

阿蘇火山中岳第一火口の熱活動

—2008 年度の位置付け—

京都大学大学院理学研究科

寺田 暁彦*

*現所属 東京工業大学火山流体研究センター

1. はじめに

阿蘇火山中岳第一火口には、非噴火期を通じて火口湖(以下では、湯だまりと呼ぶ)が形成されている。ときに 60–70 °C に達する水温^{1), 2)}は、草津白根火山・湯釜火口湖³⁾の 20 °C 前後と比較して著しく高く、このような高い水温が非噴火期を通じて維持されている例は、世界の火口湖⁴⁾と比較しても数少ない。

第一火口からの火山ガス放出は活発で、例えば SO₂ 放出量は、非噴火期を通じて 500 tonne/day 達する(例えば、気象庁火山活動解説資料など)。また、湯だまり湖面放熱率は 200–300 MW と見積もられている²⁾。すなわち中岳第一火口は、別府地域や三宅島火山とともに、国内最大級の放熱活動を続けている。

湯だまりの湖水の大部分は、雨水ではなく、湖底から噴出する流体である²⁾。湯だまり近傍の降水量は、阿蘇山測候所(湯だまりから約 1.2 km 西)周辺よりも平均 1.1 倍あり、降水 1 mm に対する湖水増加量は平均 113 m³ である。この結果から、湯だまりへの年間降水流入量 4.0 × 10⁵ m³ と見積もられる。それに対して、湖表面から蒸発で失われる水量は年間 3.4 × 10⁶ m³ に達し、湖水維持に対する降水の寄与は少ないことがわかる。

このように、湖面蒸発量の見積もりの不確定を考慮したとしても、湖水の大半が湖底供給された火山性流体であることが確実である。すなわち、湯だまりは火山の熱活動を直接反映して変動している。そこで本論文では、2006 年 7 月から実施してきた湖水位、湖面積および湖水体積の観測データに基づき、湯だまりの熱活動を定量的に評価する。また、2008 年 12 月の火山灰噴出、2009 年 2 月の熱水噴出事象について述べ、集中総合観測が実施された 2008 年度における、中岳第一火口の熱的活動の位置付けを考える。

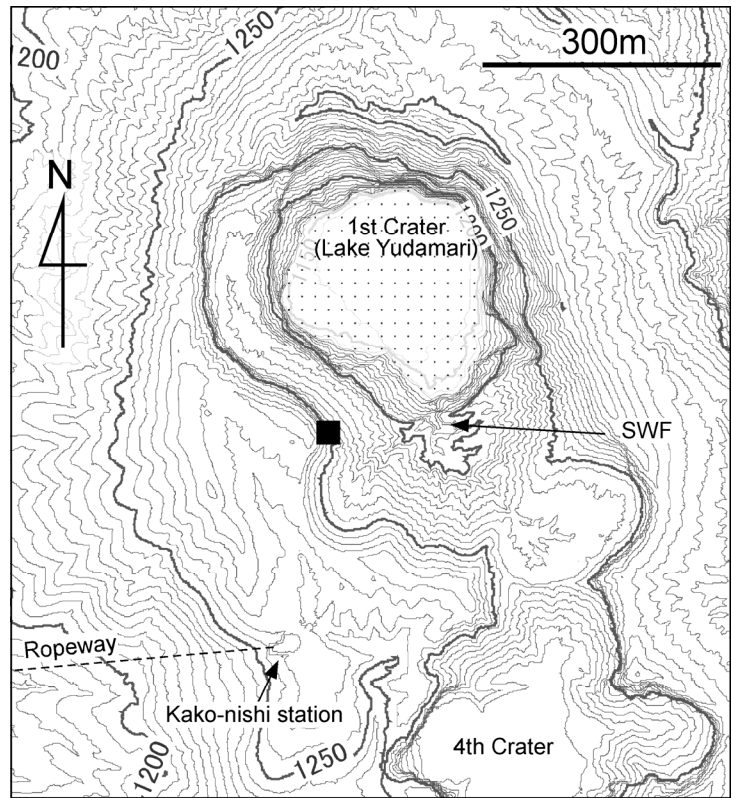


図 1. 阿蘇火山中岳第一火口周辺の地形図。コンターは 5 m 間隔である。黒四角は、阿蘇火山博物館が運用する火口監視カメラ、通称 A カメラの位置を示す。本地形図の描画に用いた数値標高データは、国際航業株式会社から提供された。

