

阿蘇火山・中央火口丘群における熱活動の定量化

寺田暁彦*・鍵山恒臣*・吉川 慎*

*京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

要 旨

阿蘇火山中央火口丘群における熱活動の詳細を把握し、その放熱量を定量的に見積もるために、ヘリコプターを用いた早朝空中赤外観測を実施したほか、現地調査および既存文献の整理を行なった。熱活動は、中岳第1火口と中央火口丘群西側斜面に存在する。両地域の放熱率は計 200 – 300 MW で、非噴火時としては国内有数の規模である。放熱率の9割以上は中岳第一火口の火口湖が占める。一方、西側斜面地熱帯からの放熱率は 9.9 MW である。同地帯は温泉湧出が放熱率の大半を占めていたが、現在、吉岡温泉に2006年に形成された噴気孔が、同地域全体の放熱の半分を占めている。

キーワード：阿蘇火山，放熱率，湯の谷温泉，吉岡温泉，地獄・垂玉温泉，空中赤外面像

1. はじめに

阿蘇火山の中央火口丘群の中岳第1火口には、火山活動が比較的静穏な時期に火口湖(以下では湯だまりと呼ぶ)が形成され、その表面から活発な放熱活動が継続している(Terada et al., 2008a)。その一方、火口丘群の西側斜面でも熱活動が見られる(湯原・牛島, 1980)。

これまで、中岳第1火口では地上や空中から赤外カメラを用いた地表面温度観測が行なわれてきた。その結果、湯だまり湖面より上の火口内壁部に、南壁噴気に代表される活発な噴気活動が見られ、火山活動との関係が議論されてきた。また、過去30年以内には第2火口や火口外でも熱活動が存在した(須藤, 私信)。したがって、比較的静穏とされる時期の熱活動を定量化することは、将来も起きるであろう熱活動の変化を定量的に把握するために重要である。

一方、中央火口丘群西側斜面では、温泉放熱量測定とともに、1 m 深地温観測による伝導的伝熱量が見積もられてきた(湯原・牛島, 1980)。しかし、吉岡温泉を除き、最近20年

間は放熱量に関する定量的評価が行なわれていない。

本論文では、複数の手法を用いて現在の阿蘇火山中央火口丘群における熱活動を検討する。まず2章において、既存の研究や未公表資料を整理し、これまでに明らかになっている阿蘇火山の熱活動の知見をまとめる。3章では、地表面温度分布の詳細を把握するために、日射の影響が少ない早朝に実施した空中赤外観測について述べる。ここで得られた赤外面像に基づき、4章では噴気地、5章では火口湖や湯沼からの放熱率を見積もる。このように得られた結果を6章でまとめ、阿蘇火山における放熱活動の特徴と、その時間変化を議論する。

2. 先行研究の概要

Fig.1に阿蘇火山および中岳、中央火口丘群の西側斜面地熱地帯(以下では西斜面地熱帯と呼ぶ)の位置を示す。1970年代以降、中岳火口周辺では地上または空中から赤外カメラを用いた地表面熱異常の観測や、ボーリング掘削による地中温度計測が実施されてきた。

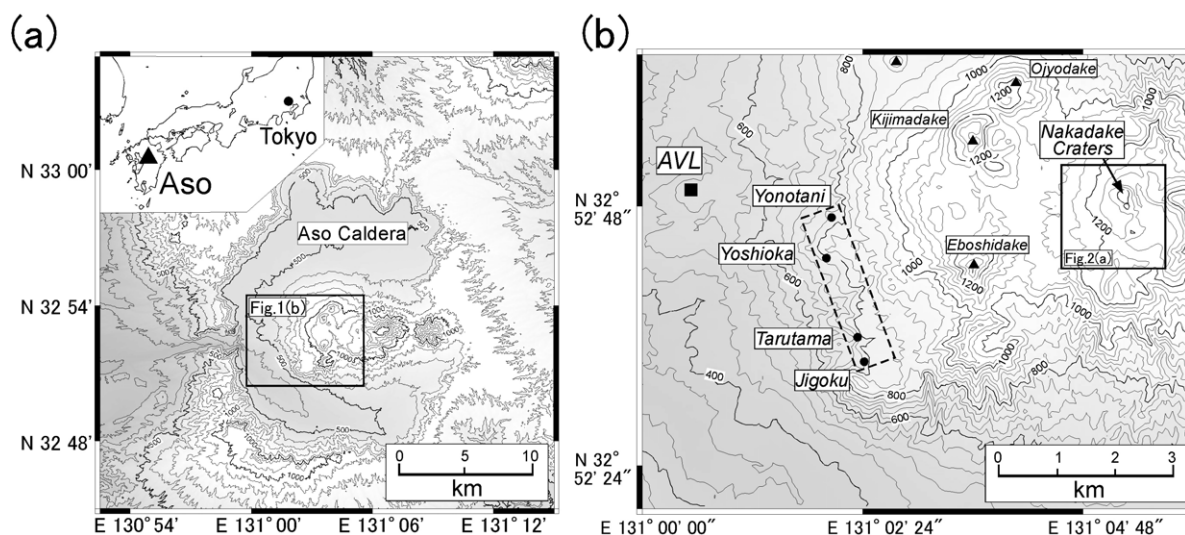


Fig. 1 (a) Locality and topography of Aso volcano. (b) Topographic map of the western area of central cones. The square written in a broken line shows the location of the Western slope geothermal zone including Yunotani, Yoshioka and Jigoku-Tarutama hot springs. Closed square indicates Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University.

一方、西斜面地熱帯では、放熱率測定以外にも様々な研究が行なわれている。本章では、これら先行研究で得られている知見をまとめる。

2.1 中岳周辺の熱活動

(1) 第1火口

Fig.2(a)に中岳第1火口周辺における熱活動の概略を示す。第1火口では、湯だまりが干上がると、火口底に優勢な噴気孔が観察される(例えば池辺・他, 2008)。一方、火山活動が比較的静穏で、湯だまりが存在する時期でも(Fig.2(b)), 湖面からの放熱率は200 MW前後に達している(Terada et al., 2008a)。このことは、湯だまりの底では常に活発な火山性流体の噴出が起きていることを意味する。

湯だまりの湖水量および周辺雨量の連続観測によれば、1 mmの降水に対して湯だまりへ流入する水量は、平均110 m³と見積もられている。これに対して、湖水表面温度および面積から計算した湖表面蒸発量は、年間降水流入量の数倍に達している。すなわち、湖水の大部分は湖底から噴出する火山性流体により賄われている(Terada et al., 2008a)。このほか、地下水が火口壁の下部から滝状に流入している様子が直接観察されることもある(池辺・他, 2008)。湖水量は、梅雨や台風時期に顕著に増加する一方、それ以外の時期で

は、降雨とは直接的には無関係に増減している(Terada et al., 2008a)。静穏期における湖表面温度には、気温変動に対応した季節変動が顕著に見られる一方、気温変動を考慮したモデルを用いて蒸発量を計算すると、静穏期には年間を通じて極めて安定した放熱活動が続いていることがわかる(Terada et al., 2008a)。

湯だまり湖面よりも上部にあたる、第1火口の火口壁にも噴気孔が存在する。とくに火口内壁南側の通称、南壁噴気(Fig.2(a)の“S”, Fig.2(c))の活動は消長が顕著で、噴気孔周辺が高温化して赤熱する現象がしばしば観測される。最近では、2007年8月から2008年4月現在まで、赤熱した状態(Fig.2(c))が継続している。2007年6月に実施したラマン・ライダーによる測定では、同噴気孔周辺からのH₂O Fluxとして、約50 kg/s(約110 MW)が観測された(Nakamura et al., submitted)。この値には、湯だまりから蒸発した水の一部が含まれている可能性がある。

このほか、1977年(久保寺・他, 1978)および1981年(須藤・他, 1984)で実施された赤外カメラ観測によれば、火口内壁南東側の中～上部にかけて(Fig.2(a)の“SE”, Fig.2(c))や、火口内壁南西側の、阿蘇火山博物館Aカメラの下方(Fig.2(a)の“SW-1”, Fig.2(d))においても、温度異常が観測されている。これ

