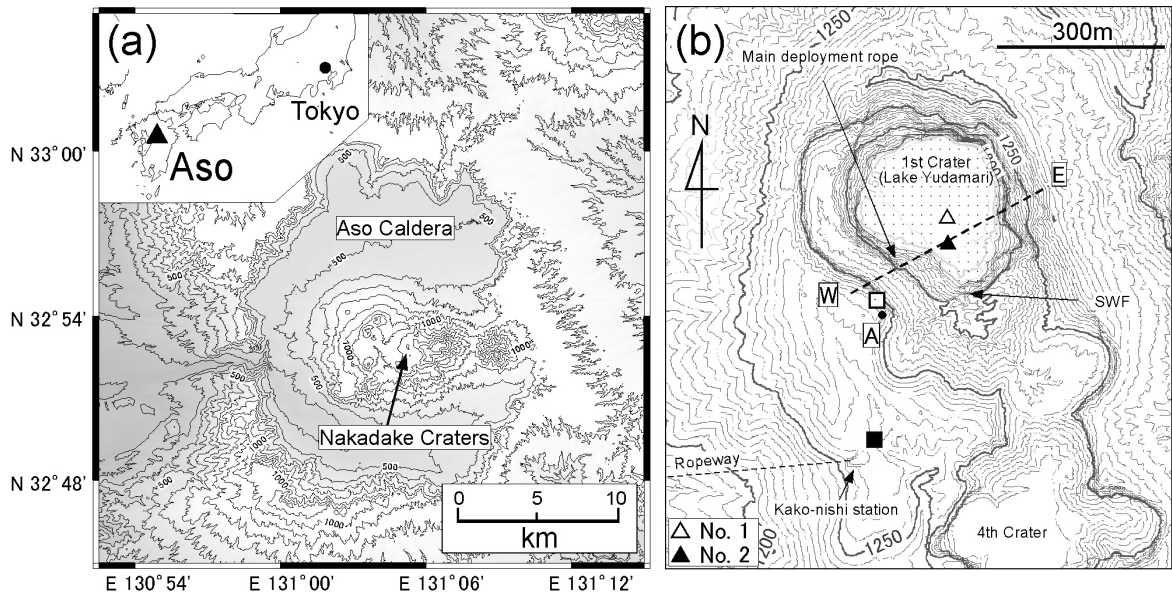


図 1. (a) 阿蘇火山周辺の地形図。コンターは 100 m 間隔である。(b) 阿蘇火山中岳火口群周辺の地形図。コンターは 10 m 間隔である。三角は無線温度計の設置位置を示す。温度計設置用の主ロープは、西側(W)と東側(E)の間を架線した。温度データは、中継局(白丸)を經由して受信局(黒丸)へ伝送される。SWF は南壁噴気孔群の位置を示す。本図作成に使用した数値標高モデルは、国際航業株式会社から提供された。

山として初めて湖底泥の採取を行なった。これらの作業は数名程度で、全て、人力で実施した。

本論文では、水温観測システムの詳細と阿蘇火山の湯だまりへの設置方法、湖水および湖底泥採取の具体的方法を詳述する。得られたデータの詳細な分析結果は、別に公表する。

2. 従来の阿蘇火山湯だまりにおける観測と課題

人が接近できない湯だまり(図 2(a))においても、これまで、様々な工夫に基づいて水温や水位の観測、湖水採取が行なわれてきた。本章ではこれらの概要を述べるとともに、従来の観測や作業上の課題を整理する。

2.1 水温

火口湖の水温は、火口縁上の定点(図 1(b)の A)から赤外カメラを用いて測定されてきた。その結果、非噴火時においても、常に 50 - 60 °C 以上という高い水温が維持されていることが明らかになった^{7),8)}。



図 2. (a) 阿蘇火山中岳火口群の空中写真。SWF は南壁噴気孔群の位置を示す。(b), (c) 水温観測ブイ 2 号機の写真。(d) 主ロープを用いた水温観測ブイ 2 号機設置の様子。(e) 湯だまり湖面に設置された水温観測ブイ 2 号機。(f) 主ロープと副ロープの操作。

しかし、湖面上空に存在する水蒸気が放射エネルギーの一部を吸収するため、赤外カメラで計測された水温は、実際的水温よりも数 $^{\circ}\text{C}$ 以上低いことが示唆されている⁹⁾。水温は、湖面から蒸発で失われるエネルギー量を見積もる際に重要である。例えば Ryan et al. の式¹⁰⁾に基づいて蒸発エネルギーを計算すると、 10°C の水温の不確定は、倍程度の蒸発エネルギーの不確

定を生じる。

このような水蒸気が水温測定に与える影響は、複雑に変化する水蒸気量の空間分布に強く支配される。そのため、赤外カメラで測定された水温変化が、実際の水温変動を反映したもののか否かを判断することが難しかった。

2.2 水位

火口湖の水位は、2006年7月以降、火口縁(図1(b)のA)に設置した高解像度のデジタルカメラによる画像と、湖水が干上がっていた2004年に実施された航空レーザー測量によって得られた、1mグリッド、鉛直誤差15cmの数値標高モデル(Digital Surface Model, DSM)と比較することで、30cm程度の解像度でモニタリングされている⁹⁾。さらに、DSMから計算した火口内の容積に基づいて、湖水量についても5,000 m³程度の精度で見積もることが可能となっている⁹⁾。

ただし、可視画像に基づく本手法は、湖面上に立ちこめる湯気や湖面の波浪に影響されやすい。多くの火口湖では、噴火前に水位変動が認められる¹¹⁾。従って、わずかな水位変化を精度よく捉えることは、防災上も重要である。そのためには、より詳細かつ簡便に水位をモニタリングする方法を組み合わせる必要がある。

2.3 採水

これまでの湯だまりにおける湖水の化学分析は、小坂ほか¹²⁾と大沢ほか⁶⁾がある。小坂らが採水を行なった1980-82年前後は、南側から湖面へ接近することが可能であった。しかし、その後の噴火活動による地形変化と噴気活発化のため、現在は湖面に近寄ることは不可能である。

そこで大沢ほか⁶⁾は、火口に軽量のロープを架線し、ボトルを降下させることで数度にわたり湖水を採取することに成功している。その結果、湖水のpHは1未満、SO₄²⁻イオン濃度は20,000-100,000 mg/Lが計測され、湖水は非常に強酸性で大量の溶存成分が含まれることが明らかになった⁶⁾。この値は、火山活動が比較的静穏だった時期に採取された湖水濃度¹²⁾の約10倍に相当し、湖水溶存成分に顕著な時間変動が起きてきたことがわかる。

このような溶存成分の時間変動は、火山活動、とくに地下浅部熱水系の活動を反映していると考えられ、湖水採取を頻繁に繰り返すことは、火山学的に重要な知見をもたらす³⁾。一方、現在の湯だまりにおける採水作業は、地形的制約のために人力に頼らざるを得ず、たとえ1kg程度の物体であっても、火口縁まで引き上げるためには多大な労力を要する。そのため、過去20年間に湯だまりでの湖水が採取されたのは数回である。これは、1ヶ月に1度の頻度で湖水

