箱根火山大涌谷における噴気温度の連続観測

加藤照之^{*1}•宮下雄次^{*1}•萬年一剛^{*1}•菊川城司^{*}•原田昌武^{*1}

Continuous temperature measurements of fumarolic gas at Owakudani in Hakone volcano, Japan

by

Teruyuki KATO^{*1}, Yuji MIYASHITA^{*1}, Kazutaka MANNEN^{*1}, George KIKUGAWA^{*1} and Masatake HARADA^{*1}

1. はじめに

火山活動の推移を監視するためには噴気温度や火口周 辺域の地表面温度を正確に追跡することは大変重要であ る。たとえば、水蒸気噴火の前には地下にある噴気の通 路が閉塞するために噴気温度が低下する可能性がシミュ レーションから示唆されており(Tanaka et al., 2018)、 噴気温度の連続観測が可能になれば水蒸気噴火の噴火準 備過程の解明に大きな貢献をする可能性がある。箱根火 山大涌谷では2015年のごく小規模噴火を含む火山活動 以来、活発な噴気活動が続いており、その活動をモニ ターするために噴気地帯の数か所の噴気孔において噴 気温度の計測が月2回程度行われているが(萬年ほか、 2018)、計測間隔としては十分でない可能性が高い。加 えて、噴気活動がさらに活発化すれば接近できない可能 性もあるため、遠隔測定が望まれる。そこで我々は、噴 気温度の連続かつ遠隔測定可能なシステムを導入するこ とを試みた。

火山における噴気や地表面の温度は主として赤外放射 温度計(赤外カメラ)を用いた遠隔測定によるものが多 くこの方式は火山活動の推移の監視に欠かせないツー ルとなっている(例えば、Pinkerton *et al.*, 2002;金子、 2005; Laiolo *et al.*, 2017;原田、2018)。一方、火山体 内部から噴出する噴気温度を直接測定することは、火山 体内部を探るために重要な物理パラメータと考えられる が(例えば Diliberto, 2017)、これを赤外カメラで正確 に計測することは難しい。最近角皆ほか(2013)は火 山ガス中の水素分子(H₂)の水素安定同位体比(D/¹H 比) が噴気温度に応じて変化する性質を利用した手法で噴気 温度を測定する新しい温度測定法を開発したが、まだ一 般的に使われるまでには至っていない。そこで、ここで は簡便な手法として温度センサーを直接噴気孔に設置 し、遠隔で温度を計測する方法を導入するための実験を 行うこととした。

2. 温度計測システム

大涌谷の噴気孔から噴出する火山ガスは、従来沸点 以下のいわゆる温泉ガスであったが(萬年、2009)、 2015年の噴火後はこの時新たに生じた噴気孔から噴出 するガスが沸点を超え、二酸化硫黄や塩化水素などの強 酸性ガスを多く含むようになった。これらの噴気孔は半 径 100m 程度の地帯に数多く集中しており(図1)、何 らかの機器をこの付近に長期間にわたって設置して観測 を実施するのは極めて困難であることは容易に察せられ る。そこで、直接噴気に触れるセンサーはせいぜい数か 月程度の耐用月数として使い捨てる一方、データ格納機 器は噴気孔から離れた位置に設置した厳重な密閉容器に 格納するという基本方針を立てた。また、データ回収の 際に、データ格納機器の密閉容器を開放せずに済むよう、 無線等を用いてデータを伝送することや、自律して計測 するために AC ではなく電池等の電源である程度の長期 間計測できることが必要であると考えた。

前記のような要求を満たす計測器として、T&D 社製 「おんどとり」を用いることとした。この温度計測シス テムは温度センサーとデータ格納のためのロガーから構 成され、多種類の温度センサーでの広範な温度の計測が 可能であり、特定小電力無線による遠隔収録や電話回線 を用いた Web 上での監視も可能である。センサー部や データ収集装置等は個別のモジュールになっていて、そ れぞれを購入して組み立てることになる。センサー部だ けであれば数千円~2万円程度と安価なため、数か月 程度の耐久性があれば使い捨てることも可能である。今 回は、噴気地帯での連続観測がどこまで可能かに焦点を

