

箱根大涌谷の北側斜面における近年の地表面変化と熱赤外カメラによる観測

原田昌武*・小田原 啓*・松沢親悟*・代田 寧*・板寺一洋*・寺田暁彦*²

Changes of surface conditions and infrared thermal camera observation at the northern side of Owakudani, Hakone volcano

by

Masatake HARADA*, Kei ODAWARA*, Shingo MATSUZAWA*, Yasushi DAITA*, Kazuhiro ITADER* and Akihiko TERADA*²

1. はじめに

箱根大涌谷（以下、大涌谷とする）は箱根火山の中央火口丘の北側に位置し、噴気活動が活発である。その主な噴気域は大涌沢であり、現在でも地表面から蒸気が上がっている。大涌谷を含む箱根火山では、2001（平成13）年に温泉地学研究所による観測史上最大の群発地震が発生し、光波測量や傾斜観測、GPSによって火山性の地殻変動が検出されている（丹保ほか、2005；代田ほか、2009；原田ほか、2010）。この群発地震活動の際には地殻変動が捉えられただけではなく、地表面の変化として大涌沢の蒸気井が暴噴し、その後、噴気域は大涌沢の尾根を越えて大涌谷の北側斜面（大涌沢の北西側）でも噴気が確認されている（辻内ほか、2003）。本報告では、2001年箱根群発地震活動以降に大涌谷の北側斜面で新たに発生した噴気域を新噴気域と呼び、従来からの大涌沢周辺の噴気域と区別する。

従来の噴気地帯である大涌沢周辺の状況については、これまでいくつかの報告がある。たとえば、萬年（2009）は過去の文献等を調査し、20世紀の大涌谷における噴気活動の変遷や過熱蒸気の消滅について議論している。また、桧山ほか（2002）は2001年箱根群発地震活動の開始直後から熱赤外カメラによる大涌沢の熱観測を行い、地震活動が活発化したピークから約2ヶ月遅れて暴噴域周辺の温度が上昇したことを論じている。

一方、2001（平成13）年以降に拡大した新噴気域については、近年、地表面温度観測や化学的な火山ガスなどの調査が進められている。地表面温度については、棚田ほか（2005）はデジタル温度計を用いて約20cm深の地温を繰り返し測ることにより新噴気域の状況を報告している。また、寺田ほか（2009）は、氷を用いた熱流量測定法を新噴気域に適用して放熱量を求め、熱赤外カメラで得られた地表面温度との間に相関があることを示し

ている。火山ガスについて、棚田ほか（2008）は新噴気域周辺において硫化水素（ H_2S ）濃度が増加しつつあることを報告しており、そのことは、代田・板寺（2010）でも確認されている。

このように、新噴気域における噴気活動が活発化していることが明らかとなったため、温泉地学研究所では大涌谷北側斜面の3ヶ所において火山ガス及び熱赤外カメラによる地表面温度の連続観測を開始するなど（原田ほか、2010）、現地での定点観測を行っている。これらの調査・研究は火山ガス・熱水の供給系や火山活動、群発地震の発生メカニズムの解明に向けて重要な役割を果たすことは言うまでもない。しかしながら、新噴気域が移動しているのか、または、拡大しているのかなどの広域の変化を把握することは、現地での定点モニタリングだけでは困難である。また、新噴気域では、複数の噴気孔から噴出している火山ガスのほか、地表面全体から染み出てくるように噴出している火山ガスの量も無視できない（Sekioka and Yuhara, 1974）。このように噴気域（噴気地、steaming ground）の地表面温度の変遷やそこから放出される火山ガス量の変化を知るには、新噴気域の全体を把握する必要がある。

そこで我々は、箱根外輪山の北側尾根から熱赤外カメラによる観測を行った。本報告では2001年以降の箱根火山の地熱活動について、大涌谷北側斜面に焦点をあてて、地表面の変化の変遷と熱赤外カメラ観測の結果について報告する。

2. 新噴気域における2001年以降の地表面変化

2001年箱根群発地震活動以降、大涌谷北側斜面において噴気が確認されている（図1のA～E領域）。この地域の新噴気に初めに気が付いたのは箱根温泉供給株式会社の辻内ほか（2003）とみられる。同会社は大涌沢の

* 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 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

