

熱赤外カメラを用いた桜島昭和火口周辺の熱活動連続観測

京都大学防災研究所

横尾 亮彦・為栗 健

井口 正人

1. はじめに

桜島火山山体斜面の熱活動については、山麓および空中からの熱赤外スキャナーを用いた観測が、1974年から1992年まで繰り返し行われてきた^{1)~9)}。そして、観測により判明していた熱異常域のひとつである昭和火口近傍では(図1)、2006年6月に58年ぶりに発生した昭和火口噴火に前駆して、2006年3月の段階で熱活動が活発化していたことが報告された^{10)~11)}。その後、我々が行ってきた黒神観測室からの繰り返し観測結果からは、2006年の噴火前だけでなく、2007年の噴火前にも熱活動の最活発化傾向(2006年噴火前の状態への回復傾向)があったことが示唆され(図2)、また、2007年噴火の活動期間中には顕著な熱活動の低下が同地域において観察された。これらの結果は、頻繁に熱赤外映像観測を繰り返すことが、当該地域における火山活動のモニタリング手法のひとつとして有効となりうることを示していると考えられた。ところ

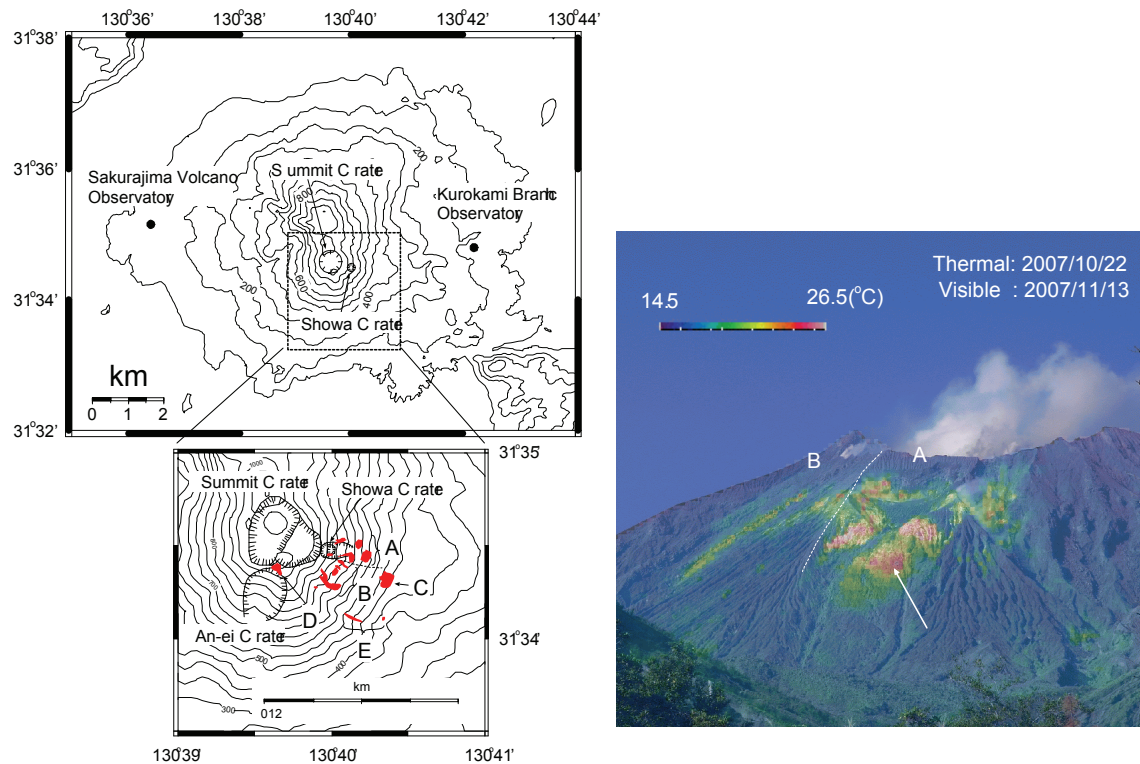


図 1. 熱赤外カメラを用いた連続観測は黒神観測室から行った(左)。昭和火口近傍の熱異常領域(右)のうち、本稿では矢印で示した昭和溶岩上の領域を特に観測対象とした。