2. 湯だまりの活動

2.1 過去十数年の活動

阿蘇火山中岳第一火口周辺の地図を示す(図 1)。第一火口には、1988 年に始まった顕著な噴火活動⁵⁾がほぼ終息した 1993 年以降、湯だまりが形成されている。このように、非噴火期を通じて湯だまりが維持されることが中岳第一火口の特徴であり、湯だまりは過去 1,500 年にわたり形成・消滅を繰り返してきた⁶⁾。

湯だまりの湖水量は、著しく変動することが知られている⁷⁾。気象庁は、湖面積を火口縁から目視により判断し、湖水面積を 10 - 0 割と表現して水量変化を記録している。それによれば、湖水量は 1995 年以降、8 年間にわたり 10 割が維持されてきた。その後、2003 年 6 月には 9 割へと減少し、2005 年 6 月には 1 割となった。2003 年以降の顕著な湖水量変化は、B 型地震や孤立型微動の発生頻度増加(気象庁火山活動解説資料)や、火口湖底での小噴火の発生⁸⁾などと同期したものである。

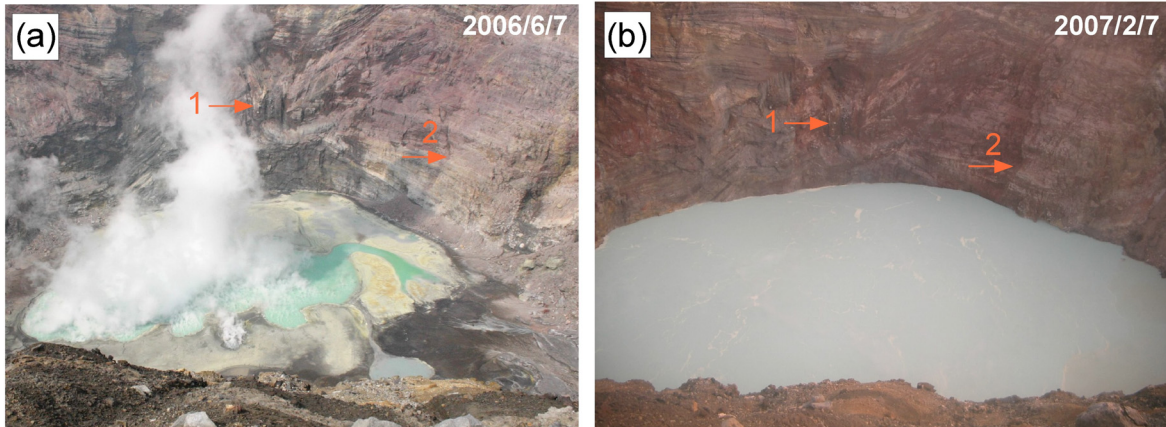


図 2. 阿蘇火山博物館火口監視カメラ A 付近から撮影した, (a) 2006 年 6 月 7 日および, (b) 2007 年 2 月 7 日の第一火口の写真。数字を付した矢印は, (a)(b)のそれぞれ同じ位置を表す。

2005 年 7 月以降は, 湖水量は増減を繰り返した。図 2(a)に, 湖水量 5 割と評価された 2006 年 6 月における第一火口の写真を示す。主たる噴気は火口底北側(画面上の左)から上がっているほか, 火口底西側にも, 噴出口の存在を示す, やや小さなお湯溜まりが複数見られる。また, 湖水が干上がった直後の火口底は黄色を呈しており, 2008 年に採取した湖底泥の分析結果⁹⁾に矛盾しない。図 2(a)が撮影された一ヶ月後には, 梅雨時期の降水流入によって, 湖水量は 10 割(図 2(b))へ増加した。

2.2 2006 年以降の水位変動

湖水量変化を, 長期間, 簡単かつ正確に測定するための自動撮影カメラを, 2006 年 7 月に火口縁(図 1 の黒四角)に設置した。本システムで得た画像と, 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, 1 m グリッド, 鉛直誤差 15 cm の数値標高モデル(Digital Surface Model, DSM)と比較することで, 湖水位を 30 cm 程度, 湖水量を 5000 m³程度の解像度でモニタリングした²⁾。

