

# 箱根火山大涌谷北側斜面の噴気地で得られた地表面温度と放熱量の経験的關係

寺田暁彦\*・攪上勇介\*・大場 武\*・萬年一剛\*<sup>2</sup>・代田 寧\*<sup>2</sup>

An empirical relationship between ground-surface temperature and heat-discharge rate  
on the northern part of Owakudani geothermal field of Hakone volcano, Japan

by

Akihiko TERADA\*, Yusuke KAKUAGE\*, Takeshi OHBA\*, Kazutaka MANNEN\*<sup>2</sup> and Yasushi DAITA\*<sup>2</sup>

## Abstract

In order to develop a simple method for the reliable measurement of total heat-discharge rate, we carried out field experiments at the Owakudani geothermal field of Hakone volcano, Japan. We used the Ice Box Calorimetry (IBC) method to directly measure the heat-discharge rate at each measurement site. This method measures the combined conductive and convective heat-discharge rate,  $Q$  ( $\text{W/m}^2$ ), at the ground surface, on the basis of the time required to melt ice housed within an aluminum box placed on the ground. Simultaneously, we used an IR thermometer to measure the ground-surface temperature,  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), at each site. Our observations revealed the relationship between  $Q$  and  $T$ . The value of  $Q$  increases almost linearly with ground surface temperature anomaly  $\Delta T$ :  $Q = C \Delta T$  where  $C$  is a constant calculated to be  $84$  ( $\text{W/m}^2/^{\circ}\text{C}$ ) using the least squares method. We consider that this empirical relationship can be used to obtain accurate estimates of the total heat-discharge rate from steaming ground. To assess the reliability of the linear relation and determine appropriate values of  $C$ , it would be necessary to conduct additional accurate, simultaneous observations of  $Q$  and  $T$  at numerous volcano sites under various meteorological conditions.

## 1. はじめに

噴気地の地表面温度分布や最高温度などの熱活動は、しばしば赤外カメラを用いて測定される。しかし、赤外カメラから得られる温度情報が、火山学的に何を意味するのかは自明ではない。一方、噴気地からの放熱量は、火山地下浅部の熱収支の検討や、火山ガス放出量に関係するなど、火山学的に大変重要な量である。もし、赤外カメラで得たデータから噴気地放熱量を精度よく計算する方法が確立できれば、火山活動のモニタリングのために大変有益である。

これまで、簡単なモデルから得られた知見に基づいて、赤外カメラから得られた地表面温度分布を放熱量へ変換する方法が用いられてきた（例えば Sekioka and Yuhara, 1974 ; 江原・岡本, 1980）。しかし、このようなモデルを用いた間接的手法について、その推定精度に対する検証が不十分であった。また、計算に必要なパラメータの不確実性が大きいなどの課題が残されている (Sekioka, 1983 ; 藤光ほか, 2004)。

最近、噴気地における放熱量を精度よく直接的に測

定する方法として、氷を用いた熱流量測定法 (Ice Box Calorimetry; 以下 IBC と呼ぶ) が、有珠火山 (Terada et al., 2008 ; 寺田ほか, 2009) や阿蘇火山 (内田ほか, 2009) の噴気地に適用されている。本手法は、従来の直接的測定方法のように特別な装置 (例えば Benseman, 1959; Hochstein and Bromley, 2005) を必要としないこと、短時間で簡単に測定できること、室内実験から測定の妥当性が検証されていること、等の特長を有する。

本研究では、箱根火山大涌谷の北側斜面において 2001 年以降に形成された噴気地 (辻内ほか, 2003) をテストフィールドとして、その各地点において IBC を用いて放熱量を計測する。同時に、赤外カメラを用いて各地点の地表面温度を測定する。そして、地表面温度と放熱量の関係を検討し、箱根火山大涌谷周辺における放熱量推定のための経験式を得ることを試みる。本噴気地は、火山ガス中の  $\text{H}_2\text{S}$  濃度が低く、後述のように腐食しやすいアルミニウム製容器を用いる本研究にとって都合が良い。