報告, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第44巻, 55-62, 2012

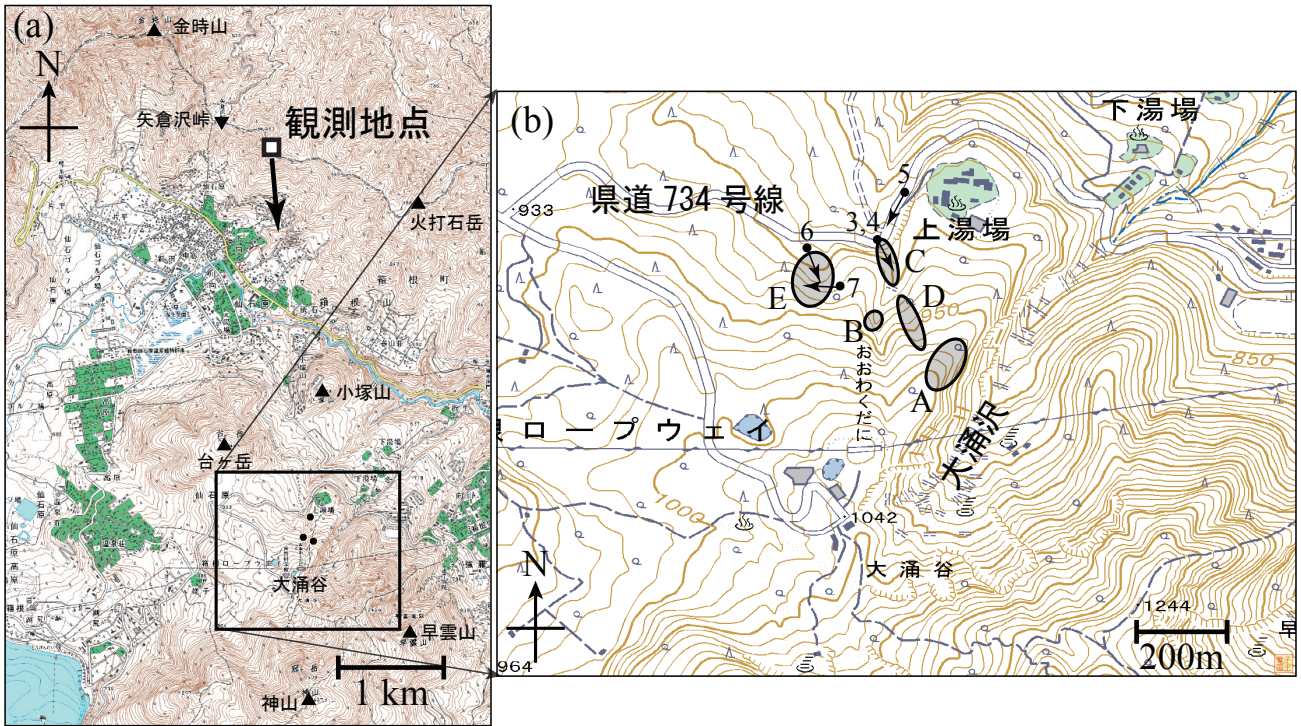


図1 (a) 箱根大涌谷周辺の地形図。□は熱赤外カメラ観測地点、矢印は撮影方位を示す。●印は原田ほか(2010)による火山ガス・地温の連続観測点。(b) 大涌谷周辺の拡大図。A～Eは大涌谷北側斜面の新噴気域。●印及び矢印は写真3～7の撮影地点、撮影方位を示す。地形図は国土地理院による。

蒸気井を用いて温泉を造成しており、そのパイプライン等の設備点検のために大涌谷北側斜面内を定期的に巡回している。辻内ほか(2003)の報告によれば、同地域における新たな噴気は2001(平成13)年11月12日に発見された。発見された場所は大涌沢の北西側の尾根を越えた場所にある沢である(図1のD領域)。その後、2002(平成14)年11月に図1のB領域、2003(平成15)年1月にA領域、2003(平成15)年2月頃にE領域で噴気が確認されている。