図 3(a)に, 2009 年 1 月までの水位変化を示す。毎年 6-7 月にかけて, 梅雨時期の大量の降水流入による急激な水位上昇が認められる。一方, 緩やかな水位増加が, 目立った降水がなかった 2006 年 9 月から 12 月にかけて認められる。その後, 2007 年に入ると, 湖水位は低下傾向となった。よく見ると, 毎年 9-11 月頃は, 湖水位の増加(2006 年), あるいは低下傾向の鈍化(2007 年および 2008 年)が認められ, これらは地下水流入等の季節変動を反映したものと思われる。

このように得られた水位と DSM とを比較することで, 湖水面積や湖水量の変動を精密に計算

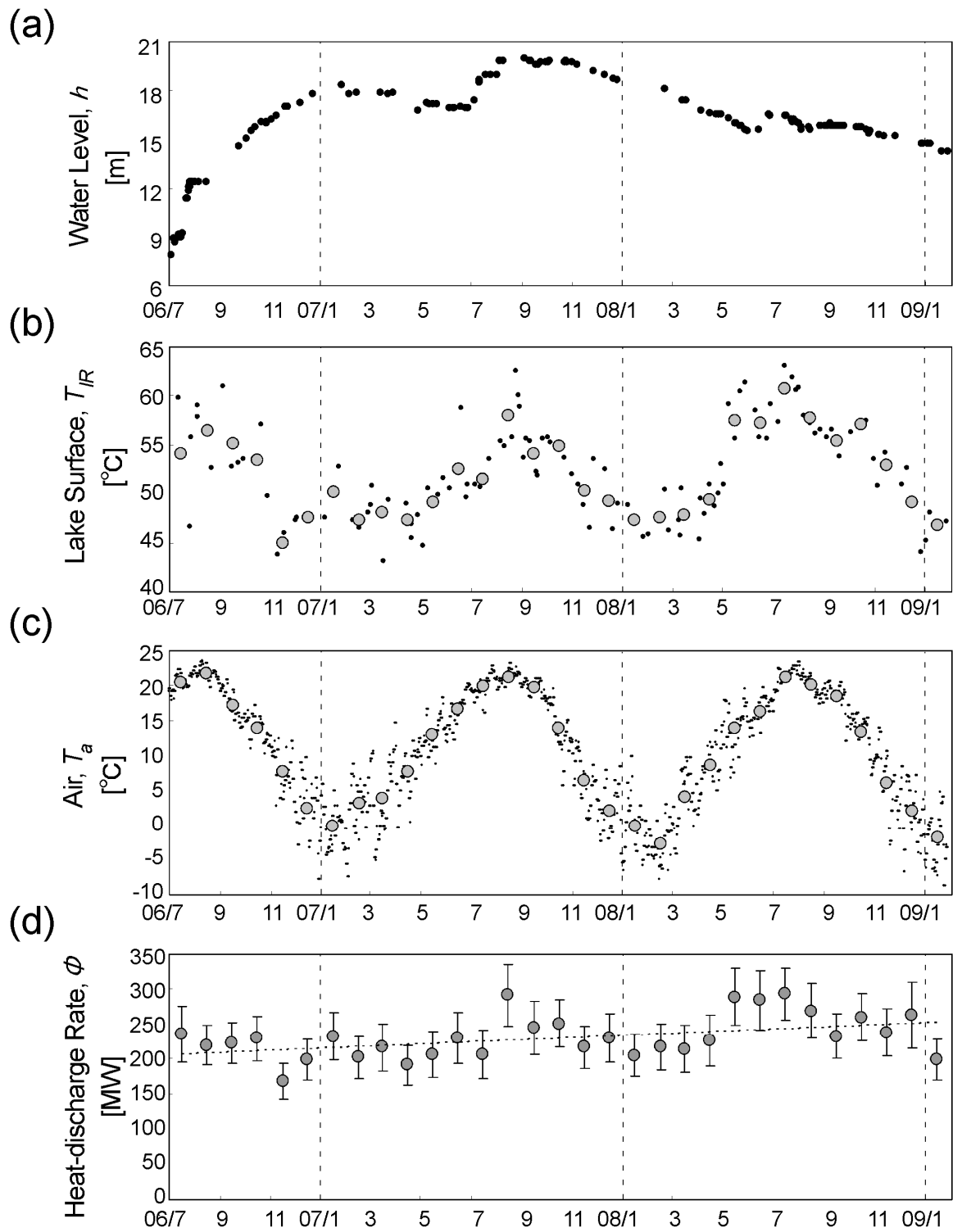


図 3. 阿蘇火山中岳第一火口の(a)水位, (b) 湖表面温度(気象庁提供資料), (c) 阿蘇山測候所における気温, および(d) Ryan et al (1974)の式に基づいて計算された湖面放熱率。