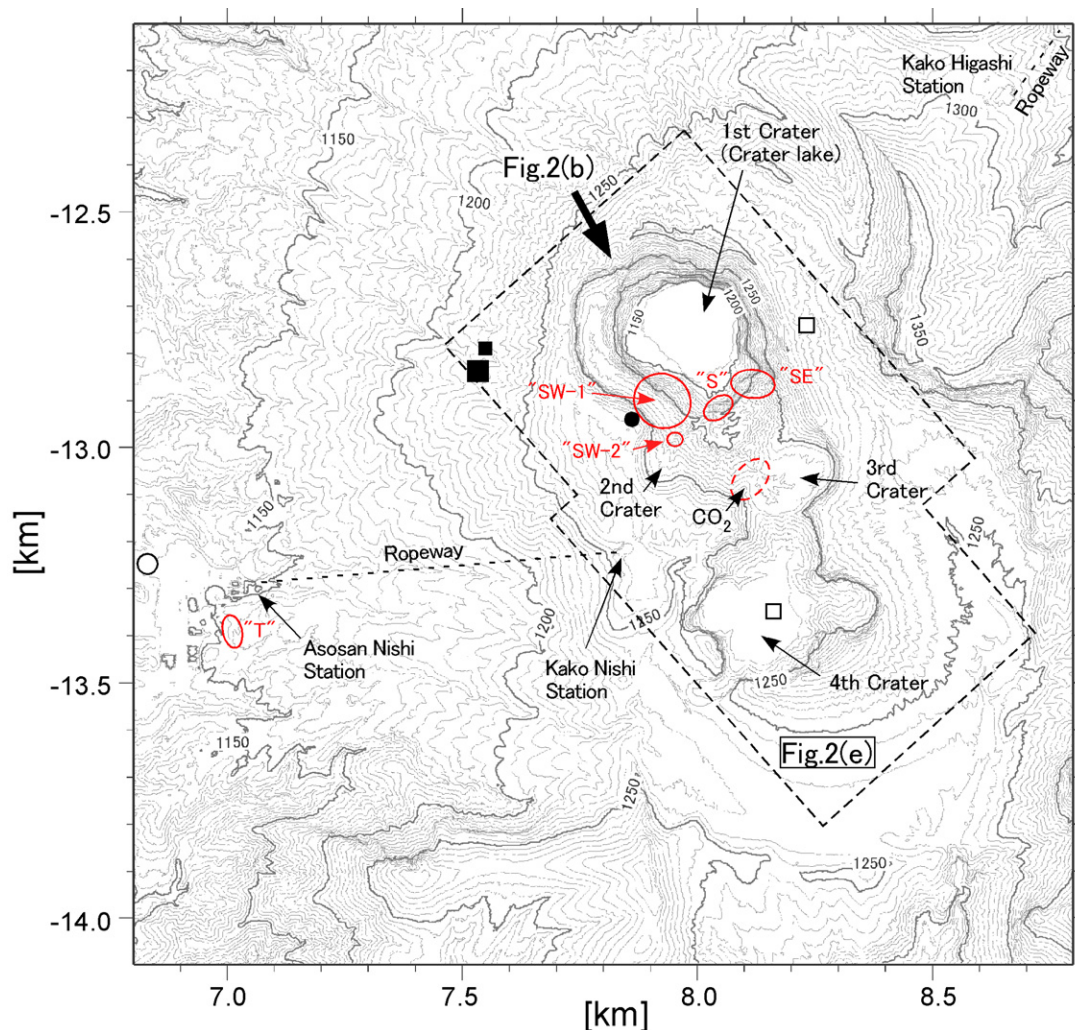


Fig.2(a) Topographic map showing localities of geothermal field of Nakadake Craters. Large and small closed circles indicate 150 m and 50 m wells (Sudo and Hurst, 1998). Locations of wells of 10 m depth for ground temperature measurements are represented by open squares. Closed circle indicate the location of the “Camera A” operated by Aso Volcano Museum. The photographs shown in Fig. 2(c) and (d) were taken from the “Camera A”, respectively. Digital topographic data are from Kokusai Kogyo, Co. Ltd.

らの温度異常は、1996年には消滅していた（鶴川・他、1998）が、後述のとおり2008年4月の観測では明瞭に認められた。

なお、第3火口と第2火口の境界部に存在する小規模な温度異常（Fig.2(a)の“SW-2”）は、かなり以前から認識されていたらしい。久保寺・他（1978）の赤外カメラ観測結果でも、“SW-2”に対応すると思われる温度異常が記載されている。

(2) 第2火口

同火口の南部にあたる、遊歩道からやや下方の領域では、1980年頃まで噴気活動が存在した（久保寺・他、1978）が、その後、衰退して現在に至っている。同火口で2004-2005

年に実施された観測によれば、第2火口と第3火口の境界部にあたる領域（Fig.2(a)の破線で囲った領域）において、土壌CO₂ Fluxがやや高い傾向が認められた（齋藤・他、2007）。

(3) 火口外の周辺領域

これまでの赤外カメラによる観測では、第1火口以外の領域で温度異常が認められたことはない（久保寺・他、1978；鶴川・他、1998）。

一方、山上有料道路の入口付近（Fig.2(a)の“T”）において、1979年10月に弱い噴気活動が一時的に見られた（須藤、私信）。1970年代以降、中岳周辺における火口外での熱活動の報告は、これが唯一である。

なお、第一火口西壁縁の西方約200m地

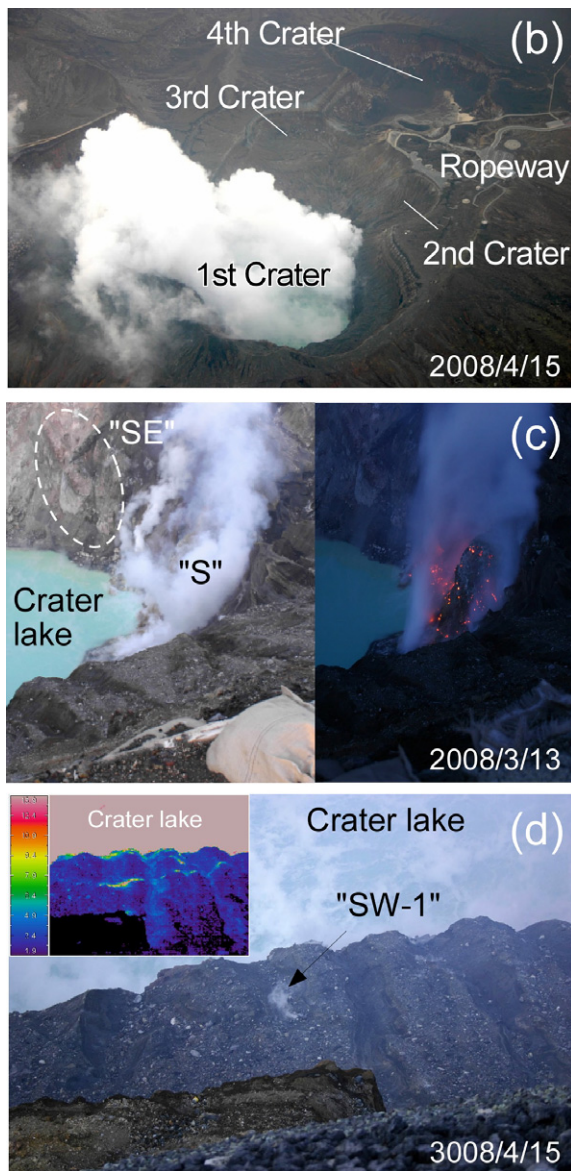


Fig.2(b) Aerial photograph of the Nakadake Craters. (c) Photograph of the South-wall fumarole ("S" in the text) and Southeast steaming ground ("SE" in the text). Red hot glows are visible at nighttime (right side) in active period. (d) Photograph of the Southwest steaming ground ("SW-1" in the text) with an infrared photograph. The photographs of (c) and (d) were taken at the "Camera A" indicated by closed circles in Fig. 2(a).

点で掘削された深度 70 m (Fig.2(a)の小黒四角) および 150 m (Fig.2(a)の大黒四角) の観測井において、連続地中温度観測が 1989 年から約 20 年にわたり実施された。その間、最高

温度は 30 °C 程度であったが、火山活動に同期したと考えられる僅かな温度変化が観測された (Sudo and Hurst, 1998)。一方、第 4 火口中央部および第 1 火口の東 100 m 付近 (Fig.2(a)の白四角) で、1985 年頃から 1 年間にわたり実施された深度 10 m の連続温度観測では、明らかな温度異常は認められなかった (須藤, 私信)。

2.2 中央火口丘西側斜面の地熱地帯

同地熱地帯には、北から湯の谷温泉、吉岡温泉、地獄・垂玉温泉が N20°W 方向に配列している (Fig.1(b))。この方向は、中岳火口群の配列方向に一致しており、火山性流体の上昇に関する弱線の存在を示唆する。

地球化学的研究によれば、本地域に湧出する温泉水の大半は天水起源の、蒸気加熱型温泉と考えられている (山崎・他, 1978; Parmentier and Hayashi, 1981; 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 1995)。一方、同位体水文学的研究によれば、本地域から湧出するマグマを起源とする CO₂ が、阿蘇火山の他の地域に湧出する温泉水に比較して多く含まれている (山田, 2005)。

湯の谷温泉の地下 200 - 400 m 付近には、蒸気卓越型の地熱貯留層が存在している。蒸気卓越型貯留層は世界的に珍しく、生産性に優れることから、同温泉では 1970 年代に地熱開発が行なわれた (山崎・他, 1978; Parmentier and Hayashi, 1981)。吉岡温泉でも、長さ 100 m 程度のパイプを挿入しただけで蒸気が得られている (寺田・他, 2007)。すなわち、同地域の地下浅部には、蒸気卓越型の貯留層が広く存在するらしい。

