

阿蘇火山・中央火口丘群における熱活動の定量化

京都大学大学院理学研究科

寺田 暁彦*・鍵山 恒臣

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

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¹⁾。その一方、火口丘群の西側斜面でも熱活動が見られる²⁾。

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、過去には第 2 火口や火口外でも熱活動が存在したことがある(須藤, 私信)。したがって、比較的静穏とされる時期に、これら熱活動を定量的に評価することは、将来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²⁾。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

図 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

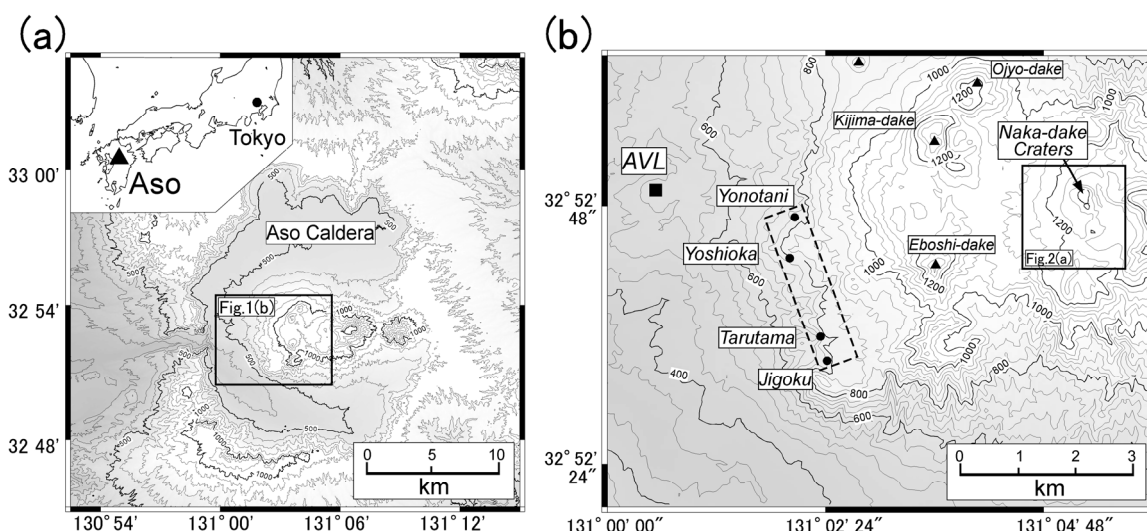


図 1. (a)阿蘇火山の位置および地形。(b) 阿蘇火山中央火口丘群西側の地形。破線で囲った四角は西側斜面地熱地帯（湯の谷、吉岡、垂玉および地獄温泉）の位置を、黒四角は京都大学火山研究センターの位置を示す。

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。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

図 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³⁾。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(図 2(b)), 湖面からの放熱率は 200 MW 前後に達している¹⁾。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、湖水表面温度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、湖表面からの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¹⁾。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³⁾。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¹⁾。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