前章で述べたとおり、2005(平成17)年頃からは温泉地学研究所を中心に地表面温度や噴気中の火山ガスの調査が進められた。それまで通常の山林だった場所から新たな噴気活動が確認されたため、地表面温度の上昇によって、所々で樹木が枯れ、倒木が発生した(棚田、2008)。地表面の温度上昇から樹木の立ち枯れや倒木の発生に至るまでには多少の時間差があるものと思われるが、詳細な時間分解能はないとしても、樹木の状況変化から新噴気域の地表面温度の上昇過程を知ることは可能であろう。そうした考えに立って我々は、神奈川県内の県政用航空機(ヘリコプター)を利用し、上空から新噴気域の状況を調査した。その時に撮影した大涌谷周辺の写真を写真1、2に示す。

写真1は2004(平成16)年2月25日に上空から撮影

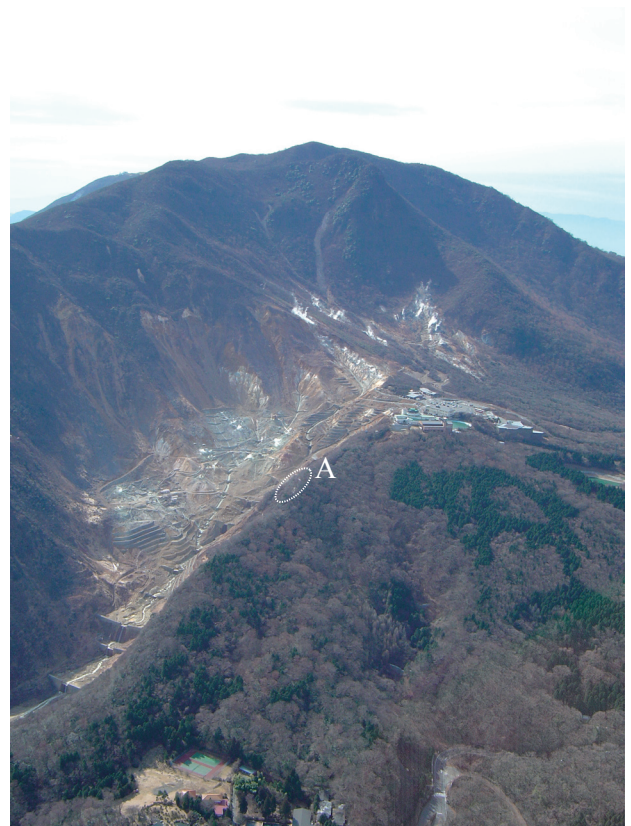


写真1 上空からの大涌谷周辺の状況(2004(平成16)年2月25日撮影)。点線で囲った地域は、図1(b)のA領域の一部。



写真2 上空からの大涌谷周辺の状況（2005（平成17）年5月27日撮影）。点線で囲った地域は、図1（b）のA～E領域の一部。

したものである。新噴気域に着目すると、A領域において若干の噴気が見られるものの、樹木の立ち枯れや倒木等は明瞭ではない。ただし、冬季であるため、立ち枯れ領域の色と通常の樹木の色とのコントラストが少なく、判別しがたい可能性がある。辻内ほか（2003）によれば、新噴気域内では「倒木が多くなりました」と記載されていることから、上空から明瞭に判断できるほどではないものの、噴気地点周辺の小規模な範囲では立ち枯れや倒木が発生していたと考えられる。

一方、2005（平成17）年5月27日に上空から撮影した写真2では、新噴気域の倒木の状況が明瞭に見られる。特に図1のA領域やD領域の倒木が激しく、C領域やE領域の一部でも立ち枯れや倒木の様子が見えている。写真1と比較してこの時期に倒木が鮮明に見られるのは、2004（平成16）年10月8日から9日にかけて箱根周辺を通過した台風22号に伴った風雨によって倒木が促進されたことも考えられる。

このように遠望からでも徐々に噴気域が明らかに見られるようになってきたが、その後、図1のD領域の噴気地帯はさらに沢を下って北に進み、2005（平成17）年5月頃には上湯場付近で県道734号線まで出現してきた（写真3）。また、2006（平成18）年4月には既にこ