(1) 湯の谷温泉

湯の谷温泉では、阿蘇観光ホテルが 2000 年に廃業して以降、温泉関連設備は事実上利用されていない。

同温泉には、複数の水蒸気爆発由来の堆積物とともに、多数の火口状地形が存在し、過去に繰返し爆発が起きたことが示唆される (池辺・藤岡, 2001)。その火口状地形の幾つかには温泉が湧出し、特に、湯の谷の南部には、「坊主地獄」と呼ばれる泥火山や、雀地獄、餅搗地獄 (Fig.3(a)) などの湯沼が形成されている (湯原・牛島, 1980)。これらの湯沼は、流出・流入河川を持たない閉塞湖である。雀地獄から北方へ伸びる湯の谷川沿いには温

泉湧出口が点在し、「湯の谷」の名称の由来とされる(池辺・藤岡, 2001)。

同温泉では、1970年代に進められた地熱開発により、深度 400 m 規模の2本の坑井、すなわち1号井および2号井が掘削された

(Fig.3(a))。掘削直後の坑井からの放熱率は、それぞれ 3 MW および 12 MW 前後に達したが(湯原・牛島, 1980; Parmentier and Hayashi, 1981), その2年半後には坑井内の^{ほうさんせき}硼酸石

(H_3BO_3)の晶出による閉塞傾向が顕著となり(Taguchi et al., 1981), やがて両坑井とも利用されなくなった。2008年4月現在, 1号井は暴噴状態で, その噴気は, 湿度の高い日には山麓からも望見できる。2号井は, 旧ホテル施設の一部として噴気が排出されており, その規模は1号井よりも大きい。両噴気は, 吉岡で2006年に形成された噴気(5 MW)よりも小規模で, おそらく 1 MW 前後以下と思われる。

同温泉では, 歴史時代に2度の噴火が知られている。1816年の推定火口は2号井付近のくぼ地(Fig.3(a)), 1881年の推定火口は温泉湧出が見られる赤湯付近(Fig.3(a))と考えられている(池辺・藤原, 2001)。この他, 1989-1990年にかけて, 湯の谷北部のキャンプ場施設(Fig.3(a))に噴気地が新たに形成される活動が起きて, 同施設が放棄された事象が知られている。

以上のように湯の谷温泉では, 爆発を含む異常な熱活動が, 過去200年間に3回認識されている。

(2) 吉岡温泉

吉岡温泉には20件前後の別荘が密集している。2006年に異常な地熱活動が起きる以前の同温泉は, 地熱地域としてはごく小規模で, 別荘地を除いて完全に植生に覆われていた。1977年の空中赤外観測(久保寺・他, 1978), 1978年の1 m 深地温観測(湯原・牛島, 1980)でも, 顕著な地熱異常は検出されていない。すなわち, 2006年以前の吉岡温泉に存在した熱活動は, 1960年代に開発された水平坑から得られた0.2 MW 規模の温泉湧出, 人工的に得られた小噴気(“a1”, “a2”), そしてごく小規模な湯沼(“D”)だけである(寺田・他, 2007; Terada and Sudo, submitted)。

同温泉では, 2006年に顕著な熱活動が始まり, 噴気や噴気地“A”, “B”, “C”(Fig.3(a)(c))が形成された(新村, 2007; 寺田・他, 2007)。これら噴気地の形成で軟弱

化した斜面が, 降雨をきっかけとして崩壊して土石流が約 200 m 流下した。熱活動のピークである2006年10月には, 新たに形成された噴気孔“b1”からの放熱率は30 MW 前後に達し, 高さ3 m の火山灰丘が形成された。同16日には10トン以上の火山灰噴出が起きるとともに, その火山灰丘は消失した。また, 同22日には有色噴煙が山麓から望見された。2007年1月において, 噴気地放熱率は0.6 MW 前後, 噴気放熱率は5 MW 前後と見積もられている(寺田・他, 2007)。

(3) 地獄・^{たるたま}垂玉温泉

地獄温泉・垂玉温泉は空間的に近接しており, 既存研究に倣い, 本研究でも同地域を地獄・垂玉温泉と呼ぶ。2008年4月現在, 南方に地獄温泉清風荘, 北方に垂玉温泉山口旅館の2つの旅館が営業している(Fig.4(a))。

地獄温泉の南方には, 北西方向に開いた径250 m 前後の爆裂火口状の地形が存在する。この窪地内には活発な温泉湧出が見られ, 地獄温泉の主要な源泉(以下では主要源泉部と呼ぶ)として利用されている。

周辺では, 同爆裂火口を起源とする $10^5 m^3$ 規模の水蒸気爆発に由来する堆積物が見つかっており, それぞれ4,500および10,000年前の事象と考えられている。この他, これより小規模の水蒸気爆発は, 同地域で少なくとも9回発生してきたらしい(宮縁・渡辺, 2000)。

主要源泉部では温泉変質が進行している。同地域は北西へ開いた急斜面を呈しており, 大雨などの際に地すべりが起きている。

3. 空中赤外観測および地上温度観測

一般に, 地表面温度は日射を受けて上昇する。したがって, 火山性の温度異常を検出するうえで日射は障害となる。そこで, 日射の影響がほとんどない早朝に空中赤外観測を実施することで, 地表面温度異常分布の詳細を観測することを試みた。また, 大気中の水蒸気が赤外観測に与える影響を評価するために, 空中赤外観測と同時に, 地上で地表面温度の連続測定を行なった。

3.1 空中赤外観測

佐賀航空株式会社が運用する4名乗りヘリコプター, ロビンソン式R44を65分間貸し切った。同機体は, 通常は遊覧飛行用として,

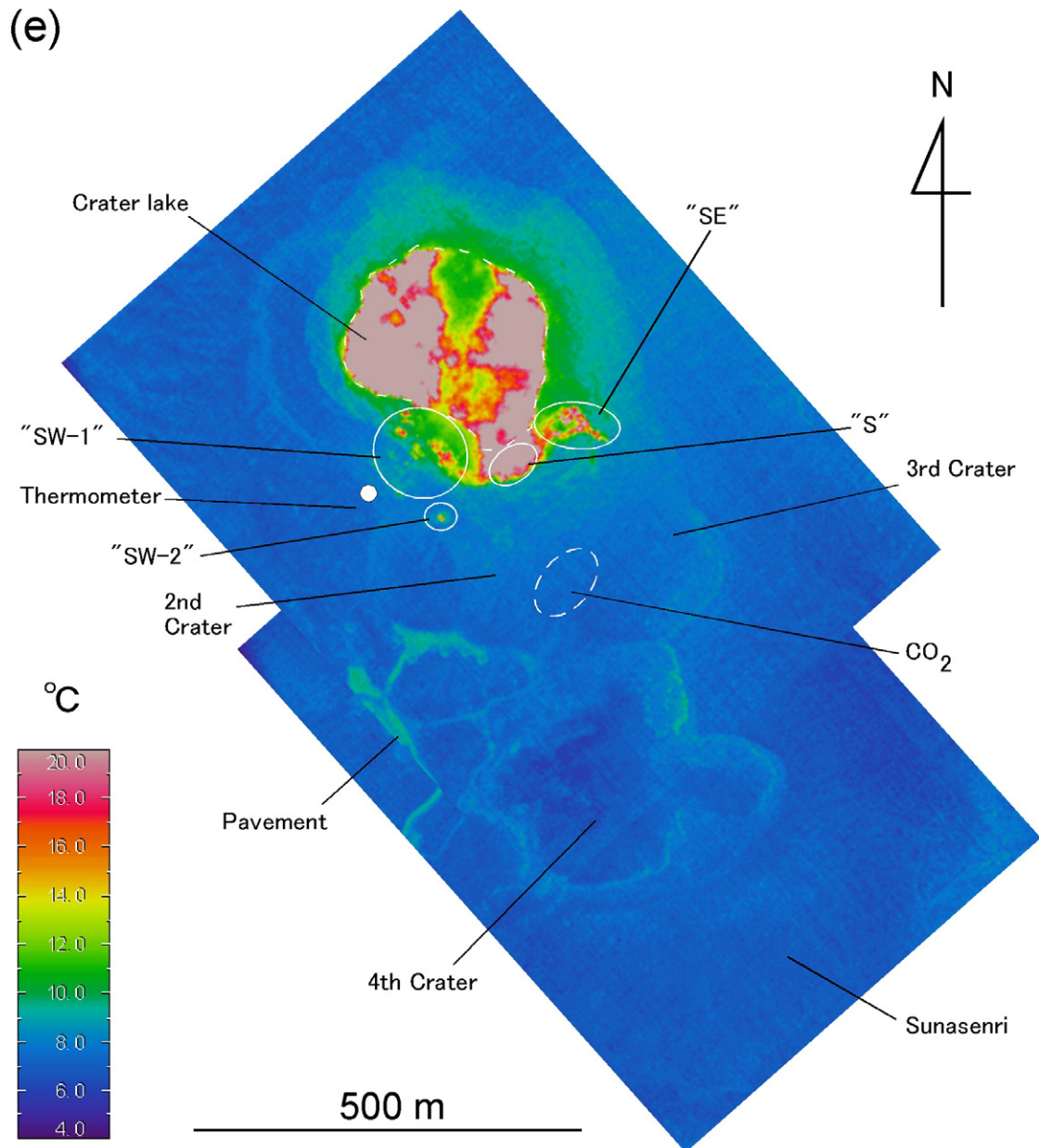


Fig.2(e) Aerial infrared photograph of Nakadake craters taken from 1,500 m height at 15 April 2008. Open circle shows the location of the “Camera A”. Circle written in broken line represents the region where CO₂ fluxes from soil are measured relatively high (Saito et al., 2007). “Thermometer” shows the location where ground temperature observation (Fig.5(b)) is carried out.