\* 東京工業大学火山流体研究センター草津白根火山観測所 〒377-1711 群馬県吾妻郡草津町草津 641-36

\*2 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

## 2. 観測方法

### 2.1. 放熱量計測原理と方法

放熱量の計測には、IBC 法（氷箱熱流計測法, Terada et al., 2008）を用いた。本手法では、氷を収めたアルミニウム製容器（以下では氷箱と呼ぶ）を噴気地に置き、ある時間  $t$  秒が経過する間に溶解した氷の量  $m$  kg を測定する。このとき、単位面積あたりの放熱率  $M$  W/m<sup>2</sup> は次の式から計算される：

$$M = \frac{mL}{tS} \quad (1)$$

ここで、 $S$  は氷箱の底面積、 $L$  は氷の融解熱  $3.34 \times 10^5$  J/kg である。ただし、 $M$  には日射の吸収など、火山とは無関係な熱流量  $M_c$  が含まれる。この  $M_c$  を評価するために、 $M$  の測定点のごく近傍に断熱材を置き、その上に氷箱を設置して、同様の計測を同時に行なう。すなわち、時間  $t_c$  において溶解した氷の量を  $m_c$  kg とすれば、 $M_c$  は以下のように計算される：

$$M_c = \frac{m_c L}{t_c S} \quad (2)$$

地中から地表へと向かう熱流量、すなわち放熱量  $Q$  は、(1) から (2) を差し引くことで得られる：

$$Q = M - M_c \quad (3)$$

以上のように、放熱量を知るために現場で測定する量は、氷の溶解時間  $t$ 、 $t_c$  と溶解量  $m$ 、 $m_c$  だけであり、誰にでも簡単に観測を実施できる。

過去の IBC 観測と同様に、氷箱として使用したのはアカオアルミ社製のアルミニウム容器である。これは食品保存用として市販されているもので、容器上面にはポリエチレン製の蓋がついている。容器の板厚は 0.8 mm、底面は  $0.12 \text{ m} \times 0.09 \text{ m}$ 、底面積は  $1.08 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ 、容器の深さは約 4 cm、蓋を含めた重さは 65 g である。本観測では、容器に水 100 g を注ぎ、家庭用冷蔵庫で冷凍することで氷とした。測定の際には、この氷箱を保冷材とともに市販の発泡スチロール・ボックスに入れて現地まで輸送した。また、断熱材は、白色の発泡スチロールを半透明のビニール袋で包んだものを使用した。

氷の溶解量は、氷箱内部に溜まった水を数秒以内にメスシリンダーへ移し、1 cc (1 g) の精度で読み取ることとで計測した。

### 2.2. 地表面温度の計測

地表面上約 1 m の高さから、赤外カメラを用いて鉛直下方を撮影した。これにより、氷箱を設置した各点について、それぞれ数 10 cm 程度の範囲の赤外面像を得た。赤外カメラは北海道大学有珠火山観測所が所有する NEC Avio 社製 H2640 を借用した。同機の測定波長は 8 ～ 13  $\mu\text{m}$ 、画像データ画素数は  $480 \times 640$  pixel、最小検知温度差は 0.06  $^{\circ}\text{C}$  である。なお、放射率は 1.0 に固定した。

観測箇所 No.1 ～ No.5（後述）では、氷箱を設置する直前の地表面を撮影し、得られた画像から設置予定領域の平均地表面温度を求めた。本研究では、このように得られた温度を、観測点における地表面温度  $T$  とした。観測箇所 No.6 ～ No.8（後述）については、氷箱を置いた直後に熱映像を取得し、内田ほか（2009）と同様の方法を用いて氷箱周囲の地表面温度を平均し、地表面温度  $T$  とした。

## 3. 観測概要

全ての観測結果と算出された放熱量を表に示す。観測は 2009 年 9 月 17 日 11 時から 16 時にかけて実施した。測定場所として、大涌谷の北側斜面に形成された新しい地熱地域（辻内ほか、2003；棚田ほか、2008）に 2 つの領域を選び、それぞれ数 10 m の範囲内に No.1 ～ No.4, No.5 ～ No.8 の合計 8 箇所を設定した（図 1 の白丸と白四角）。このうち 2 箇所（No.4 と No.5）は、非地熱地域における放熱量を測定するため設定したもので、噴気地のごく近傍で、かつ地熱異常の見られない場所を選んだ。10 cm 深地温が気温に概ね一致するかどうかにより、地熱異常の有無を判断した。