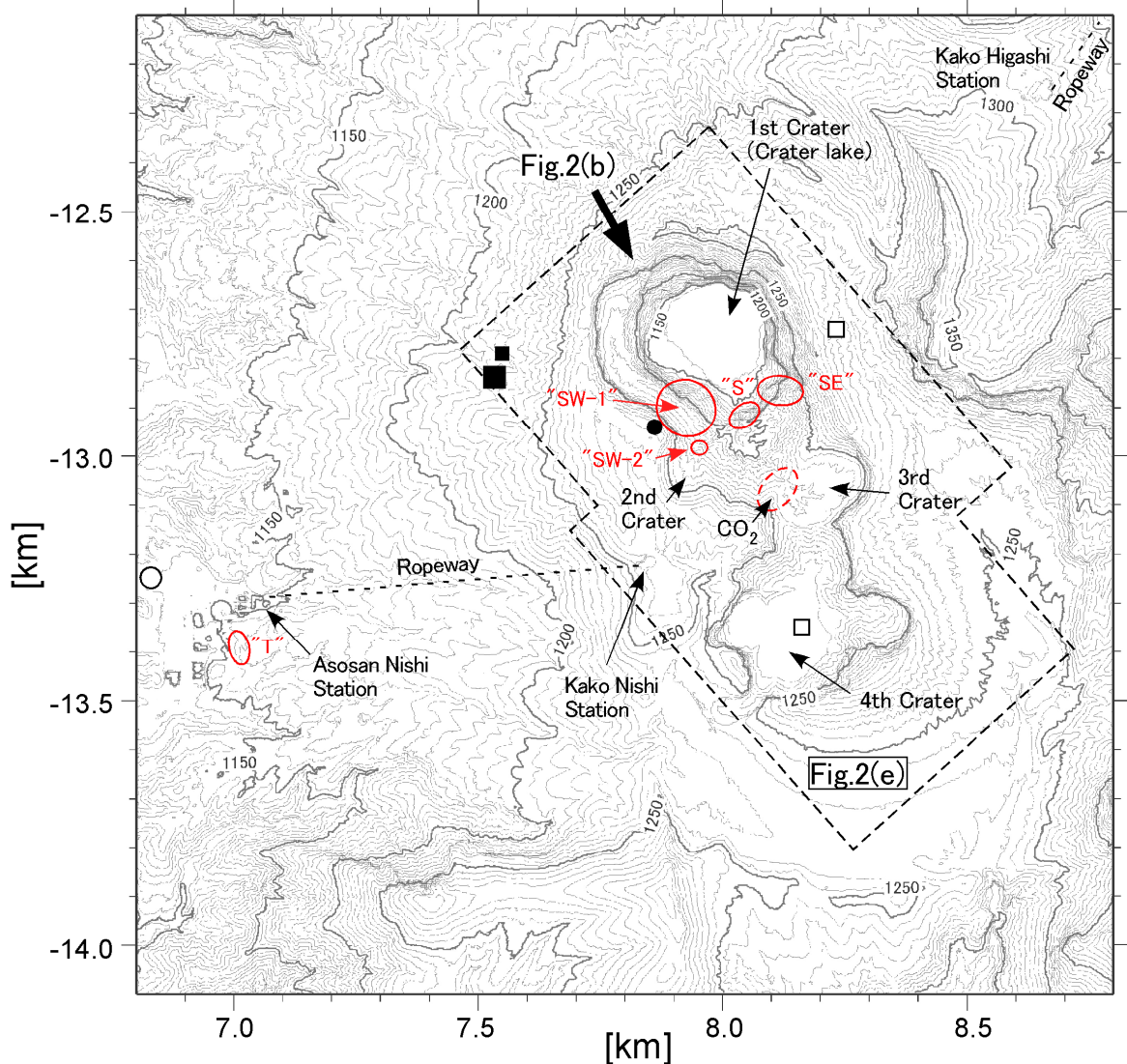


図 2. (a)中岳火口群周辺の地熱異常分布。大小の黒四角は深度 150 m および 70 m の地温観測井の位置⁸⁾を、白四角は深度 10mの地温観測点の位置を示す。黒丸は阿蘇火山博物館が運用する火口監視カメラ（通称 A カメラ）の位置に対応する。

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¹⁾。

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(図 2(a)の”S”, 図 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(図 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⁴⁾。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。

