

# 赤外熱映像装置を用いた 地獄温泉地熱域における温度連続観測

気象庁火山課	火山監視・情報センター	飯野 英樹
札幌管区气象台	火山監視・情報センター	小山 寛
仙台管区气象台	火山監視・情報センター	内田 東
福岡管区气象台	火山監視・情報センター	佐藤 孝久
		高松 政美
阿蘇山火山防災連絡事務所		後小路 義弘
		山下 隆丞

## 1. はじめに

火山の熱活動を評価するための観測手法の一つとして、噴気地帯や地熱地帯を対象とした赤外熱映像装置による地表面温度分布観測が挙げられる。地表面温度は、火山の熱活動だけでなく、日射、風、降水などの気象の影響を常に受ける。地表面温度がそれほど高くない地熱域などでは、観測された温度変化が、火山活動を反映したものか否かを判断することがしばしば困難となっている。

そこで今回、沸点程度の地熱域である地獄温泉を対象にして、赤外熱映像装置および温度ロガーによる地表面温度の連続観測を行い、気象観測データとの比較を行うことにより、気象の影響による地表面温度の変動について調べた。

## 2. 観測場所

今回の観測は、地獄温泉の地熱地域を対象として実施した。地獄温泉は、熊本県阿蘇郡南阿蘇村河陽<sup>かわよう</sup>にある温泉で、標高 750 m の阿蘇山南西山腹に位置する(図1-(a))。温泉宿(清風荘)の南東側には径 250m 前後の爆裂火口状の地形が存在し<sup>1)</sup>(図1-(b))、地獄温泉の源泉である温泉の湧出が認められている。ここでは定常的な地熱活動が認められており、阿蘇山測候所(2008年4月より阿蘇山火山防災連絡事務所)の観測によると、深さ約 10cm で測定している地中温度は、定常的に沸点に近い値が観測されている。

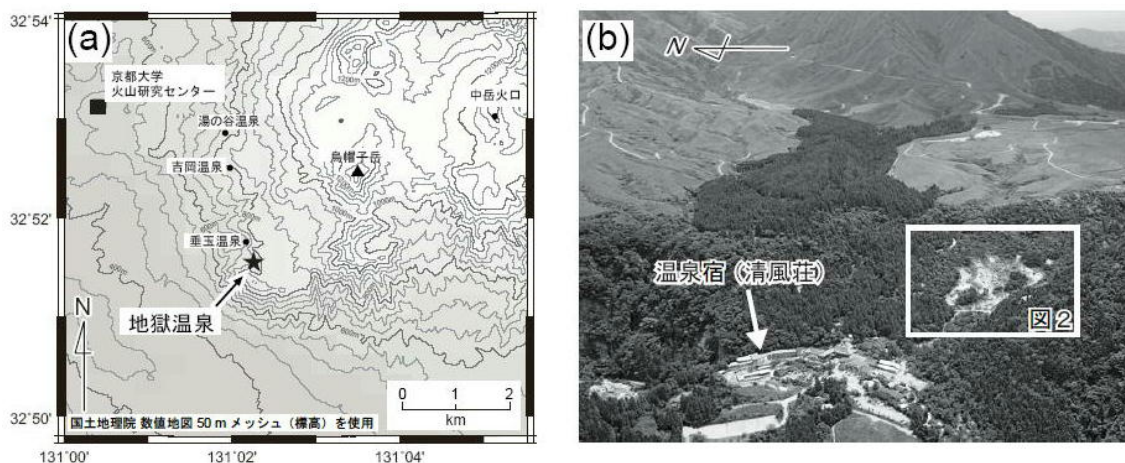


図1. (a)地獄温泉と京都大学火山研究センターの位置およびその周辺の地形図  
(b)地獄温泉の空中写真。今回観測を行った地獄温泉の地熱地域を白の矩形で囲んで示す。

### 3. 観測の概要

図2に今回温度連続観測を行った地熱地域の全景写真と観測場所の位置を示す。得られた変化がその地熱域一帯が持っているものなのか、あるいは日射の影響などを含めた観測場所に起因するものなのかを確認するため、連続観測は地熱域南東側の撮影地点Aおよび地熱域北西側の撮影地点Bの二箇所からおこなった。それぞれの地点から撮影した領域を領域Aおよび領域Bとよぶ。領域Aと領域Bの写真を図3と図4にそれぞれ示す。さらに、領域Aと領域Bの赤外面像を図5および図6にそれぞれ示す。



図2. 地獄温泉の地熱地域の全景写真  
気温の測定地点を星印で示す。また、赤外面像の撮影地点2箇所(A・B)とその撮影方向をそれぞれ丸印と矢印で示す。さらに赤外面像で撮影した領域(領域A・領域B)のおおよその範囲もあわせて示す。

