

(1) 実施機関名：

東京工業大学

(2) 研究課題(または観測項目)名：

活動火口に形成された火口湖における熱活動モニタリング

(3) 最も関連の深い建議の項目：

2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

(2) 地震・火山噴火に至る準備過程

(2-2) 火山噴火準備過程

イ. 噴火履歴とマグマの発達過程

(4) その他関連する建議の項目：

(5) 本課題の 5 か年の到達目標：

(本課題は H24 年度に課題登録されたため 2 か年の到達目標)

活動火口に火口湖を有する阿蘇火山と草津白根火山において、他火山では実現不可能な高い精度で熱活動をモニタリングする。陸上に存在する噴気や噴煙の熱流量測定は精度が悪く、一般に数倍～1桁程度の不確定を持つ。これに対して火口湖を用いた熱流量解析は、10%程度のエネルギー変化でも十分に捉えることができる。この特徴を活用し、阿蘇および草津白根火山で各種の物理観測をテレメータし、得られたデータを数値モデルで解析することで、湖底熱活動を常時解析するシステムを構築する。

(6) 本課題の 5 か年計画の概要：

(本課題は H24 年度に課題登録されたため 2 か年計画の概要)

阿蘇火山では、熱活動の大半が火口湖に集中している。この火口湖の水温を精度よく測定するために、強酸性高温環境下でも長期間運用可能な水温観測ブイを開発し、水温常時観測およびテレメータを目指す。得られた水温データは、気象観測結果とともに東京工業大学内のサーバへ送信し、熱流量計算を行う。

草津白根火山の火口湖では、水位・水温の安定的な連続観測を実現している。これに気象観測装置を追加することで、熱流量計算を可能とさせる。なお、同火山では火口湖以外にも噴気活動が広範に点在していることから、軽飛行機を用いた空中赤外観測を実施して、火口湖を含めた全山的な熱放出量を明らかにする。

(7) 計画期間中(平成 21 年度～25 年度)の成果の概要：

1. 阿蘇・湯だまりにおける水温観測

高温強酸性に耐える、小型軽量ブイの開発を行った。ブイには無線式温度計と、耐酸性能を高めた太陽電池パネルを搭載し、2-3 年程度の長期連続観測を目指した。また、得られた水温データに基づき、湖底熱活動の変動を定量的に評価し、湖水変動のメカニズムを検討した。

1.1 ブイを用いた水温観測の経緯

転覆した観測ブイ(2号機, 2011年12月設置)に代わり、波に対する復元力を大幅に強化した水温観測ブイ(3号機)を2012年3月末に投入することで湯だまりの水温連続観測を再開した。同ブイが

1分間隔で計測した水温は、30分おきに東京工業大学のサーバへ自動伝送され、WEBを通じて誰でもデータを閲覧できる仕組みを運用した。

湯だまりは2012年5月末にほぼ干上がり、水温観測も停止したが、梅雨期の大雨で水位が回復した同6月中旬から観測を再開した。しかし、7月5日には水温計の1台が不調となり、同9月にはもう一台の水温計も通信不能となった。その後、ブイは火口壁の崩落に巻き込まれて所在不明となった。

2012年3月に投入した3号機は、ブイを湖底へ係留する仕組みが機能せず、しばしば湖面を漂流した。これが、火口壁崩落に巻き込まれた原因である。おそらく、設置時にアンカーロープが絡まるなどして、アンカーが正常に降下しなかったのであろう。また、通信途絶した理由は特定できていない。ブイ内部温度は、事前の試験通り、無線機の動作限界の50℃を十分下回っていたことから考えると、装置の腐食が不調原因として有力であろう。フッ素樹脂によるコーティングをもってしても、耐腐食性の問題が残されている。

1.2 研究成果

水温直接観測の結果、2012年4月の水温は70℃を超えており、この時期としては10℃以上高いことが分かった。この変化は、気象庁が火口縁から実施している赤外カメラを用いた定期観測では捉えられておらず、水温直接観測の有効性が示された。水温観測ブイから得たデータに基づいて計算した結果、湖面放熱率は通常(220 MW)の2倍以上の、500-600 MWまで増加していることが分かった(図1)。