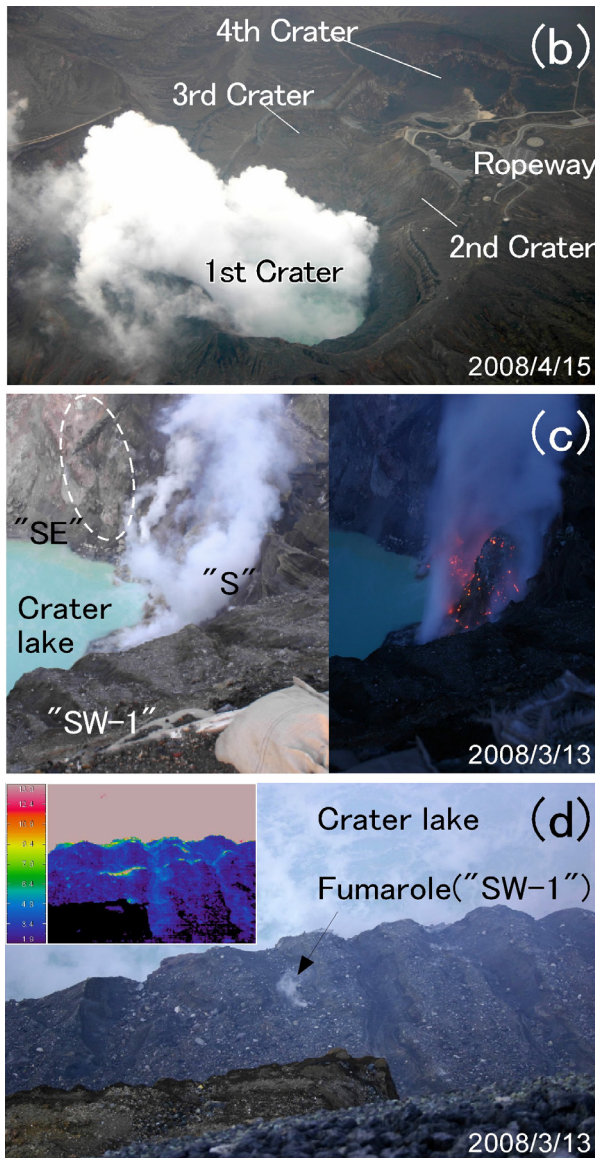


図 2.(b) 中岳火口群の空中写真。(c) 南壁噴気孔群(S)と南東壁噴気(SE)の写真。南壁噴気孔群では、夜間には 赤熱現象が見られることがある。(d) 南西噴気孔群 1(“SW-1”)の可視および赤外画像。ここに示した(c)および(d)は、阿蘇火山博物館が運用する監視カメラ(通称 A カメラ、図 2(a)の黒丸)付近から撮影した。

(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^{5), 9)}。一方、山上有料道路の入口付近(図 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

このほか、1977年⁵⁾および1981年⁶⁾に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(図 2(a)の”SE”, 図 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(図 2(a)の”SW-1”, 図 2(d))においても、温度異常が観測されている。これらの温度異常は、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(図 2(a)の”SW-2”)は、かなり以前から認識されていたらしい。久保寺ら⁵⁾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⁵⁾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(図 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⁷⁾。

報告は、これが唯一である。

なお、第一火口西壁縁の西方約 200 m 地点で掘削された深度 70 m (図 2(a)の小黒四角) および 150 m (図 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⁸⁾。一方、第 4 火口中央部および第 1 火口の東 100 m 付近(図 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(図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係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^{10),11),12)}。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¹³⁾。

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^{10),11)}。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¹⁴⁾。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¹⁵⁾。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^{すずめ}地獄、餅搗^{もちつき}地獄(図 3(a))などの湯沼が形成されている²⁾。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¹⁵⁾。

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(図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^{2),11)}、その2年半後には坑井内の^{ほうさんせき}硼酸石(H₃BO₃)の晶出に

よる閉塞傾向が顕著となり¹⁶⁾、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(図 3(a))、1881年の推定火口は温泉湧出が見られる赤湯付近(図 3(a))と考えられている¹⁵⁾。この他、1989-1990年にかけて、湯の谷北部のキャンプ場施設(図 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年の空中赤外線観測⁵⁾、1978年の1m深地温観測²⁾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¹⁴⁾。

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”(図 3(a)(c))が形成された^{17), 14)}。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200m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3m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¹⁴⁾。