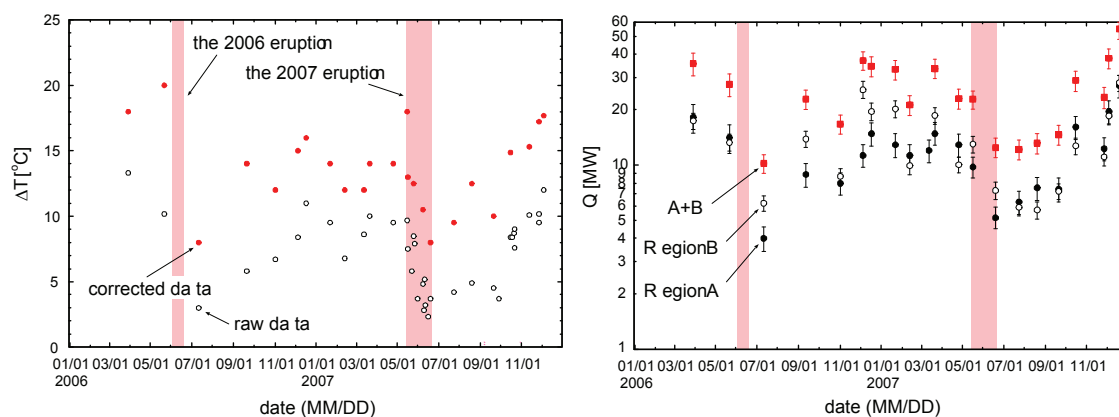


図2. 2006年～2007年における昭和溶岩上の最高温度と熱異常のない領域との温度差(左)と昭和火口近傍熱異常域 A, B における熱放出率の変化(右)。

が、2006年、2007年の昭和火口噴火のいずれもが、1年のうちのほぼ同時期(5, 6月)に発生したことから、上記のような熱活動再活発化の傾向に、気象条件の影響がどの程度重畳しているのか不明である。もちろん、近藤¹²⁾の経験式を用いた観測結果に対する大気補正は行っているが、それ以外の季節変動等の影響について補正しきれていない可能性がある。これまで、数日～数週間、ないしは数ヶ月程度の比較的短い期間における温度変化等の把握を目的とした試験的観測は、2日間にわたって2時間おきに繰り返し観測を行った加茂・ほか²⁾を除いて、桜島において行われたことがない。短期間における熱観測結果の詳細な変動状況を知ることは、たとえば1年に1～2回程度といった比較的長い時間間隔で継続して行う繰り返し観測結果を評価する際に重要である。そこで、第10回桜島火山の集中総合観測の一部として、我々は昭和火口近傍の熱異常域を対象として、熱赤外カメラを用いた連続観測を行った。本稿ではその結果について報告する。

2. 観測

昭和火口近傍地域を対象とした熱赤外連続観測には、定点繰り返し観測^{10)~11)}で使用しているものと同一の熱赤外カメラ(NEC 三栄製 TH7102MV, 測定波長 8~14 μ m)を使用した。熱赤外カメラは、黒神観測室敷地内に既設の架台上に設置した。カメラハウジングは、硬質塩化ビニル製防水ケース(30cm×30cm×20cm)で作成し、窓材には $\Phi=12$ mm, d=5mmの反射防止膜付き ZnSe を使用した。メーカー資料によると、ZnSeの屈折率波長特性は、熱赤外カメラの測定波長 8~14 μ m において 85%以上の透過率である。また、ケース内の不要な温度上昇を避けるため、ビニールシートにより直射日光がケースに当たらないようにした。専用架台およびカメラハウジングの機構上、熱赤外カメラによる撮像画角は固定である。

熱赤外カメラは観測室局舎内から給電して使用した。カメラは IEEE ケーブル(4.5m)を介して

局舎内専用 PC と接続され、操作は NEC 三栄製ソフトウェアにより PC 上から行った。カメラから受信した熱赤外面像データは熱動画ファイルとして1Hz サンプリングで保存した。およそ 30 分間の熱画像撮影で 200~300M のファイルサイズとなる。専用 PC のハードディスク容量を超えないよう、ディスク使用率に適当な敷居値を設け、古いファイルから順に自動削除した。2008 年1月現在稼動している連続観測システムでは、およそ 10 日分の熱動画ファイルが保存される。桜島火山観測所へのデータ伝送、ならびに観測対象領域の熱データ保存のために、10 秒に 1 度の頻度で作成途中にある熱動画ファイルから直接温度データを読みとった。読み取る温度データは、任意に指定した 4 矩形領域¹(位置、サイズは可変)の、最高温度、最低温度、平均温度のいずれかである。また、これら 4 領域すべてを含む範囲の表示温度の標準偏差も計算した。1 時間に 1 度、熱動画ファイル中の先頭 1 フレームを熱静止画像ファイルに変換する作業も併せて行った。

