

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

萬年一剛^{*1}・菊川城司^{*1}・宮下雄次^{*1}・山口珠美^{*2}・丹保俊哉^{*3}・本間直樹^{*1*4}

Steaming area formed after the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan and sequential changes of fumarolic temperature

by

Kazutaka MANNEN^{*1}, George KIKUGAWA^{*1}, Yuji MIYASHITA^{*1}, Tamami YAMAGUCHI^{*2},
Toshiya TANBO^{*3} and Naoki HONMA^{*1*4}

Abstract

Fumarole activity of Hakone volcano significantly intensified approximately one month before the 2015 phreatic eruption and new fumaroles formed before, during and after the eruption. Most of such fumaroles have been active up to the present and we have monitored temperatures of up to 10 fumaroles since our entry to the eruption center area was permitted in 2016. Although temperatures of some fumaroles remain high (> 150 °C), steam temperatures from well-established and stable fumarole vent show gradual lowering. The newly formed fumaroles only formed a simple hole in the surface; however, sulfur towers and domes have been developed in the hole from around October 2015. Sulfur spherules (≤ 1 mm) have been dispersed from the fumaroles. They have deposited around the vent and small ones (\leq a few tens of micro meters) drifted to attach to plants more than 700 m from the vent area. Sulfur on plant surface was significant just after the eruption; however, they were recognized even in July 2017. Our volcanic gas measurement using diffusive tube implies decreasing of $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ratio, which implies lowering of steam temperature. Instead of normal yellow sulfur, some fumaroles occasionally dispersed greenish sulfur since 2017. Such greenish sulfur was found formed by contamination of xenolithic altered minerals. Accidental inflow into the fumarole vent was also implied by a mud fountaining event on May 17, 2018 and these inflows may also imply waning of fumarolic activity.

1. はじめに

大涌谷噴気地帯は箱根火山にある噴気地帯のうち最大のもので、観光地としても広く知られている。この地域は、分水嶺を境に東西2つの地域に分かれる(図1)。東側は大涌沢が削った谷である大涌谷で、箱根ロープウェイがまたぎ、駐車場の東側から見下ろすことができる。谷底では古くから温泉造成が行われているほか、2015年噴火の噴出中心が形成された。西側は、冠ヶ岳のふもとにあり、噴気の中を散策できる自然研究路や、黒たまごの製造現場が見られる玉子茶屋などが整備され、一般

に大涌谷園地と呼ばれている(2019年1月時点では閉鎖中)。

このうち、東側の大涌谷地域は、戦前は活発な噴気地帯で、湯気がもうもうと上がっていたほか、140°Cをこえる噴気が観測されたこともあった。しかし、戦後は2015年噴火の直前まで湯気は目立たず、沸点を超える自然噴気はない状態が続いてきた(萬年, 2009)。

