

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

寺田 暁彦*・須藤 靖明***・吉川 慎*・井上 寛之*

(2007年3月29日受付, 2007年10月15日受理)

Quantitative Analysis of Geothermal Events at the Yoshioka Hot Spring,
Aso Volcano, in 2006

Akihiko TERADA*, Yasuaki SUDO***, Shin YOSHIKAWA* and Hiroyuki INOUE*

New geothermal activities occurred at the Yoshioka hot spring of Aso Volcano from June 2006. We found a new fumarole named "a3" in a new steaming ground called "A". The maximum temperature of the steams from it exceeded 98 degrees centigrade. In August, a vigorous fumarole "b1" and new steaming grounds "B" and "C" were formed. Vapor fluxes from these fumaroles obviously increased in October, and the daily mean heat and water discharge rates of the fumarole "b1" were estimated approximately to be 15–30 MW and 6.7–13 kg/s (580–1,100 ton/day), respectively. Especially, "b1" ejected over 10 tons of ash on 16 October. After November 2006, the temperatures of the steaming grounds fell, and heat and the water discharge rates of the fumarole "b1" decreased to be about 4.6 MW and 2.0 kg/s (170 ton/day), respectively. The average heat discharge rate from "b1" is more than tens times higher than that of existing natural fumaroles in the Yoshioka, Yunotani, Jigoku and Tarutama hot springs in the usual period. We infer that the vigorous geothermal events were caused by the temporal increase of vapor flux from the deep geothermal hot water.

Key words: Yoshioka hot spring, Aso volcano, fumarole, steaming ground

1. はじめに

阿蘇火山中岳第一火口から西へ5 kmに位置する吉岡温泉は、同温泉の北方約600 mに位置する湯の谷温泉、南方約1.6 kmに位置する垂玉、地獄温泉とともに、阿蘇火山中央火口丘群としては数少ない地熱地域のひとつである (Fig. 1a).

吉岡温泉では、2005年11月頃から噴気量が増加し始めた。そして、2006年6月までに複数の噴気地が形成されて植生が枯死したほか、同年8月には優勢な噴気孔の開口や火山灰噴出が発生するなど、地熱活動が顕著に活発化した。地熱地帯では、活動的火口ではない場所であっても、しばしば強い水蒸気爆発が発生することがある (例えば、Hedenquis and Henry, 1985; White, 1956)。阿蘇火山においても、湯の谷温泉や地獄、垂玉温泉などで同様の事例が報告されている (例えば、池辺・藤岡、

2001; 宮緑・渡辺, 2000)。また、吉岡温泉付近を含む中央火口丘群西側斜面は、水準測量から示唆される圧力変動源の上に位置すること (須藤・他, 2006)、同地熱地域で発生してきた水蒸気爆発や温泉成分の変化と、中岳の噴火活動との関連が指摘されていること (例えば、太田, 1984) から、本地域の地熱活動を定量的に評価することは重要である。

我々は、今回の活動の初期から現象の推移を記録した。本論文では、噴気および噴気地からの放熱活動を定量的に評価するとともに今回の活動の経過をまとめ、地熱活動の推移と原因について議論する。

2. 吉岡温泉の概要

吉岡温泉は1960年代に開発された小規模な温泉地で、これ以前に行なわれた地熱地域としての研究、記載はほ

* 〒869-1404 熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽 5280
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

Aso Volcanological Laboratory, Kyoto University, 5280
Kawayo, Minami-Aso, Kumamoto 869-1404 Japan.

** 現所属 財団法人阿蘇火山博物館

〒869-2232 熊本県阿蘇市赤水 1930-1
Aso Volcano Museum, 1930-1, Akamizu, Aso, Kumamoto 869-2232 Japan.