3. 結果

ハウジングケースの外で撮影した熱画像と、その 2 分後に、連続観測システムによってケース内から撮影された熱画像を図 3 に示す。連続観測システムによる熱画像周縁部には同心円状の温度勾配が生じているが、これは、窓材のサイズと窓材自身の温度勾配の影響である。しかし、観測対象である昭和火口近傍の熱異常領域には、温度勾配の影響はほとんど見られない。カメラからの発熱があるため、ケース内部の温度は外気よりも高く、表示温度の絶対値を直接比較

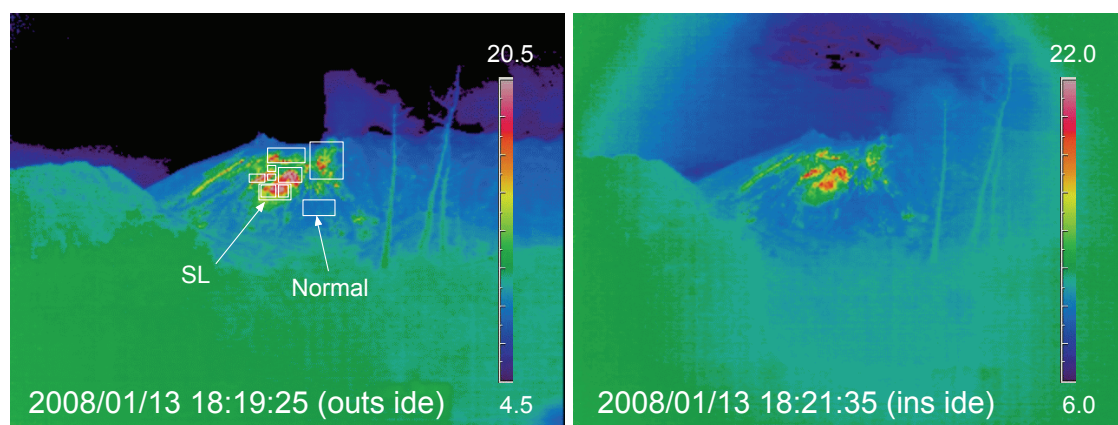


図 3. カメラハウジング内外において撮影した熱赤外面像。ハウジング内の温度が外気よりも高いため、ハウジング内から撮影した場合(右)、ハウジング外で撮影したもの(左)よりも全体的に温度が高くなっている。白線で囲まれた小矩形領域は、窓材の影響評価のために熱データ測定値の比較を行った領域(表 1, 後述)。SL, Normal は、それぞれ、昭和溶岩上の熱異常領域と熱異常の認められない領域を示す。

¹ 今回の観測では昭和火口部分(最大値), 昭和火口左下の白色変色地域(最大値), 昭和溶岩(最大値), 熱異常のない領域(平均値)の 4 箇所を設定した。

できないが、両者の間で熱画像のパターンに大きな違いはない。

図 4 上段は連続観測システムによって得られた、昭和溶岩上の熱異常領域(以下, SL と記す; 図 3)の最高温度と熱異常の見られない領域(以下, Normal と記す)の平均温度の連続観測結果である(2007 年 8 月と 2007 年 12 月)。いずれも、日中の温度上昇, 夜間の温度低下が明瞭である。加茂・ほか²⁾がすでに指摘しているように、これらの日周期の変動は、大気温度の影響を強く受けた結果であり、今回の観測結果においても、鹿児島市における大気温度 T_{air} (図 4 下段; 気象庁アメダスデータ)とほとんど同じ変化傾向であった。もちろん、日周期の変動だけでなく、12 月 28 日から始まった大気温度低下のような比較的ゆっくりした変動も、SL, Normal いずれの領域の観測結果にも反映される。大気中の水蒸気圧 P_{vapor} も観測温度 T_{obs} に影響を与えていたが(図 5)、大気温度ほどの強い相関は認められなかった。SL における最高温度と Normal