採取が行なわれている草津白根の火口湖、湯釜⁵⁾に比較して、著しく少ない。より簡単に採水する方法を考案することで、湯だまりに関する地球化学的研究の発展が期待される。

3. 新しく構築した水温観測システム

登別火山大湯沼のように湖岸に温度計を設置したり、草津白根火山・湯釜のように温度計を収めたブイから湖岸までケーブルを施設して、データを有線で回収する方法は、100 m 以上の急崖に囲まれている阿蘇火山では困難である。そこで、本研究では無線式温度計とブイを組み合わせた観測システムを構築した。

無線式の水溫観測ブイは、New Zealand の Ruapehu 火山において実践されている¹³⁾。Ruapehu で開発されたブイは、塩化ビニルパイプを用いた本体を鉛直に立てて、発泡スチロールを用いて湖面に浮かべるものである。このブイは同火山において貴重なデータをもたらしたが、次の理由により、阿蘇火山には適用できない：(1)無線機やバッテリーが湖面下に位置するため、阿蘇の湯だまりのように水温がときに 80°C に達する環境では、無線器等の動作が難しい。(2)湯だまりの水温は、ときに本体部を構成する塩化ビニルの耐熱温度を上回る。(3)全長 2 m、アンカーを含めた重量は 20 kg を超えるため、湯だまりへ設置作業を行なうことが極めて困難である。

そこで、より強い酸性、高温の湖水を有し、かつ接近不可能な阿蘇火山での直接水温観測を可能とするため、試験的に製作した 1 号機を 2008 年 4 月 25 日に設置し、装置の設置作業手順、ブイの内部温度と機器動作状況を確認するとともに、ブイ内部への浸水状況を調べた。その結果に基づいて 2 号機を作成し、同 7 月 8 日に設置した。本章では、主に 2 号機に関する使用素材の詳細を述べる。1 号機の概要については付録で述べる。

3.1 無線温度計

(1) 使用器材

現在、帯域 400 MHz を利用した無線式温度計が市販されており、特別な資格や許可を得ることなく数 100 m 程度の距離を通信できる。本研究では、株式会社ティアンドディ社製の無線式温度計 RTR-71 を使用した。本製品は、データロガーと無線機能が一体化しており、外寸は 90 × 65 × 33 mm、重量 0.125 kg である。入力データは 2 チャンネルで、それぞれ 2,800 の温度データを任意の時間間隔で記憶する。記録間隔を最小の 1 分とした場合、温度データが約 2 日分記憶されるが、時間の経過とともにデータが上書きされる仕様である。

RTR-71 は、温度観測に用いる子機、データ受信や子機へコマンド送信を行なう親機、および子機・親機を中継する中継器の3機能を、あらかじめ設定する。見通しが良好であれば、機器同士で最大 400 m の距離を交信できる。従って、中継器を併用することで最大約 800 m の距離から温度データを取得できる。

親機および中継器の電源供給は、それぞれ阿蘇火山防災協議会および阿蘇火山博物館が管理する AC 100 V 商用電源を利用した(図 1(b))。一方、子機の電源は Panasonic 社製リチウム電池 CR123A(電圧 3 V)を用いた。常温環境で RTR-71 を子機として使用した場合、1 日に 1 回のデータ回収を継続すると、3 ヶ月程度で電池 1 本を消耗する。機器を湖面へ設置した後の電池交換は一切不可能なため、6 年分に相当する 24 本の CR123A を並列した。

(2) データ回収方法

データ回収には、専用のソフトウェアをインストールした Windows パソコンに、RS-232C を通じて接続した親機を使用した。親機およびパソコンは、阿蘇火山防災協議会が所管する阿蘇山山上事務所(火口監視員詰所)に設置した(図 1(b)の黒四角)。同事務所からは、地形的に湖面を視認できないため、火口縁(図 1(b)の白四角)に中継器を設置した。

データを回収する場合、あらかじめ設定した時刻に、親機から中継器を介して子機へコマンドを送る。子機は、受取ったコマンドに応じて温度データを発信する。親機で受信した温度データには、パソコンの時刻情報が付与され、パソコンのハードディスクドライブに保存される。そのため、時刻精度はパソコンに依存する。このように蓄積された温度データを、現地で定期的に回収する。

なお、子機の温度データ記録間隔や親機との通信間隔の設定は、必要に応じて親機に接続したパソコンを用いて変更した。

3.2 温度センサ

本観測で使用したセンサは、同社製 TR-5106 で、ケーブル長は 60 cm である。本製品の計測可能温度は最大 155 °C、測定精度は 80 °C 未満において ± 0.3 °C、攪拌水中における熱時定数は 2 秒である。

本センサは、センサ部からケーブルにかけての全面が、フッ素樹脂(Fluororesin)で被覆されている。一般にフッ素樹脂は耐酸性に極めて優れており、いかなる不着物も付きにくいことから、湖水に直接的に晒される温度センサの被覆として最適である。

本研究では、2 チャンネル存在する温度センサのうち、ひとつを湖水温度計測に、もうひとつ

を無線式温度計本体周辺の温度計測に用いた。

3.3 浮箱

(1) 素材

図 2(b) に、2 号機として用いた浮箱の写真を、図 3 にその模式図を示す。浮箱は、ポリスチレン樹脂(Polystyrene resin)を原材料とする発泡スチロール(Expanded Polystyrene, EPS)に臭素を混合した厚さ 30 mm の難燃性 EPS(耐熱 EPS)板を組み合わせて製作した。使用した発泡スチロールの発泡度は 96 倍で、密度は 10.4 kg/m^3 と極めて軽量である。発泡スチロールは断熱性にも優れているため、内部に水温計を収納する浮箱としての使用に適している。

難燃性 EPS は熱可塑性樹脂のひとつであり、耐熱温度は $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 前後とされるが、自身の断熱性から、 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 前後の環境下でも浮箱として十分な強度を保つ。また、水中に 100 日以上定置した場合でも、その機械的性質にほとんど変化はない(例えば、EPS 建材推進協議会、私信)。

発泡スチロールを野外観測に用いる課題として、日射(主として紫外線)による劣化が挙げられる。このような耐候性を確保すること、機械的強度を向上させることを目的として、ポリウレタン樹脂(Polyurethane resin)を浮箱全面に 1 mm 厚で塗布した。なお、ポリウレタン樹脂は黄土色であったが、日射による浮箱内部の温度上昇を軽減するため、さらに白ペンキを塗布した

箱内部や機器の結露が生じると、箱内部に侵入した火山ガスが結露に吸着されて硫酸となり、機器の腐食を引き起こす。浸水への対応を兼ね、汎用製品の除湿材とともに、紙オムツを箱内部に敷き詰めた。