することが可能である。次に述べる水温変動と合わせて、湯だまりの湖底から噴出する流体について、様々な情報が得られている(例えば、寺田・橋本, 2008 など)。

2.3 2006 年以降の水温および放熱率変動

湖水温度は、水量とともに火口湖の熱活動を表現する重要な観測量である。湯だまりの湖表面温度は、従来は赤外放射温度計を用いて遠隔測定されてきた(気象庁火山活動解説試料)。図 3(b)(c)に、気象庁が測定した湯だまり表面温度、気象庁阿蘇山測候所(火口から西へ 1.2 km, 湖面とほぼ同じ標高)で記録された気温を示す。水温には、15 °C 前後に達する季節的変動が存在することがわかる。このような水温変動は、主として気温と風に支配された湖面蒸発量に規定されており、気象条件を考慮した数値モデルにより再現できる^{10), 11)}。

なお、水温変化をより詳細に観測するために、2008 年 4 月および 8 月に水温観測ブイ^{12), 13)}が投入され、湖水温度を 1 - 5 分程度の時間分解能で連続観測することが可能になった。2009 年 2 月に投入した水温観測ブイは、2009 年 4 月現在も運用中である。

湖表面温度、湖表面積および気象データに基づき、次元解析に基づく Ryan et al. の式¹⁴⁾を用いて湖面放熱率を推定した。ここで、湖表面温度のデータが少ないため、各月の 1 ヶ月平均値を使用する。計算に必要な気温や風速などの気象データも、1 ヶ月平均値を使用する。

計算された湖面放熱率(図 3(d))には、気温や水温に見られた著しい季節変化は認められず、2 年半にわたり安定した放熱活動が継続していたことがわかる。ただし、長期的には湖面放熱率が増加傾向にある。例えば 2006 年の年平均放熱率は 210 MW であるが、07 年は 230 MW, 08 年は 250 MW である。

なお、2009 年 1 月になると、湖面放熱率は 200 MW へと低下した。2008 年 12 月下旬以降、それまで水没し、湖水へ熱と物質を供給していた南壁噴気孔群の下部が、湖水位低下によって完全に露出した。そのため、同噴気孔群から供給される熱・物質は、大気へ直接放出されるシステムへと変化した。このことが、2009 年 1 月に湖面放熱率が低下した原因と考えられる。

3. 南壁噴気孔群の活動

3.1 温度変化

南壁噴気孔群の表面温度は、気象庁阿蘇山測候所(2008 年 4 月以降は阿蘇山火山防災連絡事務所)により定期的に計測されている。通常、温度観測は、A カメラ(図 1)付近などから赤外

Red hot glow at a crater lake in Aso volcano, Japan
Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University



2007/11/26

Photo by Shin Yoshikawa

図 4. 阿蘇中岳第一火口，南壁噴気孔群の赤熱現象と湯だまり。2007 年 11 月 26 日，吉川 慎氏撮影。

放射温度計および熱赤外カメラによって実施され，結果は火山活動解説資料などを通じて随時公表されている。

これらの資料によれば，2006 年における南壁噴気孔群の温度は 100 °C を下回っていた。2007 年に入って温度は上昇しはじめ，同年 8 月には 300 - 400 °C で推移するとともに，夜間には火映現象として認識されるようになった(図 4)。火映現象は，2009 年 4 月においても継続している。2009 年 12 月以降は，ときおり 500 °C 近い温度が計測されている。

3.2 火山灰噴出

2008 年 2 月に，おそらく南壁噴気孔群を噴出源とする火山灰が，火口縁周辺の積雪の上に堆積している様子が確認された¹⁵⁾。

2008 年 12 月 23 日以降，火口周辺において，ごく少量の火山灰の堆積が認められるようになった。これらの火山灰は，火口縁から数 100 m 以内の積雪面上で認識できる程度であった(池辺・宮縁，私信)。また，阿蘇火山博物館が運用する火口監視カメラにおいても，南壁噴気孔群から火山灰噴出が起きる様子が記録されるようになった(須藤・吉川，私信)。