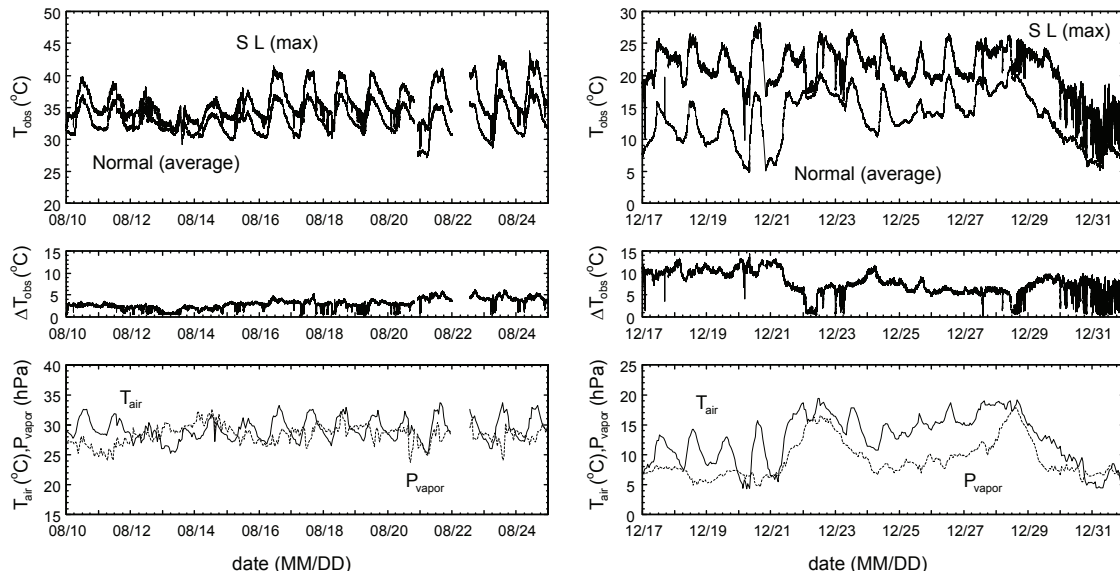


図 4. 2007 年 8 月(左), 2007 年 12 月(右)における連続観測結果。上段は昭和溶岩上の熱異常領域 (SL)の最高温度と熱異常の認められない領域(Normal)の平均温度, 中段は、両者の温度差をそれぞれ示す。下段は、鹿児島市における気温(実線)と水蒸気圧(点線)である。

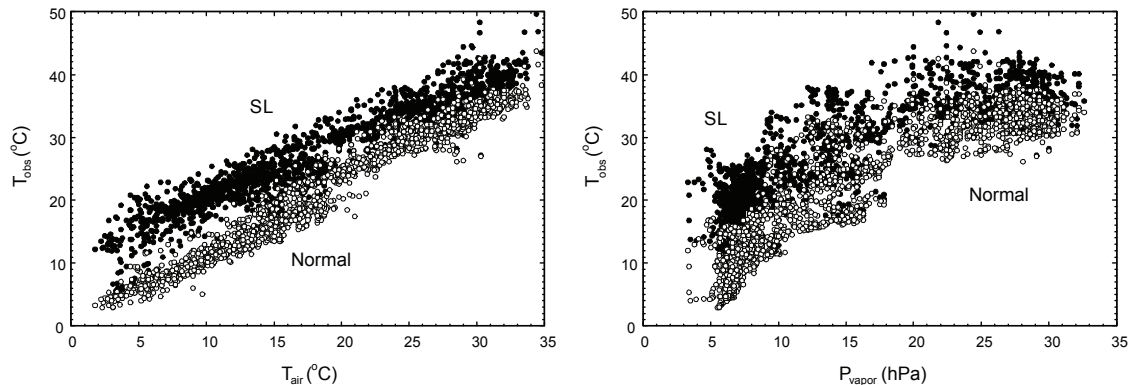


図 5. 鹿児島市における大気温度 T_{air} (左), 水蒸気圧 P_{vapor} (右)と, SL(●), Normal(○)で観測された最高温度, 平均温度との関係(2007 年 8 月 9 日から 2008 年 1 月 17 日)。