(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(図 4(a))。

地獄温泉の南方には、北西方向に開いた径250m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

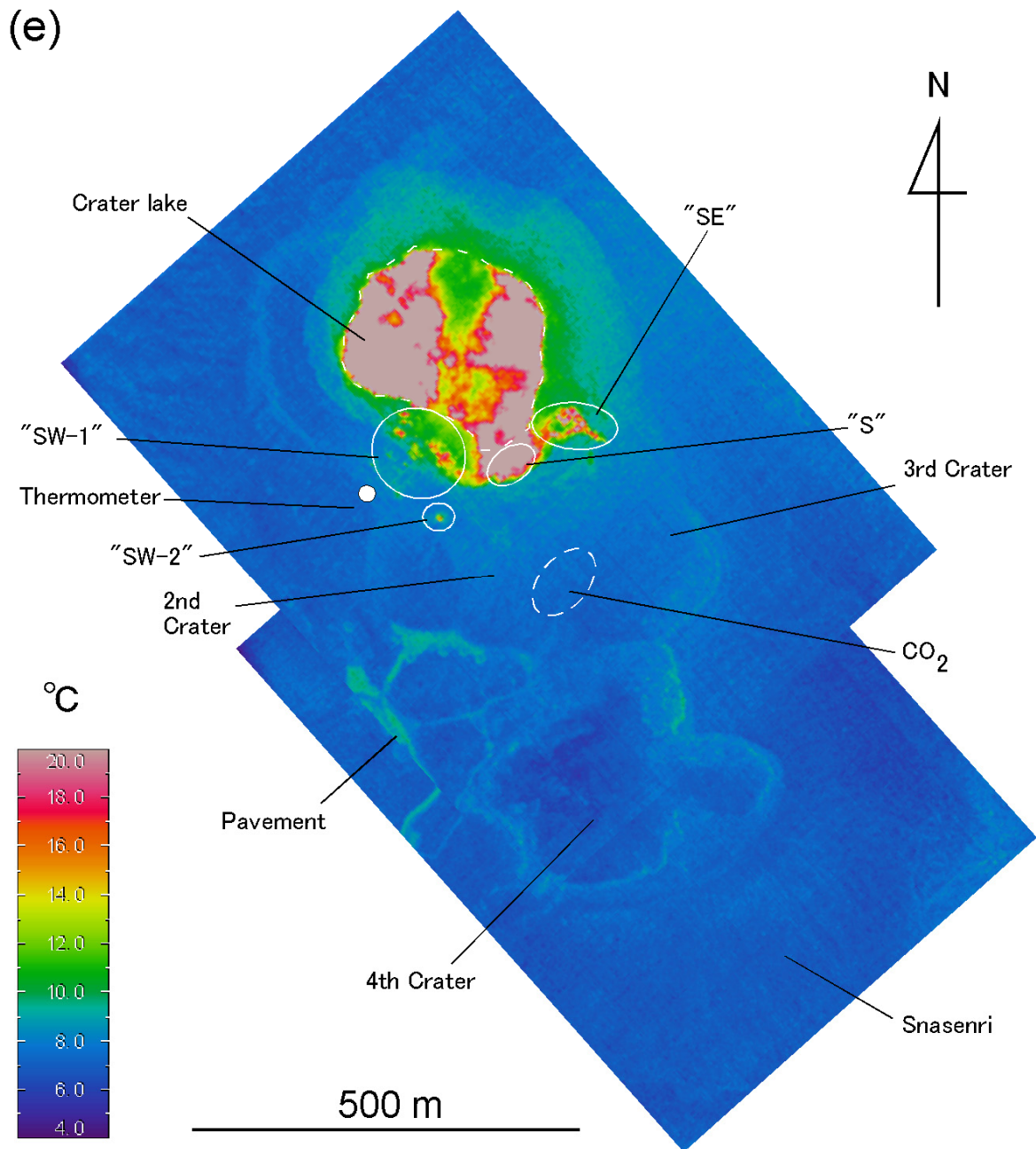


図 2. (e)中岳火口群の空中赤外画像。対地高度 1,500 m から 2008 年 4 月 15 日撮影。白丸は阿蘇火山博物館が運用する監視カメラ(通称 A カメラ)の位置を示す。破線で囲った領域は、やや高い土壌 CO_2 濃度⁷⁾が測定された位置を示す。“Thermometer”は、空中赤外観測に合わせて設置した地表面温度測定点の位置を示す。

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¹⁸⁾。

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、阿蘇火山中岳の北北東 5.6 km に位置する観光施設「カントリー・ドミニオン」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。

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ィ社製のロガー 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。図 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(図 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(図 2(b)の白丸)付近に設置した。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(図 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(図 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は 7 - 9 °C だったが、地表面温度(図 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、解析に用いる赤外面像と、およその撮影範囲を図 2(c)、図 3(d)(e)および図 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(図 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、久保寺の観測⁵⁾や須藤の観測⁶⁾では検出されたが、1996 年に実施された空中赤外観測⁹⁾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℃、"SE"の最高温度は23.3℃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⁷⁾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(図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(図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、赤外面像に表現されている(図3(d))。

(3) 吉岡温泉

赤外面像上では、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、2007年1月に熊本県が実施した空中赤外觀測¹⁴⁾と比較して、"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²⁾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¹⁴⁾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(図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、赤外面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面像に表現されている(例えば、地獄温泉雀の湯)。また、図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、新湯しんゆと呼ばれる温泉