本装置の重量は、浮箱のみで 0.69 kg である。水温計や電池等を搭載し、次節で述べるアンカーを合わせると、水温観測システムの総重量は 3.3 kg となる。

(2) 外形および重量

浮箱は、波浪等で転覆しにくい構造とするため、水温計を収める直方体部(肉厚 30 mm)に、円盤を組み合わせた形状とした(図 2(b))。ここで、円盤部の肉厚を 50 mm としたのは、発泡スチロール、ポリウレタンとも酸に対して徐々に侵されてゆくためである。円盤部と直方体部を合わせれば、浮箱底部の厚さは合計 80 mm になり、高温の湖水によって箱内部の温度が極端に上昇することを防止する。箱の上蓋は勘合蓋とし、無線温度計等を収めた後、樹脂を用いて接着した。

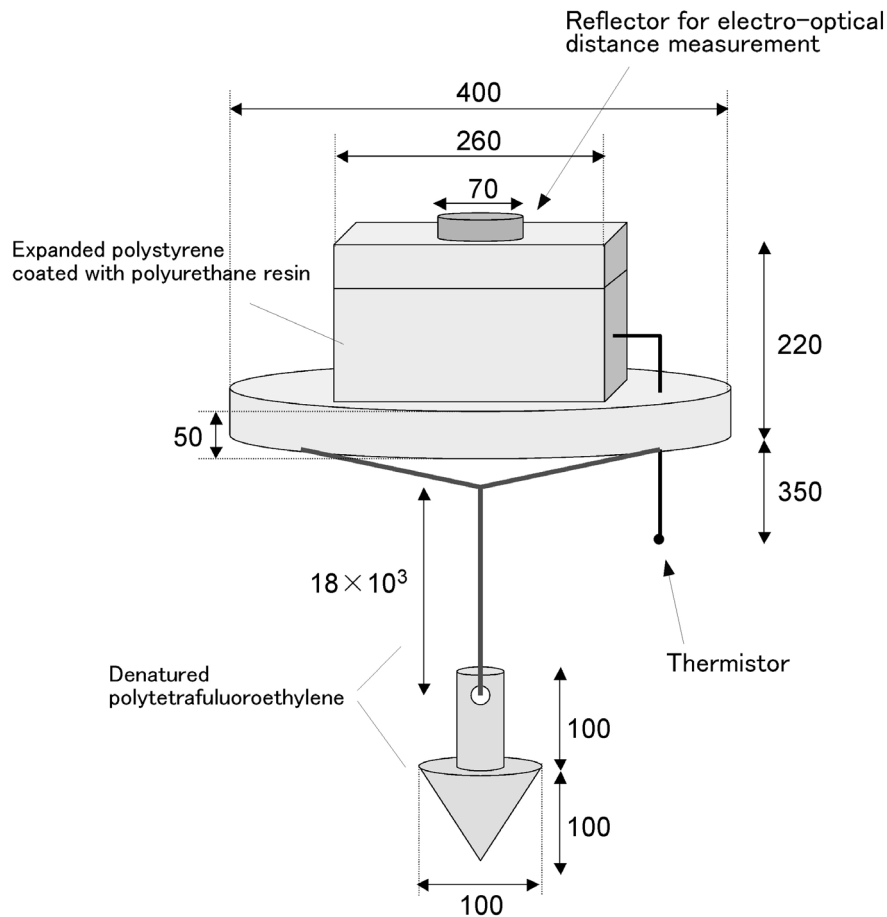


図 3. 水温観測ブイのイラスト。ここに示した長さの単位は mm である。

2つの温度センサのうち、1つを箱側面と円盤に空けた穴を通じて水中へ導いて、水温測定に用いた(図3の Thermistor)。従って、センサは浮箱下部の水深 35 cm 前後に位置することになる。

もうひとつのセンサは箱内部に設置した。これは、箱内部温度を監視することで機器の熱暴走を検討すること、水温測定値との差を調べることで水温測定用センサの異常を検出することを目的としている。

さらに、箱天井部に光波測量用に使用する反射鏡を装着した(図 2(b), 図 3)。この反射鏡を利用することで、火口縁から光波測距儀を用いた正確で簡単な水位計測が可能となる。また、反射鏡は、火山活動が活発化して湖水が干上がった際に、火口底の地殻変動をミリメートル単位で観測するための測定点として使用できる。

(3) 湖底係留用アンカー

浮箱が水流や風で移動することを防ぐため、アンカーを用いて浮箱を湖底に係留した。アン

カーは、高い水温、低い pH という厳しい環境に常に置かれても十分な強度を保つ必要がある。そこで、フッ素樹脂を用いてアンカーを作成した。アンカーと浮箱を連結するためのロープも、フッ素樹脂を用いて作成した。

一般に、フッ素樹脂はほとんどの有機・無機薬品に対して不活性であるうえ、耐候性にも優れる。本研究で用いたフッ素樹脂は、特に耐酸性に優れる変性 PTFE (Denatured polytetrafluoroethylene) である。密度は $2,180 \text{ kg/m}^3$ 前後で水に沈むため、そのままアンカーとして使用した。製造者によれば、同製品の融点は $327 \text{ }^\circ\text{C}$ 、連続使用温度は $260 \text{ }^\circ\text{C}$ である。従って、草津白根火山の湯釜や、New Zealand の Ruapehu Crater Lake など、湖底に溶融硫黄 (湯釜では $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 前後) が存在する環境においても使用できると思われる。

アンカーの形状は、湖底の泥に突き刺さるか、あるいは礫に引っかかることを期待して、全長 0.2 m の矢印型とした (図 2(c), 図 3)。アンカーの重量は 0.99 kg で、棒部に変性 PTFE 製のドーナツ状の錘を装着することで重量を調節できる。なお、フッ素樹脂は、他の樹脂との接着が容易ではないという欠点がある。このため、本アンカーはブロック状の樹脂を整形することで製作した。

アンカーと浮箱は、同じく変性 PTFE を用いて直径 2.9 mm のロープを製作し、結束した。想定⁹⁾される湖水深 15 m に対して、ロープ長は 18 m (0.26 kg) とした。なお、変性 PTFE ロープは硬いために、より複雑なロープ操作を行なうためには、ロープを加熱しながら作業する等の配慮が必要である。

4. 水温観測システムの設置

4.1 架線作業

中岳第一火口に初めて架線作業が行なわれたのは、1980 年代初頭である (須藤, 私信)。この作業は湯だまりの温度測定を目的として、ステンレス製ワイヤが用いられた。しかし、架線後のワイヤ両端に大気に由来する電位差がしばしば生じて観測に支障を与え、ステンレス製ワイヤは観測利用に適さないことが示された。その後、大沢ほか⁶⁾は、絶縁性の高いポリプロピレン製ロープを一時的に架線することで、数回にわたり採水作業を実現させた。

本研究でも、大沢ほか⁶⁾の方法に基づいて架線した。作業に用いる架線用ロープは、強固なほど重量が増して、人力による作業が困難となる。今回は、湖面への投入物が 3 kg を超えること、ロープ上を滑車が移動することを考慮して、ロープの太さを 8 mm とした。ロープの重量は 100 m につき 0.7 kg である。使用したロープの連続長 200 m に対して火口径は 400 m 以上