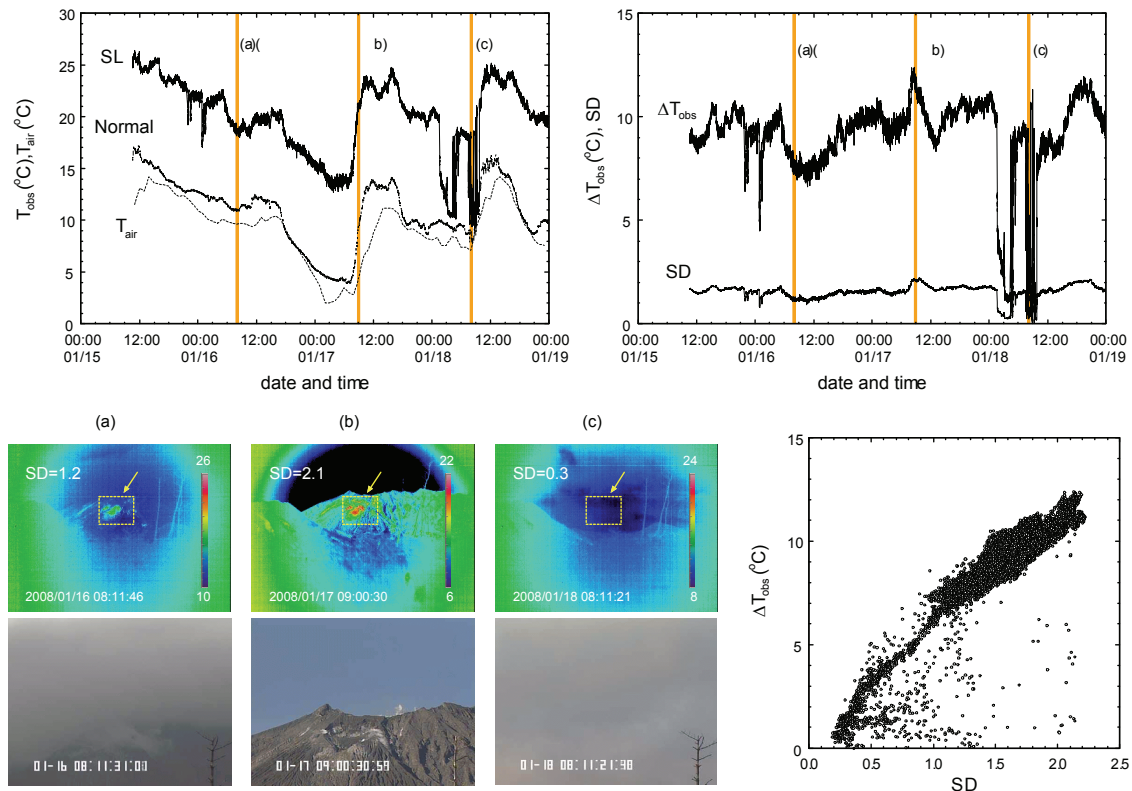


図 6. (上)2008 年 1 月 15 日から 1 月 19 日の観測結果。(左下)時系列グラフ中の(a)~(c)の時刻における・熱赤外面像と可視画像。SD は図中点線で囲まれた矩形領域内 (50×40 ピクセル) で計算した。(右下)およそ 3.5 日分データの ΔT_{obs} と SD の関係。正の相関が認められる。

における平均温度との差 (ΔT_{obs} ; 図 4 中段) は、8 月の観測期間においては日周期の変化もほとんどなく、比較的安定していた。一方、12 月の結果では、12 月 21 日午前に 5 度くらいの急激な温度低下が認められるなど、全体的に数度程度の増減が常に発生していた。

図 4 上段の温度変化のグラフにおいて、散発的に発生しているスパイク状の温度低下(12 月 30 日以降、断続的に発生)は、雨、曇、霧、かすみ等によって観測対象領域が隠れたり、熱画像上での視認性が低下したりするためによる。もちろん、 ΔT_{obs} にもこれらは影響し、たとえば 12 月 22 日午前など、SL と Normal のいずれもが雲等によって見えなくなってしまった場合には、 ΔT_{obs} は 0~1°C まで低下する。このような天候等の雰囲気条件が観測結果へ与える影響について定量的に把握するため、昭和火口近傍域領域(図 6 下段左の熱赤外面像中の点線領域)における観測温度の標準偏差 SD を計算した。2008 年 1 月 15 日から約 3.5 日間の観測結果(図 6 上段)によると、天候不良によって撮像画角内の温度分布がはっきりしなくなると SD が低下し、逆に、快晴で画角内温度分布が明瞭となったときには SD が大きくなることが確かめられた。この観測期間中、SD はおおむね 0.2~2.3 の間の値をとり、そのほとんどが 1.0 以上の範囲に集中していた。 ΔT_{obs} と SD との間には正の相関があったが、SD が 1.2 よりも小さい範囲ではこのトレンドから下方へはずれる ΔT_{obs} が目立ち始める。低 SD のときは観測条件が不良であることを考えると、