同 26 日には，南壁噴気孔群の一部から，火山灰が連続的に噴出していた(図 5)。噴煙の噴



図 5. 南壁噴気孔群の 08-1 火孔からの火山灰噴出。2008 年 12 月 26 日 14 時頃, 阿蘇火山博物館 A カメラ(図 1)付近から撮影。

出口付近では赤茶色で, 100 m 程度の高さに至るまでに周辺の白煙に紛れる。従って, この噴煙は, 遠方から通常の白色噴煙と区別できない程度であった。翌 27 日の噴煙は, 噴出口から高さ 30 m 程度の範囲が灰色を呈していたが, 火山灰噴出量は減少したように見えた。赤外カメラによる計測では, 27 日の 08-1 火孔の最高温度は 598 °C であった。

このような火山灰を噴出している火孔を, 須藤⁷⁾が過去に用いた噴出口の命名手法に倣い, 「08-1 火孔」と呼ぶ(図 6)。火山灰噴出は, 08-1 火孔の隣に形成された「08-2 火孔」からも認められる。08-1 と 08-2 火孔の長径は, 合計 20 m 前後と思われる。

同 27 日夜間には, 阿蘇火山博物館の A および B カメラにより, 08-1 および 08-2 火孔において明瞭な火炎現象が観察された。火炎の高さは 10 - 20 m 程度と推定される。火炎現象の発現は, 噴煙にテフラが含まれていること, そのテフラが高温であることを意味する。さらに 08-1 火孔からは, 数分に 1 回程度の頻度で, 放物線を描いて飛行する赤熱した噴石が観察された。これら噴石の到達高度・水平飛行距離は 10 - 20 m 程度と思われる。

2009 年 4 月現在においても, ごく少量の火山灰噴出や, 火炎および赤熱現象は継続している(池辺, 私信; 気象庁火山活動解説資料)。08-1 および 08-2 火孔は, ほぼ連結して深さ不明の火孔となった。

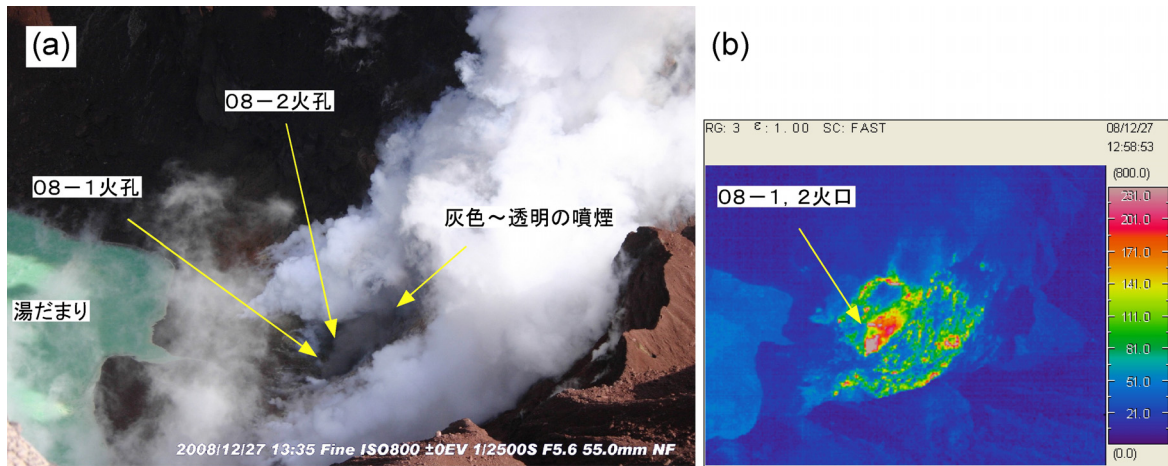


図 6. 噴煙を上げる南壁噴気孔群の (a) 可視画像, および (b) 赤外画像。2008 年 12 月 27 日 13 時頃, 阿蘇火山博物館 A カメラ(図 1)付近から撮影。