阿蘇火山中岳の北北東 5.6 km に位置する観光施設「カドリー・ドミノオン」敷地内などを離発着しており、今回の観測でも同施設を使用した。

観測時には、三脚に取付けた赤外カメラを搭乗者のひとりが水平に持ち、カメラを機外から僅かに出して、鉛直下方へレンズを向けた。赤外カメラは IEEE ケーブルを通じてノート型パソコンで操作するとともに、データを同パソコンの内蔵 HDD へ連続的に収録し

た。

観測は 2008 年 4 月 15 日に実施した。日射の影響を極力避けるため、熊本市における日出時刻 05 時 47 分に対して、離陸を 06 時 11 分、着陸を 07 時 16 分とした。観測時の対地高度は、中岳で 1,500 m、その他の地域では 1,000 m を維持した。このとき、赤外カメラ画像上の 1 画素がなす面積は、視線方向に対する法面において、それぞれ 3.24 m² および 1.96 m² と見積もられる。

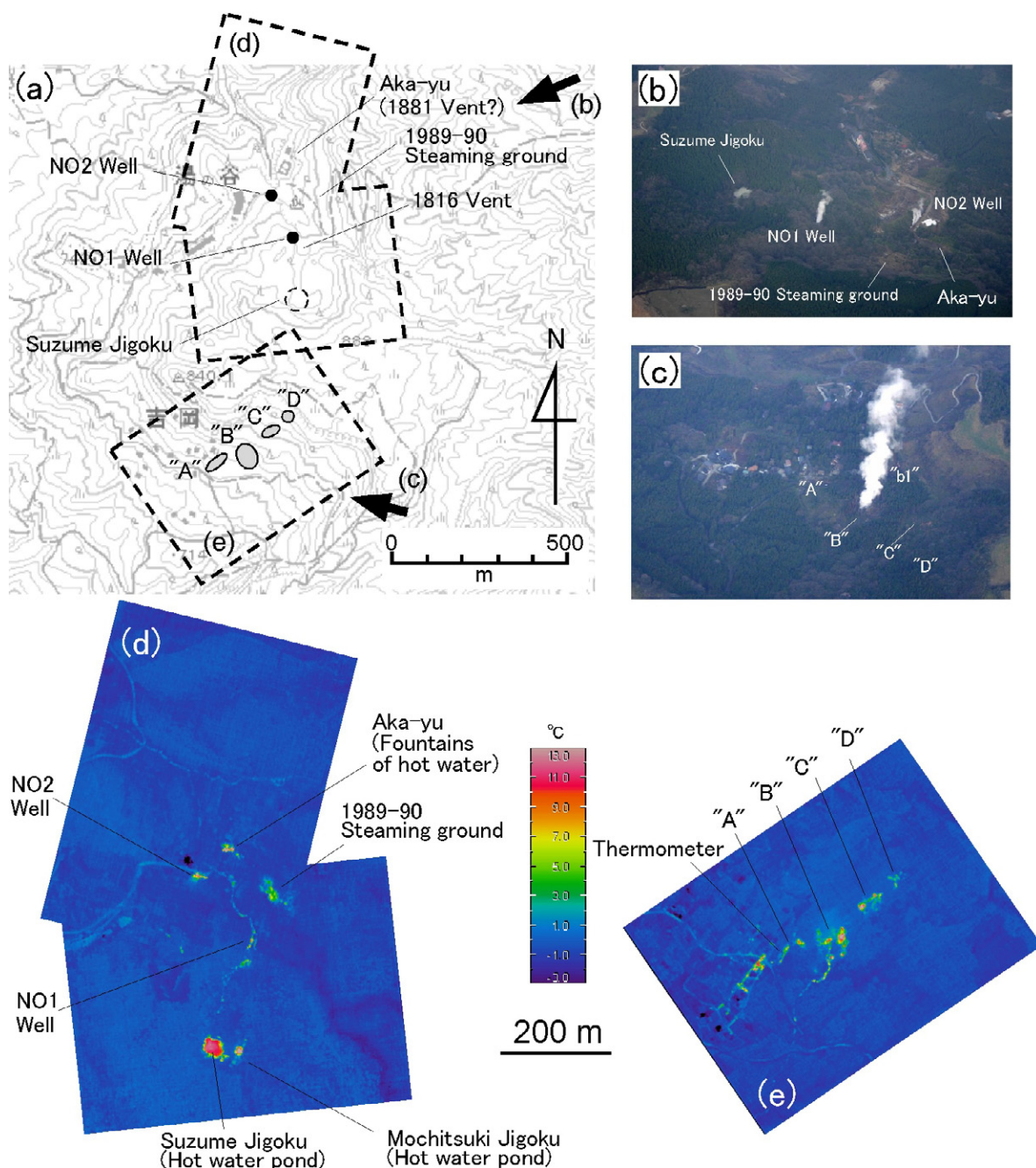


Fig.3(a) Topographic map showing localities of geothermal field of the Yunotani and Yoshioka Hot Springs. Aerial photographs of the (b) Yunotani and (c) Yoshioka Hot Springs. Aerial infrared photographs of the (d) Yunotani and (e) Yoshioka Hot Springs taken from 1,000 m height at 15 April 2008. "Thermometer" in Fig.3(e) shows the location where ground temperature observation (Fig.5(c)) is carried out.

本研究では、地表面の放射率を1として議論を進める。

3.2 地上温度観測

温度空中赤外線観測と同時に、中岳第1火口周辺および吉岡温泉において地表面温度計測を実施した。観測に用いたのはティアンドデイ社製のロガーRTR-71およびステンレス保

護管付きセンサで、地表面および5 cm 深地温を1分毎に記録した。Fig.5に、阿蘇山測候所の気温とともに、地温変化を示す。ここで、空中赤外線観測実施直前にあたる午前6時の阿蘇山測候所の気温は、8 °Cである (Fig.5(a))。