同時期、火山性微動の振幅が顕著に増大するとともに、湯だまりの水位が1か月余りの間に約5mも低下した。日減少率は-9 cmと、これまでの最大の約4倍のペースであった。湯だまり湖水に関する熱・エネルギー収支を計算したところ、同時期、湯だまり湖底からは高温火山ガスの寄与が増していることが分かった。すなわち、2012年に湯だまりで観察された湖水消滅は、地下からの火山ガス供給率の増大による湖面蒸発が原因と考えられる。これは、2011年に起きた湖水減少と対照的である。さらに、同年3月に採取した湖水の溶存成分分析によれば、2011年12月と比較してシリカ濃度が明瞭に増加しており、2011年3月29日には湯だまりとしては過去最高の580 mg/Lが得られた。これは、地下浅部熱水系の温度が上昇していたことを示唆する。このような浅部熱水系の変動と、火山性微動の振幅変化が同期した事実は、微動発生機構や火山活動評価という観点から興味深い。

2012年6月中旬に湯だまりが再生して以降、水温や火山性微動の振幅は通常に戻り、急激な水位低下も収まった。以後、湯だまりは安定して維持されている。

1.3 湯だまり消滅以降の熱活動評価

2012年以降、湯だまりの湖水量は少ない状態で推移した。特に2013年9月以降は火口湖がほぼ消滅し、湖底噴出した火山ガスは、湖水の関与を殆ど受けずに大気へと放出される状態に移行した。このため、水平風で棚引く噴煙の形状に基づいて放熱量を推定する方法(Briggs, 1969; Kagiya, 1981)を用いて、第一火口からの放熱量推移を検討した。噴煙解析に用いる映像は、気象庁福岡管区気象台が阿蘇火山博物館に設置している監視カメラで得られたものである(許諾番号:福気業第183号, 263号)。

解析の結果、2014年1月11日頃から放熱量は400-500 MWへ増大したことが分かった(図2)。この値は、それ以前の2-3倍に相当し、2012年4-5月に火口湖・湯だまりを消滅させた熱活動に匹敵する。熱活動は、1月中旬および下旬の2つのピークがあるように見える。これらピークは、火口底の新たな噴出口の開口(京大火山研などの現地観察)や、火口直下浅部クラックの膨張(京大火山研の観測)に対応している可能性がある。

その後、2014年2月に入って、放熱量はほぼ以前の値に戻ったように見える。同1月の放熱活動において通常よりも過剰に放出された熱量は 2×10^{14} Jと概算される。この値は2012年4-5月の湯だまり消滅イベントと比較して、数分の1程度である。

本期間、いくつかの噴火事象が報告されているが、これら噴火発生とともに噴煙高度や放熱量が増大した事実は認められない。一連の噴火事象の本質は、本期間における脱ガス量の増加にあるように見える。

1.4 総括

観測ブイを用いた強酸性火口湖における水温連続観測に成功し、データを WEB で閲覧できる仕組みを運用できた。水温データを解析することで放熱量の僅か 10 % 程度の変動も十分に捉えることが可能で、しかも湖底噴出流体の flux と enthalpy を独立に評価できる。しかし、いずれのブイも半年程度で機能を停止しており、運用年数 2-3 年という目標を大きく下回った。いくつかの状況証拠から、不具合の原因は無線温度計本体の腐食にあると考えられ、これは機器収納スペースの改良で改善できる可能性がある。

また、噴煙解析手法から得られる放熱量は、火口湖解析で得られる放熱量と矛盾しない。このことは、湯だまりの有無に関わらず、放熱量変動がモニタリング可能であることを示唆する。

2. 草津白根山・湯釜における水温観測

2008 年 10 月に、東京工業大学は湯釜観測システムを更新した。その結果、湯釜湖岸に気泡式水位計、湖岸および湯釜中央付近の 2 箇所に水温計、湖岸に気象観測装置を設置するなど、安定的なデータ取得が可能となっている。以下では、これらデータの予察的解析結果を紹介する。