撮影された赤外面像から、地熱活動の影響を受け地表面温度が高まっている岩（以下、地熱域と呼ぶ）、および地熱活動の影響をほとんど受けていない岩（以下、非地熱域と呼ぶ）を選定し、岩の表面に温度センサーを取付け、温度ロガーにより地表面温度を直接測定した。温度センサーを取り付けた位置を、図 3 および図 4 の図中に示す。岩の表面への温度センサーの取り付けは、岩の表面に 0.5 cm から 1 cm 程度のごく浅い溝を掘り、その溝に温度センサーを埋め、最後に掘った溝を埋めるように上からパテで固定することにより行った。



図 3. 熱映像撮影地点 A からみた領域 A の全景と温度ロガーセンサーの設置位置。あわせて地中温度測定地点の位置を星印で示す。図中の矩形は、図 5 の赤外面像上での温度の読取領域に対応する。（撮影距離：撮影場所から地熱域までは約 23m、非地熱域までは約 15m）



図 4. 熱映像撮影地点 B からみた領域 B の全景と温度ロガーセンサーの設置位置。図中の矩形は、図 6 の赤外面像上での温度の読取領域に対応する。（撮影距離：撮影場所から地熱域までは約 21m、非地熱域までは約 22m）

一方、赤外面像からの温度の読み取りは、地表面温度を直接測定するために設置した温度ロガーを囲むように赤外面像上で矩形の領域を設定し、その領域の平均温度をそれぞれ地熱域および非地熱域の地表面温度として時間的な変化を調べた。また、植生がみられる場所にも矩形領域を設定し、この領域の平均温度を植生域の地表面温度とした。温度読み取りのために

設定した赤外面像上の矩形領域を図 5 および図 6 に示す。

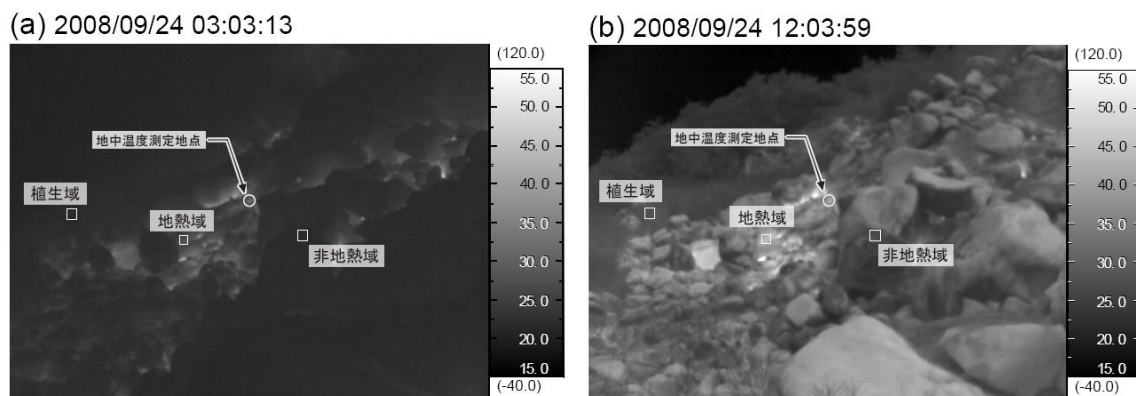


図 5. 領域 A の赤外面像 ((a)夜間, (b)日中)。温度を読み取った矩形領域を中抜きで四角で示す。これら矩形領域は図 3 で示す矩形領域にそれぞれ対応する。地中温度測定地点もあわせて示す。  
(矩形画素の大きさ 地熱域:6pixel×6pixel、非地熱域と植生域:8pixel×8pixel)