写真3 上湯場付近の噴気状況。県道734号線から南方方向を撮影した。（2005（平成17）年5月2日撮影）。

の県道を超えて、道路の北側に位置する上湯バス停付近の路肩は崩落する危険性もあった（写真4、5）。

拡大の一途をたどる新噴気域の状況を調査・監視する目的で、当所では2008（平成20）年12月から図1のA、B、C領域付近で火山ガス及び地温の連続観測を開始した（原田ほか、2010）。その後、2011（平成23）年夏頃からはE領域の噴気活動が活発になり、現在は県道734号線付近にまで達している状況である（写真6、7）。



写真4 上湯場付近の噴気状況。県道734号線から南方向を撮影した。(2006(平成18)年4月17日撮影)。



写真5 上湯バス停付近の状況。(2006(平成18)年7月10日撮影)。



写真6 領域Eの噴気状況。県道734号線付近から南方向を撮影した。(2011(平成23)年11月30日撮影)。

3. 遠望からの熱赤外カメラ観測

前章で述べたとおり、現在も新噴気域は拡大ないしは移動しており、固定点による火山ガス・地温の連続観測や定点における繰り返し調査だけでは全体像の把握や監視が不十分であると思われる。そこで、我々は新噴気域が見渡せる箱根外輪山の尾根上から広域の地表面温度の監視を行うために熱赤外カメラによる観測を開始した。

3.1. 観測概要

赤外線カメラには NEC Avio 赤外線テクノロジー(株)社製のサーモレーサ (TH9100MR) を使用した。この熱赤外カメラは、水平 21.7°・垂直 16.4° の範囲を水平 320 ドット・垂直 240 ドット、データ深度 14bit で撮影する。測定波長は、熱赤外の波長帯域である 8~14 μm を測定している。観測は日中に行っており、得られた熱赤外面像には太陽光の影響も考えられるが、桧山ほか(2002)と同様に、約 3 μm 以上の領域では地球放射強度は太陽光の反射強度よりも大きくなると考えて、日射による影響は無視した。また、観測地点から撮影対象となる新噴気域は約 3.5km 離れているため大気補正や距離補正が必要である。しかし、本報告の目的は地表面温度の絶対値を詳細に議論することではなく、周囲に比べて相対的に温度が高い領域を把握することであるので、これらの補正は行っていない。なお、放射率は 1.0 とした。

観測場所は、外輪山の北部に位置する金時山から南東にある矢倉沢峠のさらに東南東方向へ水平直線距離で 530m 程度の場所にある尾根上である(図1(a)□に示す)。観測地点からは、新噴気域がほぼ南方向(N175°E)に見える(写真8)。新噴気域における熱赤外面像の解像度は、1ドットあたり約 4.2m である。



写真7 領域E内の噴気状況。県道734号線から100mほど南にある登山道で撮影した。(2011(平成23)年11月30日撮影)。

3.2. 観測結果

前節に示した条件のもとで、2012（平成24）年10月15日に行った赤外線カメラによる観測結果を図2に示す。当日の天候は晴れで、雲量7～8（70～80%）程度、観測地点における気象データは観測開始時（12:30）が気温22.9℃、湿度57%、気圧911hPa、終了時（13:08）が気温21.6℃、湿度58%、気圧910hPaであった。熱赤外カメラに内蔵されている可視カメラは熱赤外画像との合成には有効であるがそれ自体では解像度が低いため（41万画素）、デジタルカメラによる可視画像を写真9に示す。これらの画像のうち、図2(a)の中央に見える白煙は、大涌沢の噴気である。また、図2(c)の点線で囲った高温域は建造物によるものである。

図2(b)の熱赤外画像からは、図1のC、D、E領域の高温域範囲が明瞭に確認できる。特に2011（平成23）年から活発化したE領域は顕著である。地表面温度の絶対値は分からないが、新噴気域周辺の噴気活動が起こっていない領域（平均約18.3℃）と相対的に比べると、C、D、E領域の高温域ではそれぞれ平均20.2℃（最高23.3℃）、平均19.9℃（最高24.1℃）、平均21.3℃（最高31.2℃）であり、周囲よりも平均温度が2～3℃程度高く有意な変化であると考えられる。