Corresponding author: Akihiko Terada
e-mail: terada@aso.vgs.kyoto-u.ac.jp

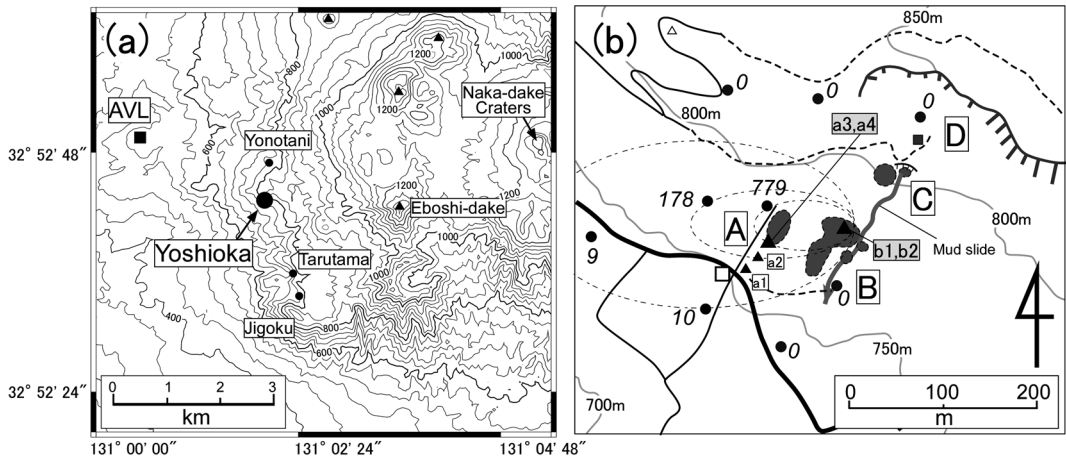


Fig. 1. (a) Locality of Yoshioka hot spring at Aso volcano in central Kyusyu, Japan, and neighboring geothermal areas of Yunotani, Jigoku and Tarutama. Closed square indicates the Aso Volcanological Laboratory (AVL) where the high sensitive camera is installed. (b) Localities of steaming ground where existing plants completely died (gray areas), fumaroles (solid triangles) and a hot water pool (gray square). An open square indicates the hot water source of the Yoshioka hot spring. Closed circles indicate the locations where the ash of 16 October 2006 were sampled, and numerals represent the ash weights in g/m^2 . A black solid line and broken lines represent vehicle-accessible roads and vehicle-inaccessible path, respectively.

とんど存在しない。ここでは、住民への聞き取り調査と現地調査を合わせて、今回の活動以前の吉岡温泉について記載する。

Fig. 1b に吉岡温泉の概略を示す。本論文では、地熱異常の分布に基づいて領域 A, B, C および D と分類して、A 内および B 内に生じた顕著な噴気孔を、それぞれ a1・a2・a3・a4 および b1・b2 と呼ぶ。

温泉開発以前から、領域 D (Fig. 1b) では泉温 90°C 前後の小規模な温泉湧出が知られていた。この湧出は山崎・他 (1978) に記載され、1997 年にも確認されている (筒井, 私信)。

1963 年頃、領域 A 付近 (Fig. 1b) から掘削された水平坑の約 100 m 付近、すなわち地表から深度 20 m 付近において、 $40\text{--}50^\circ\text{C}$ 前後の温泉水が得られた。湧出量は 100 l/min 前後で、これは 10°C の地下水温を基準とすると約 0.2 MW の放熱率に相当する。この温泉は 2006 年現在も吉岡温泉の源泉として利用されている。さらに 1985 年頃には、領域 A 付近から複数のステンレス製パイプがほぼ水平方向に約 100 m 挿入され、 100°C 前後の蒸気が得られ、温泉水の造成に利用されている。これらパイプのいくつかは埋設時に地中で破断して、その地表で噴気 a1 と a2 が生じた。

このように、以前から存在してきた明らかな地熱活動は、領域 D の熱水の自然湧出と、破損したパイプから生じた噴気孔 a1 と a2 である。1974 年から 1975 年にか

て実施された 1 m 深地温観測の際にも、領域 A, B および C において地温異常、植生異常および変質帯は認められなかった (湯原・牛島, 1980)。

水平坑から得られた温泉水については、山崎・他 (1978) や新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1995) による溶存成分分析があり、温泉水は極めて浅所の水を起源とすることを報告している。温泉水や周辺の噴気ガスの Cl 濃度が非常に少ないことから、本温泉は、地下深部に貯留された天水が加熱され、生じた蒸気が表層付近の地下水に吹き込むことで生成された、蒸気加熱型温泉と考えられている。なお、近年、阿蘇火山では温泉水の炭素安定同位体を用いた研究が進められている。吉岡温泉での分析例はないものの、周辺の湯の谷や地獄および垂玉の各温泉水については、マグマ起源の CO_2 混入比が阿蘇火山の他地域よりも多いことが示されている (山田, 2005)。