観測の様子を図 2 に示す。各観測点では 1 m 程度の範囲内に 5 個の氷箱を用い、そのうち 1 個は  $M_c$  を測定することとした。従って、各測定箇所では 4 点で放熱量が計測された。ただし、測定の都合上、No.3 の氷箱は 3 個を 40cm 程度の範囲内に、No.8 は 20 m 程度の範囲内に 10 個の氷箱を用い、それぞれ 2 点および 9 点の放熱量が計測された。

以上のように、噴気地の放熱量としては合計 6 箇所（27 点）、非地熱域の放熱量としては合計 2 箇所（8 点）で値が得られた（表）。

### 3.1. 天候

当日の天気は曇で、日射はほとんどなかった。現地で測定した気温  $T_a$  は 17–20  $^{\circ}\text{C}$  前後、湿度は 65 % 前後、風速については、図 1 の白丸周辺では 0 m/s、白四角周

表1 IBC法(氷箱熱流計測法)を適用して測定した各パラメータと、赤外カメラを用いて計測した地表面温度  $T_s$ 。また、 $M$ 、 $M_c$  および  $Q$  は、測定値に基づいて式(1)、(2)、(3)を用いてそれぞれ計算した熱流量である。No.4とNo.5は非地熱域で得られた値である。

Table 1 Results of measured and computed parameters.  $T_s$  is ground surface temperature,  $t$  is the time that it is necessary to melt  $m$  of ice.  $M$ ,  $M_c$  and  $Q$  are computed using the equation (1), (2) and (3). No.4 and No.5 indicate the data obtained at an area located outside of the steaming ground.

|       | $T_s$ | $t$   | $m$ | $M_c$ | $M$  | $Q$  |
|-------|-------|-------|-----|-------|------|------|
| No. 1 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 30    | 1,526 | 46  | 593   | 932  | 340  |
| II    | 36    | 1,569 | 62  | 593   | 1222 | 629  |
| III   | 35    | 1,604 | 66  | 593   | 1273 | 680  |
| IV    | 31    | 1,633 | 57  | 593   | 1079 | 487  |
| No. 2 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 36    | 1,534 | 65  | 666   | 1310 | 644  |
| II    | 36    | 1,590 | 62  | 666   | 1206 | 539  |
| III   | 35    | 1,624 | 66  | 666   | 1257 | 590  |
| IV    | 34    | 1,652 | 65  | 666   | 1217 | 550  |
| No. 3 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 55    | 922   | 95  | 1013  | 3187 | 2173 |
| II    | 55    | 997   | 85  | 1013  | 2637 | 1623 |
| No. 4 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 18    | 2,103 | 44  | 379   | 647  | 269  |
| II    | 18    | 2,101 | 45  | 379   | 662  | 284  |
| III   | 18    | 2,182 | 42  | 379   | 595  | 217  |
| IV    | 18    | 2,255 | 40  | 379   | 549  | 170  |
|       |       |       |     |       |      |      |
|       | $T_s$ | $t$   | $m$ | $M_c$ | $M$  |      |
| No. 5 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 18    | 1707  | 33  | 429   | 598  |      |
| II    | 18    | 1760  | 34  | 429   | 597  |      |
| III   | 18    | 1793  | 34  | 429   | 586  |      |
| IV    | 18    | 1831  | 36  | 429   | 608  |      |
| No. 6 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 35    | 1198  | 58  | 265   | 1497 |      |
| II    | 35    | 1132  | 49  | 265   | 1339 |      |
| III   | 32    | 1066  | 55  | 265   | 1596 |      |
| IV    | 35    | 1011  | 43  | 265   | 1315 |      |
| No. 7 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 33    | 880   | 65  | 736   | 2284 |      |
| II    | 40    | 923   | 76  | 736   | 2546 |      |
| III   | 46    | 963   | 93  | 736   | 2987 |      |
| IV    | 41    | 1007  | 71  | 736   | 2180 |      |
| No. 8 |       |       |     |       |      |      |
| I     | 25    | 1362  | 32  | 553   | 727  |      |
| II    | 24    | 1427  | 41  | 553   | 889  |      |
| III   | 22    | 1452  | 44  | 553   | 937  |      |
| IV    | 25    | 1450  | 42  | 553   | 896  |      |
| V     | 26    | 1581  | 52  | 553   | 1017 |      |
| VI    | 29    | 1631  | 60  | 553   | 1138 |      |
| VII   | 27    | 1612  | 50  | 553   | 959  |      |
| VIII  | 26    | 1595  | 56  | 553   | 1086 |      |
| IX    | 30    | 1646  | 60  | 553   | 1127 |      |