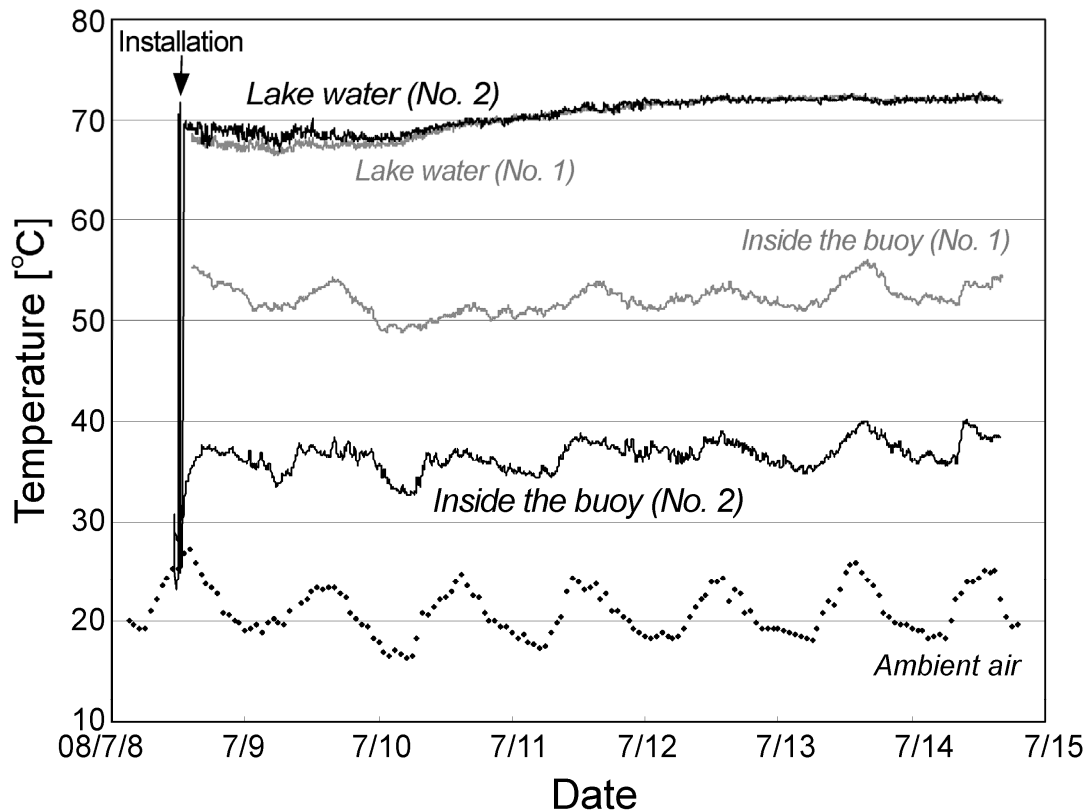


図 4. 水温観測ブイ 1 号機および 2 号機から送信された水温および箱内部温度と、気象庁阿蘇火山測候所(湯だまりから西方約 1.2km)で観測された気温。

あるため、4 本のロープを繋げて作業に使用した。そのため、架線したロープだけで 3 kg 以上の重量になる。一方、ポリプロピレンの密度は 910 kg/m^3 前後で、湖面に達したロープは水に浮かぶ。

以下では、このように架線したロープを主ロープと呼ぶ。環境へ配慮して、主ロープは作業終了後に回収した。

4.2 アンカーの自動降下

水温観測システムは、主ロープに乗せた滑車を用いて降下させた。作業開始前に、滑車に岩石を固定して自然降下試験を行ったところ、3 - 5 kg 以上の重量があれば、任意の物体が円滑に降下できることを確認し、本水温観測装置(3.3 kg)が降下可能なことが示された。

その一方、水温観測システムを降下させる際、浮箱とアンカーを繋ぐ全長 18 m の変性 PTFE 製ロープが障害となる。そこで、システム降下時には、変性 PTFE 製ロープを紙製の紐

(紙紐)で束ねることにした(図 2(c))。乾燥状態の紙紐は、重量物を吊下するに十分な強度を有する一方、水を吸収すると溶解してほぼ強度を失う。そのため、着水後、アンカーは自重により湖底へ自然降下する。重量に対して適切な強度の紙紐を選択すれば、数分程度でアンカーを自然降下させることができる。

使用した紙紐は、市販されている直径 2 mm 前後の安価な製品である。なお、錘の自然降下を確認するために、紙紐にゴム風船を結びつけた。これにより、ゴム風船が装置から離れることで、火口壁上からアンカーの降下を容易に確認できる(図 2(c))。

水温観測システムは、主ロープに乗せた滑車に、S 字金具を用いて吊り下げられている。システムが着水した後、主ロープを弛めることで S 字金具は滑車から自然に外れる。

4.3 設置経過

2008 年 7 月 8 日に、火口への架線作業を行なった(図 1(b), 図 2(a))。架線作業は、東側(E) 3 名、西側(W) 4 名の計 7 名が担当し、40 分程度で終了した。当時の火口縁における風速は 5 - 6 m/s に達していたが、ロープに掛かる負荷は、人ひとりの力で安全に作業を進められる程度であった。全ての作業が終了した後、主ロープは回収した。

架線した主ロープをやや緩ませた状態で、自重により、西側(図 1b, 図 2a の W)から水温観測システムを降下させた(図 2(d))。降下とともに徐々に主ロープを緩め、わずかな設置位置の調整は、ロープ両端において、ロープの送り出し・手繰り寄せることで行なった。着水から数分後に、ゴム風船が離れたことを視認することで、火口縁からアンカーの降下を容易に確認できた(図 2(e))。

設置から 1 週間の観測データを、図 4 に示す。水温は 70 °C 前後で変動している。箱内部温度には、日射および気温変動の影響によると思われる、振幅 5 °C 前後の周期的な温度変化が見られるが、箱内部の温度は 40 °C 以下で推移した。すなわち、無線温度計の動作保障最高温度 50 °C を下回り、装置の熱暴走の問題は回避された。

5. 湖底泥および湖水の採取

これまで数回にわたり採水作業を行ってきた大沢ほか⁶⁾は、架線したロープに採水用ボトルを取り付け、そのロープの両端において、同時にロープ送り出し、手繰り寄せを行なうことでボトルを所定の位置へ降下させた。これら一連の作業は、人力に頼らざるを得ず、物体の重量が 1 kg 前後になると、引上げ作業には相当の労力が必要である。また、着水時にボトルに湖水が十