3. 2005 年末から 2007 年までの経緯

本章では、今回の地熱異常活動の経緯をまとめる。地熱活動は 2005 年 11 月の領域 A に始まり、2006 年 8 月に領域 B と C が形成され、活動の最盛期となった 10 月には噴気孔 b1 から火山灰噴出が起きた。

3-1 噴気地・噴気孔の形成

2005 年 11 月頃から、噴気孔 a1, a2 からの噴気量が増大し、2.7 km 離れた京都大学火山研究センター (以下では

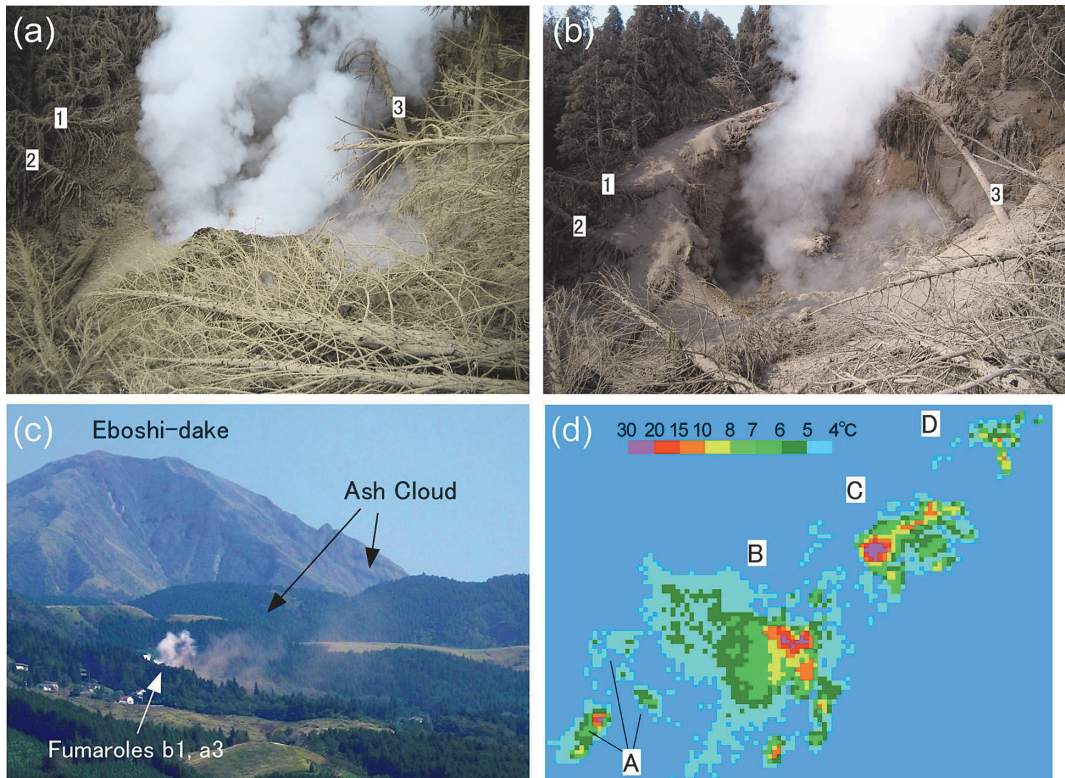


Fig. 2. (a) The photograph of vent “b1” with the small tuff-cone taken at 4 October 2006 and (b) vent “b1”, taken just after the ash ejection events on 16 October 2006. The three trees marked as 1, 2 and 3 in (a) are, respectively, identical to the trees marked as 1, 2 and 3 in (b). (c) A photograph of ash cloud emitted from vent “b1” on 21 October 2006, taken from 500m south of AVL. (d) An aerial infrared photograph of Yoshioka taken on 19 January 2007 by the local government of Kumamoto Prefecture.