中岳第1火口周辺では、温度計を阿蘇火山博物館の通称Aカメラ (Fig.2(b)の白丸) 付

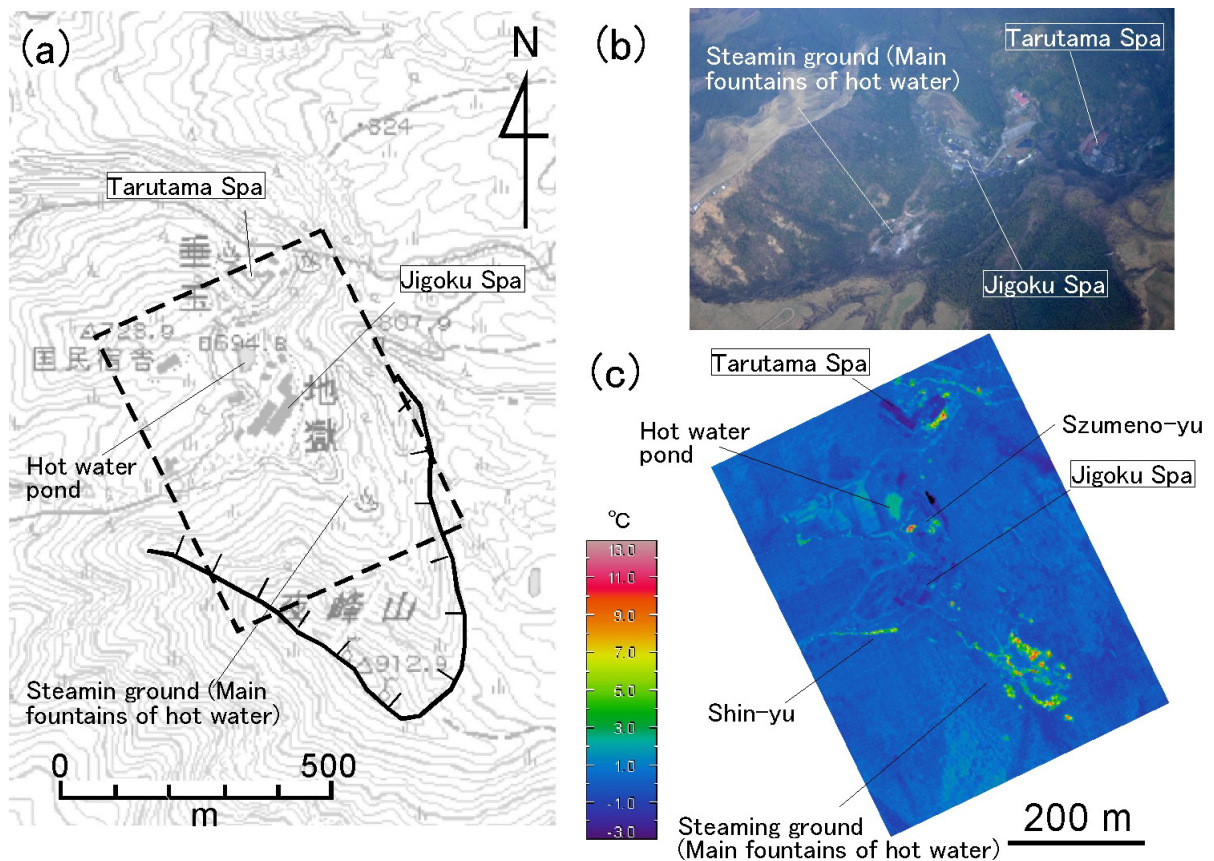


Fig.4 (a) Topographic map showing localities of geothermal field of the Jigoku-Tarutama Hot Springs. (b) Aerial photographs of the Jigoku-Tarutama Hot Springs. (c) Aerial infrared photographs of the Jigoku-Tarutama Hot Springs taken from 1,000 m height at 15 April 2008.

近に設置した。1,500 m 上空から赤外カメラで記録された当該箇所の地表面温度 0 - 0.5 °C に対して、地表面温度は 6 °C であった (Fig.5(b)の矢印)。この差は、地表面からの放射エネルギーの一部が、大気中の水蒸気に吸収されたためと考えられる。

吉岡温泉では、温度計を地熱異常域“A”付近に設置したため (Fig.3(e)), 5 cm 深地温は地熱活動に対応して 25 - 30 °C と、気温よりもかなり高い状態で推移した。1,000 m 上空から赤外カメラで観測された当該箇所の地表面温度 (Fig.5(c)の矢印) は 12 °C であった。

以上のように、当時の観測条件において、上空からの赤外カメラ観測では実際よりも 4 - 6 °C 前後低く計測されたことがわかる。

3.3 温度異常分布の概要

観測対象である中岳火口群、湯の谷、吉岡および地獄・垂玉温泉について、解析に用い

る赤外画像と、およその撮影範囲を Fig.2(c), Fig.3(d)(e)および Fig.4(c)に示す。以後、3-2節の結果に基づき、赤外カメラ観測で得た温度に 5 °C を加えた温度を用いて議論を進める。図中のカラーバーも、補正後の値を示す。ただし、ここで示した温度は、少なくとも 3.24 m², あるいは 1.96 m²の範囲について平均化された値である。さらに、実際には地表面が傾斜していることも考えれば、実際にはより高温であった場合もある。

(1) 中岳火口群

第1火口内では、水温の高い火口湖に対応する熱異常がみられ、湖表面温度は最高で 46.1 °C と測定された。平面的に顕著な温度変化が見られるが、このような面的温度変化の大半は、湖面および南壁噴気“S”に由来する噴煙 (Fig.2(b)) による放射エネルギーの不均質な吸収が原因であろう。

南壁噴気“S”の最高温度は、計測限界に対応

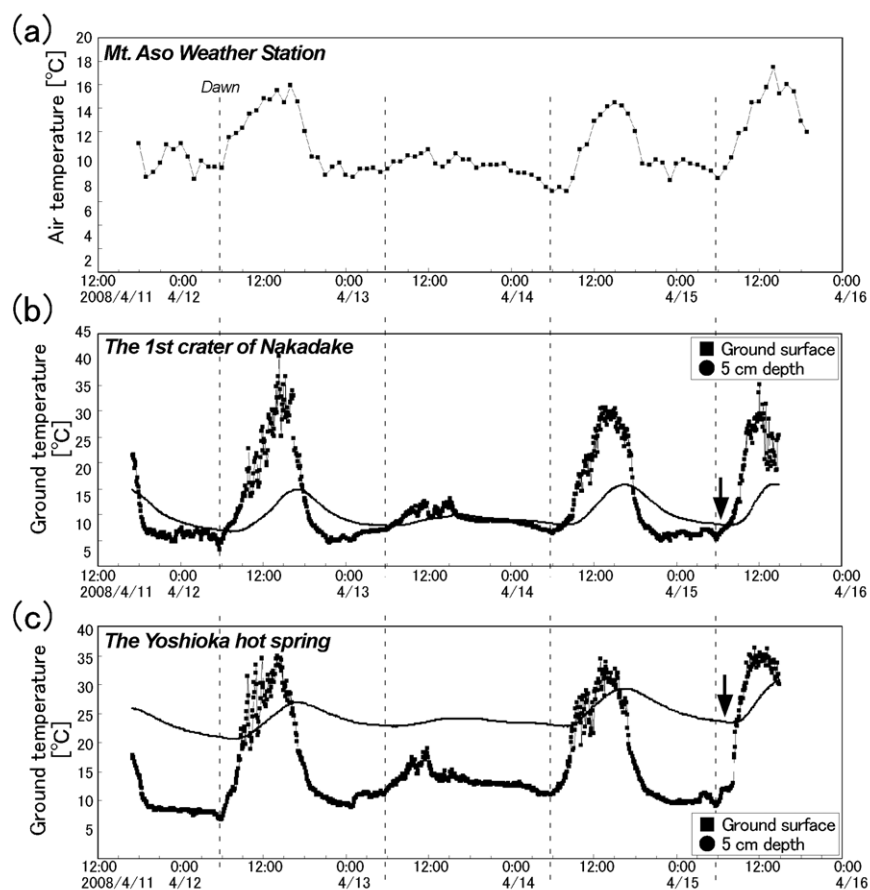


Fig.5(a) Records of air temperature measured at the Mt. Aso Weather Station, Japan Meteorological Agency, located at the open circle in Fig.2(a). (b)(c) Records of thermometers at ground surface and 5 cm depth, that are measured at the top of crater wall of the Nakadake 1st Crater and the Yoshioka Hot Spring. The sites' locations are indicated by "Thermometer" in Fig.2(e) and Fig.3(e), respectively. The aerial infrared survey is carried out when arrows are showing.

する 100 °C が測定された。同領域では赤熱現象が続いており、今回の観測時にも、一部の噴気孔は数 100 °C 以上の高温状態だったと思われる。

第 1 火口内については、赤熱状態にある“S”ばかりでなく、その東西の領域“SW-1”および“SE”についても、顕著な温度異常が見られる。このような温度異常は、久保寺・他（1978）や須藤・他（1984）では検出されたが、1996 年に実施された空中赤外観測（鶴川・他, 1998）では検出されていない。すなわち、火口壁に存在する噴気活動に顕著な時間変化が見られる。2008 年 4 月以降、“SE”でも、ときおり活発な噴気が観察されるようになり、近年の熱活動の高まりを反映していると思われる。なお、“SW-1”の最高温度は 18.0 °C，“SE”の最高温度は 23.3 °C であった。

火山活動に関係すると思われる温度異常は、従来の研究と同様、第 1 火口内にのみ見られた。土壌 CO₂ Flux がやや高い領域（齋藤・他, 2007）でも、それに対応すると思われる温度異常は検出されなかった。

(2) 湯の谷温泉

湯の谷温泉南部に見られる顕著な温度異常（Fig.3(d)）は、雀地獄や餅搗地獄などの湯沼に対応する。現地調査によれば、これら湯沼では温泉の湧き出しが見られた。本地域から北方へ伸びる線状の温度異常は、湯の谷川沿いに点在する温泉湧出とその流出に対応する。1989-90 年に生じた噴気地は、現在は植生がかなり回復しているものの（Fig.3(b)）、地温の高い状態が現在も継続している。赤湯では、従来から見られている温泉湧出のため、小規模な湯沼が形成されている。そのため、赤湯

は明瞭な熱異常として、赤外画像に表現されている (Fig.3(d))。

(3) 吉岡温泉

赤外画像上では、2006年に新たに形成された地熱異常“A”～“C”，それ以前から存在する温泉湧出“D”を明瞭に認識できる。温度異常の広がり、は、2007年1月に熊本県が実施した空中赤外観測 (寺田・他, 2007) に比較して、“A”については縮小傾向が見られる。また、地熱異常域“B”から線状に伸びる温度異常は、噴気孔“b2”から噴出している温泉水の流出に対応する。このような温泉湧出は、2007年1月の観測時には存在しなかった。