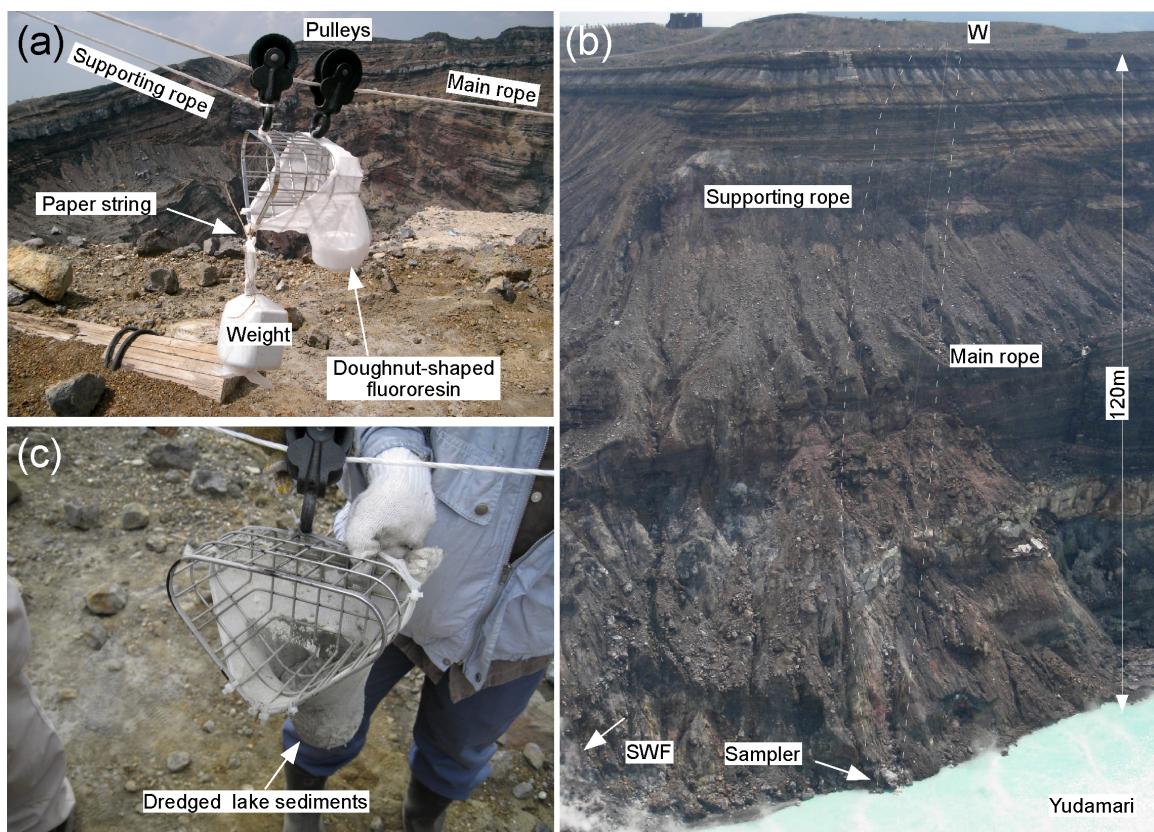


図 5. (a) 採泥器, (b) 採泥の様子, および(c) 採取された湖底泥の写真。

分に入らなかったり, 引き上げ時のロープの動揺で湖水が失われる等の課題があった。本研究では, 前章で用いた滑車や紙紐, 重しを用いて, 確実に湖水採取を行なう方法を試行した。さらに, 阿蘇火山の湯だまりにおいて初めて, 湖底泥の採取を可能とした。

5.1 採泥・採水に用いた器具

本研究では, 火口縁からロープを操作することで湖底をドレッジ・回収するために簡単な採泥器を製作した。この採泥器は, 汎用製品であるステンレス製の三角コーナー(幅 20 cm, 深さ 10 cm 前後)の外側から, ポリエステル製のネット(汎用製品の水切りネット)を被せたものである(図 5(a))。

ネットの中には, 錘として耐酸性に極めて優れた変性 PTFE 製のドーナツ型ブロック(0.24 kg)が収められている。これにより, 常にネットが下方へ引かれることで, ドレッジ後に採泥器を引き上げる際に試料が落下することを防止した。ここで, 強酸性湖水により, 採泥器自身が腐食して, 採取試料が化学的に汚染される恐れがある。重しの形状をドーナツ型にしたことで, ドーナツの穴内部に定着した試料については, ドレッジの際の僅かな時間以外は, ステンレス素材

に直接接触することがない。この採泥器の全重量は、主ロープに取り付けた 2 台の滑車を含めて 2.2 kg である。

採水には、大沢ほか⁶⁾と同様に、水試料の保存に用いられるポリプロピレン製ボトル(500 ml)を用いた。

5.2 作業上の工夫

架線した主ロープに取り付けた滑車を用いて、採泥器等を自重で降下させた。滑車には、主ロープよりも軽量の直径 4 mm(0.24 kg / 100 m)のポリプロピレン製ロープを結びつけた(図 5(a))。以下では、このロープを補助ロープと呼ぶ。

物体を引き上げる際には、主ロープを緩めて角度をつけた状態で、補助ロープを引く(図 2(f))。これにより、主ロープ自体を引くよりも著しく少ない労力で、採泥器の引き上げが可能である。滑車を用いた引上げ作業は、採泥器等へ与える振動が少なく、引上げ作業中に試料が落下するリスクを回避できる。

架線した主ロープの素材であるポリプロピレンは、密度 910 kg/m³ と水に浮くため、主ロープ自身が採泥や採水の障害となる。そのため、滑車に何らかの重しを取り付ける必要がある。その一方、重しを使用した場合には、採取した試料の重量も加わるため、それらを火口縁まで引き上げる際の負担が非常に大きくなる。

そこで、重し(石など)を袋に入れ、紙紐を用いて採泥器や採水用ボトルに吊り下げた(図 5(a)の weight)。これらの重しは、4 章で述べたアンカーと同様に、着水後に湖底へ自然落下する。そのため、火口縁へ引き上げる際に重しは存在せず、少ない労力で試料を引き上げることが期待される。

5.3 作業経過

採泥器や採水用ボトルは、4 章で述べた水温観測システムと同様に、西側(図 1(b)の W)から湖面へ順調に降下した(図 5(b))。

採泥器については、主ロープのたるみの具合と、送り出した補助ロープの長さに基づいて、着底したことを推定した。そして、架線した主ロープの西・東側において、同時に主ロープを 20 m の手繰り寄せ・送り出しを行なうことで、湖底のドレッジを行なった。その後、主ロープを引いて採泥器を湖面上の十分な高さまで引き上げ、補助ロープを用いて採泥器を回収した。この結果、約 400 g の湖底泥を採取することができた(図 5(c))。

採水用ボトルについても、同様に重しを用いて湖水中へ降下させた後、補助ロープを用いて火口縁まで回収した。滑車と補助ロープを用いたことで、回収作業時のボトルの振動は少なく、蓋の付いていない採水用ボトルに、ほぼ満水の湖水約 500 ml を得ることができた。

両作業ともに紙紐は想定どおり溶解して、重しは自然降下した。作業時間は、それぞれ、実質 30 分程度であった。試料の引き上げにかかる労力も、従来よりも著しく軽減された。径 8 mm の主ロープと 4 mm の補助ロープは、後者の方がより強く風に流されていた(図 5(b))。そのため、両ロープが絡み合うことはなかった。