^{*1} 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 報告,神奈川県温泉地学研究所報告,第 51 巻,11-16,2019

当て、現地収録で試験的な観測を行うこととした。なお、 データ収集は特定小電力による 100 ~ 150m 程度の遠 隔収集が可能な専用の収集機器を用いることとした。

大涌谷の噴気温度は 2015 年の噴火以降、新たに生成 された噴気孔において手動で計測されているが、これら は 120℃から 140℃程度を示す場合が多い。しかしな がら場所によっては160℃以上の高温を示すものもあ り(萬年ほか, 2018)、強い酸性を示すため、センサー やロガーに特殊な保護が必要である。計測温度が160 ℃以上の場合はこのシステムでは白金測温抵抗体あるい は熱電対が必要であるが、ここでは試験的に実施するた め比較的安価なサーミスタタイプの温度計を用いるこ ととして、同社製の水中用温度センサー TR-5530 を用 いた。同センサーのカタログ仕様を表1に示す。デー タ格納部(ロガー)は前記のセンサーに対応する同社製 RTR-502Lを用いた。電源は、本体内蔵のリチウム電池 が使用可能で、約4年間の連続稼働が可能である。サ ンプリングは1秒~60分まで15通りの間隔で選択可 能であり、データ数は本体内 16000 サンプルの保存が 可能である。今回は10分毎のサンプリングとしたが、 これで本体内には111日分のデータが収録できる。こ のロガーの仕様を表2に示す。図2はこれらをセット

したところである。同センサーを3つ用い、そのうち2 つは噴気にあたるように噴気孔内にセットし、1つはロ ガーを入れた容器の中に置いた。データは現地に置かれ た装置の内部に記録されるが、データを持ち帰るために は同社製の無線データ収集機(RTR-500DC)を用いた。 データ収集は特定小電力無線を用いることができるた め、ロガーから100m以上離れた場所からでもデータ の収集が行える。これを用いることで容器の蓋を開ける ことなく、また2~3ヶ月程度に一度くらいの頻度でも 遠隔からデータを収集することができる。

噴気孔からは噴気が勢いよく吹き出しているため、お んどとりのセンサーを噴気にさらしたまま固定すること は難しい。また、噴気孔の周りは溶融硫黄が飛び散るな ど過酷な環境にあるため、センサーとロガーを結ぶ配線 の保護も必要である。そこで、2本の温度センサーと配 線部を耐高温性、耐薬品性の高いフッ素チューブで保護 したうえでフジパイプ(富士化工株式会社製)に通し、 パイプの両端はシリコン栓で封入した。このようにする ことでフジパイプを持って噴気孔の適切な位置にセンサ ーを挿入するとともに、配線の経路を安定的に保持する ことが可能になった。2本のセンサーの先端はパイプの 先端から 5㎝ほど露出させ、うち一本はシリコンシーラ



 ○ 2015年に生じた火口・噴気孔 Fumaroles and craters formed during the 2015 eruption
 ● 2016年以降に生じた噴気孔

- ☆ 移動後の噴気孔 Fumaroles migrated after the eruption
- 2015年に暴噴した蒸気井
 Steam wells blew out before the 2015 eruption

図1 大涌谷の噴気孔と蒸気井の分布(萬年ほか(2018)に加筆)。今回の実験には噴気孔 16-1 を用いた。データ収 集地点は左上の展望台などである。

表 1 T&D 社製「おんどとり」センサー TR-5530 仕様

サーミスタ
−60~155°C
−70~180°C
平均±0.3℃ at -20~80℃
「平均±0.5℃ at -40~-20℃, 80~110℃
平均±1.0℃ at -60~-40℃, 110~155℃
空気中 約 150 秒
攪拌水中 約15秒
SUS316 (FEP 樹脂モールド) 水中形,長さ
30 mm
FEP 樹脂被覆,水中形,長さ 3000mm