火山研と呼ぶ) からもしばしば目視されるようになった。

2006年6月までに、領域Aに噴気孔a3 (Fig. 1b) が開口した。噴気孔a3は、当初は噴気ばかりでなく、温度96–98°Cの温泉水を高さ2m前後まで噴き上げていた。さらに、噴気孔a3北側の50m×30mの範囲に地温90°C以上の噴気地が形成されて、植生枯死や倒木が起きるなど、領域Aにおいて地熱活動が顕著に活発化した。その一方で、噴気孔a3の開口に対応するように、噴気孔a1, a2からの噴気量は顕著に減少した。

領域B付近では、7月10日に樹木が赤茶色に変色している様子が遠望された。8月25日頃には、新たな噴気が火山研から目視され始め、29日に行なった現地調査で、領域Bに温度98°C前後の新たな噴気孔b1が見出された。また、領域B, C (Fig. 1b) の100m×200mの範囲に、地温90°C以上の噴気地が形成されたこと、C東縁の幅約20m程度が崩壊して、小規模な土石流として約150m流下したことが確認された。

3-2 火山灰噴出

噴気孔a3とb1の噴気量は徐々に増大し、2006年9月以降、a3はごく少量の湿った泥を断続的に近傍へ飛散させるようになった。9月下旬頃にはa3が閉塞し、a3から約3m北側に噴気孔a4が開口した (Fig. 1b)。

10月11日には、噴気孔b1で基底数m、高さ約3mの火山灰丘が形成されていた (Fig. 2a)。噴出口からは温度90°C前後の湿った泥状の火山灰の塊を、10数秒おきに数mの範囲に飛散させ、火山灰丘は成長中であった。

10月16日未明には、噴気孔b1から乾燥した火山灰が噴出し、b1周辺の東西300m、南北200m程度の範囲に降灰した。また、噴気孔b1に形成されていた火山灰丘の大半が消失し、噴出口が拡大していた (Fig. 2b)。単位面積あたりの堆積重量を数箇所ですべて計測してアイソパックを作成 (Fig. 1b) した結果、堆積重量は4.7tonと計算された。噴出物はb1近傍に数10cm程度の厚さで堆積しており、これらを合わせた総噴出量は少なくとも10ton以上

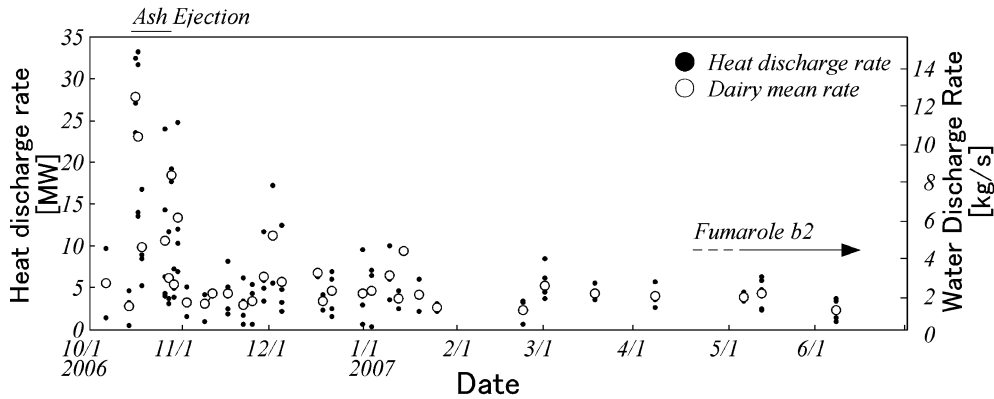


Fig. 3. Time-series variation of heat and water discharge rates from b1 (b2) (closed circles). Open circles represent daily mean rates.

と考えられる。さらに、10月22日13時30分頃から14時頃にかけて、噴気孔 b1 から少量の火山灰を含む有色噴煙が噴出し、噴出口から高さ数10 m まで上昇した (Fig. 2c)。なお、噴気 a4 は同22日までに顕著に衰退した。

3-3 噴気・噴気地の衰退

11月初旬まで、噴気孔 b1 からの噴気には常にごく微量の火山灰が含まれ、周辺の植生に火山灰の付着が認められた。11月下旬以降、噴気孔 a4 や b1 に目立った変化は見られなくなったほか、領域 A, B および C の各噴気地では、熱異常範囲の縮小、地温低下および植生の回復が見られた。2007年5月には、噴気孔 a1, a2 および a4 はほぼ活動を停止し、噴気孔 b1 は閉塞するとともに、その東側数 m の場所に同規模の噴気孔 b2 が開口した。