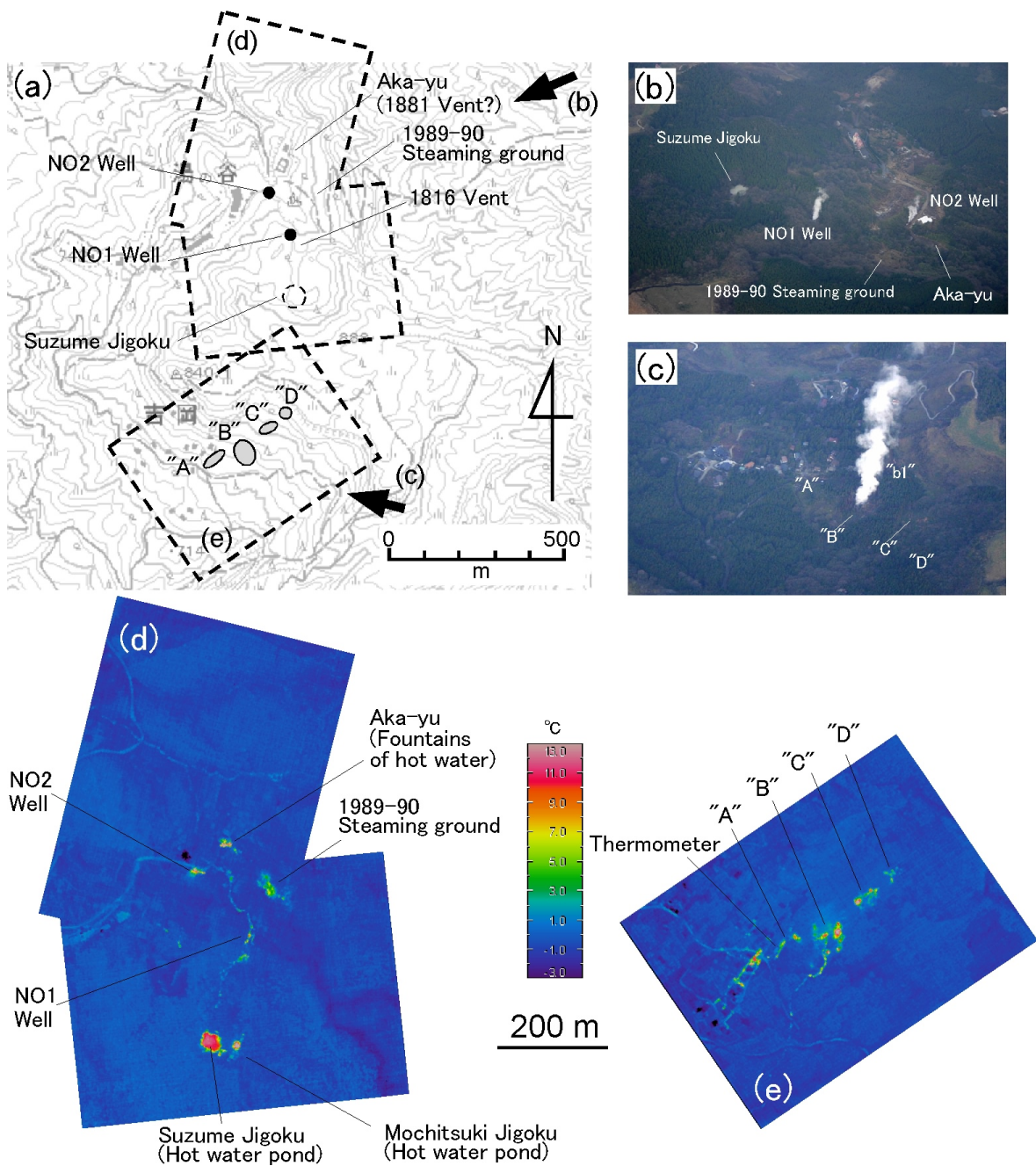


図 3. (a) 湯の谷および吉岡温泉周辺の地形図。(b) 湯の谷および (c) 吉岡温泉の空中写真。(d) 湯の谷および (e) 吉岡温泉の空中赤外画像。これらの画像は 2008 年 4 月 15 日に対地高度 1,000 m から撮影された。図.3(e) に示した“Thermometer”は、空中赤外観測に合わせて実施された地表面温度観測の測定点を示す。