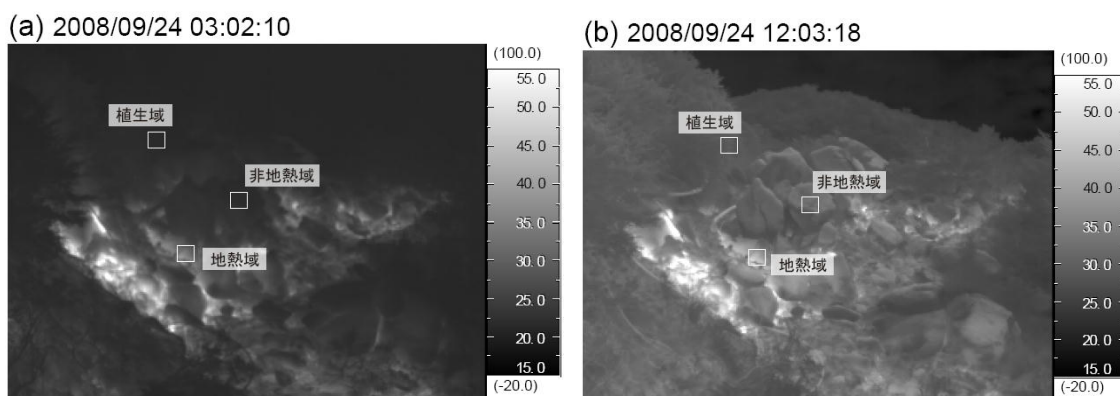


図 6. 領域 B の赤外面像 ((a)夜間, (b)日中)。温度を読み取った矩形領域を中抜きで四角で示す。これら矩形領域は図 4 で示す矩形領域にそれぞれ対応する。  
(矩形画素の大きさ 地熱域:14pixel×14pixel、非地熱域と植生域:12pixel×12pixel)

なお領域 A では、矩形領域の大きさによってはその矩形の領域が対象としない別の手前の岩と重なってしまうため、矩形の大きさをできるだけ小さくした。一方領域 B では、赤外熱映像装置のバッテリーやメモリーカードの交換を行った際に撮影画角がわずかにずれてしまったことから、画角のずれが平均温度に影響しないように矩形をやや大きく設定した。

気温は領域 A 及び領域 B の中間地点で取得した (図 2)。さらに、領域 A では 10 cm 深地中温度 (図 3) の連続測定も同時に行った。地獄温泉での観測項目とその詳細について表 1 にまとめる。

なお、阿蘇山の南西山腹に位置する京都大学火山研究センター (図 1-(a); 以下では京大火山研と呼ぶ) では、気象データの観測を行っている。地獄温泉との距離は北西約 4 km 程度で標高も概ね等しいことから、地獄温泉の気象状況は京大火山研のそれと近い状況であったと考え、本報告では、気温を除き観測期間中の気象データとして京大火山研の観測値を参照した。

表 1. 地獄温泉での観測項目とその詳細

	データ取得期間	データ取得間隔	機器	保存形式	備考
地表面温度 (赤外画像)	23d06h ~24d18h 26d17h30m~27d10h30m	5分 (日中) 10分 (夜間)	NEC 三栄 サーモトレーサ TH9100WX	CF カード保存	・広角レンズ着用 ・測定温度レンジ (0~120℃)
地表面温度 (直接測定)	24d09h ~27d10h30m	5分	HIOKI 温度ロガー3632	メモリー保存	
気温	23d07h ~18h30m 24d10h ~24d18h 26d18h10m~27d10h10m	5分	Kestrel 4000	メモリー保存	
	23d18h30m~24d10h	10分			
	24d09h ~27d10h30m	5分	HIOKI 温度ロガー3632	メモリー保存	
地中温度 (10cm 深)	23d06h ~27d11h	5分	サ-ミスタ温度計	メモリー保存	DATAMARK LZ8000

## 4. 結果と考察

### 4-1. 観測時の気象状況

観測結果を図7に示す。地獄温泉付近の天候は期間を通して大きく荒れることはなかった。図7-(a)および(b)に京大火山研における平均風速および降水量・湿度の推移を示す。

26日の前半には数十ミリの降水を観測し、その他の日にも時間数ミリ程度の降水を観測している。このため、日中を除き湿度の高い日が多かった。

風については、観測期間前半の23日から25日にかけて風速1~2 m/s程度であったが、期間後半の26日頃から風がやや強まった。

地獄温泉で観測した気温(図7-(c)、(e))は、日中30℃近い最高気温を観測するが、夜間になると20℃程度まで気温が下がり、27日の朝には10℃まで冷え込んだ。