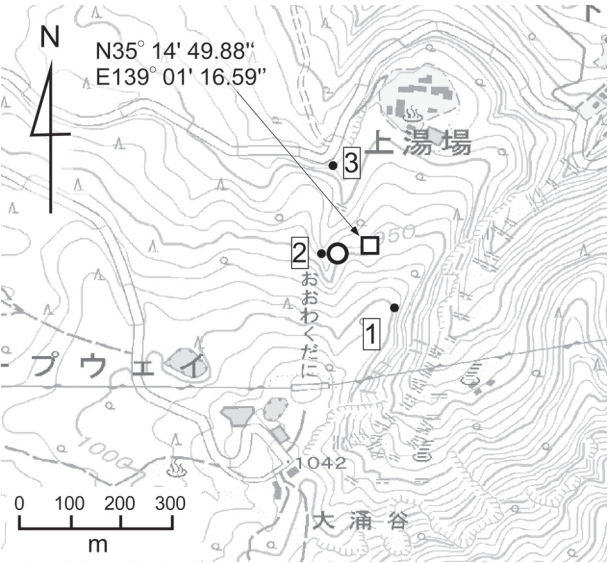


図1 箱根火山大涌谷北側周辺の地形図（国土地理院発行の地形図を使用）。白丸および白四角は、熱流量および地表面温度の測定位置を示す。黒丸は、棚田ほか（2008）の火山ガス採取および地温測定地点に対応する。

Fig.1 Spatial distribution of IBC (Ice Box Calorimetry) measurement sites (open circle and square). Closed circles (Loc.1, 2 and 3) indicate locations of volcanic gas and ground temperature observation sites (after Tanada et al., 2008). The topographic map is from web site of Geological Survey Institute.

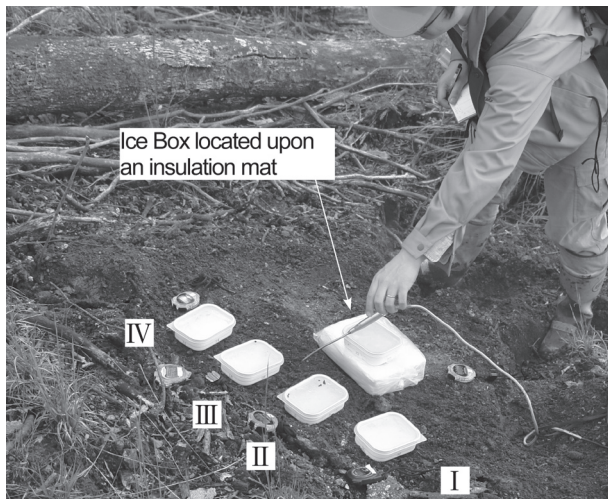


図2 観測点 No. 7 に設置した氷箱。

Fig.2 An example of an Ice Boxes putting on the site No.7.