6. 議論とまとめ

6.1 水温観測技術

試験的に製作した 1 号機の運用経過に基づいて、2 号機を製作した。1 号機は、設置直後に水温データが不規則に変動するとともに、箱内部温度が上昇した(図 A3)。この温度データから、浮箱は姿勢が不安定となって水温センサが水面上に露出・水没を繰り返す状態になったこと、浮箱内部に浸水が起きたことが示唆される(付録)。この不安定な状態は半日程度で改善したが、2 号機では姿勢制御と浸水への対策を強化することとした。また、1 号機の浮箱内部温度は、無線温度計の耐用温度である 50 °C を越えることがあり(図 A3)、湖水との断熱性向上が求められた。

浮箱の姿勢を安定させるために、2 号機の浮箱は、直方体の箱に円盤型の底板を組み合わせた形状とした(図 3)。最も浸水する恐れがあるのは、直方体部の上部に設けた勘合蓋の継ぎ目であるが、2 号機は姿勢が安定しており、1 号機で見られたような不規則な温度変化は記録されず(図 4)、浮箱の沈下も認められないため、浸水は起きていないと考えられる。また、同日採取された湖水の pH は 0.43 であり¹⁴⁾、このような強酸性環境下でも、浮箱やアンカーは強度を維持している。

設置後の 2 号機の箱内部温度は、真夏でも 40 °C 以下で推移した。浮箱の肉厚は、1 号機の 20 mm に対して、2 号機の底面は、円盤部と底板とをあわせて 80 mm ある(図 3)。そのため、水温 70 °C、気温 20 °C 前後の環境下で、目標とする断熱性が確保された。

このような改良を施す一方で、水温観測システムは大型化するとともに重量が増した。そのため、滑車、紙紐および重しを用いることで、少ない労力で確実に観測システムを湖面に設置した。これらの道具は、任意の物体を円滑に自然降下させるうえ、少ない労力で物体を湖面から引き上げることができる。これにより、湖水採取作業の効率化とともに、湖底泥の採取を可能にした。

本報告で構築した観測装置は、フッ素樹脂を用いることで、極端な強酸性環境下でも使用に耐え得るものである。他火山の例として、例えば登別火山の火口湖、大正地獄で使用されているステンレス被覆のセンサ(大島, 私信)は、湯だまりでは直ちに腐食するため、使用は困難である。

また、本報告で述べた設置技術は、阿蘇火山・湯だまりのように、湖へ接近できない場合に極めて有効である。地形的な問題のほかに、噴火活動や火山ガス等の影響で火口底へ赴けない場合にも有効であろう。一方、湖に容易に接近できる草津白根・湯釜火口湖では、水温センサがブイに係留され、データは有線で湖岸に伝送されている。これら装置の設置・保守作業は、必要に応じて直接を行なうことができる(大場, 私信)。このようなシステムを、湯だまりに設置することを試みるのは、現実的ではない。

本観測技術は、湯だまりの湖水温度を、天気や時間を問わずにモニタリングすることを可能にした。湖水温度は、湖面蒸発量・放熱率を計算するために重要であり、湖に関する水・熱収支の見積りに大きな影響を与える¹¹⁾。また、湖水温度は、湖底噴気活動の変化に応じて変化するから、湖水温度に基づく火山活動度評価に資することが期待できる。湯だまりの水温変動に関する詳細な解析とその火山学的意義については、別に発表する。

6.2 採水技術

水温観測システムを設置するために用いた滑車、紙紐および重しを用いた工夫は、採水作業にも応用された。従来、ロープに採水用ボトルを固定し、架線したロープの両端で送りだし・手繰り寄せを行なってきた⁶⁾。この手法により、湯だまりでは、これまで数回にわたり湖水採取に成功し、溶存成分や安定同位体比に関するデータが得られてきた。従来の手法では、ロープ操作に労力と時間を要すること、ボトルに十分な量の湖水が入らない場合があること、引き上げ時のロープの動揺によって湖水が失われること等が課題であった。

今回試行した方法では、滑車と重しを用いたことで、ボトルを容易に自然降下させた。重しにより、ボトルは完全に湖水中へ沈み、滑車を用いてボトルを引き上げたために主ロープの動揺が少なく、ボトルにほぼ満水の湖水が得られた。重しは、引上げ作業前にボトルから自然に離れたため、少ない労力で引き上げ作業を行ない、実質的な作業時間は30分程度であった。

このように、簡単で確実な採水作業が可能となったことは、火口湖に関する研究ばかりでなく、火山学的に大きな意義がある。阿蘇火山は国内有数の活動的火山であり、その活動火口に湯だまりが存在する。このような火口湖で湖水試料を繰り返し得ることで、火山噴火予測や、火山体浅部熱水系に関する研究を進めることが期待できる³⁾。

一方、本研究で述べた作業は、火口に架線されたロープを使用することを前提としている。架線作業には少なくとも数名の人員が必要で、ときに火口内への転落の危険が伴う。今後、架線作業の効率化、例えば火口縁からロープを他方へ射出する等の方法を確立できれば、作業の安全性を高め、作業にかかる労力をさらに減らすことができるだろう。

6.3 採泥技術

湖に接近できない阿蘇火山・湯だまりでは、これまで湖底泥の採取が試みられたことはない。採泥器を湖水中に降下させるために必要な重しは、その引上げ作業を困難にする。この課題は、紙紐と重しを組み合わせることで解決した。その結果、阿蘇火山として初めて湖底泥が採取され、湖底堆積物の大部分はシルトや粘土サイズの粒径をなす硫黄であることがわかった(宮縁・寺田, 2008)。

一般に海底をドレッジするために用いられる装置は、その重量や耐酸性の問題から火口湖での使用は困難なため、本研究では簡便な採泥器を製作した。試料の引き上げ時に点検したところ、採泥器のフレームとして用いたステンレス素材表面がわずかに黒変色している部分も認められたが、目立った腐食はなく、十分な強度を保持していた(図 5)。袋内部に置いた変性 PTFE 製のドーナツ型ブロックの、穴内部に保持されている試料は、ドレッジの際の僅かな時間を除いて、ステンレス素材と直接接触れることはない。従って、採泥器の腐食が試料へ与える影響は少ないと考えられる。試料への汚染を定量的に評価する場合には、例えば変性 PTFE 製の採泥器を製作してドレッジを行なう等、さらなる検討が必要である。

湯だまりの湖面標高は、時とともに浅くなっていることが指摘され¹⁵⁾、その原因として、火口壁崩落物の供給と、湖水に由来する沈殿物による湖底標高の上昇が考えられる。今回採取された湖底泥の大半は、沈殿物であった¹⁶⁾。特に沈殿物の種類・沈殿速度を見積もること、湖底泥を繰り返し採取して時間変動を明らかにすることは、湖水内で進行する化学反応速度や、火口縁で観測される火山ガス濃度変動原因の定量的理解を可能にするであろう。今回採取した泥の詳細な分析結果は、別に発表する。