なお、“A”の西方に広がる温度異常は、別荘地に相当する。これら温度異常には、舗装道路の下で生じている熱活動に対応するものが含まれるが、多くは、横穴から湧出する温泉水 (湯原・牛島, 1980) の配管や、温泉水を一次的に貯留する槽、蒸気から温泉を造成するための槽 (寺田・他, 2007) などに対応する。

(4) 地獄・垂玉温泉

地獄温泉南方の主要源泉部 (Fig.4(c)の右下) に、顕著な温度異常が見られる。現地調査によれば、本領域では温泉湧出が卓越しており、赤外画像に表現されている熱異常は、噴気地や温泉水湧出口、小規模な温泉水のプールが含まれる。

温泉湧出とそれに付随する小噴気地は、地獄温泉の主要施設内にも点在し、例えば雀の湯などの露天風呂施設が温度異常として赤外画像に表現されている (例えば、地獄温泉雀の湯)。また、Fig.4(c)の画像中央左側の、東西方向へ線状に伸びる温度異常は、新湯と呼ばれる温泉湧出と、新湯から沢へ流出している温泉水に対応する。新湯の温泉湧出量は季節変動が顕著で、毎年10月から3月にかけて湧出量が顕著に減少するらしい。この他、地獄温泉北方の溜池に見られる温度異常は、同施設で使用された温泉水の排水の一部が流入していること、池の底でも温泉湧出が起きていることが原因である。

垂玉温泉では、温泉湧出口付近の舗装された駐車場や、いくつかの露天風呂が顕著な温度異常として観測された。

なお、地獄温泉と垂玉温泉の中間に位置する国民宿舎は、地獄温泉からの引き湯を利用していた。同施設が閉鎖された後の2008年4

月15日において、同施設の温泉貯留タンクに相当する位置に温度異常が認められたが (Fig.4(c))、同施設内に自然の火山性地熱異常は見出されなかった。

4. 噴気地としての放熱率の推定

噴気地からの放熱率を評価するためには、熱異常領域の面的広がりを把握することが重要である。今回は、噴気地上空から撮影した赤外画像に基づき、地表面温度分布から熱収支モデルを用いて放熱率を求める、Sekioka and Yuhara (1974) の方法を用いる。なお、地上において氷を用いた放熱率測定法 (Terada et al., 2008b) も合わせて実施した。その詳細は別に発表する。

4.1 熱収支法

Sekioka and Yuhara (1974) の熱収支法では、モデルから計算される地表面における放射、顕熱および潜熱輸送量を合算し、その残差量を地中から地表へ向かう熱流量と考える。これら詳細については、寺田・他 (2008) で述べたので、ここでは放熱率の計算に用いる式のみを示す：

$$Q_g = 37 \sum_i \Delta T_i S_{gi} \quad (1)$$

ここで、 Q_g はある噴気地からの総放熱率、 ΔT_i は地表面温度差 $T_i - T_0$ に対応し、 T_i は噴気地内のある地点 i における地表面温度、 T_0 は火山性の熱活動が影響しない領域での地表面温度である。また、 S_{gi} は ΔT_i をなす地表面面積の和である。式(1)を適用する際に必要な観測量は、 T_0 、 T_i およびその地表面積 S_{gi} であり、いずれも赤外画像から得られる。なお、係数37は、国内20数箇所の噴気地での気象観測から得られた結果を平均した値である (Sekioka, 1983)。

4.2 解析方法

得られた画像には、温度情報が 0.1°C 間隔で記録されているが、これは1画素に対応する広さの地表面について、平均化された放射エネルギーから求められた値である。さらに、赤外カメラによる観測には、放射エネルギーの大気水蒸気による吸収、近傍から噴出

した噴気による吸収、植生の影響が含まれる。したがって、本研究では各温度に対する面積を厳密に求めることはせず、地表面温度を 2.5 °C 間隔の階調に分けて、その中央値を各階調 i の地表面温度 T_i とした。

また、一般に赤外面像には火山とは無関係な温度異常も含まれている。日射の影響を避けるために早朝に実施した本観測では、直接的な日射の影響はほとんど見られない一方で、ホテルや別荘地内の温泉貯留槽や、放射率が地表面とは異なる舗装道路などが、温度異常として認められる。放熱率の計算に当たり、これらを地上観察結果に基づいて選別した。

なお、対象とする地域の多くは斜面に位置しているため、地表面積 S_{gi} を見積もる際には地表面の傾斜角を地形図から読取ること、1 画素あたりの面積を補正した。

4.3 解析結果

Table 1 に、各噴気地からの放熱率を、温度異常面積、解像度および観測された最高温度とともに示す。

中岳第 1 火口の南壁噴気“S”では、放熱率は 2.0 MW と計算された。ここで、測定可能上限を超えている領域では温度を 100 °C に固定している。そのため、100 °C 以上の領域については過小評価となるが、その面積は小さいため、見積もりに与える影響は小さい。ただし、“S”には顕著な噴気活動が存在している。Table 1 に示した放熱率には、噴気としての放熱率が含まれていないことに注意が必要である。その他の領域からの放熱率は、“SE”は

0.64 MW, “SW-1”は 0.27 MW, そして“SW-2”は 0.005 MW と計算された。これら第 1 火口の噴気地としての合計放熱率は 2.9 MW である。

湯の谷温泉の 1989 年噴気地について解析を行なった結果、噴気地としての放熱率は 0.09 MW と求められた。

吉岡での“A”~“D”における放熱率は、合計 0.41 MW である。この値は、2007 年 1 月の空中赤外面像から推定値された 0.6 MW (寺田・他, 2007) よりもやや小さい。

地獄・垂玉については、観測した赤外面像には露天風呂など自然状態ではない熱活動が多く含まれている。そこで、本研究では地獄温泉南方の主要源泉部のみを対象として計算を行なった。その結果、放熱率は 0.42 MW と見積もられた。

5. 火口湖および湯沼からの放熱率推定

本章では、中岳第一火口の湯だまりや、湯の谷温泉の雀地獄、餅搗地獄の蒸発エネルギーを、空中赤外面像に基づいて推定する。

5.1 解析方法

阿蘇火山においては、噴気地としての放熱以外に、火口湖や湯沼としての放熱が見られる。これまで、中岳第 1 火口の火口湖については、Ryan et al.(1974)の式を用いることで、気象要因を考慮した詳細な見積もりが行なわれている (Terada et al., 2008a)。

本研究では、湖面から蒸発で失われるエネ

Table 1 Computed heat-discharge rates (MW) through steaming ground with the equation (1). “Area” and “Max. Temperature” represent the total area that surface temperatures are obviously higher than that of natural ground surface and its maximum surface temperatures, respectively. “Resolution” shows the area per pixel in the infrared photographs.

	Area [m ²]	Max. Temperature [°C]	Resolution [m ² /pixel]	Heat-discharge [MW]
1st Crater				
“S”	1.0 × 10 ³	100<	3.24	2.0<
“SE”	3.5 × 10 ³	23.3	3.24	0.64
“SW-1”	2.9 × 10 ²	18.0	3.24	0.27
“SW-2”	6.0 × 10 ¹	8.8	3.24	0.005
Yunotani	9.3 × 10 ²	48.7	1.96	0.09
Yoshioka	4.2 × 10 ³	38.0	1.96	0.41
Jigoku -Tarutama	4.5 × 10 ³	30.1	1.96	0.42

Table 2 Computed heat-discharge rates (MW) through crater lake and ponds with the equation (2). “Area” and “Mean Temperature” represent surface areas and mean surface temperatures of lake or ponds, respectively.