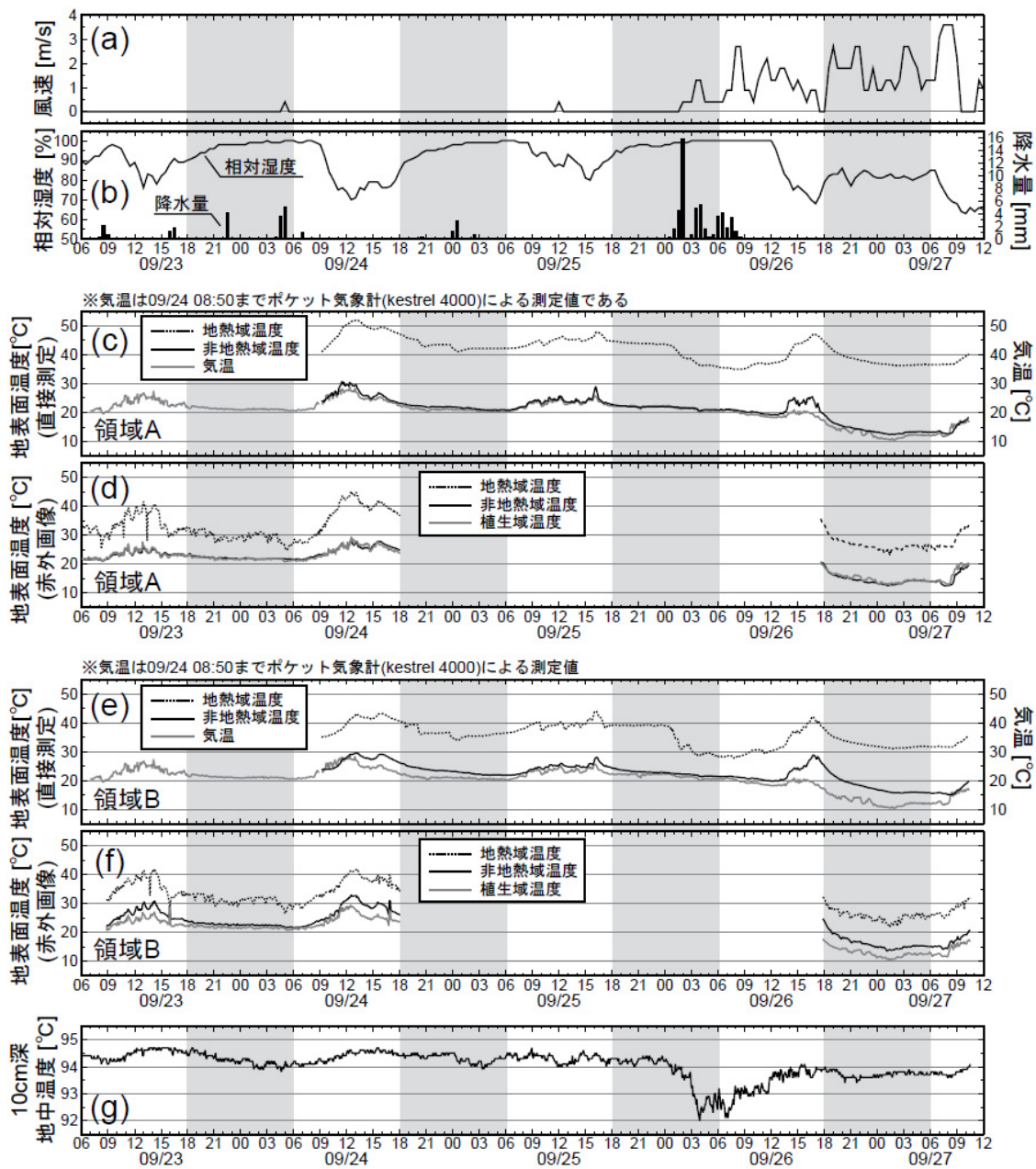


図 7. 観測期間中の気象データと領域Aおよび領域Bの地表面温度及び 10cm深地中温度の推移 (灰色: 日没期間)

- 京大火山研における平均風速
- 京大火山研における相対湿度および降水量
- 地獄温泉の気温と、領域 A における地熱域および非地熱域の地表面温度(直接測定)
- 領域 A における地熱域および非地熱域の赤外面像温度
- 地獄温泉の気温と、領域 B における地熱域および非地熱域の地表面温度(直接測定)
- 領域 B における地熱域および非地熱域の赤外面像温度
- 地獄温泉領域 A で測定した 10cm 深地中温度の推移

## 4-2. 地中温度の推移

領域 A で測定した 10cm 深の地中温度経過を図 7-(g) に示す。

23～25 日にかけては、地中温度は 94～95℃ 程度で推移し、1℃ 程度の日周変化が認められる。また、26 日の午前 0 時から同日 4 時頃にかけて 2℃ 程度の急激な低下が認められた。京大火山研の気象データと照らし合わせると、26 日の降水量変動に対応していることから、この地中温度の低下は降水によるものと考えられる。その後、26 日の 18 時頃まで徐々に温度が上昇する変動が認められる。

降水による温度低下を除いて期間を通して目立った変化はなく、地中温度の変化からみた地獄温泉の熱活動は、観測期間中に大きな変化はなかったと考えられる。

## 4-3. 直接測定した地表面温度の推移

温度ロガーにより直接測定した地表面温度および気象データの推移を図 8 に示す。

領域 A および領域 B とも、直接測定した地熱域および非地熱域の地表面温度の推移は、全体的にみて気温の推移に似た変動を示しており、その影響を受けていることがわかる。

地熱域の地表面温度推移を見てみると、領域 A、領域 B とも 24 日および 26 日の日中には、ピークを持つ地表面温度の増減が認められ、観測期間全体では 10～15℃ 程度の変動幅を持って推移している。また地熱域では、25 日の 0 時頃は約 2～3℃、26 日の 0 時から 9 時ころにかけては 10℃ 程度の地表面温度低下が認められる。図 8-(b) に示す京大火山研の気象データと比較すると、降水のあった時間帯に対応しており、4-2 項で述べた地中温度と同様、降水による影響と考えられる。なお、降水量の多かった 26 日については、降水が止んだ 09 時以降も数時間程度にわたり地表面温度の低下した状態が続いている。