謝 辞

火口への主ロープ架線作業にあたり、地形的に条件が悪く、作業により危険が伴う東側は、京都大学火山研究センターの宇津木 充氏、井上寛之氏、森林総合研究所九州支所の宮縁育夫氏が担当しました。ロープ操作等の労力が必要な西側は、気象庁阿蘇火山防災連絡事務所の後小路義弘氏、山下隆丞氏および著者が担当しました。阿蘇火山博物館の須藤靖明氏と

吉川美由紀氏には、現地作業のほか、同博物館が運用する火口カメラを用いてご支援頂きました。以上、現場作業にご協力くださった方々に深く感謝します。また、京都大学地球熱学研究施設の大沢信二氏には、架線作業や滑車使用、使用素材について経験に基づいた貴重な情報を頂きました。東京工業大学火山流体研究センターの大場 武氏、北海道大学有珠火山観測所の大島弘光氏には、当地の火口湖における水温度観測方法について教えて頂きました。阿蘇火山防災協議会および阿蘇火山博物館には、電気使用の快諾を頂いたほか、現地作業について様々な便宜を図って頂きました。本観測で用いた浮箱は東京資材株式会社、テフロン製アンカーおよびテフロン製ロープは熊谷化成株式会社が製作するとともに、両社から有益な情報を頂きました。国際航業株式会社には、中岳火口群周辺の数値標高データをご提供頂きました。本研究の一部には、文部科学省科学研究補助金・基盤研究(B)(課題番号:19310116, 研究代表:鍵山恒臣)と、京都大学生存圏研究所 2008 年度萌芽ミッションプロジェクト研究費を使用しました。

本論文は、日本地熱学会誌第 31 巻に掲載された文章および図表を、一部改変したものです。

引用文献

- 1) Pasternack, G. B. and Varekamp, J. C. (1997): Volcanic lake systematics I. Physical constraints, *Bull. Volcanol.*, 58, 528-538.
- 2) Varekamp, J. C., Pasternack, G. B. and Rowe Jr., G. L. (2000): Volcanic lake systematics II. Chemical constraints, *Volcanol. Geotherm. Res.* 97, 161-179.
- 3) 高野穆一郎 (2001): 活動的火山湖の地球科学, *温泉科学*, 50, 161-182.
- 4) Hurst, A. W., Bibby, H. M., Scott, B. J. and McGuinness, M. J. J. (1991): The heat source of Ruapehu crater lake; deductions from the energy and mass balances, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 46, 1-20.
- 5) Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (2000): D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios of water in the crater lake at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 97, 329-346.
- 6) 大沢信二・須藤靖明・馬渡秀夫・下田 玄・宇津木 充・網田和宏・吉川 慎・山田 誠・岩倉一敏・恩田祐二 (2003): 阿蘇火山の火口湖「湯溜り」の地球化学的性質, *九州大学地熱・火山研究報告*, 12, 62-65.
- 7) 吉川 慎・須藤靖明 (2004): 阿蘇火山中岳第 1 火口の温度変化と火山活動, *京都大学防災研究所年報*, 47B, 803-807.
- 8) 吉川 慎 (2005): 阿蘇火山中岳第 1 火口の温度変化と火山活動, *東京大学地震研究所技*

術研究報告, 11, 20-23.

- 9) Terada A., Hashimoto, T., Kagiya, T. and Sasaki, H. (2008): Precise remote-monitoring technique of water volume and temperature of a crater lake in Aso volcano, Japan: Implication for a sensitive window of volcanic hydrothermal system, Earth Planets Space, 60, 705-710.
- 10) Ryan, P. J., Harleman, D. R. F. and Stolzenbach, K. D. (1974): Surface heat loss from cooling ponds, Water Resour. Res., 10, 930-938.
- 11) Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (1994): Water, heat and chloride budgets of the crater lake Yugama at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, Geochemical J. 28, 217-231.
- 12) 小坂丈予・平林順一・小沢竹二郎(1984): 阿蘇火山の地球化学的観測, 阿蘇火山の集中総合観測(第2回1981)報告, 82-84.
- 13) Hurst, A. W. (1980): Temperature observations of Crater Lake, Mt. Ruapehu, New Zealand, using temperature telemetry buoys, Bull. Volcanol., 43, 121-129.
- 14) 寺田暁彦・吉川 慎・橋本武志・鍵山恒臣・佐々木 寿(2008): 阿蘇火山中岳火口湖(湯だまり)における水温・溶存成分濃度の変動解析, 日本火山学会講演予稿集, 38.
- 15) Hashimoto, T., Ikebe, S. and Yoshikawa, S. (2003): Water level of the crater lake (Yudamari) of Nakadake, Aso Volcano, Annual Rep. Inst. Geotherm. Sci, Kyoto Univ., FY2002, 11-12.
- 16) 宮縁育夫・寺田暁彦(2008): 阿蘇火山中岳第一火口で採取された湖底堆積物(予報), 日本火山学会講演予稿集, 39.

付録. 水温観測システム1号機の概要

水温観測システム1号機を, 2008年4月25日に設置した。本機は, 2号機を設計するための試験的装置と位置づけ, 市販の安価製品のみで構築した。1号機を用いて4章で述べた設置手順を確認するとともに, 湖水温度や浮箱内部温度をモニタリングし, 設置後の経過を観察した。

1号機の浮箱として使用したのは, 食品保存等の用途として市販されている発泡スチロール製ケースで, 大きさは 290 × 200 × 200 mm, 箱の肉厚は 20 mm, 重量は 0.110 kg である(図 A1)。浮箱内部には, 2号機と同様の無線温度計 RTR-71 を収め, 電源として CR123A 電池を 6 本並列している。すなわち, 電池容量としては 1 年前後持続すると思われる。

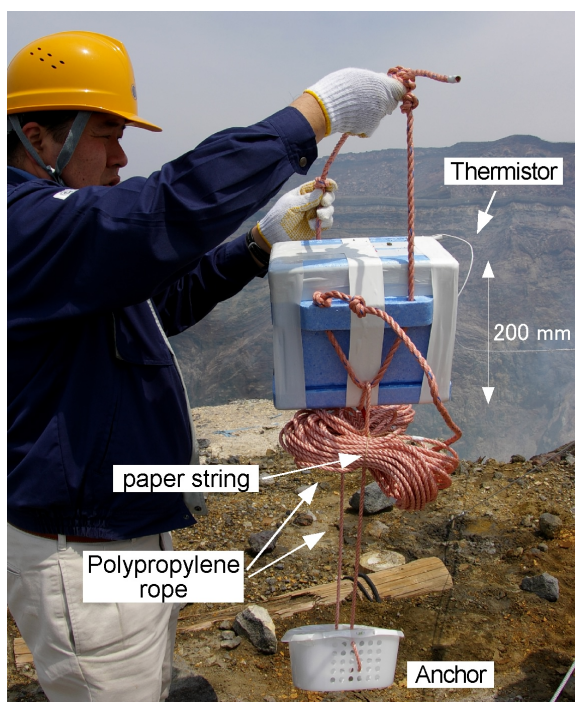


図 A1. 水温観測ブイ1号機の写真。

浮箱を湖底へ係留するためのアンカーとして、家庭用のポリプロピレン製の籠(220 × 160 × 120 mm)に、ポリエチレンで被覆された2 kgの漬物石を収めた。アンカーと浮箱をつなぐロープは、直径12 mmのポリプロピレン製ロープを用いた。