また、C、D領域の平均温度に比べてE領域の平均温度及び最高温度が高いことは、噴気活動の移動を示して

いることも考えられる。ただし、1回の熱赤外カメラ観測による観測結果だけでは相対的な高温域範囲の状況は把握できても、それ以上のことは推測の域を出ない。



写真8 熱赤外カメラ観測地点から大涌谷の方向を望む。

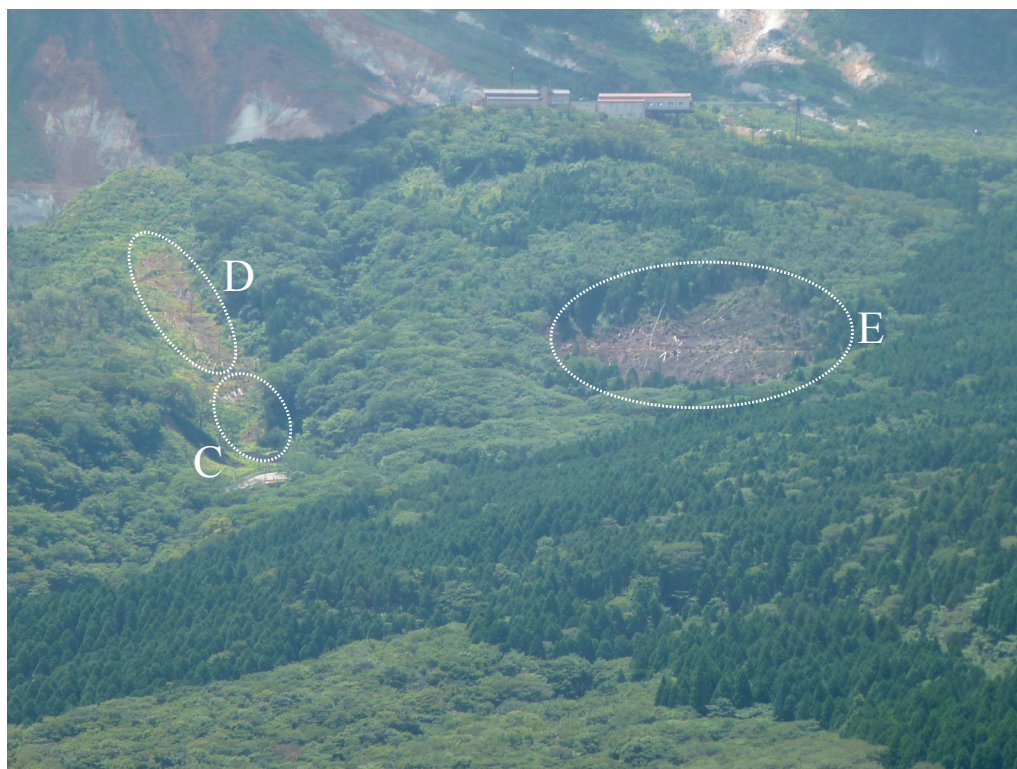


写真9 箱根外輪山から望む大涌谷北側斜面の新噴気域の拡大写真。図2の熱赤外カメラによる観測地点と同一の場所からデジタルカメラにて撮影した（2012（平成24）年8月2日撮影）。点線で囲った地域は、図1（b）のC～E領域の一部。