次に領域 A に着目し、地熱域、非地熱域の地表面温度および気温の推移を比較してみる。いずれも変動は似ているものの、非地熱域では、地熱域で認められた 25 日の 0 時頃および 26 日の 0 時から 9 時ころにかけての降水によると考えられる温度低下が認められない。また、24 日および 26 日の日中は、地熱域の地表面温度が 10℃ 近く上昇しているのに対し、非地熱域では 5℃ 程度にとどまり、増減の時間変化が地熱域と非地熱域とで異なっているのがわかる。

非地熱域の地表面温度と気温の推移を比べてみると、両者の変動は非常に良く似ているが、24 日および 26 日の午後に非地熱域の地表面温度が気温より若干高くなる時間帯が認められる。

領域 B では、前述の降水によると考えられる地表面温度低下の時間帯を除いて、地熱域と非地熱域の地表面温度の推移が酷似している。また、非地熱域の地表面温度と気温の推移を比

べると、非地熱域の地表面温度が気温より高くなる時間帯がある。領域 A 同様、24 日および 26 日の午後が顕著であり、日没後も続いている。

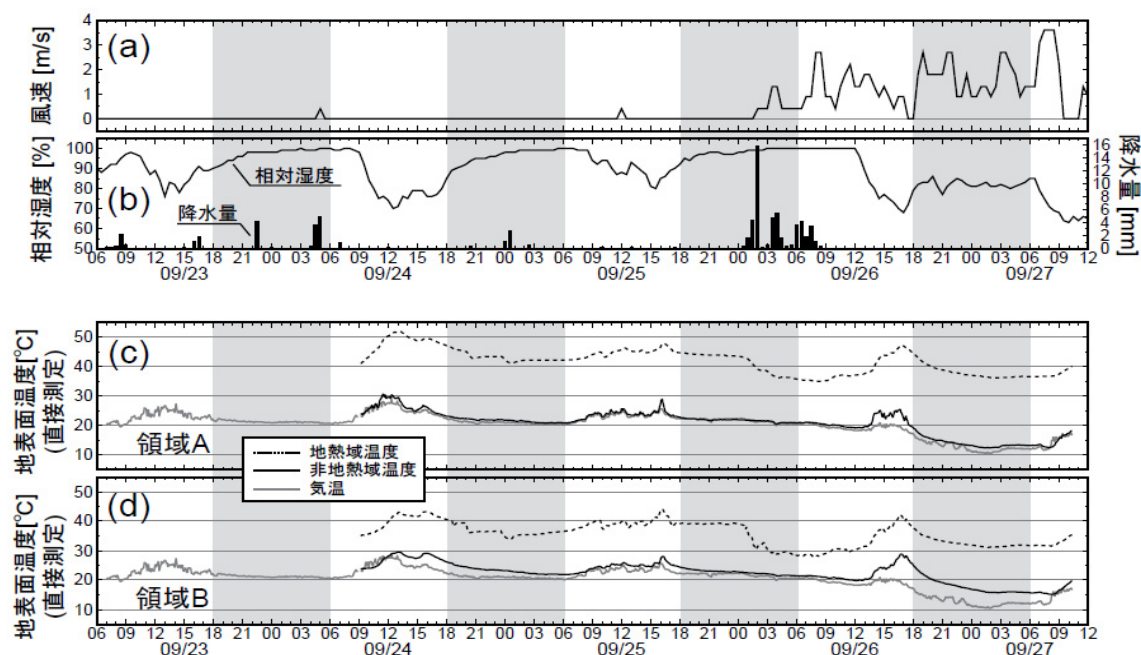


図 8. 観測時の気象データと直接測定による地表面温度の推移（灰色：日没期間）  
 (a) 京大火山研における平均風速  
 (b) 京大火山研における相対湿度および降水量  
 (c) 地獄温泉の気温と、領域 A における地熱域および非地熱域の地表面温度（直接測定）  
 (d) 地獄温泉の気温と、領域 B における地熱域および非地熱域の地表面温度（直接測定）

#### 4-4. 赤外画像から読み取った地表面温度の推移

赤外熱映像連続観測を行った期間について、赤外画像による地表面温度の観測結果および気象データの推移を図 9 に示す。4-3項で述べた直接測定による観測結果と同様に、全体的にみて気温変動に追従したものであることがわかる。また、直接測定による地表面温度（図 8）にくらべ短い周期の変動が多く含まれている。