なお、2006年10月14日に吉岡温泉周辺に設置した3台の地震計の記録では、噴気孔 b1 の方向から到来する連続微動が記録され、10月22日に噴気孔 b1 で発生した有色噴煙放出の際には、やや低周波の地震動と連続微動振幅の増大が記録された。11月以降は、連続微動振幅が減少するとともに、領域 D 付近のごく浅部から到来するやや低周波の地震動が1週間に数個程度観測された。

4. 地熱活動の定量化

4-1 噴気からの放熱率

火山研 (Fig. 1a) に2006年10月4日に高感度カメラを設置して、得られた画像を Plume Rise 法 (鍵山, 1978) で解析し、噴気孔 b1 および b2 からの放熱率を見積もった。吉岡温泉は山体斜面に存在する。このような場合に Plume Rise 法を適用すると、斜面風の影響により、解析結果が大きくばらつくことがある (寺田, 2004)。そこで、解析は風速 3 m/s 以下の日に限り、さらに風速と得られた放熱率に相関が見られないことを確認した。なお、噴

気孔 b1 程度の規模では、周辺大気湿度が低いとき、噴出した水蒸気が十分に凝結しないために、Plume Rise 法から得られる結果の解釈が困難になることがある。そこで、特に2007年1月以降については、比較的湿度の高い早朝の画像を選んで解析した。

Fig. 3 に噴気孔 b1 からの放熱率変化を示す。ここで、2007年5月以降は噴気孔 b2 からの放熱率を表示している。放熱率は、火山灰噴出の起きた10月16日に顕著に増大したことがわかる。その後、11月にかけて日平均放熱率の変動が大きく、日平均で30 MW 前後に達する日も見られた。11月以降、放熱率が減少するとともにその変動幅が小さくなり、日平均4.6 MW のほぼ一定水準で推移した。現地観察でも、新たな火山灰噴出の痕跡は見られなくなった。噴気活動が b1 から b2 へ移動した前後でも、放熱率に変化はみられなかった。

京都大学や気象庁が月に数回程度実施した現地調査によれば、噴気孔 b1 または b2 の噴出口付近の温度は100°C 前後でほぼ一定で、噴出口は常に透明であった。そこで、噴気として放出される熱量が100°C における水蒸気の潜熱 $2.25 \times 10^6 \text{ J/kg}$ に等しいと仮定して、放水率を推定した (Fig. 3)。平均放水率は、10月中旬～下旬は6.7 kg/s (580 ton/day)、11月以降は2.0 kg/s (180 ton/day) である。解析した8ヶ月間における総放水量は55,000 ton と見積もられる。

4-2 噴気地からの放熱率

Fig. 2d に熊本県が2007年1月19日に撮影した空中赤外画像を示す。使用した帯域は8-12 μm 、撮影対地高度は約650 m、地表面における平均的解像度は $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ である。観測は8時15分前後に行われたため、地表面温度に対する日射の影響は小さいと考えられる。本熱画像にはオルソ補正、および MODORTAN4 (Anderson *et al.*,

Table 1. Heat discharge rates from Yoshioka (this study) and neighboring geothermal areas of Yunotani, Jigoku and Tarutama (after Yuhara and Ushijima, 1980).

	Fumaroles	Steaming ground	Hot springs	Hot water ponds
Yoshioka in Oct. 2006	15-30	1-2	0.2(?)	-
Yoshioka in 2007	4.6	0.6 <	0.2(?)	-
Yunotani, Jigoku and Tarutama	0.5	0.9	2.7	0.24

2000) を用いた大気中の水蒸気吸収補正が施されている。放射率を0.96とすると、地表面の最高温度は43°Cと求められる。なお、Fig. 2dが撮影された2007年1月は、最盛期の2006年10月に比較して地熱異常領域が縮小している。従って、Fig. 2dには、植生枯死領域の概略を示したFig. 1bに対応しない領域もある。

Fig. 2dから、Sekioka and Yuhara (1974)の熱収支法を用いて噴気地からの放熱率を推定した。放熱率の計算に必要な係数は、通常の噴気地における平均的な値とされる37 W/m²/K (Sekioka, 1983)を用いた。熱異常のない地表面温度をFig. 2dから3.5°Cと読み取って計算すると、総放熱率は0.6 MWと見積もられる。ここで、立木が残存している領域Bの東部についてはやや過小な見積もりとなっている。