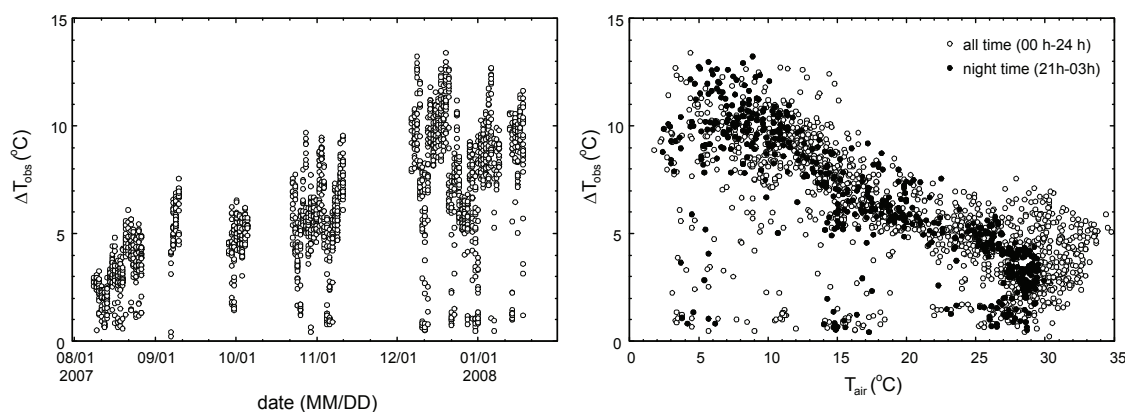


図 7. (左)2007 年 8 月 9 日から 2008 年 1 月 17 日の ΔT_{obs} (毎時データ)。 (右) 同期間における T_{air} と ΔT_{obs} との関係。●は夜間のデータのみをプロットした。

少なくとも $SD < 1$ のときの ΔT_{obs} は除外するべきである。

連続観測を行った 2007 年 8 月 9 日から 2008 年 1 月 17 日現在の観測結果 ΔT_{obs} を図 7 左に示す。これまでのすべての観測期間で SD を見積もっていたわけでないので、 SD の値による (周囲状況を考慮した) 観測結果の選別は行っていない。毎日の変動が数 $\sim 5^{\circ}\text{C}$ 程度あるが、全体的に見ると、 ΔT_{obs} はこの半年で 10°C ほど上昇していた。しかし、これらは夏から冬にかけての変化であり、 ΔT_{obs} と T_{air} の間 (図 7 右) には明瞭な負の相関も認められることから、大気温度に依存した見かけ上の変化と考えるべきだろう。日射によって地表面が直接温められることの影響を排除するため、毎夜 21 時から 3 時までの夜間 7 時間分のデータについても別にプロットしてみたが (図 7 右, ●), ほかの時間帯のデータと大きな違いは見受けられなかった。

4. 考察

熱観測対象領域の測定温度が大気温度 T_{air} に依存する, という加茂・ほか²⁾の指摘以降, 熱異常域における温度と異常のない領域における温度との差 ΔT が, 桜島山体斜面に分布する熱異常域の活動経過を評価する際に指標となってきた。そして, この観点から 2006 年以降の繰り返し観測結果 (図 2 左) を概観し, 2006 年, 2007 年の昭和火口の噴火活動に関係すると思われる変動が生じていたと考えた。つまり, 昭和溶岩上の熱異常域を対象としたとき, 2006 年噴火前の段階で約 20°C だった大気補正後の温度差が, 噴火によって約 10°C 低下し, その後, 2007 年噴火発生までの約 1 年間をかけて約 15°C まで上昇した。2007 年噴火活動期間中にも急激な温度低下 (約 $5^{\circ}\text{C}/\text{月}$) が観察されたが, 噴火終了後から再度上昇を開始した。そして 2007 年 12 月で約 18°C まで回復している。温度差だけでなく, 昭和火口近傍の熱異常域からの熱放出率にも同様の变化傾向がある (図 2 右)。

しかし, 今回の我々の連続観測結果では, 気温に依存した日周期変化ですらその変動幅が

表 1. カメラハウジング窓材の影響による表示温度の違い

2007/08/20	$T_{\text{obs(out)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (°C)	$T_{\text{obs(in)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(in)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(in)}/\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (%)
a	25.8	-	27.4	-	
b	30.5	4.7	31.0	3.6	76.6
c	30.5	4.7	30.7	3.3	70.2
d	31.1	5.3	31.0	3.6	67.9
e	32.8	7.0	32.9	5.5	78.6
f	29.1	3.3	30.0	2.6	78.8
g	31.3	5.5	31.7	4.3	78.2
h	30.4	4.6	31.0	3.6	78.3
i	30.7	4.9	31.5	4.1	83.7 (Ave. 76.5%)
2008/01/13	$T_{\text{obs(out)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (°C)	$T_{\text{obs(in)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(in)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(in)}/\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (%)
a	8.6	-	9.7	-	
b	21.1	12.5	18.6	8.9	71.2
c	17.2	8.6	15.9	6.2	72.1
d	16.1	7.5	15.1	5.4	72.0
e	24.7	16.1	21.1	11.4	70.8
f	19.8	11.2	18.0	8.3	74.1
g	23.4	14.8	21.2	11.5	77.7
h	21.4	12.8	20.0	10.3	80.5
i	20.6	12.0	20.0	10.3	85.8
j	14.6	6.0	13.6	3.9	65.0 (Ave. 74.4%)
2008/01/26	$T_{\text{obs(out)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (°C)	$T_{\text{obs(in)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(in)}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{obs(in)}/\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (%)
a	8.6	-	9.6	-	
b	17.9	9.3	17.3	7.7	82.8
c	-	-	-	-	-
d	19.2	10.6	17.0	7.4	69.8
e	23.1	14.5	20.5	10.9	75.2
f	18.1	9.5	15.9	6.3	66.3
g	23.2	14.6	20.6	11.0	75.3
h	20.9	12.3	19.1	9.5	77.2
i	20.8	12.2	19.3	9.7	79.5 (Ave. 75.2%)