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。

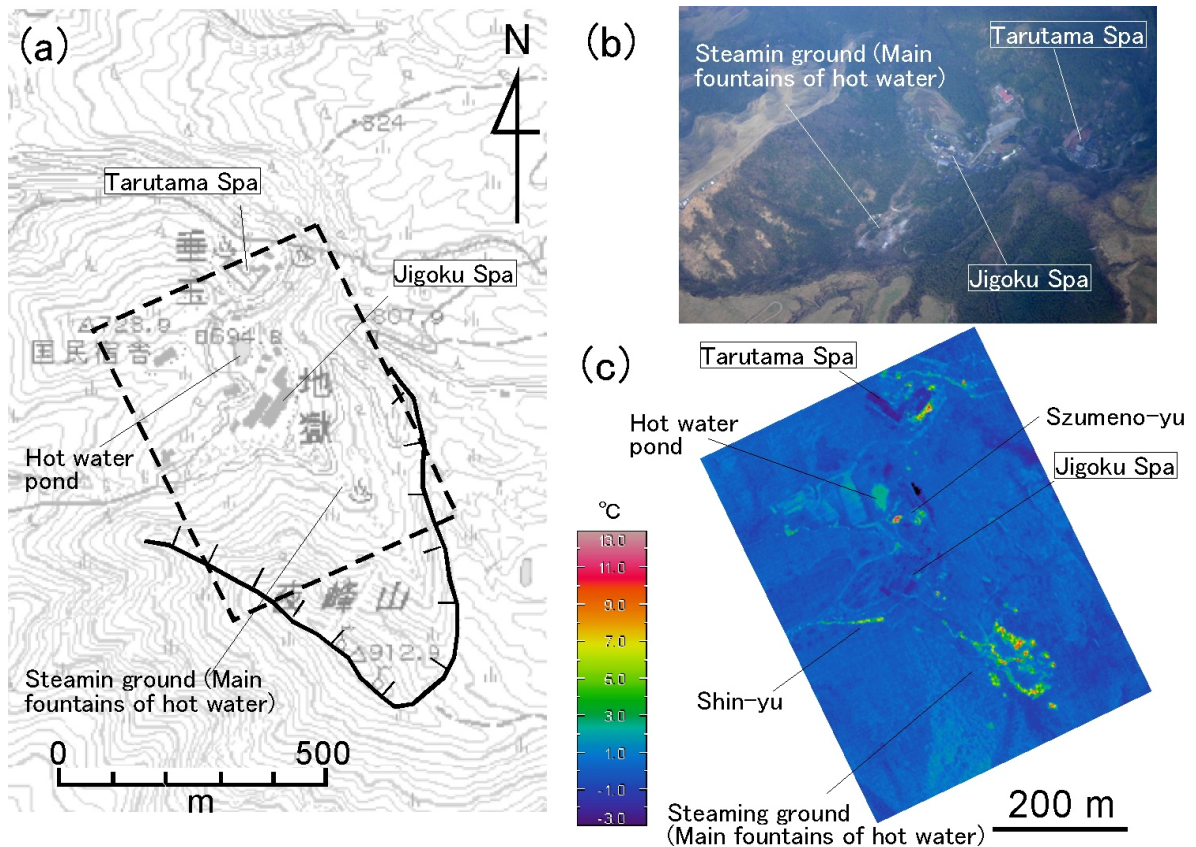


図.4(a) 地獄・垂玉温泉周辺の地形図。(b) 同温泉周辺の空中写真。(c) 同温泉周辺の空中赤外面像。

これらの画像は、2008年4月15日に対地高度 1,000 m から撮影された。

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(図 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面像に基づき、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の方法¹⁹⁾を用いる。なお、地上において氷を用いた放熱率測定法²⁰⁾も合わせて実施した。その詳細は別に発表する²¹⁾。