24 日 18 時から 26 日 18 時にかけては、赤外熱映像による観測を実施していないため、直接測定で降水により温度低下が認められた 26 日 0 時から 9 時ころについてはデータがない。しかしながら、23 日 16 時から 17 時および 24 日 05 時から 06 時には京大火山研の気象データで認められた降水に対応して、領域 A および領域 B の地熱域の地表面温度が 5°C 程度低下している。一方、非地熱域では降水に対応した地表面温度の低下は明瞭ではない。

次に地熱域と非地熱域の地表面温度および気温の推移を比較すると、直接測定による観測結果と同様の特徴が認められる。

領域 B では、降水による温度低下が認められた時間帯を除き、地熱域と非地熱域の推移が酷

似している。一方、領域Aでは23日や24日の09時から12時ころにかけて地熱域の地表面温度が10℃以上上昇しているのに対し、非地熱域では5℃程度にとどまり、地表面温度の推移が異なっている。また、非地熱域の地表面温度と気温の変動を比べてみると、領域Bでは23日、24日の日中および26日の夕方以降に非地熱域の地表面温度が気温よりやや高い時間帯が認められ、翌朝まで続いている。領域Aでは、26日の午後から27日朝にかけて、明瞭ではないものの、非地熱域の地表面温度が気温よりやや高い時間帯が認められる。

そのほか、植生の地表面温度の推移は気温とほぼ同じであった。

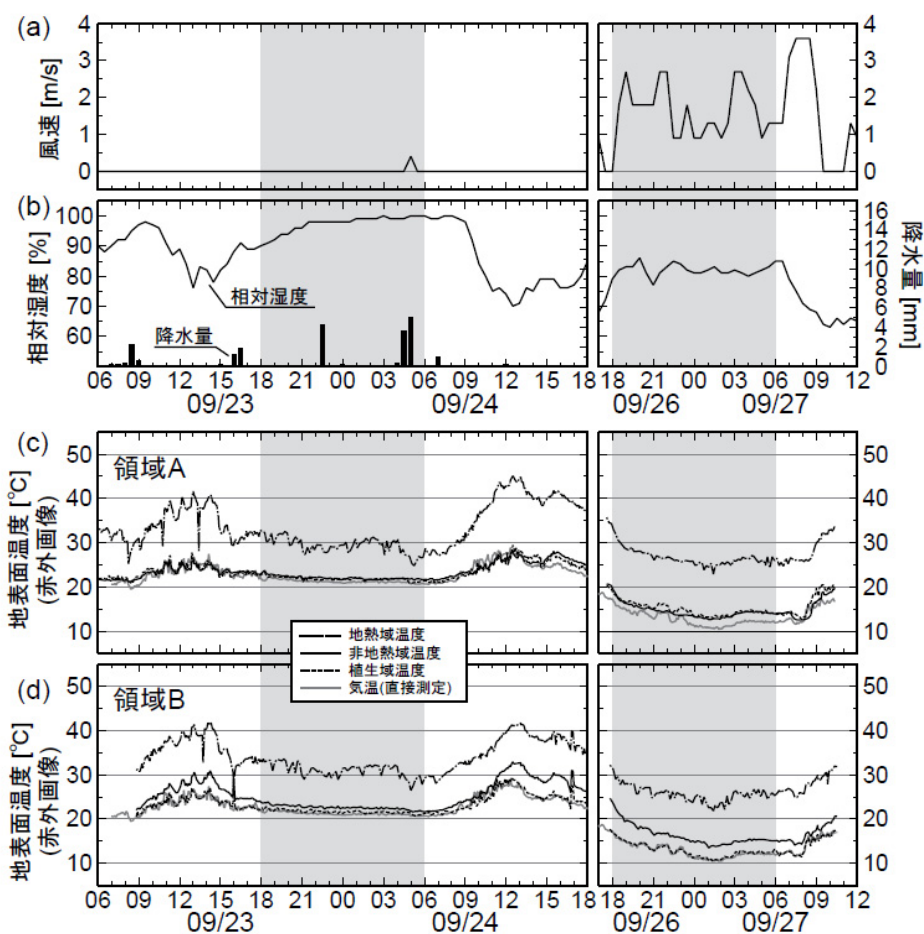


図9. 赤外熱映像連続観測時の気象データと赤外面像による地表面温度の推移 (灰色: 日没期間)

- (a) 京大火山研における平均風速
- (b) 京大火山研における相対湿度および降水量
- (c) 赤外面像から読み取った領域Aの地表面温度の変化と気温の変化
- (d) 赤外面像から読み取った領域Bの地表面温度の変化と気温の変化