4. 湯だまりの異常活動－2009 年 2 月 6 日の熱水噴出－

4.1 概要

2009 年 2 月 6 日 01 時 16 分頃, 第一火口付近が震源と思われる, 振幅の大きな地震が観測された。同時に, 阿蘇火山博物館が A カメラ(図1)に設置しているマイクロフォンにより, 火口壁の崩落とは異なる音が記録された(吉川, 私信)。火口から約 3 km 離れた阿蘇火山博物館屋上に設置された気象庁監視カメラによれば, 同時刻に有色噴煙や噴煙柱が高く上がるなど, 明らかな噴煙の変化は認められなかった(福岡管区気象台, 私信)。

気象庁が実施した同日 09 時 50 分頃の現地観測によれば, 湖面を漂う浮遊硫黄の量が, 普段よりも明らかに多かった。また, 湯だまり湖面の北側が薄い灰色に, 中央から北側が乳緑色に変色していた。京都大学および森林総合研究所が 14 時頃に行った現地観測によれば, 湖面変色は認められなかった。さらに, 2008 年に湯だまり中央部に設置した水温観測ブイ 1 号機と, 同西部に設置した 2 号機^{12), 13)}が, 両機とも所在不明となった。本イベントに明らかに関係すると思われる火山灰の堆積は, 火口縁において確認できなかった。

4.2 観測結果

本事象の前後にあたる, 2009 年 2 月 2 日 14 時と 6 日 14 時 50 分の水位計測用画像を, Terada et al.の方法²⁾を用いて解析した。その結果, 本事象後に, 湖水位は 60 cm, 湖水体積は

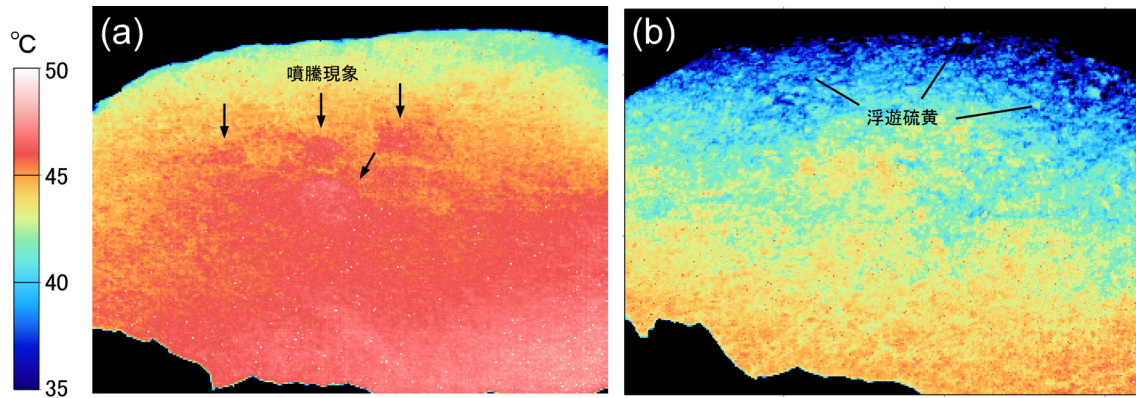


図 7. 阿蘇火山博物館 A カメラ(図 1)の上から、5 秒間隔で撮影された 60 枚の画像を用いて、各ピクセルの最高温度を出力して合成した赤外面像。(a) 2009 年 2 月 2 日 10 時 55 分から 11 時 00 分、(b) 2009 年 2 月 6 日 14 時 45 分から 14 時 50 分の画像から作成したもの。矢印は、火口底からの温度の高い流体の湧出口に相当すると思われる、やや温度の高い領域。

26,000 m³ 増加したことがわかった。これに対して、山上において 2 月 3 日に観測された約 40 mm の降水に対応する流入量は 4,500 m³ と概算され、湖水増加を降水だけで説明することは難しい。2006 年 7 月以降、40 mm 程度の降水で湖水量が明瞭に増加した例はないことから、観測された湖水増加は、2 月 6 日未明の事象に対応したものと考えられる。

増加した約 20,000 tonne という湖水量は、通常、湖底噴出していると考えられる流体量の 3 - 4 日分に匹敵し、その熱エネルギーは約 4×10^6 MJ と概算される。この規模を最近の他火山での噴火と比較すると、例えば 2009 年 2 月 2 日未明に発生した浅間山噴火の、100 分の 1 程度に相当する。