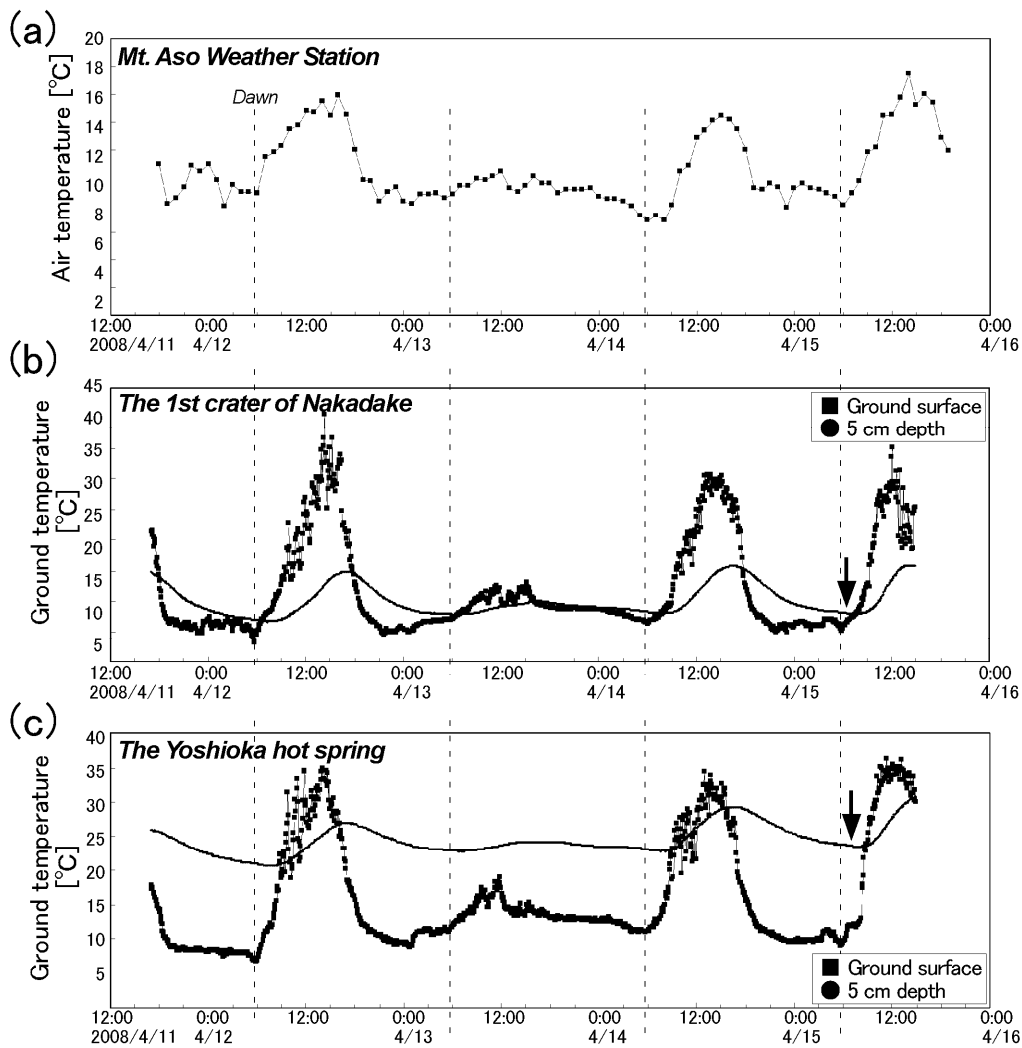


図 5. (a) 気象庁阿蘇山測候所(図 2(a)の白丸)における気温。(b)(c) 地表面および 5 cm 深地中温度の記録。観測点の位置は、それぞれ図 2(e)と図 3(e)に“Thermometer”として示した。矢印は、空中赤外線観測が実施された時刻を示す。

4.1 熱収支法

Sekioka and Yuhara の熱収支法¹⁹⁾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別に述べたので²²⁾、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、いずれも赤外面像から得られる。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²³⁾。

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で、1 画素あたりの面積を補正した。

4.3 解析結果

表 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 50 MW 規模の噴気活動⁴⁾が存在している。表 1 に示した放熱率には、これら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。

湯の谷温泉では、1989 年噴気地について同様の解析を行なった結果、噴気地としての放熱

表 1. 式(1)および赤外画像から計算した各噴気地の放熱率。ここで，“Area”と“Max. Temperature”は、地表面温度異常領域の面積と、その最高温度を示す。“Resolution”は、赤外画像における 1 pixel あたりの実面積を表す。

	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

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 月の空中赤外画像から推定値された 0.6 MW¹⁴⁾ よりもやや小さい。

地獄・垂玉については、観測した赤外画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

阿蘇火山には、通常の湖沼よりも明らかに水温の高い火口湖や湯沼が複数存在する。本章では、中岳第一火口の湯だまり、湯の谷温泉の雀地獄、餅搗地獄の蒸発エネルギーを、空中赤外画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 の式²⁴⁾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¹⁾。

本研究では、湖面から蒸発で失われるエネルギー Q_f の大小関係を概略的に求めるために、須川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²⁵⁾：

$$Q_i = CS_iT_i^3 \quad (2)$$

ここで、 T_i は湖面の平均温度、 S_i 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^{25), 2)}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

表 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¹⁾。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。

表 2. 式(2)を用いて計算された火口湖および湯沼からの放熱率。ここで、“Area”と“Mean Temperature”は、それぞれ湖面積と平均湖面温度を示す。