図 A2(a)に、設置当日の2008年4月25日の写真を示す。設置80日後にあたる同7月10日に撮影された写真(図 A2(b))と比較すると、時間の経過とともに浮箱の退色が見られる。一方、浮箱に大きな損傷はなく、湖底へ降下したアンカーも機能している。設置から100日以上が経過した7月30日においても、1号機は正常にデータを送信している。

送信されてきた温度データによれば(図 A3)、設置直後に水温データが不規則に変動するとともに、箱内部温度が上昇した(図 A3)。この温度データから、浮箱は姿勢が不安定となって水温センサが水面上に露出・水没を繰り返す状態になったこと、浮箱内部に浸水が起きたことが示唆される。

このような浸水は、浮箱が設置直後に横倒しとなったため、蓋の継ぎ目から発生したのであろう。浮箱が、4月(図 A2(a))に比べて7月(図 A2(b))はやや沈んでいることから、実際に顕著な浸水が起きたことが明らかである。なお、記録された温度の不安定な変動は半日程度で改善し、その後は姿勢が安定した。1号機は、2号機と同様に箱内部に紙おむつを敷き詰め、ポリエチレン製ビニル袋で装置を密閉している。これらの対策は、精密機械を保護するためにある程度有効と思われる。

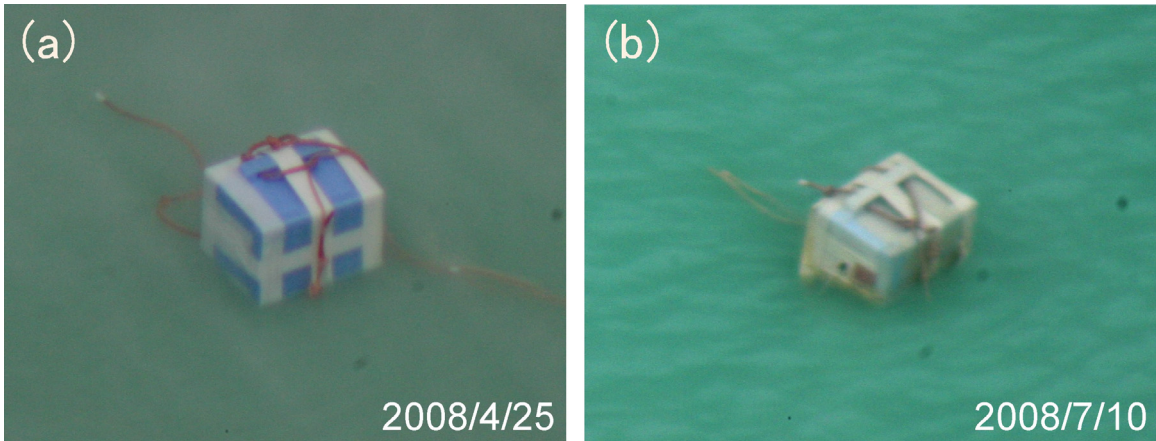


図 A2. (a)湖面へ設置された直後(2008年3月25日)の水温観測ブイ1号機と, (b) 設置から76日が経過した後(2008年7月10日)の水温観測ブイ1号機の写真。

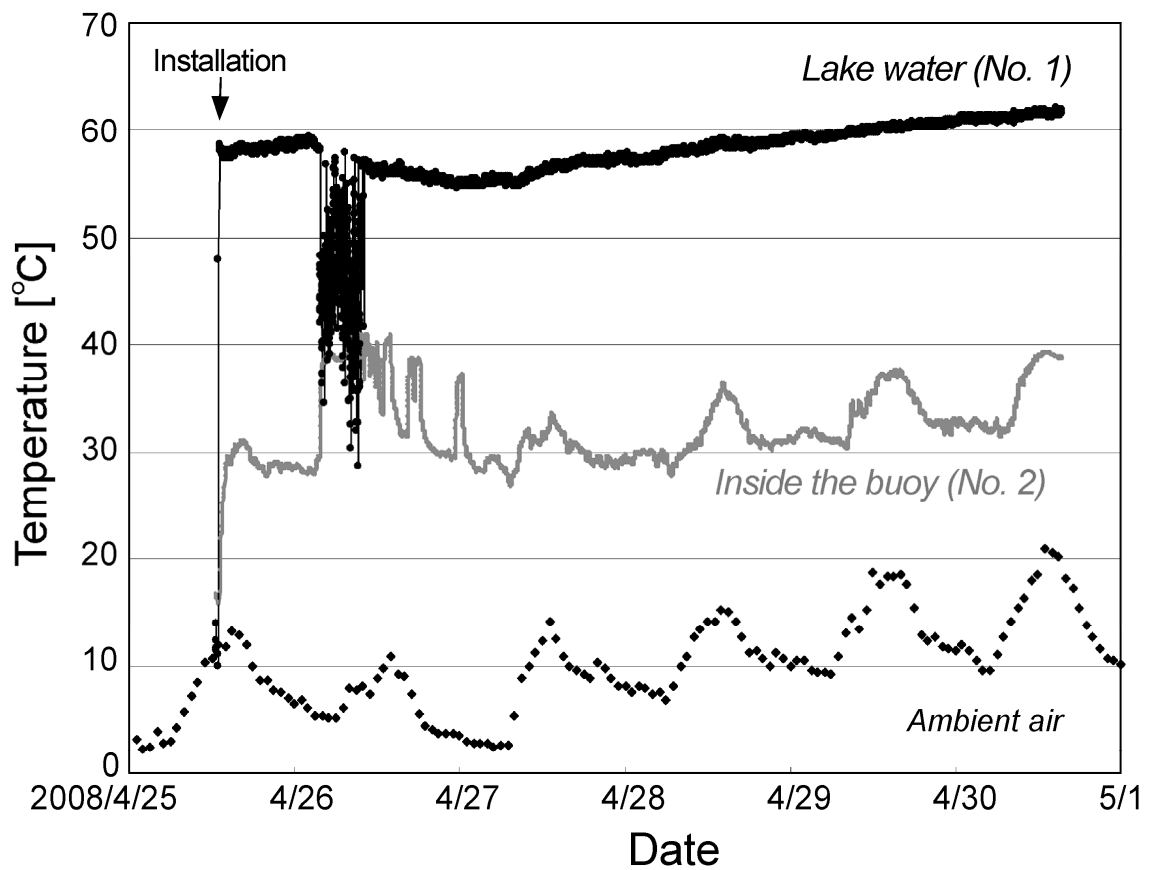


図 A3. 水温観測ブイ1号機から送信された水温およびブイ内部温度と, 気象庁阿蘇火山測候所(湯だまりから西方約1.2km)で観測された気温。