2.1 有効集水面積

降り始めからの総降水量が数 10 mm 以下の降雨の場合、湖水増加量と総降水量との間には明瞭な線形関係が認められた。このとき、有効集水面積 (S_e) は湖面積の 1.5 倍、 $8.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ と見積もられた。一方、大雨(数 10 mm 以上)の場合の S_e は、Ohba et al. (1994) が示した $1.6 \times 10^5 \text{ m}^2$ に近い値を示す。ただし、数 10 mm 以上の大雨は年間 1 回程度で、年間降水量約 2000 mm に占める割合も少ないため、以下の計算では、今回得られた値を S_e として使用する。

2.2 数値計算

火口湖に関する 1 次元数値モデル (Terada et al., 2012) を用いた。解析の結果、湯釜における湖底噴出流体の m は 6 kg/s 、 H は $3.2 \times 10^6 \text{ J/kg}$ と見積もられた。一方、阿蘇火山に存在する、湯釜火口湖と同規模の火口湖「湯だまり」については、水温は 60 - 70 と高いものの、湖底から噴出している流体のエンタルピーは 1.8 - 3.0 MJ/kg と推定されており (Terada et al., 2012)、草津白根火山の湯釜にほぼ等しい。

両火山では、湖底噴出流体のエンタルピーが等しい一方で、水温の異なる火口湖が形成されている。数値モデルからの検討によれば、火口湖が維持される条件は、あるエンタルピーに対して 2 つが存在することがわかる (Terada and Hashimoto, 2013)。草津では低温の、阿蘇には高温の火口湖が形成される条件にあると考えられる。

3. 空中赤外観測

草津白根火山からの全山放熱量を推定するため、軽飛行機を用いた広域にわたる空中赤外観測を 2012 年 10 月に実施した。その際、飛行経路上にあたり、最近、火山活動が活発化している弥陀ヶ原火山・室堂地区、および箱根火山・大涌谷地区についても観測を行った。

3.1 草津白根火山

セスナ機を用いた空中赤外観測を 2012 年 10 月実施した。その結果、既知の地熱活動 (湯釜火口湖、湯釜火口北東内壁、湯釜火口北方噴気列、および水側火口北東方の噴気列) に加えて、湯釜火口の北西内壁に、20 m 四方程度の小さな高温領域を見出した (図 3)。以前の写真と比較すると、この領域は以前から存在していた変質帯に対応することが分かる。すなわち、この高温域は以前から存在してきたものと考えられる。

解析の結果、火口周辺からの総放熱量は 15.1 MW (各噴気地の合計 5.1 MW、湯釜火口湖 10 MW) と計算された。各噴気地からの合計放熱量は、2003 年 10 月の観測結果 (井口・他, 2004) と比較して大きな変化がないことが分かった。

なお、草津町温泉課の依頼に基づき、町内の主要源泉の一つを重点的に観測した。その結果、万代鉱源泉を湧出する水平坑道において、地表面にまで達した亀裂に対応すると思われる温度異常領域を新たに見出した。

3.2 箱根火山

2001年に上湯場と呼ばれる地域で始まった地熱活動(噴気地 A-D)が衰退するとともに、隣接域に新たに噴気地 E が 2011 年頃に形成されている。これら A-E の面積は 20,000 m²、総放熱量は 2.8 MW (雲のため過小評価)である。この値は、既存の大涌谷噴気地のそれに匹敵する(図 4)。

2012 年 12 月に地上で氷を用いた熱流量計測を行った結果、噴気地 D における放熱量は、2009 年に比較して 1/5 へ減少していた。すなわち、噴気地 E の形成は、噴気地 A-D の衰退を補う関係にある。この結果を受けて、2012 年 12 月、噴気地 E 周辺 4 か所において 1 m 深地中温度連続観測を開始した。そして 2013 年 1 月、当地の直下で 2001 年以來となる地殻変動を伴う群発地震活動が始まった。そこで、2013 年 2 月にはさらに 9 か所に地中温度観測点を設け、地下活動と噴気地 E との関係を検討中である。