	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

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。表 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²⁾¹⁴⁾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、単純に比較することは困難である。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²⁾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生じた。

(1) 湯だまり

本研究で用いた経験的關係²⁵⁾から得られた 110 MW は、2007 年を対象としたの見積もり 220 MW¹⁾の半分程度である。須川の式²⁵⁾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.¹⁾が用いた Ryan のモデル²⁴⁾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²⁶⁾。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⁴⁾、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^{2),11)}、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・牛島の研究²⁾と比較して、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²⁾が観測を行なった際よりも 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、過去に一部の泉源で直接測定が行なわれ、放熱率として 0.78 MW が報告されている²⁾。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²⁾。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、本研究と過去の結果²⁾とを直接比較することは難しい。ただし、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、以前に調査²⁾が行なわれた 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¹⁴⁾¹⁷⁾の結果、前回²⁾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 2007 年の結果¹⁴⁾とを比較すると、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²⁾は、1m 深地温観測に基づいて伝導的伝熱量を 0.70 MW と見積もった。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

表 3. 阿蘇火山各地熱地域からの放熱率。

	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	-	Total
Yunotani	1	0.09	0.17	0.78 ^(c)	2.04
Yoshioka	5	0.41	-	0.20 ^(d)	5.61
Jigoku	-	0.42	-	1.86 ^(c)	2.28
-Tarutama					
Total	6	0.92	0.17	2.84	9.93

較は難しい。また、湯原・牛島²⁾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²⁾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の特徴

表 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²⁾の値を、吉岡温泉からの噴気および温泉放熱率は寺田・他⁷⁾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 MW、同噴気を加えれば 200 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 MW²⁷⁾ の数倍規模であり、Poás²⁸⁾ や Ruapehu²⁶⁾ 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 MW²⁹⁾ 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. まとめ

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 120 - 200 MW で、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。国際航業株式会社の佐々木 寿氏には、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。なお、本文は京都大学防災研究所年報第 51B 巻に収録されたものであり、図表については、表 3 を修正したうえで再掲載したものです。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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, 31, 553-566.
- 3) 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, 15-34.

- 4) 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.
- 5) 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), 40-50.
- 6) 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), 57-64.
- 7) 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, 22, 51-62.
- 8) 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.*, 81, 159-172.
- 9) 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, 58, 77-104.
- 10) 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*, 15, pp.205-216.
- 11) Parmentier, P. and Hayashi, M. (1981): Geologic model of the "Vapor-dominated" reservoir in Yunotani geothermal field, Kyusyu, Japan, *Geothermal Resources Council transactions*, 5, 201-204.
- 12) 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.
- 13) 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科博士論文, 102pp.
- 14) 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*, 52, 335-340.
- 15) 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*, 46, 147-163.
- 16) Taguchi, A., Parmentier, P., and Yamasaki, T. (1981): Sassolite sublimated in a steam well at the Yunotani geothermal field, Aso Caldera, Kyushu, *Mineralogical Journal*, 10, 338-343.
- 17) 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」, 13, 49-67.
- 18) 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, 45, 25-32.
 - 19) Sekioka, M. and Yuhara, K. (1974): Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface, J. Geophys. Res., 79, 2053-2058.
 - 20) Terada A., Kagiya, T. and Oshima, H. (2008b): Ice Box Calorimetry: A handy method for estimation of heat discharge rates through a steaming ground, Earth Planets Space, 60, 699-703.
 - 21) 内田 東・佐藤孝久・山下隆丞・寺田暁彦: 噴気地における地表面温度と放熱率の経験的関係ー赤外カメラと氷箱熱流計測による同時観測実験ー, 火山, 投稿中.
 - 22) 寺田暁彦・大島弘光・松島喜雄・鍵山恒臣 (2008): 有珠火山 2000 年新山からの総放熱率とその変遷ー1977 年噴火後の貫入マグマの冷却過程との比較, 日本地熱学会誌, 30, 259-270.
 - 23) 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, 23, 95-103.
 - 24) Ryan, P. J., Harleman, D. R. F. and Stolzenbach, K. D. (1974): Surface heat loss from cooling ponds, Water Resour. Res., 10, 930-938.
 - 25) 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, 7, 63-70.
 - 26) 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.
 - 27) 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., 28, 217-231.
 - 28) 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., 49, 23-51.
 - 29) Pasternack, G. B. and Varekamp, J. C. (1997): Volcanic lake systematics I. Physical constraints, Bull. Volcanol., 58, 528-538.