辺では  $0.5 - 1.0 \text{ m/s}$  前後であった。観測時に降雨はなかったが、気象庁アメダス観測点「箱根」によれば、観測の前1週間に日量  $0.5 \text{ mm}$  以上の降水が記録されたのは、12日  $33 \text{ mm}$ 、13日  $0.5 \text{ mm}$ 、15日  $5 \text{ mm}$ 、16日  $0.5 \text{ mm}$  である。観測当時、土壌は湿った状態で、例えば上湯場(図1)の登山道入口は滑りやすい状態であった。このような降水が放熱量測定へ与える影響(内田ほか、2009)は、4.4節で議論する。

### 3.2. 地点2周辺での測定結果

本領域(図1の白丸)は、温泉地学研究所(棚田ほか、2008)が火山ガス・地中温度観測を定期的に行なっている地点2(図1の黒丸)に相当する。ここでは、No.1～4の4箇所(14点)を設定した。このうちNo.3は、大場ほか(2007)や棚田ほか(2008)による噴気ガス採取地点に一致する。

本領域に設定したNo.1～No.3において、 $Q$  は  $340 - 2170 \text{ W/m}^2$ 、地表面温度  $T$  は  $30 - 55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  の範囲に求められた。また、非地熱域No.4の地表面温度  $T_0$  は  $18.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、非地熱域の放熱量  $Q_0$  は  $170 - 280 \text{ W/m}^2$  の範囲に求められた。

図3(a)に、地表面温度  $T$  に対する放熱量  $Q$  の関係を黒丸で示す。データ分布に偏りがあるために詳細な議論は難しいが、線形モデルを仮定して最小二乗法を適用すると、データ分布の傾き  $C$  は  $64 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  と求められる(図3(a)の破線)。破線を外挿すると、非地熱域(No.4)で測定された値(図3の白丸)は、地熱域(黒丸)から得た直線のトレンドからは大きく外れていることがわかる。

### 3.3. 地点2から地点1へ向かう登山道沿いでの測定

本領域は、地点2から、同じく温泉地学研究所が定点観測を行なっている地点1へ向かう登山道沿いの、標高  $950 \text{ m}$  前後に位置する(図1の白四角)。ここでは、No.5～No.8の4箇所21点で測定を行なった。その結果、地熱域No.6～No.8の放熱量  $Q$  は  $170 - 2250 \text{ W/m}^2$ 、地表面温度  $T$  は  $24 - 46 \text{ }^{\circ}\text{C}$  の範囲に計測された。非地熱域No.5においては、地表面温度  $T_0$  が  $18.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  に対して  $Q_0$  は  $170 \text{ W/m}^2$  前後であった。

図3(b)に、地点1周辺における  $T$  と  $Q$  の関係を示す。本図からは、 $Q$  は  $T$  に概ね比例して増加する傾向が認められ、その傾き  $C$  は  $84 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  と見積もられる。非地熱地域(No.5)に対応する白丸も、概ね直線の延長線上にある。直線を外挿すると、放熱率が0となる地表面温度は  $20.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  であり、当時の気温  $T_a$  ( $18 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) や非地熱領域(No.5)での地表面温度  $T_0$  ( $18.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) に概ね一致する。

## 4. 議論

箱根火山大涌谷地域で放熱量が測定されたのは、積雪を利用した方法(White, 1969)に基づく関岡・湯原(1970)の研究や、熱収支法を用いた関岡ほか(1978)の報告以来と思われる。本章では、当地からの総放熱率は議論せず、放熱量  $Q$  と地表面温度  $T$  の関係を検討することで、従来よりも信頼性の高い総放熱量の推定方法を考える。

### 4.1. 地点2のデータに認められる線形関係

図3(a)において、No.1～No.3のデータを線形近似すると(図3(a)の破線)、その傾き  $C$  は  $64 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  であった。一方で、非地熱域No.4で得られた値は、近似直線からは外れている。

仮にNo.3のデータを除外して、No.1とNo.2のデータのみを直線近似した場合(図3(a)の点線)、その傾き  $C$  は  $43 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  と見積もられる。また、近似直線(点線)を外挿して得られる、放熱率  $0 \text{ W/m}^2$  を示す表面地温は  $21.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  であり、当地の気温( $18 - 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )や非地熱域での表面地温( $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )に近い値を示す。

観測点No.3では活発な噴気放出が観察され、地表面温度は本観測で最高の  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$  であった(表)。No.3は、周辺とはやや条件が異なる、すなわち、噴気地から噴気孔へと現象が遷移する過程に対応するのかも知れない。