なお、Fig. 2dが撮影された2007年1月は、火山灰噴出などが発生した2006年10月に比較して、噴気地の領域縮小や温度低下が見られた。特に優勢だった領域Aの熱異常領域の大半が消滅していたことを考慮すると、最盛期の総放熱率は1-2 MW前後あったと思われる。

5. 議 論

従来、小規模な温泉湧出が存在するのみだった吉岡温泉では、2005年11月ごろから数ヶ月間で噴気地や噴気孔が次々に形成され、2006年10月には火山灰噴出が発生した。噴気孔b1からの放熱率は最盛期で15-30 MW、その後も4.6 MW前後を維持している。この放熱規模は、湯の谷、垂玉・地獄温泉における自然噴気の0.5 MW (湯原・牛島, 1980)の約10倍規模に相当する。既存の湯の谷、地獄・垂玉温泉における温泉、噴気、噴気地を合わせても、総放熱率は4.3 MW (湯原・牛島, 1980)程度であり、中岳第一火口を除けば、吉岡温泉は阿蘇火山としては最も活発な地熱地帯となったことがわかる (Table 1)。

活発な地熱地域では、噴気地や噴気孔の移動が普通に観察されるが (例えば、福富, 1965)、小規模な温泉湧出のみが存在していた吉岡温泉において、今回のような顕著な地熱活動が起きたことは興味深い。このよう原因として、まず火山表面における局所的な要因を検討する。一般に、活発な地熱地帯では、大雨等により発生した地

すべりによる急減圧をきっかけとして、水蒸気爆発が起きる (例えば、伊藤・他, 1997; 露木・他, 1980)。これに対して、吉岡温泉の地熱活動の変遷は、降雨や地すべりとは時間的に無関係に起きた。一方、例えば Philippines Tiwi 地熱地域のように、地熱開発に起因した熱水系不安定による水蒸気爆発の事例があるが (例えば、倉沢, 1984)、吉岡で温泉開発が行われたのは20年前である。すなわち、今回の地熱活動に人為的要因が強く影響していることは考えにくい。

本研究により、今回の地熱活動は、既存の周辺地熱地域からの噴気の10倍規模であり、しかも8ヶ月間で合計55,000 tonの水蒸気が放出されていることがわかった。このことから、本地熱活動は火山表層部における局所的現象ではなく、吉岡温泉への深部からのガス供給量が、2006年10月をピークとして増大した結果として生じたと考えられる。

2006年10月16日の火山灰噴出直後は、噴気孔b1からの放熱率は30 MWと大きく、その後、約2週間にわたり放熱率が顕著に増減し、断続的な火山灰噴出が続いた。噴出物の実体顕微鏡観察によれば、構成物の大半は変質帯内で生じた変質岩片やスコリア片で、新鮮なマグマ物質に由来する物質は含まれていなかった (渡辺, 私信)。以上のことから、2006年10月をピークとした顕著な火山ガス噴出により、ガス流路が確立される過程で表層の土砂を吹き飛ばした結果、火山灰噴出や火山灰丘の形成が起きたのだろう。

なお、阿蘇火山中岳において、今回の吉岡温泉の活動に対応するような明らかな変化は観測されていない。阿蘇火山中岳第一火口では定期的に100-400 MWに達する、極めて活発な放熱活動が継続している (Nakamura et al. 2006; Terada et al. 2007)。これは、吉岡温泉で起きた地熱活動の数10倍規模に相当し、今回の吉岡温泉からの放熱活動が阿蘇火山全体の熱収支に与える影響は小さいと言える。

6. ま と め

2005年11月頃から地熱活動が高まり、200 m×300 mの範囲に噴気地や噴気孔が形成された結果、植生枯死と

小規模な土石流が発生した。地熱活動は2006年10月が最盛期であり、一時的に高さ3m程度の火山灰丘が形成されたほか、同16日には10ton程度の火山灰噴出が起きた。噴気放熱率は同16日前後の最盛期に15-30MWに達したが、11月以降は約4.6MWで推移した。この放熱規模は、湯の谷、垂玉・地獄温泉における自然噴気の放熱率0.5MWの約10倍に相当し、本地域としては大規模な熱活動と評価できる。今回の地熱活動は、深部からのガス供給量が2006年10月にかけて増大した結果として生じたと考えられる。