図 2 T&D 社製「おんどとり」のセンサー(TR-5530) とロガー(RTR-502L)をセットしたところ。ケーブ ル長は 3m。

ントで封入して保護した一方、計測温度に差異が出るか どうかを検証するためもう一本はシーラントで封入せず フッ素チューブのみの保護とした。図3に先端の形状を 示す。

ロガーは3重に保護した。まず、ロガー2個をポリ カーボネート製の密閉容器に格納し、もう一つのロガー と一緒に高密度ポリエチレン製の密封容器に除湿剤(オ カモト社製水とりぞうさん)とともに封入する。それを さらにフッ素樹脂製のシート(ニチアス社製ナフロン PTFE シート)で自作したボックスに入れた。図3はこ の計測システムをセットアップしたところである。この ように厳重にロガーを密閉してしまうと、遠隔データ収 録に支障がでるかと懸念されたが、室内テストで支障が ないことが確認された。

3. 大涌谷における温度計測

大涌谷には噴気孔が多数あるが、今回はそのうち駐 車場付近から見通せる噴気孔 16-1 を選び、2019 年5 月 20 日に機器をセットした。セット時の写真を図4に 示す。図5は6月5日の様子である。データは噴気孔

表2 T&D 社製「おんどとり」ロガー RTR-502L 仕様

測定チャンネル	温度 1ch (外付け)
データ記録容量	16,000 個
記録モード	エンドレス(記録フルで先頭のデータか
	ら上書き)かワンタイム(記録フルで停
	止)を選択
通信インターフェース	特定小電力無線通信,光通信
無線通信距離	約150m(見通しのよい直線において)
電源	リチウム電池、外部電源アダプター
電池寿命	約4年
本体寸法	H62mmxW47mmxD46.5mm, アンテナ長:24mm
質量	約 65g
本体動作環境	-40~80℃(無線通信時:-30~80℃)
防水性能	IP64 防まつ形, 生活防水



図3 セットアップした温度計測装置(全体とセンサー 部の拡大写真)。パイプ先端にセンサーを2個取り 付けてある。手前の箱に入れた密閉容器内に3個の ロガーを格納。

16-1 から 130m ほど離れた展望台から無線を使用して 遠隔収録により取得した。格納箱を覆っているシートを めくったり箱をあけたりする必要がなく、作業効率がよ いほか、ロガーの保護のためにも都合がよい。また、特 に大涌谷は噴気地帯での調査のために特別な許可が必要 であるが、データ収録のためだけであれば立入規制区域 外からのデータ収録が可能であることも利点である。

データの回収は2週間に一度程度の頻度で行った。設 置以来、データは一ヶ月程度は順調に収録できていたが、 6月18日の現地確認では計測中の噴気孔の近くに新た な噴気孔ができていることが判明した(図6)。また、 7月はじめには新たな噴気孔が拡大して温度計測装置が 孔内に落下してしまい、観測できなくなってしまった。

図7に6月20日までの記録を示す。(1)及び(2)が噴 気孔内のセンサーで、それぞれシーラント有、無を示す。 設置後しばらくはいずれも120℃前後の温度を示した。 これは別途手動で計測した値とほぼ同じである。設置直 後に温度が低下している部分は降雨によるものであるこ とが明らかであり、100℃未満を示していることから湯