### 4.2. 地点2から地点1へ向かう登山道沿いのデータに

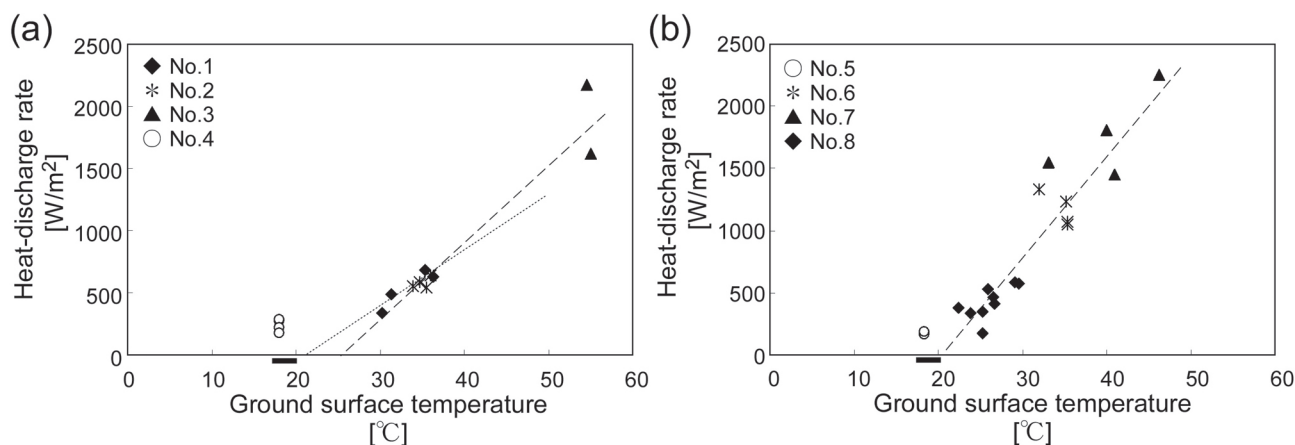


図3 熱流量 ( $\text{W/m}^2$ ) と地表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) の関係。各シンボルは、測定箇所 (No. 1 ~ No. 8) に対応し、例えば白丸 (No. 4 と No. 5) は、非地熱地域で測定されたデータである。破線は、噴気地内で得られたデータについて、最小二乗法に基づいて近似した直線である。点線は、No. 1 および No. 2 のデータについて直線近似したものである。なお、黒線は、IBC 観測時に測定された当地の気温の範囲を示す。(a) 地点 2 (図 1 の白丸) で得られたデータ、(b) 地点 1 に近い場所 (図 1 の白四角) で得られたデータ。

Fig.3. Plot of heat-discharge rate  $Q$  ( $\text{W/m}^2$ ) versus ground-surface temperature  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ). The broken line indicates the best-fit line obtained using the least squares method, taking into account data collected within the geothermal field. The dotted line in fig.3 (a) indicates the best-fit line for data of No.1 and No.2. Open circles (No.4 and No.5) indicate the data obtained at an area located outside of the steaming ground. The horizontal solid lines indicate the air temperature at the time when the observations on the geothermal field were carried out. Data are obtained at (a) Loc. 2 (Fig. 1) and (b) neighborhood of Loc.1 (Fig.1).

#### 認められる線形関係

図 3(b) から、放熱量  $Q$  と地表面温度  $T$  の間に明瞭な線形関係が成立していることがわかる。このような関係は、阿蘇火山 (内田ほか、2009)、有珠火山 (寺田、未公表資料) に続いて 3 例目である。線形関係は、多くの噴気地で普遍的に見られる性質であることが期待される。

線形関係は、熱収支モデル (Sekioka and Yuhara, 1974) から予測されている。本研究は、このようなモデルに基づく予測を、実測から保障したものである。また、比例定数  $C$  も、本研究により、簡単に実測から得ることができた。