#### 4-5. 考察

今回、地熱域および非地熱域の地表面温度の連続観測を行うことにより、延べ5日間に渡り、気温や日射、降水等の気象条件による影響を受けた変動データを継続して収集した。

領域A、領域Bとも、地熱域と非地熱域は近接しており、気温、湿度、日射量および降水量な

どの気象条件にほとんど差異はないと考えられる。このため、地熱域と非地熱域の地表面温度の差は、地下からの熱流に起因した温度増分と考えられる。よって、地下からの熱流に変化がない限りその温度増分は変化しないことが期待される。

このようなことから、赤外面像から火山の熱活動を評価する際には、火山としての熱的兆候のほとんどない非地熱域の地表面温度を調べ、地熱域と非地熱域の地表面温度差(以下、温度異常と呼ぶ)で地熱地域の熱活動を議論することがある。そこで、赤外面像および温度ロガーにより直接測定した地表面温度から、地熱域と非地熱域の地表面温度の差、すなわち地表面温度異常をそれぞれ求めその時間経過を調べた。図 10 にその結果を示す。

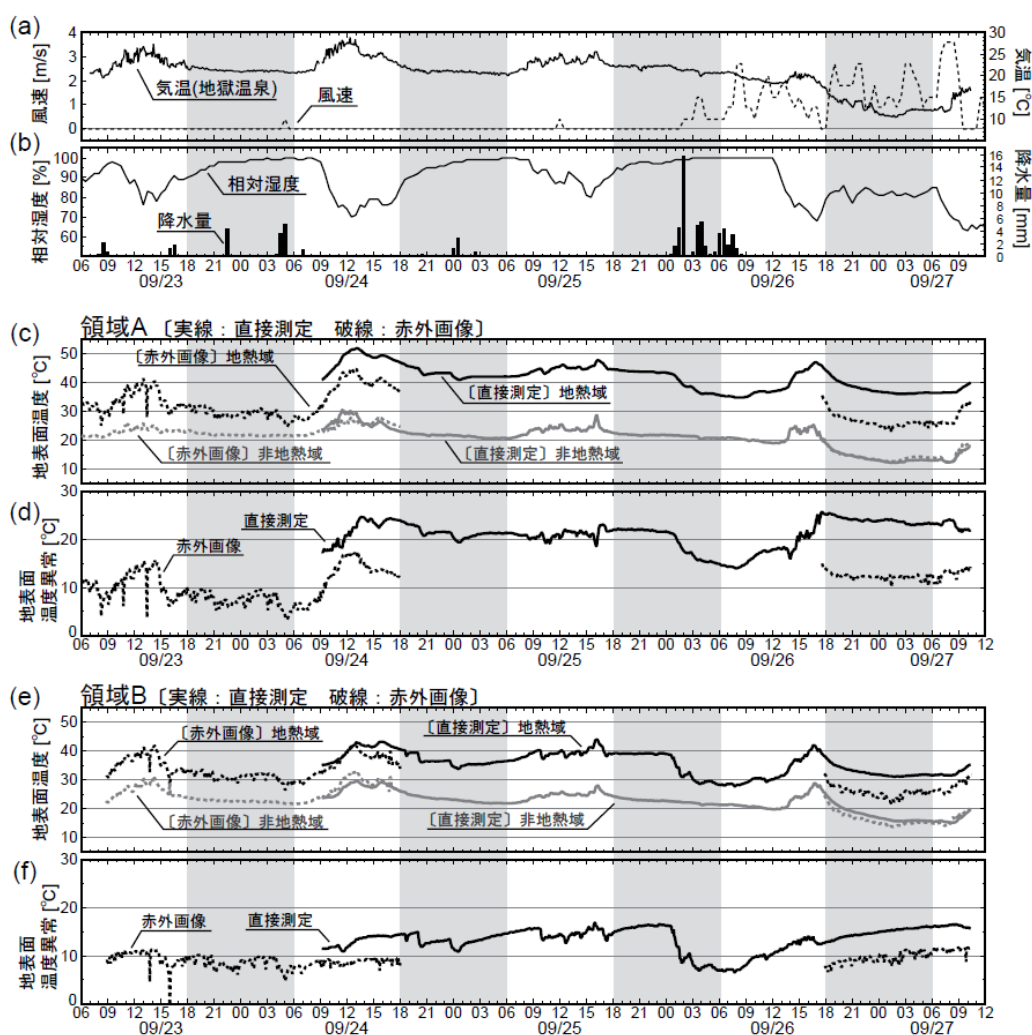


図 10. (a) 地獄温泉の気温と京大火山研における平均風速 (灰色:日没期間)  
 (b) 京大火山研における相対湿度および降水量  
 (c) 領域 A における、赤外面像および直接測定した地熱域および非地熱域の地表面温度  
 (d) 領域 A の地表面温度異常の推移  
 (e) 領域Bにおける、赤外面像および直接測定した地熱域および非地熱域の地表面温度  
 (f) 領域 B の地表面温度異常の推移