* a~jは昭和火口近傍熱異常域における特徴的な小領域に対応する(図3左)。

数~5°C程度あり、また、2007年夏から冬にかけての半年間の温度変化も全体で約10°Cの上昇があった。これらの変化量、変化傾向は噴火活動に関係していると考えた(上で説明した)温度変化とほぼ同程度である。つまり、本稿はじめに懸念したように、近藤¹²⁾による経験式を用いて、乾燥空気・水蒸気・エアロゾルについての赤外線吸収についての補正を行うだけでは、周囲大気温度の影響について、完全には排除できないと考えられる。

ここでは、今回の我々の連続観測結果によって、2006年からこれまでの約2年間の繰り返し観測結果が大気温度の変化で説明できるかどうか考える。いま、下付き添え字の別で、現地地表面温度を T_{surf} 、ハウジングケース外での観測結果を $T_{\text{obs(out)}}$ 、ケース内からの連続観測結果を $T_{\text{obs(in)}}$ と区別する。図2のraw dataが $T_{\text{obs(out)}}$ 、corrected dataが T_{surf} にそれぞれ相当する。ハウ

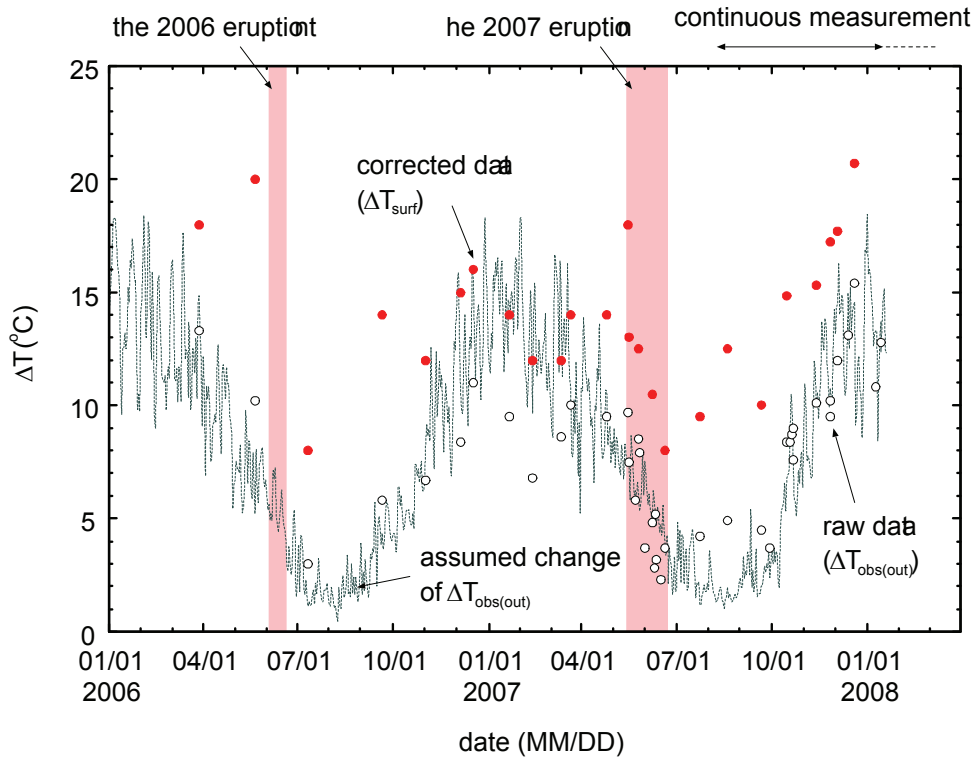


図 9. 2006 年以降の繰り返し観測結果(観測値○と補正值●)と、21 時のアメダスデータから式(1), (2)によって推定した $\Delta T_{\text{obs(out)}}$