	Area [m ²]	Mean Temperature [°C]	Heat-discharge rate [MW]
Yudamari	4.8 × 10 ⁴	51.9	110
Suzume	5.7 × 10 ²	24.2	0.14
Mochitsuki	9.6 × 10	25.6	0.027

ルギー Q_l の大小関係を概略的に求めるために、須川（1960）が火口湖や湯沼において蒸発計を用いて収集した蒸発量データに基づく経験的關係を用いる：

$$Q_l = CS_l T_l^3 \quad (2)$$

ここで、 T_l は湖面の平均温度、 S_l は湖面積、 C は北海道登別火山および阿蘇火山雀地獄で得られた経験的定数（須川，1960；湯原・牛島，1980）に、水の密度を与え、潜熱 2.5×10^6 J/kg を乗じることで MKS 単位系に整理した値 1.7×10^{-2} J/(s·K³) である。

5.2 解析結果

Table 2 に、湯だまり、雀地獄、餅搗地獄からの放熱率を、面積および平均表面温度とともに示す。

湯だまりでは、主として噴気の影響による表面温度のばらつきが見られる。一方、実際の湯だまり表面温度はほぼ均一であることが、経験的に知られている。そこで、表面温度として、もっとも高い温度 45.9 °C を採用する。また、A カメラから湖面を赤外カメラで測定した場合、実際の湖面温度よりも 6 °C 程度低い値が測定されることが、経験的に知られている（Terada et al., 2008a）。そこで、水温に 6 °C を加えた温度 51.9 °C を、蒸発エネルギーの計算に用いる。このとき、赤外カメラから得られた湖表面積 4.8×10^4 m² から、蒸発エネルギーは 110 MW と計算される。

雀地獄については、赤外カメラから得られた表面温度の平均 24.2 °C を用いる。赤外カメラから得られた湖表面積 570 m² より、同湯沼からの放熱率は 0.14 MW と計算される。餅搗地獄も同様に、表面温度 25.6 °C および湖表面積 96 m² から、放熱率は 0.027 MW と

計算される。

6. 議論

本研究と既往の研究成果を合わせることで、阿蘇火山における熱活動の全容を明らかにすることができた。Table 3 に、本研究で見積もった噴気地および火口湖、湯沼からの放熱率を、噴気および温泉からの放熱率（湯原・牛島，1980；寺田・他，2007）とともに示す。本章では、過去の推定と本研究との比較を行ない、主に時間変化についてまとめるとともに、阿蘇火山の熱活動の特徴を検討する。

6.1 過去の研究との比較

中岳第一火口では、これまで多くの熱的観測が実施されてきたが、それぞれ解析手法が異なること、活動時期によって放熱活動に大きな変化が見られることから、比較には注意が必要である。一方、西側斜面地熱地域では、1974-75 年に実施された総合的な熱的調査の結果（湯原・牛島，1980）の一部と比較が可能である。当時と比較すると、湯の谷と地獄・垂玉温泉においては明瞭な変化は認められない一方で、吉岡温泉では著しい熱活動の発達が見られた。

(1) 湯だまり

本研究で用いた経験的關係（須川，1960）から得られた 110 MW は、2007 年を対象とした Terada et al.(2008a)の見積もり 220 MW の半分程度である。須川（1960）の式では、気温や風などの気象的要因の違いが考慮されていない問題がある一方、Terada et al.(2008a)が用いた Ryan et al.(1974)のモデルは、現実よりも過大評価となりやすい可能性が指摘されている（Hurst et al. 1991）。すなわち、ここに挙げた放熱量は、概略的値に過ぎない。蒸発エネルギーの絶対値を議論するためには、新

しい火山観測手法であるライダーを用いた測定 (Nakamura et al., submitted), 湖水温度の直接測定などの新たな工夫を重ね, 注意深く検討を進める必要がある。

(2) 湯の谷温泉

1号および2号井からの放熱率は, 現在は 1 MW 前後と思われる。同坑井からは, 当初は 3 MW および 12 MW の噴出があったが (湯原・牛島, 1980; Parmentier and Hayashi, 1981), 現在は坑井の閉塞により 1/10 程度に減少した。

雀地獄からの放熱率は, ほぼ同じ手法を用いた湯原・牛島 (1980) に比較して, 1/3 程度の値となった。これは, 本研究で測定された湖面温度が, 湯原・牛島 (1980) よりも 10°C 程度低いことに対応する。この水温の違いは, 火山活動の変化のほか, 観測時の気温の違いが影響している可能性がある。なお, 2006 年 10 月に我々が実施した現地調査では, 雀および餅搗地獄の湯量が著しく減少し, 特に雀地獄の湖底の大部分が露出している様子を確認した。このように, 雀地獄の湯量は顕著に変動するらしい。

温泉湧出率は, 湯原・牛島 (1980) は一部の泉源で直接測定を行い, 放熱率として 0.78 MW を報告した。現在, 湯の谷における温泉施設は事実上管理されておらず, 温泉湧出量を測定することは困難である。

なお, 湯の谷温泉では 1 m 深地温観測に基づき, 伝導的伝熱量は 0.17 MW と見積も

られている (湯原・牛島, 1980)。一方, 本研究では彼らの調査時には存在しなかった 1989 年噴気地の放熱率を 0.09 MW と見積もった。

以上のように, 湯原・牛島 (1980) と直接比較することは難しい。1989-90 年噴気地は衰退し, 現在, 熱活動としてはごく小規模である。坑井を除けば, 湯原・牛島 (1980) が調査した 30 年前と比較して, 同温泉で顕著な変化は認められないと評価できる。

(3) 吉岡温泉

吉岡温泉の地熱活動は, 2006 年の活動 (新村, 2007; 寺田・他, 2007) の結果, 湯原・牛島 (1980) の調査時に比較して著しく発達した。

噴気地の放熱率は, 本研究と寺田・他 (2007) を比較すると, 2007 年以降は変化がないか, やや衰退したと言える。噴気孔“b2”から放出される噴気量も, 2007 年以降は顕著な変化はない。すなわち, 吉岡温泉で 2006 年に生じた地熱活動は, その後 1 年半以上にわたり安定して継続していると評価できる。

2008 年 4 月現在, 吉岡温泉からの総放熱率は, 5.6 MW である。以前は 0.2 MW 規模の温泉湧出が見られただけの同温泉は, 現在, 西側斜面地熱地域において最大規模の地熱地域となった。

(4) 地獄・垂玉温泉

湯原・牛島 (1980) は, 1m 深地温観測に基づいて伝導的伝熱量を 0.70 MW と見積もつ

Table 3 Results of computed heat-discharge rates (MW) through fumaroles, steaming grounds, ponds or lakes and hot springs of Aso volcano. Superscript numbers refer to the following references: (a) Nakamura *et al.* submitted; (b) Terada *et al.* (2008a); (c) Yuhara and Ushijima (1980); (d) Terada *et al.* (2007).

	Fumaroles	Steaming grounds	Ponds or lakes	Hot springs
1st Crater				
Yudamari	-	-	110 - 220 ^(b)	-
“S”	<100 ^(a)	2.0<	-	-
“SE”	-	0.64	-	-
“SW-1”	-	0.27	-	-
“SW-2”	-	0.005	-	-
Total	<100	2.92<	110	-
Yunotani	1	0.09	0.17	0.78 ^(c)
Yoshioka	5	0.41	-	0.20 ^(d)
Jigoku -Tarutama	-	0.42	-	1.86 ^(c)
Total	6	0.92	0.17	2.84

た。一方、本研究で推定した放熱率 0.42 MW は、対流的伝熱量も含む噴気地としての放熱率であり、比較は難しい。また、湯原・牛島 (1980) は地獄・垂玉温泉の広い範囲を測定対象としたが、本研究では地獄温泉の主要源泉部のみを解析対象としている。

本地域では顕著な噴気孔は存在せず、主要源泉部を除いて噴気地は小規模である。すなわち、本地域での放熱活動の本質は温泉湧出と思われる。湯原・牛島 (1980) は、数多く分布する温泉湧出口の一部で湧出量を測定し、温泉放熱率を 1.86 MW と見積もった。現在も、温泉湧出口は広く分布しており、その多くは直接的に利用されていることから、現在、温泉湧出量を測定することは困難である。

6.2 阿蘇火山の放熱活動

Table 3 に、阿蘇火山の各地域からの放熱率を示す。ここで、本研究で測定していない湯の谷温泉、地獄・垂玉温泉における、温泉としての放熱率は湯原・牛島 (1980) の値を、吉岡温泉からの噴気および温泉放熱率は寺田・他 (2007) を用いた。

阿蘇火山からの総放熱率は、不確定の大きな中岳第 1 火口南壁噴気“S”を除けば 120 - 220 MW、同噴気を加えれば 300 MW 規模となる。これは、非噴火時の火山としては極めて多く、国内では別府地域の 400 MW に次ぐ。放熱活動の大部分は中岳第 1 火口の湯だまりで起きている。その規模は、草津白根火山の火口湖、湯釜の 30 MW (Ohba et al., 1994) の数倍規模であり、Poás (Rowe et al., 1992) や Ruapehu (Hurst et al., 1991) などと同様に、世界に存在する火口湖における最大級の放熱規模である 200 - 300 MW (Pasternack and Varekamp, 1997) に匹敵する。非噴火時の SO₂ 放出量が 500 - 1000 tonne/day に達することや、中岳第 1 火口南壁噴気“S”において、たびたび赤熱現象が見られることから、非噴火時を通じて、マグマからの活発な脱ガスが継続していることが示唆される。

一方、西斜面地熱帯からの放熱率は合計 9.9 MW で、中岳第 1 火口の 10 分の 1 以下の規模である。蒸気卓越型貯留層の存在が示唆されている一方で、湯の谷および地獄・垂玉温泉の放熱形態は、温泉湧出が 7 割以上を占めている。吉岡温泉でも、以前は温泉湧出が見られるのみであったが、現在、2006 年の地

熱活動によって形成された乾き蒸気を噴き出す噴気孔“b1” (2007 年 5 月以降は“b2”) が、同温泉からの放熱率の大半を担っている。噴気孔“b1” (“b2”) の放熱率は、西斜面地熱帯全体の放熱率の 5 割に相当する。