だまりの形成が示唆される。湯だまりは、6月以前にみ とめられたことはなかったが、噴気孔が拡大した7月 以降しばしば現場で形成が目撃されているので、何らか の理由でこのころから噴気孔に地下水が流入するように なったのを、今回の計測装置で捉えた可能性がある。そ の後、6月6日にはセンサー(1)の温度が急上昇し、計 測可能範囲である 155℃を超えてしまった。センサー 回りの状況が変化したものと思われるが詳細は不明であ る。翌6月7日から6日間にわたってセンサー(2)の みが降雨によると思われる温度低下がみられるのに対 し, センサー(1)がそれには追随していない。また、 16日頃にセンサー(2)の温度が20℃近くにまで低下 したり、センサー(1)が17日頃に再び計測範囲に戻 ってセンサー(2)と同じ温度を示すなど複雑な経過を たどっている。上述したように噴気孔の周囲が陥没する などの環境変化が著しいためこれらが影響した可能性が ある。その後、装置が落下して計測不能となったため原 因も調査不能となってしまった。本稿執筆の時点で次の 装置を準備中である。





図4 5月20日に噴気孔16-1に温度計測装置を設置。 (上)噴気孔脇の堆積した硫黄の山を穿孔してセン サーパイプを噴気孔に差し込み、(下)データ格納 箱を噴気孔の外に置いてブルーシートで覆う。

4. 議論

「はじめに」で述べたように、火山における温度計測 は多くが赤外放射によるものである。しかし、赤外観測 が導入された 1970 年頃より以前は温度センサーを用い た計測が行われていた。このような温度計による測定を 火山活動を捉える目的で体系的に行った事例として諏 訪・田中(1959)による伊豆大島三原山における研究 がある。三原山は 1950 ~ 51 年に大噴火があったが、 その後の 1952 年頃から諏訪らは三原山火口内にできた 多くの噴気孔の温度を週1回程度の繰り返しで観測を行 った。用いた温度計は熱電対温度計(<1200℃)や棒状



図5 6月5日の様子。ブルーシートが噴気の物質で覆 われて変色していることがわかる。



図6 6月18日にドローンで撮影した噴気孔16-1付近 の様子。上部に薄くもやがかかったようになってい る箇所が計測している噴気孔であるが、そのすぐ手 前に新たな噴気孔ができている。その右側にロガー 格納箱が置かれている。この撮影のしばらく後に新 しい噴気孔が拡大して温度計測機器が孔に落下して 計測不能となった。



図7 大涌谷噴気孔 16-1 の温度変化。(1) 及び (2) は噴気孔に設置した温度センサーの値でそれぞれシーラント有りと 無しを、(3) はロガー格納箱内に設置した温度センサーによる測定値を示す。近傍の気象庁アメダス観測点の時間 雨量も示す。

留点最高温度計(<200℃)であり、延べ84点で測定 を行った。多くの観測は1955年頃までで終了している ようであるが、13観測点では1957年まで続いたよう である。これらのデータ計測期間の途中の1953年10 月~1954年2月、1955年12月~1956年1月など には小規模な噴火が、またそのほか何度か噴煙活動など があった。これらの活動に際して、温度がどのように変 化したかについていくつかのタイプに分けており、火山 活動の発生に先立って噴気孔の温度が急激に、あるいは 徐々に上昇する現象を見つけている。一方、火山活動と は無関係に温度が下降したりあるいはほとんど変化しな い場合もあるとのことである。

今回の箱根山における噴気活動に伴う噴気孔の温度計 測ではどのような変遷が見られるのであろうか。また、 その変化がどのような火山体内部のマグマ活動や熱水活 動のメカニズムを反映しているのか、是非とも知りたい ところである。図8は2019年7月末までの大涌谷に おける温度計測の結果である。ほぼ2週間に一回程度 現地での手動による計測を行っている。多くの噴気孔 が120~150℃程度であり、今回使用した温度センサ ーの計測範囲内であるが、小規模噴火を起こした噴気孔 15-1は160℃を超える温度を示している。今回、噴気 孔16-1で使用した温度計は155℃までしか計測できず、 計測期間中に噴気温度が計測限界を超えて記録できなく なってしまったことがあった。このため、図8に示した 噴気孔 15-1 以外の観測点でも、温度が上がった場合に 備え 155℃以上でも計測可能な熱電対や白金測温抵抗 体のようなセンサーを用いる必要があると考えられる。