ジングケース・窓材の影響については、2007 年 8 月 20 日と 2008 年 1 月 13 日、26 日のケース内外での比較観測によって、おおむね

$$\Delta T_{\text{obs(in)}} = \Delta T_{\text{obs(out)}} \times 0.75 \quad (1)$$

の関係があることがわかっている(表 1)。一方、 T_{air} による $\Delta T_{\text{obs(in)}}$ への影響は、図 7 右の結果(終日データ、○)を 1 次式で線形近似し、

$$\Delta T_{\text{obs(in)}} = (T_{\text{air}} - 31.52) / (-2.06) \quad (2)$$

とする。連続観測を行った 2007 年 8 月～2008 年 1 月 18 日現在まで、昭和溶岩 SL と熱異常のない山腹領域 Normal の地表温度差に顕著な変動がなく、気象条件による見かけ上の変化が同期間の $\Delta T_{\text{obs(in)}}$ 変化(図 7 左)の大勢を占めていたとすると、逆に式(2)によって、連続観測していない 2007 年 8 月以前の期間の温度差 $\Delta T_{\text{obs(in)}}$ についても、熱活動に大きな変化が生じていないという仮定の下で推定することが可能となる。そこで、式(1)、(2)によって、2006 年 1 月からのアメダス 21 時の大気温度データ T_{air} から $\Delta T_{\text{obs(out)}}$ を推定した。図 9 は推定した $\Delta T_{\text{obs(out)}}$ (点線)と、繰り返し観測結果(観測値○、補正值●)を同じ時間軸に沿って並べたものである。2007 年 1 月～2 月、2007 年 8 月など、予想される変化からやや外れるときもあるものの、これまでのほぼすべての時期の温度変化は、気温変化に由来する見かけ上の変動として説明することが可能であった。

5. まとめ

桜島火山南東斜面の昭和火口近傍を観測対象として、熱赤外カメラを用いた連続観測を開始した。観測値は大気温度や水蒸気圧に依存していることが確認された。そして、2006年以降の繰り返し観測結果に見られた熱活動の変化傾向は、おおむね大気温度に依存した見かけ上の変化の可能性がある。

謝辞

高山鐵朗氏、山崎友也氏をはじめとする京都大学防災研究所桜島火山観測所のスタッフ諸氏には、観測に当たって多大なご協力をいただいた。鹿児島地方気象台から高層気象データをいただく際に、菅井明氏、平松秀行氏にお世話になった。以上の方々に感謝します。

参考文献

- 1) 加茂幸介・西 潔 (1975): 赤外映像による桜島南岳の地表温度異常域の調査, 桜島火山の総合調査報告, 33-39.
- 2) 加茂幸介・江頭庸夫・西 潔・石原和弘 (1977): 桜島火山の熱映像の調査研究, 文部省科
研費自然災害特別研究成果 噴火予知のための主要火山活火山における熱的状态の調
査研究(研究代表者 横山 泉), 129-153.
- 3) 加茂幸介・江頭庸夫・西 潔・石原和弘 (1977): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異
常域の調査, 第2回桜島火山の集中総合観測, 34-44.
- 4) 加茂幸介・西 潔・高山鐵朗 (1980): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異常域の調
査, 第3回桜島火山の集中総合観測, 27-33.
- 5) 加茂幸介・西 潔・高山鐵朗・須藤靖明 (1982): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異
常域の調査, 第4回桜島火山の集中総合観測, 29-31.
- 6) 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鐵朗 (1986): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異
常域の調査, 第5回桜島火山の集中総合観測, 29-32.
- 7) 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鐵朗 (1988): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異
常域の調査, 第6回桜島火山の集中総合観測, 31-36.
- 8) 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鐵朗 (1989): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異
常域の調査, 第7回桜島火山の集中総合観測, 21-31.
- 9) 加茂幸介・西 潔・井口正人・高山鐵朗 (1995): 赤外線映像による桜島火山の地表温度異
常域の調査, 第8回桜島火山の集中総合観測, 31-36.
- 10) 横尾亮彦・井口正人・石原和弘 (2007): 熱赤外映像観測からみた桜島山体斜面の熱活動,

火山, 第 52 卷, 121-126.

11) Yokoo, A. and Ishihara, K. (2007): Characteristics of the 2006 eruption around Showa crater, Sakurajima volcano. *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 50C, 149-156.

12) 近藤純正 (2000): 地表面に近い大気の科学, 東京大学出版会, pp. 324.

(Received on March 17, 2008)