3.3 弥陀ヶ原火山

近年、噴気ガスの化学組成に変化が認められている弥陀ヶ原火山地獄谷(室堂)地区において、同火山として初めて空中赤外観測を実施して、地表面温度分布を定量的に把握した(図 5)。温度異常領域の総面積は 35,000 m² である。また、2012 年 8 月に実施した地上観測結果と合わせて、同地域からの放熱量は 20 MW と見積もられる。この値は、活動火山の火口としてはやや大きい。また、地獄谷中央の池(紺屋地獄)においては、2012 年 8 月の地上観測で得られた約 50 に比較して、同 10 月の空中赤外観測では 62 と上昇している。

- (8) 平成 25 年度の成果に関連の深いもので、平成 25 年度に公表された主な成果物(論文・報告書等)：
福井敬一・寺田暁彦(2013)霧島山新燃岳 2011 年 2 月の脱ガス活動，駿震時報，印刷中
Terada, Y. Miyabuchi and T. Ohba (2013) A Guide for the Field Trip to Aso Volcano, CVL8 Workshop, 25-28 July 2013, at Aso Volcano, Japan, 16p.
東京工業大学(寺田暁彦)，弥陀ヶ原火山・地獄谷における空中赤外観測：総放熱量の推定，火山噴火予知連絡会会報，印刷中
Terada A., and Hashimoto, T., The factors that control the long-term sustainability of a hot crater lake: Insights from a generic numerical model, IAVCEI2013 Scientific Assembly, Kagoshima, Japan, 2013.7.

- (9) 実施機関の参加者氏名または部署等名：

他機関との共同研究の有無：無

- (10) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署等名：火山流体研究センター

電話：0279-88-7715

e-mail：webmaster@ksvo.titech.ac.jp

URL：

- (11) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名：寺田暁彦

所属：

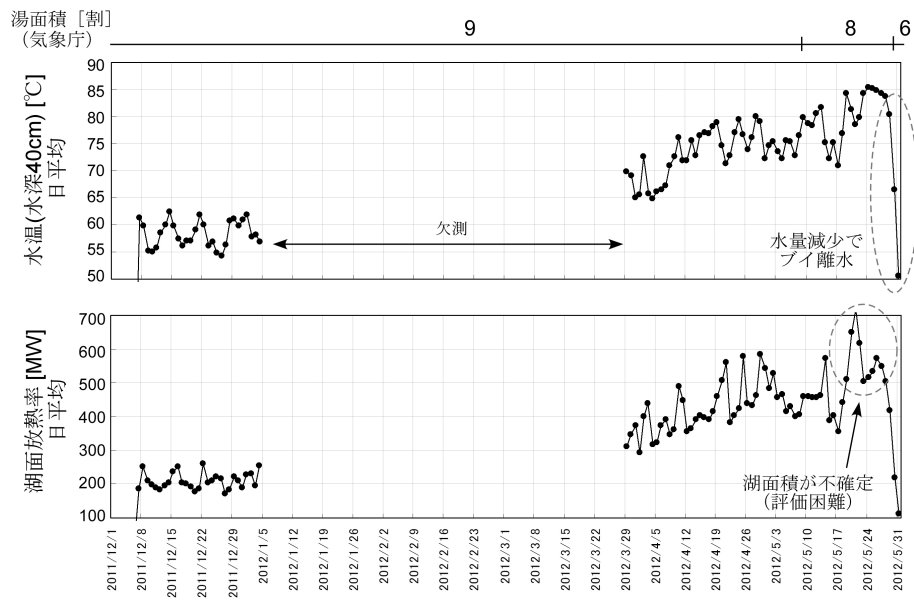


図 1
 (a) 水温観測ブイが観測した阿蘇山・湯だまりの日平均温度 . (b) 湖面放熱率 .