熱収支モデルから比例定数  $C$  を求めるためには、噴気地において微気象観測を注意深く行なう必要がある。Sekioka (1983) は、各火山の噴気地で気象観測を行い、比例定数  $C$  が  $17 - 96 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  の範囲でばらつくことを示し、平均的な定数として  $37 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  を提案している。本研究で得られた  $84 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  は、Sekioka (1983) の示した値の範囲内にあるが、平均的とされる値の 2 倍に相当する。また、過去に、有珠火山) や阿蘇火山の噴気地に IBC 法を適用して得られた結果 ( $73$  および  $51 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$ , Terada et al., 2008 ; 内田ほか, 2009) と比較しても、箱

根火山で得られた  $84 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  という値は、比較的大きい。

比例定数  $C$  は、土壤の透水係数や熱伝導率、火山ガスの湿度など、噴気地固有の性質に加えて、風などの気象要因も関係する (Sekioka and Yuhara, 1974)。IBC と赤外カメラによる同時観測を重ねることで、比例定数  $C$  の信頼性を高めるとともに、 $C$  の支配要因を検討することが可能である。

#### 4.3. 熱流量測定のための経験式

本節では、データ分布の偏り等の課題が含まれる図 3(a) は扱わず、図 3(b) について考察を行なう。

噴気地内外の地表面温度は、気象条件とともに変化する。そのため、火山としての放熱量を求めるためには、非地熱域での地表面温度  $T_0$  を基準として、温度異常領域を定義すると便利である。一方、図 3(b) の近似直線 (破線) を外挿し、放熱率  $Q$  が 0 となる地表面温度  $T_s$  は  $20.5^{\circ}\text{C}$  と見積もられた。非地熱域 No.5 の地表面温度は  $18.3^{\circ}\text{C}$  であり (表)、両者は約  $2^{\circ}\text{C}$  異なる。

これまで阿蘇火山や有珠火山での測定によれば、 $T_0$  と  $T_s$  はほぼ一致し、この事実が基準温度として  $T_0$  を採用する根拠となってきた (例えば、内田ほか, 2009)。

箱根においては、非地熱域 No.5 の位置の選択や、No.8 のデータ数が多くデータがやや偏っている等の要因が、 $T_0$  と  $T_s$  の不一致に関係している可能性がある。再測定を行なうことで、原因の検討を行ないたい。

このように、現段階では基準温度の選択に不確定が含まれるが、その差は  $2^{\circ}\text{C}$  程度であり、総放熱率の算出に与える影響は少ない。したがって、本研究では非地熱域で得られた地表面温度  $T_0$  は  $T_s$  に矛盾しないとみなし、 $T_0$  を基準温度として採用する。

ここで、地表面温度異常  $\Delta T$  を

$$\Delta T = T - T_0 \quad (4)$$

と定義する。このとき、放熱率  $Q$  は、

$$Q = 84\Delta T \quad (5)$$

と表される。以上のことから、赤外カメラ画像から総放熱量  $q$  を求めるための経験式は、(4) および (5) 式を用いて次のように表される：

$$q = 84 \sum_i (T_i - T_0) S_i \quad (6)$$

ここで、 $i$  は赤外画像における各ピクセルを表し、 $S_i$  は  $T_i$  をなす地表面面積の和である。式 (6) を用いるために必要な  $T_i$ 、 $T_0$  および  $S_i$  は、赤外画像から容易に得ることができる。

#### 4.4. 降水の影響

断熱材を用いて大気補正を行なう IBC 法では、非地熱域における放熱量は十分小さな値を取ることが期待される。その一方で、今回は非地熱域においても  $100 \text{ W/m}^2$  を超える熱流量  $Q_0$  が計測された。この原因は、測定前の降水と考えられる。

内田ほか (2009) は、地表面が降雨などの外来水によって湿っている場合、外来水に由来する水蒸気が媒体することで、地表面付近から大気への熱輸送量が一時的に増加することを実験的に確かめた。この場合、得られた放熱量  $Q$  には、降水を原因とする放熱量  $Q_0$  が含まれる。すなわち、火山としての放熱量を知るためには、 $Q$  から  $Q_0$  を差し引くべきである (内田ほか、2009)。

気象庁の観測によれば、当地で測定を行なう 4 日前に  $33 \text{ mm}$  ( $33 \text{ kg/m}^2$ ) の顕著な降水があり、実際に非地熱域の地表面は湿った状況であった。一方、図 3(b) (図 4) によれば、No.5 はデータのばらつきの範囲内にある