謝 辞

熊本県農林水産部森林保全課には、空中赤外画像をご提供いただきました。南阿蘇村長野の藤原 力氏、京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設の大沢信二氏、岡山理科大学オープンリサーチセンターの山田 誠氏、熊本学園大学の新村太郎氏、北海道大学大学院理学研究科附属地震火山研究観測センターの長谷英彰氏、秋田大学工学部資源学部の筒井智樹氏には、現地に関して多くの有益な情報を頂きました。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の皆様には、現地観測に際してご支援を頂きました。阿蘇火山博物館の池辺伸一郎氏、吉川美由紀氏、森林総合研究所九州支所の宮縁育夫氏のコメントにより、本稿は大きく改善されました。熊本大学教育学部の渡辺一徳氏には、噴出物の分析結果をご教示頂いたほか、原稿について貴重なコメントを頂きました。2名の匿名の査読者からのご指摘によって、本原稿は大幅に改善されました。ここに記して深く感謝します。

引用文献

- Anderson, G.P., Berk, A., Acharya, P.K., Matthew, M.W., Bernstein, L.S., Chetwynd, J.H., Dothe, H., Adler-Golden, S.M., Ratkowski, A.J., Felde, G.W., Gardner, J.A., Hoke, M.L., Richtsmeier, S.C., Pukall, B., Mello J. and Jeong, L.S. (2000) MODTRAN4: radiative transfer modeling for remote sensing, In *Algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery VI*, Proceedings of SPIE, **4049**, 176-183.
- Hedenquis, J.W. and Henry, R.W. (1985) Hydrothermal eruption in the Waiotapu geothermal system, New Zealand: their origin, associated breccias and relation to precious metal mineralization. *Econ. Geol.*, **80**, 640-1668.
- 福富孝治 (1965) 登別火山の地球物理学的研究の概要。温泉科学, **16**, 51-59.
- 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.
- 伊藤順一・川辺禎久・吉田明博・福山佳之・長沢 昭・

- 高橋裕史・佐々木耕造 (1997) 澄川温泉水蒸気爆発噴出物の構成物。地質ニュース, **515**, 44-48.
- 鍵山恒臣 (1978) 火山からの噴気による熱エネルギーとH₂Oの放出量—Plume riseからの推定—。火山, **23**, 183-197.
- 倉沢辰巳 (1984) ティウィ発電所と温泉公園の水蒸気爆発について。地熱, **21**, 196-197.
- 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.
- Nakamura, T., Sugimoto, N., Tsuda, T., Abo, M., Hashimoto T. and Terada, A. (2006) Observation of water vapor with a portable Raman Lidar —Continuous monitoring and field experiment over the forest and at the volcano—. Reviewed and Revised Papers, 23rd International Laser Radar Conference 2006, Part II, 897-900.
- 太田一也 (1984) 阿蘇火山における温泉観測 (1977-1982年)。阿蘇火山の集中総合観測 (第2回) 報告, 89-98.
- 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**, 14, 2053-2058.
- 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.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1995) 阿蘇山西部地域。地熱開発促進調査報告書, No. 38, 1508p.
- 須藤靖明・筒井智樹・中坊 真・吉川美由紀・吉川 慎・井上寛之 (2006) 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり—長期間の変動と圧力源の位置—。火山, **51**, 291-309.
- 寺田暁彦 (2004) 樽前火山A火口の放熱率推定—Plume Rise法を火山噴煙に適用する注意点—。北海道大学地球物理学研究報告, **67**, 327-335.
- Terada, A., Hashimoto, T., Kagiya, T. and Sasaki H. (2007) 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*, submitted.
- 露木利貞・金田良則・小林哲夫 (1980) 火山地域に見られる地盤災害とその評価 (1) 霧島火山群地域にみられる崩壊型について。鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学), **13**, 91-103.
- 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, 102p.
- 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**, 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, **31**, 553-566.
- White, D.E. (1956) Violent mud-volcano eruption of Lake City hot spring, northeastern California. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **66**, 1109-1130.

(編集担当 大場 武)