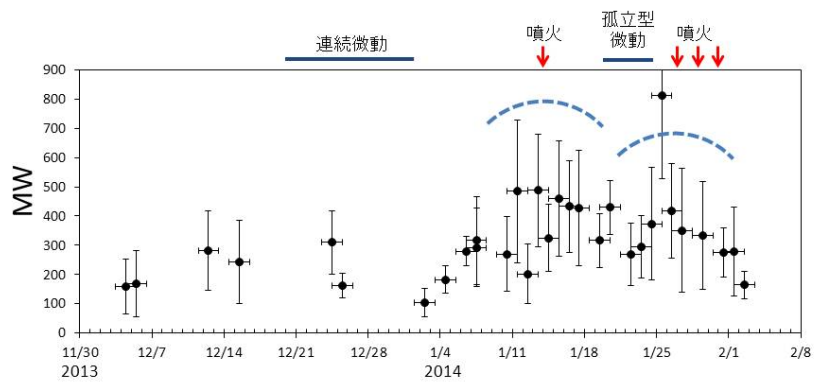


図 2 .
 噴気上昇運動解析に基づく阿蘇火山中岳第一火口からの放熱量推移 (2013 年 12 月 ~ 2014 年 2 月) .

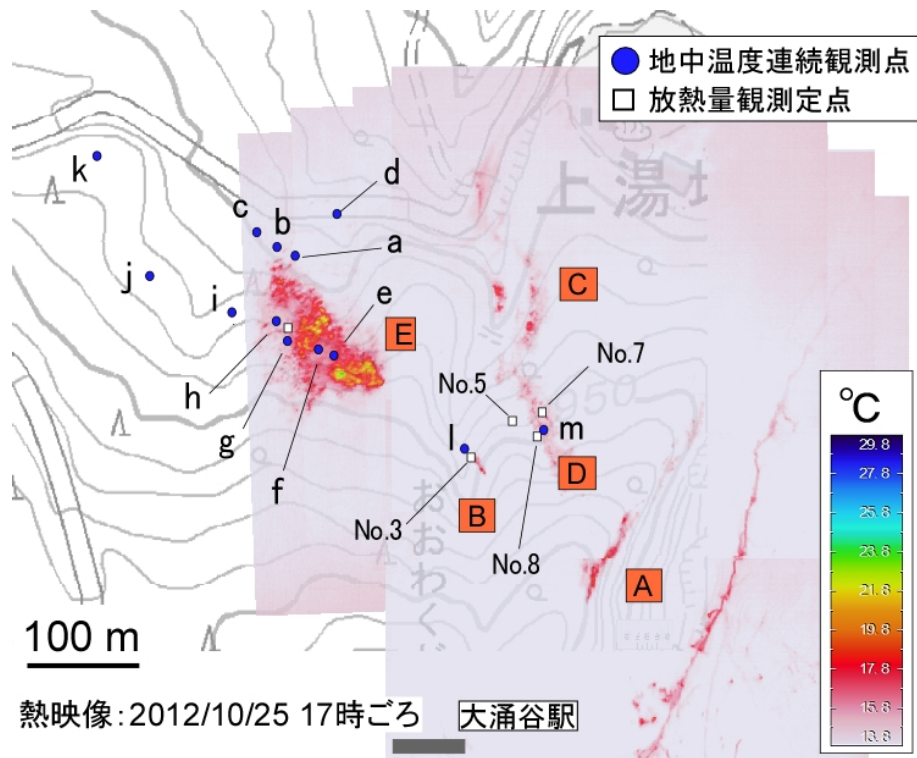


図4. 箱根山・上湯場地区における1m深地中温度連続観測点と、氷箱熱流観測の繰り返し測定点の位置。