噴気孔は必ずしも同じ場所に定在しているとは限らない。今回使用した噴気孔 16-1 の測定でも、設置後しば



図8 大涌谷における噴気孔の 2019 年7月までの手動 による温度計測結果。今回のセンサーによる温度計 測は最下段の噴気孔 16-1 で実施した。温度の単位 は℃。

らくしてすぐ隣に新しい噴気孔が出現したために機器が 孔内に落下してしまい測定が出来なくなってしまった。 このような噴気孔の移動や新たな出現に備えて、ロガー 格納箱を噴気孔から離して置いたり、新たな噴気の出現 する可能性の低い場所に置く、などの工夫が必要だろう。 センサーの噴気孔への設置についても安定して長期間の 噴気が計測できるよう改善を進めて行きたいと考えてい る。さらには、本報告で活用している「おんどとり」の システムでは電話回線を利用してデータをインターネッ ト上で監視することが可能であるので、いずれはこのよ うな方式を導入して研究室においても温度監視ができる ようなシステムを構築していきたいと考えている。

5. おわりに

噴気孔で噴出する過熱蒸気は地下数百m付近にあると 考えられる熱水だまりから、浅部地下水の影響をあまり 受けずに上昇しているものと考えられ、その温度を直接 モニターすることは火山活動の監視及び予測に重要と考 えられる (Diliberto, 2017)。これまで月2回程度の現 地観測 (萬年ほか, 2018) や赤外カメラによる遠隔観 測 (原田, 2018) が行われてきたが、前兆変化が微弱 な水蒸気噴火の予測のためには精度良い隔測連続監視が 極めて重要であると考えられるので、今後装置に改良を 加えつつ遠隔監視を導入し監視機能強化につなげていき たいと考えている。

謝辞

機器の開発にあたっては、大涌谷に関わる多くの関係 者の方々にご指導・ご協力をいただきました。ここに記 して深く感謝いたします。

参考文献

- Diliberto, I. S. (2017) Long-term monitoring on a closedconduit volcano: A 25 year long time-series of temperatures recorded at La Fossa cone (Vulcano Island, Italy), ranging from 250°C to 520°C, J. Volcanol. Geotherm. Res., 346, 151-160.
- 原田昌武(2018)大涌谷における熱赤外カメラによる 連続観測とその特徴温地研報告, 50, 53-59.
- 金子隆之 (2005) 衛星リモートセンシングによる火山 の赤外観測,火山, 50, S233-S251.
- Laiolo, M., D. Coppola, F. Barahona, J.E. Benítez, C. Cigolini, D. Escobar, R. Funes, E. Gutierrez, B. Henriquez, A. Hernandez, F. Montalvo, R. Olmos, M. Ripepe, A. Finizola (2017) Evidences of volcanic unrest on high-temperature fumaroles by satellite thermal monitoring: The case of Santa Ana volcano, El Salvador, J. Volcanol. Geotherm. Res., 340, 170-179.
- 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.
- 萬年一剛・菊川城司・宮下雄次・山口珠美・丹保俊哉・ 本間直樹(2018)箱根火山2015 年噴火後の大涌 谷噴気地帯と噴気温度の変化,温泉地学研究所報 告,50,18-44.
- Pinkerton, H., M. James, A. Jones (2002) Surface temperature measurements of active lava flows on Kilauea volcano, Hawai'i, J. Volcanol. Geotherm. Res., 113, 159-176.
- 諏訪彰・田中康裕(1959)三原山の火山活動に関連 する火口内の噴気孔温度の変動,火山第二集,3, 107-118.
- Tanaka, R., Hashimoto, T., Matsushima, N., Ishido T. (2018) Contention between supply of hydrothermal fluid and conduit obstruction: inferences from numerical simulations. Earth, Planets Space, doi: 10.1186/s40623-018-0840-6
- 角皆潤・小松大祐・中川書子 (2013) HIReTS 法を用い た火山噴気の遠隔温度測定:薩摩硫黄島における 検証,火山,58(3),443-459.