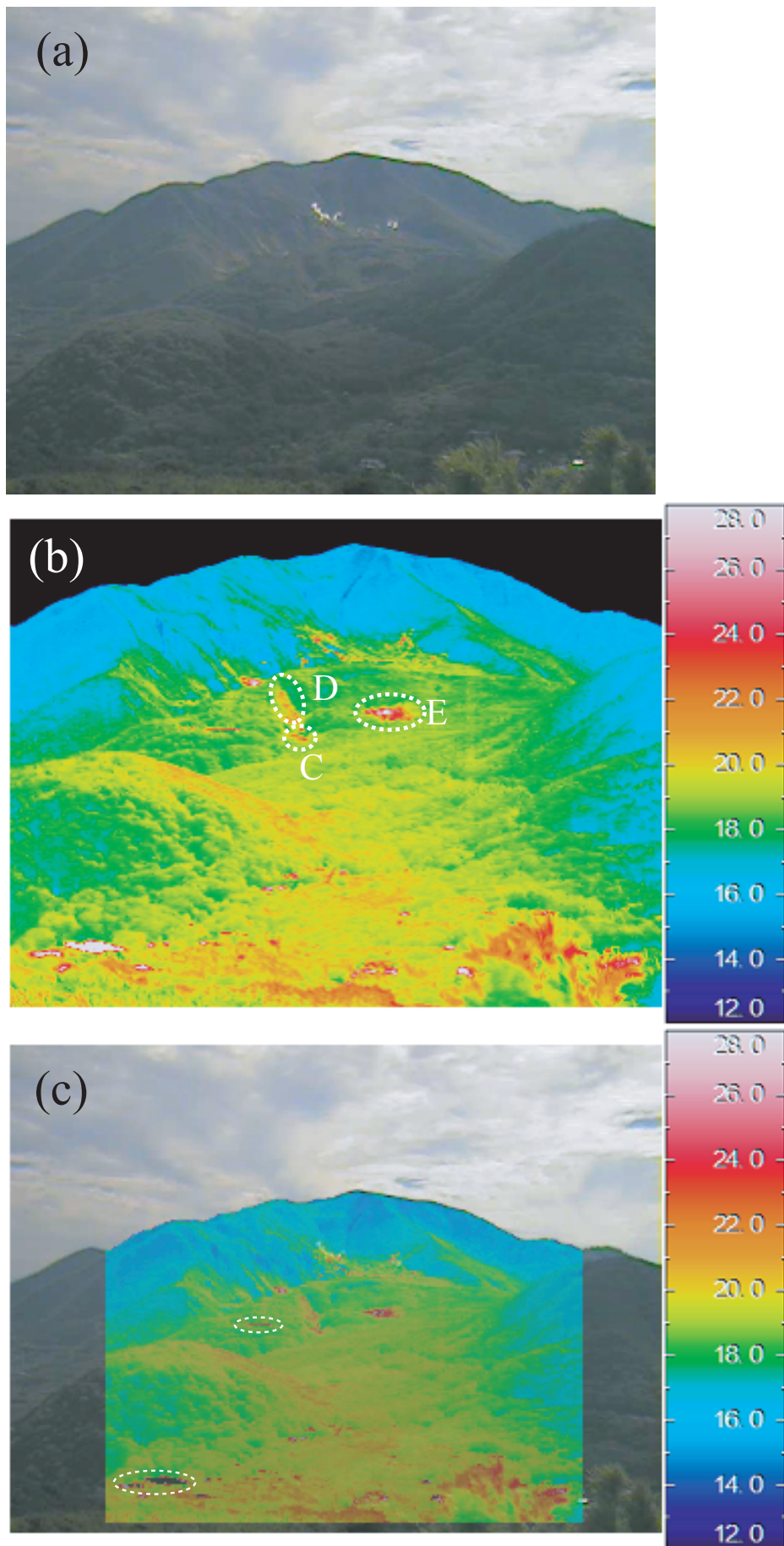


図2 熱赤外カメラによる (a) 可視画像、(b) 熱赤外画像、(c) 合成画像 (2012 (平成 24) 年 10 月 15 日撮影)。(b) の点線で囲った高温域は図1(b)のC～E領域の一部を示す。(c)の点線で囲った高温域は建造物によるものである。

4. 議論及びまとめ

箱根火山において2001（平成13）年に発生した大規模な群発地震活動以降、大涌谷北側斜面において新たな噴気活動が確認されている。その新噴気域では、樹木の立ち枯れや倒木などが現れている。これらは2001（平成13）年以後、大涌谷の北西斜面を越えて隣の沢を北側に下ったり、2011（平成23）年以降はさらに西側の領域でも顕著になっており、噴気域の範囲が拡大していることが確認されている。これまで新噴気域内での地表面温度観測や火山ガス成分の調査が進められてきていたが、より広域の全体像を把握・監視するために箱根外輪山からの熱赤外カメラによる観測を開始した。観測された熱赤外面像では、新噴気域は周囲よりも地表面温度が2～3℃程度高く、特に2011（平成23）年以降に活発化したE領域が高温であった。