4-2項で触れたように、降水の多かった時間帯を除き、10cm 深の地中温度は概ね一定で推

移した。観測期間中の地獄温泉における熱活動はほぼ一定であったと仮定して、地表面温度異常について考えてみる。

領域 B における直接測定による地表面温度異常をみると(図 10-(e)、(f))、地熱域と非地熱域の地表面温度の推移が酷似しているため、降水により地熱域の地表面温度が低下した 26 日 0 時から 26 日 15 時を除き、多少の変動をしながらも 10~15℃の範囲で推移している。また、赤外面像による地表面温度異常でも同様で、10℃前後ではほぼ一定で推移している。つまり領域 B では、地熱の影響の有無を除き、地熱域と非地熱域の地表面の状態は同じような環境であったと考えられる。

次に、領域 A に着目する。直接測定による地表面温度異常では、26 日 0 時から 26 日 15 時にかけての降水の影響による温度低下を除き、全体的に見て 20~25℃で推移している。24 日および 26 日の日中に地表面温度異常がやや増加しているが、これは 4-3 項で述べたように地熱域と非地熱域の温度上昇の差に起因している。また、赤外面像の地表面温度異常は、23 日から 24 日、および 26 日から 27 日にかけての夜間は概ね 10℃前後で推移しているが、23 日および 24 日の日中は、いずれも正午頃をピークに 5~10℃程度の地表面温度異常の増減が認められる。つまり、直接測定および赤外面像によるいずれの観測においても、日射量の多い時間帯に地表面温度異常が大きくなる結果が得られた。特に 23 日および 24 日は、正午付近で顕著であることを考慮すると、領域 A では、日射の影響を受ける度合いが地熱域と非地熱域で異なっていた可能性が考えられる。

今回の観測では、領域 B の地熱域および非地熱域は、いずれも黒みがかった岩に設定したのに対し、領域 A では地熱域の領域は黒みがかった岩、非地熱域では白っぽい岩を測定対象とした。推測の域は出ないが、日射量の多い時間帯では、黒味を帯びた地熱域の岩が非地熱域の岩に比べてより多くの太陽放射を吸収したため、地熱域での温度上昇が非地熱域のそれにくらべ相対的に大きくなったことが原因の一つとして挙げられる。また、領域 A は南向きに面していたため、領域 B に比べて日射の影響を受けやすい環境にあったこともその差を際立たせた可能性が考えられる。

なお、4-3 項および 4-4 項で触れたように、非地熱域の地表面温度が気温より高くなる変動が認められる。26 日の夕方をはじめとして、23 日および 24 日の午後などに顕著であったことを考慮すると、これらは日射によって地表面温度が上昇した変動と考えられ、26 日午後から 27 日の朝にかけてみられたように、状況によっては翌朝まで影響が残る場合があることがわかった。

## 5. まとめ

阿蘇山集中総合観測の一環として、気象の影響による地表面温度の変動について把握することを目的として、地獄温泉の地熱域を対象とした温度連続観測を行った。延べ 5 日間の短期間の観測ではあったが、連続的な地表面温度データを得ることで、気温や日射、降水などに関連付けた時間的な経過を探ることができた。今回の調査で得られた知見、確認できた主な事項は以下の通りである。

(1) 地表面温度がそれほど高くない地熱域では、地表面温度の変動は気温の変動に追隨した変動傾向を示す。

(2) 植生の地表面温度は、気温とほぼ同様の変動傾向を示す。

(3) 降水により地熱域の地表面温度は低下するが、非地熱域の地表面温度の変動幅は小さい。相対的に地表面温度異常は小さくなるため、降水時および降水の後は適切な評価ができない。

(4) 地熱域表面の岩の色が非地熱域表面の岩の色にくらべて大きく黒みがかった領域では、日中、正午ごろをピークとした地表面温度異常の上昇と下降が認められた。これは、黒みを帯びていた地熱域の岩が非地熱域に比べて太陽放射をより多く吸収したためと考えられる。

(5) 地表面温度異常から、地熱域の火山としての熱活動を評価する場合には、地表面の色を含めた地表面の状態が、地熱域と非地熱域で大きく異ならないよう注意を払う必要がある。

(6) 日射による地表面温度の上昇は、状況によっては翌朝まで影響が残る場合がある。

### 参考文献

- 1) 寺田暁彦・鍵山恒臣・吉川 慎(2008): 阿蘇火山・中央火口丘群における熱活動の定量化, 京都大学防災研究所年報, 第 51 号 B, 275-290.

### 謝 辞

観測データの基礎資料として京都大学火山研究センターには気象観測データを提供していただきました。また、観測を行うにあたり、観測場所を提供していただいた地獄温泉清風荘の方々に大変お世話になりました。ここに記して感謝いたします。