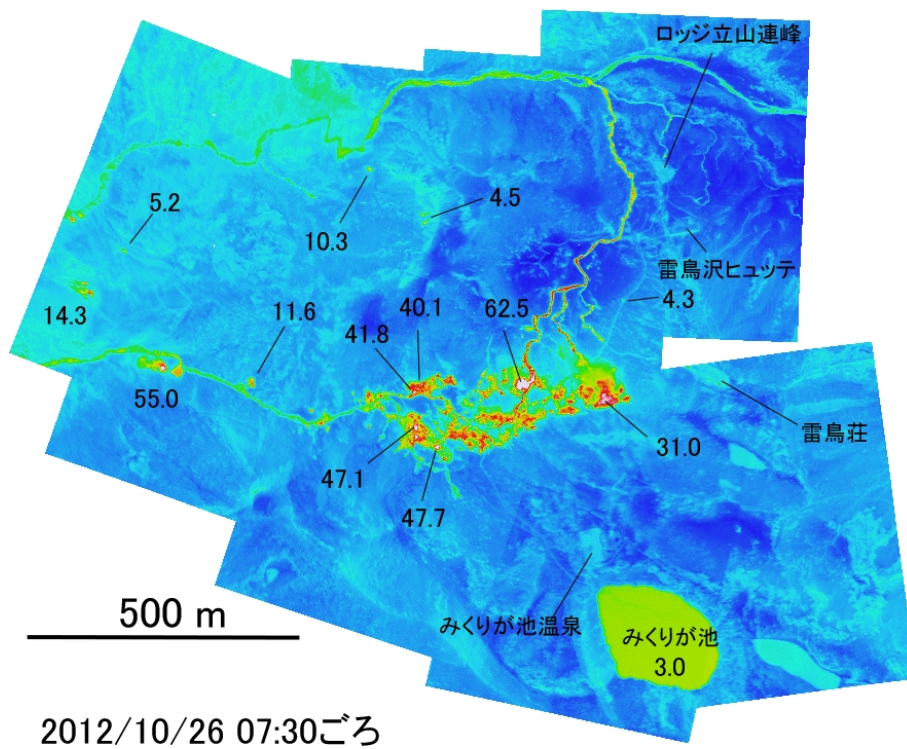


図5. 弥陀ヶ原地獄谷(室堂)における空中赤外観測(2012年10月26日)。

20012/10/26 08時頃
草津白根火山 湯釜火口周辺

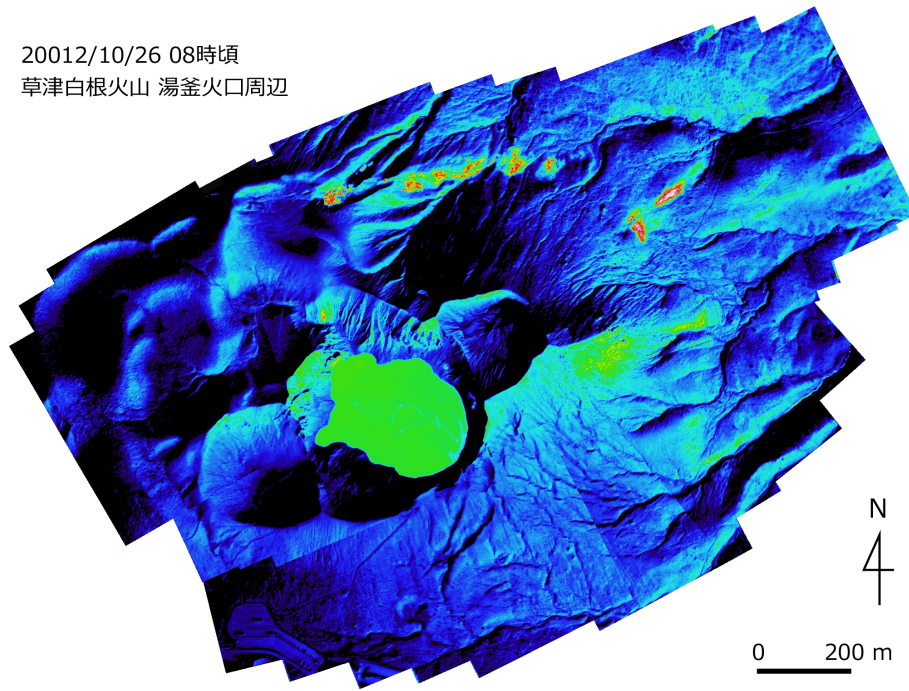


図 3 .
草津白根火山・湯釜周辺の地表面温度分布 (2012 年 10 月 26 日) .