2011（平成23）年の夏頃からE領域で噴気活動が活発化したと思われるが、その数カ月前の2011（平成23）年3月11日には東北地方太平洋沖地震（M9.0）が発生している。箱根火山では、同地震の直後から群発地震が発生した。その群発地震活動については、Yukutake et al. (2011) や原田ほか(2012)によってまとめられている。これらの論文では、2011（平成23）年の箱根群発地震活動は、東北地方太平洋沖地震の表面波によって励起され、静的な応力変化によって誘発されたことが指摘されている。また、2001（平成13）年や2006（平成18）年、2008（平成20）年から2009（平成21）年に発生した箱根群発地震活動と比べて、空間的な震源の分布に大きな違いは見られないのに対して、時間的な地震活動の推移の様相が異なっていたことが示されており、2011（平成23）年の群発地震活動はそれまでの群発地震活動と異なる特徴があったことが明らかとなっている。

また、代田・板寺(2010)は、噴気の勢いが強く火山ガス（H₂S）濃度が高かったB領域の噴気孔について2010（平成22）年7月までの火山ガスの調査結果をまとめているが、その後も継続して測定を行っている。その結果によれば、2010（平成22）年12月には同噴気孔から火山ガスを採取できたが、2011（平成23）年1月の調査時点では噴気孔がおおよそ閉塞しており、火山ガスの採取が困難な状況となっていた。B領域での噴気量が減少したのに対し、その後、E領域での噴気の勢いが強くなったため、2012（平成24）年6月にE領域のガス組成を測定したところ、B領域よりも高濃度のH₂Sが観測された。このように、目視による噴気の状態と火山ガス濃度の測定結果からは、噴気域が移動（火山ガスの経路が変化）したかのように見える。ただし、明らかに

E領域の噴気は激しく、移動とともに拡大していると言えるかもしれない。

先述したように、桧山ほか(2002)は大涌谷で熱赤外カメラ観測を行い、2001（平成13）年の箱根群発地震活動の活動開始から2ヶ月遅れて温度が上昇したことを報告している。しかしながら、板寺ほか(2011)によれば、2011（平成23）年の箱根群発地震活動の際は、大涌谷地域の蒸気井において、2011（平成23）年6月までの観測データに明瞭な温度の変化は観測されていない。これらの地震活動や火山ガス組成、温度観測の観測事実は、地震活動も噴気活動も2011（平成23）年は2001（平成13）年の活動と異なっていたことを示しているように見える。

今回、E領域で噴気活動が活発化したのは、2011（平成23）年3月の東北地方太平洋沖地震および箱根群発地震が発生した数ヶ月後である。同地震については、発生直後から箱根火山を含む約20の活火山で地震活動が高まり、特に吾妻山では硫黄自然燃焼などの噴気活動の異常が報告されている（気象庁、2011）。過去の事例を見ても、例えば2003年十勝沖地震（M8.0）の発生直後に、震源域から約150km離れた樽前火山で、群発地震とともに噴気活動の活発化が認められている（寺田・他、2004）。これらの事例から、E領域の活発化は、東北地方太平洋沖地震が遠因となり引き起こされたと見ることができるとも思われる。つまり、同地震によって新噴気域周辺の火山ガス、熱水の供給経路に変化が生じたという可能性がある。ただし、E領域については詳細な観測データが少なく、また、噴気活動の活発化から樹木の立ち枯れや倒木の発生までは時間差があるため、これらの現象の時間経過については不確定な要素が多く、1つの可能性を指摘する程度にとどめておきたい。

箱根火山は、鍵山(2008)の分類によれば“地熱活動卓越型”の火山活動であると考えられる。このタイプの火山活動監視においては火山ガスのモニタリングとともに、地表面温度の観測も重要な役割を果たすであろう。また、新しい噴気地の形成は、既存植生の破壊ばかりでなく、火山ガスとして供給される水による地盤の軟弱化を引き起こすことがある。そのため、大雨などをきっかけとした斜面崩壊にも注意が必要である（Terada and Sudo, 2012）。このように、噴気域の位置の変化をモニタリングすることは、火山ガス事故や土砂災害の危険性を評価するためにも重要であり、本報告のような遠望からの熱赤外カメラによる地表面温度の観測は、新噴気域の地熱活動の状況を明らかにする有効な方法であると思われる。そのため、今後も定期的に同じ観測条件のもと

で繰り返し観測を行うことによって新噴気域が移動しているのか、または拡大しているのかなどについて調査を行っていききたい。また、寺田ほか（2009）は有珠火山において熱赤外カメラ観測の結果などを用いて放熱率を推定しその時間変化を詳細に議論している。箱根火山においても同様の手法は適用できると考えられるため継続して観測を行い、火山ガスの調査・研究も含めて箱根大涌谷周辺の浅部の熱水系・地熱活動の理解を深めたい。