湖表面温度は、本事象直前の 2 月 2 日に詳細な観測を行なっていた。すなわち、湖面を漂う湯気が温度測定に与える影響を軽減させ、より正確な温度計測を行なうため、5 秒間隔、5 分間連続して赤外面像を取得していた。このように得られた 60 枚の画像を重合し、各ピクセルの最高温度を出力させた合成赤外面像を図 7(a)に示す。同様の観測を、イベント直後の同 6 日 14 時頃にも行なった(図 7(b))。両者を比較すると、イベントの前後で湖表面温度は 3 °C 低下したことがわかった。

4.3 解釈

2008 年に設置した 2 台の水温計は、それぞれ、重量 1 kg のアンカーで湖底に係留^{12),13)}されていたにも関わらず、本事象後に所在がわからなくなった。このことは、2 月 6 日の事象の際に、湯だまりにおいて強い水流が一時的に実現したことを意味する。阿蘇火山博物館のマイクロフォ

ンで記録された異音も、このような強い水流の発生に関係するのであろう。

このような異常水流、湖面変色、大量の浮遊硫黄の発生は、湖底から急激な熱・物質噴出が発生したことを示唆する。一方、湖水温度は 3 °C 低下していたことから、噴出流体の温度があまり高くなかったことがわかる。もし火山ガスなど気相に富む高エンタルピー流体が噴出したならば、湖水温度は上昇し、湖面蒸発量の増加によって湖水量は低下する¹⁶⁾。

以上のことから、2月6日未明、液相に富む熱水が湖底から噴出したと思われる。一方、監視カメラによれば、異常な噴煙は発生していない。噴出した熱水が液相に富んでいいため、周辺大気を取り込んで浮力を獲得する顕著な噴煙は、形成されなかったと思われる。湖面変色は、6日10時頃には観察されたが、同14時頃には解消されていた。おそらく、熱水噴出は、地震の起きた01時16分頃をピークとして、弱まりながらも10時頃まで継続していたのであろう。

湯だまりでは、火山活動の活発時に、しばしば土砂噴出と呼ばれる事象が発生してきた。一般に、このような土砂噴出は高さ数 100 m の噴煙柱と、火口周辺への降灰を伴う。2008年2月6日のイベントでは、土砂噴出の際に発生するものと同規模の地震が発生したが、噴煙柱や降灰は認められなかった。すなわち、噴出物の大半は熱水であったと考えられる。

5. 議論

本論文では、2006年以降の湯だまりの熱的活動を定量的に記述した。南壁噴気孔群については、2007年1月に温度上昇が始まり、同年8月以降の赤熱現象に至った(図4)。2008年2月には、火口縁周辺の積雪上に、おそらく南壁噴気孔群を給源とする火山灰の堆積が確認された¹⁵⁾。そして、2008年12月以降、火山灰を連続的に噴出する状態となった(図5, 6)。このように、同噴気孔群における熱活動の高まりは明白である。ただし、噴出している火山灰量はごく僅かで、噴気放熱率は、おそらく 100 MW を越えない規模と思われる。

一方、湯だまりからの放熱率(図3(b))からは、南壁噴気孔群のような顕著な熱活動の高まりは認められない。放熱率には3年間で2割程度の増加が認められたが、2009年1月には低下した。2009年1月の放熱率低下は、長期的に続いている水位低下に伴い、湖面下にあった南壁噴気孔群の全てが大気へ露出したためと解釈している。すなわち、湯だまり湖面放熱率の長期的変化も、南壁噴気孔群の活動を反映したものである。

以上のことから、2007年1月に活発化し始めた中岳第一火口南壁噴気孔群の熱活動は、2008年を通じて、ゆるやかに高まりつつあったと結論される。湯だまりの熱活動に明らかな活発化傾向は認められず、2009年2月6日の熱水噴出(図7)の前後においても、顕著な活動の変化は見出されていない。