2006 年に起きた吉岡温泉の地熱活動の他にも、湯の谷温泉、地獄・垂玉温泉では多数の水蒸気爆発の痕跡が残されており、本地域の地熱活動は安定していない。本地熱地域直下に存在すると考えられている蒸気卓越型の地熱貯留層は世界的にも数少なく、その一般的特徴を整理するうえでも、本地熱地帯は重要である。

7. おわりに

阿蘇火山中央火口丘群における地熱活動を定量的に評価するために、ヘリコプターを用いた早朝空中赤外観測と現地調査を実施したほか、既存研究を整理した。中央火口丘群全体からの放熱率は 300 MW 前後に達し、非噴火時の活動としては世界的にみても有数の規模である。放熱量の 9 割は中岳第 1 火口の火口湖が占める。一方、西側斜面地熱地域からの放熱率は 9.9 MW である。同地域を構成する 3 つの温泉では、これまで爆発を含む異常な活動が発生するなど、熱活動は安定していない。2006 年以前の同地熱地域では、放熱の大半は温泉湧出が担っていたが、2008 年 4 月現在、2006 年に吉岡温泉に形成された噴気孔が、同地域全体の放熱率の半分を占めている。

謝 辞

早朝におけるヘリコプターの運行は、佐賀航空株式会社のご協力により実現しました。阿蘇火山博物館の須藤靖明氏には、1970 年代以降の第 1 火口周辺における熱活動についての貴重な情報に加え、草稿について有益なコメントを頂きました。福岡管区気象台地震火山課の松島正哉氏、阿蘇火山防災連絡事務所の後小路義弘氏には、現地調査に際して多くの情報をご提供頂きました。地獄温泉清風荘の河津 威氏には、同温泉の現状と歴史についてご教示頂きました。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。以上の方々に深く感謝します。なお、空中赤外観測は 2008 年度阿蘇火山集中

総合観測のひとつとして、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)を使用して実施しました。

参考文献

- 池辺伸一郎・藤岡美寿夫(2001): 文化十三年(1816)の阿蘇「湯の谷大変」—古文書・絵図資料による水蒸気爆発記録—, 火山, 第46巻, pp.147-163.
- 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, 第53巻, pp.15-34.
- 鶴川元雄・矢崎 忍・宮坂 聡(1998): 火山専用空中赤外映像装置(VAM-90A)による北海道駒ヶ岳, 九重山, 阿蘇山の山体表面温度観測, 防災科学技術研究所研究報告, 第58巻, pp.77-104.
- 久保寺 章・須藤靖明・太田一也(1978): 空中赤外熱映像法による阿蘇および雲仙火山の熱的調査, 阿蘇火山の集中総合観測(第1回)報告(1977年8月~12月), pp.40-50.
- 齊藤政城・松島 健・松尾のり道・清水 洋(2007): 阿蘇中岳火山の二酸化硫黄および二酸化炭素ガス放出量の測定, 九州大学大学院理学研究院研究報告, 第22巻, pp.51-62.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構(1995): 地熱開発促進調査報告書 No.38 阿蘇山西部地域, 1508pp.
- 新村太郎(2007): 南阿蘇村吉岡地熱地帯における新たな噴気活動と温度の連続測定, 熊本学園大学論集「総合科学」, 第13巻, pp.49-67.
- 須川 明(1960): 高温な水面からの蒸発量, 北海道大学地球物理学研究報告, 第7巻, pp.63-70.
- 須藤靖明・山田年広・西 潔・井口正人・高山鉄朗(1984): 阿蘇火山中岳火口内の熱的調査 - 地上赤外熱映像装置による観測 -, 阿蘇火山の集中総合観測(第2回)報告(1981年8月~12月), pp.57-64.
- 寺田暁彦・須藤靖明・吉川 慎・井上寛之(2007): 阿蘇火山吉岡温泉で2006年に起きた地熱活動の定量的評価, 火山, 第52巻, pp.335-340.
- 寺田暁彦・鍵山恒臣・松島喜雄・吉川 慎・吉川章文・小山 寛・山崎伸行・平松秀行・大島弘光(2008): 有珠火山2000年新山の総放熱率と貫入マグマの冷却過程, 有珠火山集中総合観測成果報告書, 印刷中.
- 宮縁育夫・渡辺一徳(2000): 阿蘇火山地獄温泉付近における水蒸気爆発とその堆積物, 火山, 第45巻, pp.25-32.
- 山田 誠(2005): 火山地下水システムにおけるマグマ起源 CO₂ 混入過程に関する同位体水文学的研究, 京都大学大学院理学研究科博士論文, 102pp.
- 山崎達雄・林 正雄・古賀昭人・野田徹郎・福田道博(1978): 阿蘇カルデラ湯の谷地熱地域の蒸気井とその探査. 地熱, 第15巻, pp.205-216.
- 湯原浩三・牛島恵輔(1980): 阿蘇垂玉・湯の谷地域放熱量調査報告, 地質調査所月報, 第31巻, pp.553-566.
- 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., Vol. 46, pp.1-20.
- Nakamura T., Hashimoto T., Terada, A., Sugimoto N., Katsube, Y. and Abo, M., First measurement of water vapor distribution in volcanic fumaroles using a Raman lidar located by an active crater, Geophys. Res. Lett., submitted.
- Ohba, T., Hirabayashi, J. and Nogami, K. (1994): Water, heat and chloride budgets of the crater lake Yugama at Kusatsu-Shirane Volcano, Japan, Geochem. J., Vol. 28, pp.217-231.
- Parmentier, P. and Hayashi, M. (1981): Geologic model of the "Vapor-dominated" reservoir in Yunotani geothermal field, Kyusyu, Japan, Geothermal Resources Council transactions, Vol. 5, pp.201-204.
- Pasternack, G. B. and Varekamp, J. C. (1997): Volcanic lake systematics I. Physical constraints, Bull. Volcanol., 58, pp.528-538.
- Rowe, G. L., Brantley, S. L., Fernandez, M., Fernandez, J. F., Borgia, A. and Barquero, J. (1992): Fluid-volcano

- interaction in an active stratovolcano; the crater lake system of Poás Volcano, Costa Rica, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 49, pp.23-51.
- Ryan, P. J., Harleman, D. R. F. and Stolzenbach, K. D. (1974): Surface heat loss from cooling ponds, *Water Resour. Res.*, Vol. 10, pp.930-938.
- Sekioka, M. (1983): Proposal of a convenient version of the heat balance technique estimating heat flux on geothermal and volcanic fields by means of infrared remote sensing, *Memoirs of the National Defense Academy Japan*, Vol. 23, pp.95-103.
- Sekioka, M. and Yuhara, K. (1974): Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface, *J. Geophys. Res.*, Vol. 79, 14, pp.2053-2058.
- Sudo, Y. and Hurst, A. W. (1998): Temperature changes at depths to 150 meters near the active crater of Aso Volcano: preliminary analysis of seasonal and volcanic effects, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 81, pp.159-172.
- Taguchi, A., Parmentier, P., and Yamasaki, T. (1981): Sassolite sublimated in a steam well at the Yunotani geothermal field, Aso Caldera, Kyushu, *Mineralogical Journal*, Vol. 10, pp.338-343.
- Terada A., Hashimoto, T., Kagiya, T. and Sasaki, H. (2008a): 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.
- Terada A., Kagiya, T. and Oshima, H. (2008b): The Ice Box Calorimetry: A handy method for estimation of heat discharge rates through a steaming ground, *Earth Planets Space*, 60, 699-703.
- Terada A. and Sudo Y. Geothermal activity within the western slope geothermal zone of Aso volcano, Japan: Development of a new geothermal field in 2006 Geothermics, submitted

Quantitative Evaluation of Geothermal Activities at the Central Cones of Aso Volcano, Japan

Akihiko TERADA*, Tsuneomi KAGIYAMA* and Shin YOSHIKAWA*

*Aso Volcanological Laboratory, Graduate School of Science, Kyoto University

Synopsis

For quantitative evaluations of geothermal activities of Aso volcano, Japan, an aerial infrared survey was carried out on early morning by use of a helicopter. At Nakadake, one of the central cones of Aso volcano, aerial infrared photographs reveal that no temperature anomalies exist out of the 1st Crater of Nakadake. The total heat-discharge rate from Aso volcano is estimated to be 200 – 300 MW in the calm period. The most of heat is discharged from hot crater lake of the Nakadake 1st Crater. Heat-discharge rate from the Western slope geothermal field (WSGZ) is estimated to be 9.9 MW. The Yoshioka hot spring (one of the WSGZ) that notable geothermal events occurred in 2006 releases over 5 MW of heats corresponding to the half of the heat-discharges from the WSGZ.

Keywords: Aso volcano, Heat-discharge rate, Yunotani hot spring, Yoshioka hot spring, Jigoku-Tarutama hot spring, Aerial infrared photograph