謝辞

上空からの火山活動監視（写真1および2）については神奈川県庁の県政用航空機（ヘリコプター）を使用させていただきました。ここに記して深く感謝します。なお、紙面の都合上写真等は白黒ですが、温泉地学研究所のホームページ（<http://www.onken.odawara.kanagawa.jp/>）ではカラーでご覧いただけます。

参考文献

代田寧・棚田俊收・丹保俊哉・伊東博・原田昌武・萬年一剛（2009）2001年箱根群発地震活動に伴った傾斜変動と圧力源の時間変化，火山，54，223-234.

代田寧・板寺一洋（2010）2001年以後に箱根火山大涌谷北側斜面に現れた噴気中のガス組成等の時間変化，温泉地学研究所報告，42，49-56.

原田昌武・細野耕司・小林昭夫・行竹洋平・吉田明夫（2010）富士山及び箱根火山の膨張歪と低周波地震活動，火山，55，193-199.

原田昌武・棚田俊收・伊東博（2010）箱根大涌谷北側斜面における火山ガス・地温の連続観測，温泉地学研究所報告，42，57-61.

原田昌武・明田川保・伊東博・本多亮・行竹洋平・板寺一洋・吉田明夫（2012）2011年東北地方太平洋沖地震によって誘発された箱根火山の群発地震活動，地震2，64，135-142.

桧山洋平・鍵山恒臣・金子隆之（2002）熱赤外カメラによる箱根大涌谷の熱観測，月刊地球，号外39，69-75.

板寺一洋・菊川城司・代田寧（2011）東北地方太平洋沖地震の影響による箱根温泉の変化，温泉地学研究所報告，43，39-43.

鍵山恒臣（2008）噴火卓越型火山活動と地熱活動卓越型火山活動—新しい視点で見る火山活動—，日本地熱学会誌，30，193-204.

気象庁（2011）平成23年3月地震・火山月報（防災編），321p.

萬年一剛（2009）大涌谷噴気地帯における過熱蒸気—その歴史と消滅の理由，温泉地学研究所報告，41，23-32.

Sekioka, M. and Yuhara, K. (1974) Heat flux estimation in geothermal areas based on the heat balance of the ground surface, Journal of Geophysical Research, 79, 2053-2058.

丹保俊哉・棚田俊收・伊東博・代田寧（2005）光波測量基線網で捉えられた2001年箱根火山の群発地震活動に伴う地殻変動，測地学会，51，45-48.

棚田俊收・原田昌武・丹保俊哉・代田寧・萬年一剛（2005）2001年箱根群発地震活動後の新たな火山噴気活動の拡大について，地球惑星合同大会，V055-P013.

棚田俊收（2008）箱根大涌谷から上湯場付近における地熱活動域での立ち枯れおよび倒木の一因について，温泉地学研究所報告，40，85-86.

棚田俊收・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，温泉地学研究所報告，40，23-28.

寺田暁彦，中川光弘・大島弘光・青山 裕・神山裕幸（2004）2003年十勝沖地震（MJMA8.0）発生直後に樽前火山で起きた高感度カメラで明るく見える現象，地震研究所彙報，79，17-26.

寺田暁彦・鍵山恒臣・松島喜雄・吉川慎・吉川章文・小山寛・山崎伸行・平松秀行・大島弘光（2009）有珠火山2000年新山からの総放熱率，北海道大学地球物理学研究報告，72，139-157.

寺田暁彦・攪上勇介・大場武・萬年一剛・代田寧（2009）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，温泉地学研究所報告，41，15-22.

Terada, A. and Sudo, Y. (2012) Thermal activity within the western-slope geothermal zone of Aso volcano, Japan: Development of a new thermal area, Geothermics, 42, 56-64.

辻内和七郎・鈴木征志・栗屋徹（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，温泉地学研究所観測だより，53，1-12.

Yukutake, Y., Honda R., Harada M., Aketagawa T., Ito H., and Yoshida A. (2011) Remotely-triggered seismicity in the Hakone volcano following the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Earth Planets Space, Vol. 63, 737-740.