このように、2007年以降に見られる南壁噴気孔群の熱活動の高まりと、湯だまりの熱活動は明確には対応せず、両者の熱供給システムの違いはよく分からない。一方、2009年2月に発生した熱水噴出事象は、詳細な観測を開始した2006年以降、初めての顕著な異常現象である。そして、20,000 tonne という噴出量は、火口底地下浅部に規模の大きな熱水貯留層が存在することを直接的に示している。このような熱水貯留層と、ふだん、湯だまりへ供給されている火山性流体との関係、南壁噴気孔群の活動、連続微動の発生機構、長周期微動の発生源となっているクラック、等との関係を相互に結び付ける観測データは、未だ少ない。中岳第一火口からの放熱率は、世界的にも有数の規模であり、このような大量の熱供給が、火口周辺で起きる様々な事象を駆動していると思われる。湯だまりを含む中岳第一火口周辺は、火山体浅部における流体輸送機構を研究するための、格好のフィールドと言える。

6. まとめ

中岳第一火口の熱活動を検討した。同火口の南壁噴気孔群は2007年1月に活発化し始めた。2008年度は、その熱活動がゆるやかに高まりつつある時期であったと位置付けられる。すなわち、南壁噴気孔群は2007年1月頃から温度上昇が始まり、同年8月には赤熱状態へ移行、2008年12月には、極僅かな量の火山灰が連続的に噴出する状態となった。湯だまりからの湖面放熱率は、例えば2006年の年平均放熱率は210 MWであるが、07年は230 MW、08年は250 MWと、年間20 MWの割合で増加した。この増加も、湖面下に位置した南壁噴気孔群の活動を反映したものと考えられる。湯だまりにおいては、2009年2月には、約20,000 tonneの熱水が湖底噴出する事象が、顕著な地震を伴って発生した。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、気象庁の松島正哉氏、後小路義弘氏には、観測データのご提供、データの解釈などを通じて大変お世話になりました。京都大学火山研究センターの吉川 慎氏をはじめとするスタッフの皆様、森林総合研究所九州支所の宮縁育夫氏、阿蘇火山博物館の池辺伸一郎氏、須藤靖明氏、吉川美由紀氏、北海道大学地震火山研究観測センターの橋本武志氏には、現地観測や火山活動に関する議論を通じて、多くの刺激を受けました。ここに記して、謝意を表します。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 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.
 - 3) 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.
 - 4) Pasternack, G. B. and Varekamp, J. C. (1997): Volcanic lake systematics I. Physical constraints, *Bull. Volcanol.*, 58, 528-538.
 - 5) 池辺伸一郎・渡辺一徳・宮縁育夫(2008): 阿蘇火山中岳 1988~1995 年活動期における噴火様式の変化, *火山*, 53, 15-33.
 - 6) 須藤靖明(2007): 阿蘇に学ぶ, 権歌書房, 319p.
 - 7) 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.
 - 8) Miyabuchi, Y., Ikebe, S. and Watanabe, K. (2008): Geological constraints on the 2003-2005 ash emissions from the Nakadake crater lake, Aso Volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 169-183.
 - 9) 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.
 - 10) 寺田暁彦・鍵山恒臣(2009): 活動的火口湖からの湖面蒸発量測定の新手法開発ーライダー技術の「安全・安心」への応用ー, 平成20年度生存圏萌芽・融合ミッションシンポジウム講演要旨集, 83-89.
 - 11) 寺田暁彦・鍵山恒臣・中村卓司・太田修史・橋本武志(2009): 阿蘇火山火口湖からの湖面蒸発量推定高精度化の試みーラマン・ライダーおよび水温観測ブイによる観測ー, 第4回阿蘇火山集中総合観測報告, 138-145.
 - 12) 寺田暁彦・吉川 慎(2009): 接近困難な強酸性火口湖における観測技術ー水温モニタリング・湖水および湖底泥の採取ー, 日本地熱学会誌, 31, 印刷中.
 - 13) 寺田暁彦・吉川 慎(2009): 接近困難な強酸性火口湖における観測技術ー水温モニタリング・湖水および湖底泥の採取ー, 第4回阿蘇火山集中総合観測報告, 85-104.
 - 14) Ryan, P. J., Harleman, D. R. F. and Stolzenbach, K. D. (1974): Surface heat loss from cooling ponds, *Water Resour. Res.*, 10, 930-938.
 - 15) 宮縁育夫・池辺伸一郎(2008): 阿蘇火山中岳で2008年2月に噴出した火山灰, *火山*, 53,

201-206.

- 16) 寺田暁彦・橋本武志(2008)：阿蘇の火口湖「湯だまり」が 1,500 年間も維持されている理由，地球，号外，60，121-132.