と言える。すなわち、今回得られた非地熱域の放熱量は大きくなく、 $Q_0$  を考慮していない式 (5) を用いても、総放熱率の見積もりに与える不確定は少ないであろう。

地熱活動をモニタリングする道具としての経験式を確立するために、適切な気象条件において測定を繰り返し、式 (5) の信頼性の向上を図りたい。

#### 5. まとめ

氷箱熱流計測法を用いて地表面放熱量を直接測定したほか、赤外カメラを用いて各地点の地表面温度を測定した。合計 39 点で得られたデータを検討した結果、熱流量  $Q$  は  $170 - 2250 \text{ W/m}^2$  の範囲に求められた。地表面温度と熱流量の間に線形関係が認められ、その傾きは  $84 \text{ W/m}^2/^{\circ}\text{C}$  であった。

#### 謝辞

本観測で用いた赤外カメラは、北海道大学有珠火山観測所からお借りしました。同観測所の大島弘光氏、前川徳光氏、京都大学火山研究センターの鍵山恒臣氏、吉川 慎氏、気象庁の内田 東氏には、日頃から噴気地の熱活動モニタリングについて深く議論して頂き、本論文をまとめる上で参考にさせていただきました。2 名の匿名の査読者から頂いたコメントにより、本論文は改善されました。ここに記して深く感謝します。

#### 参考文献

- Benseman, R. F. (1959) The calorimetry of steaming ground in thermal areas, *J. Geophys. Res.*, 64, 123-126.
- 江原幸雄・岡本 純 (1980) 噴気地からの放熱量の推定, *日本地熱学会誌*, 2, 13-27.
- 藤光康宏・木戸俊晴・西島 潤・江原幸雄・明楽智也 (2004) 熱収支法による放熱量の高精度評価に関する研究—ヘリコプターに搭載された赤外熱映像装置による長崎県雲仙地熱地域の観測—, *九大地熱・火山研究報告*, 13, 2-7.
- Hochstein, M. P. and C. J. Bromley (2005) Measurement of heat flux from steaming ground, *Geothermics*, 34, 131-158.
- 大場 武・澤 毅・平 徳泰・大和田道子・森川徳敏・風早康平 (2007) 箱根カルデラ中央火口丘熱水系における火山性流体の化学的進化, *神奈川県温泉地学研究所報告*, 39, 1-42.
- 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.
- 関岡 満・伊藤芳郎・斉藤輝夫・大庭 基・高橋憲一(1978) 箱根大涌谷における放熱量測定, 地熱, 15 (No.56), 11-18.
- 関岡 満・湯原浩三(1970) 積雪を利用して測定した箱根大涌谷の熱流量, 地熱, No.25, 22-27.
- 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.
- 棚田俊収・代田 寧・板寺一洋(2008) 箱根大涌谷から上湯場付近における硫化水素および二酸化硫黄のガス濃度と地温測定結果, 神奈川県温泉地学研究所報告, 40, 23-28.
- Terada, A., Kagiya, T. and Oshima, H. (2008) Ice Box Calorimetry: A handy method for estimation of heat discharge rates through a steaming ground, Earth Planets Space, 60, 699-703.
- 寺田暁彦・鍵山恒臣・吉川 慎・吉川章文・小山 寛・山崎伸行・平松秀行・大島弘光(2009) 氷を用いた噴気地からの放熱率評価ー有珠火山 2000 年新山西山噴気地での観測実験ー, 北海道大学地球物理学研究報告, 72, 125-138.
- 辻内和七郎・鈴木征史・栗谷 徹(2003) 箱根大涌谷で 2001 (平成 13) 年に発生した蒸気井の暴噴事故とその対策, 温地研観測だより, 53, 1-12.
- 内田 東・佐藤孝久・山下隆丞・寺田暁彦(2009) 噴気地における地表面温度と放熱率の経験的關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, 54, 199-208.
- White, D. E. (1969) Rapid heat-flow surveying of geothermal areas, utilizing individual snowfalls as calorimeters, J. Geophys. Res., 74, 5191-5201.