箱根火山の2015年噴火は、同年6月29日から7月1日にかけて発生した、ごく小規模な水蒸気爆発であった。この噴火前後で、大涌谷噴気地帯の西側では明瞭な

*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

*2 箱根町立箱根ジオミュージアム 〒250-0631 神奈川県足柄下郡箱根町仙石原 1251 - 2

*3 富山県立山カルデラ砂防博物館 〒930-1405 富山県中新川郡立山町芦嶺寺字ブナ坂 68

*4 新潟地方気象台 〒950-0954 新潟県新潟市中央区美咲町 1-2-1 新潟美咲合同庁舎 2 号館

論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第 50 巻, 19-44, 2018

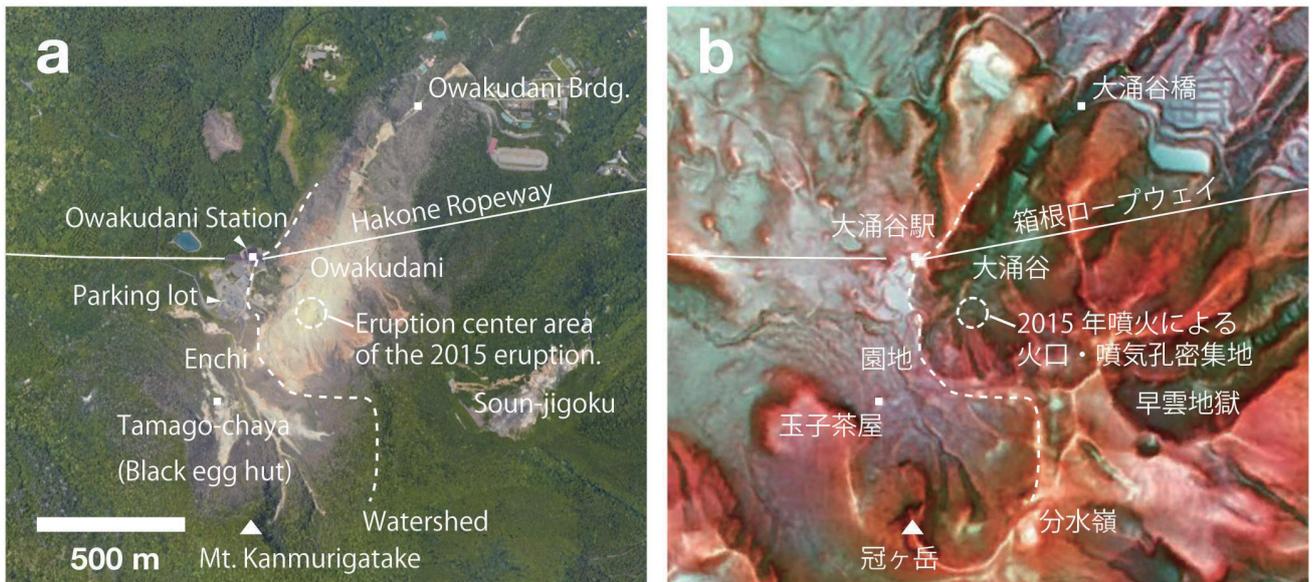
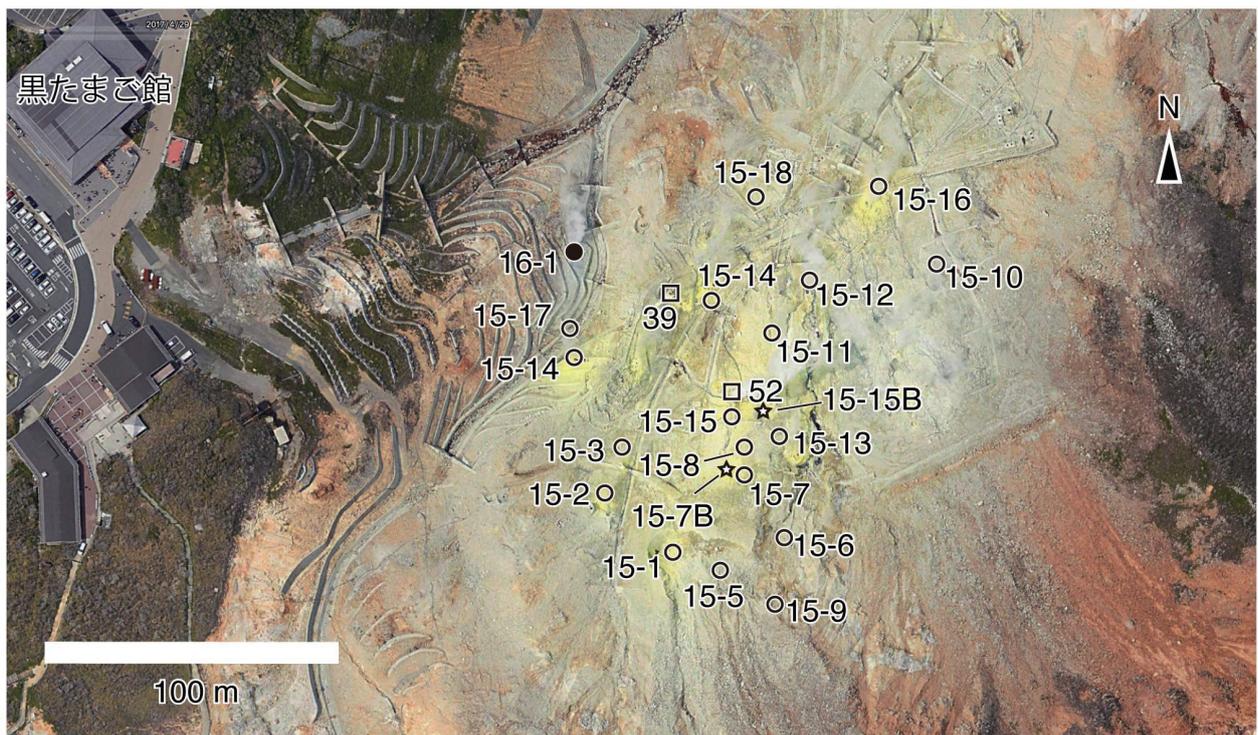


図1 大涌谷付近の地形 a) 空中写真 (Google Maps より取得) b) 赤色立体地図 (元のデータは国土地理院による)
 Fig. 1 Index map of Owakudani area. a) Aerial photograph (from Google Maps). b) Red relief map (topographic data from Geographical Information Authority of Japan).



- 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
Fumaroles formed after 2016
- ★ 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2 2015年噴火で生じた噴気孔群の位置図。39および52は、暴噴した蒸気井の番号と位置を示す。空中写真はGoogle Mapsによる。

Fig. 2 Index map of fumaroles formed associated with the 2015 eruption of Hakone volcano. The points 39 and 52 indicates steam wells blew out during volcanic unrest before the 2015 eruption. The source of the aerial photograph is Google Maps.

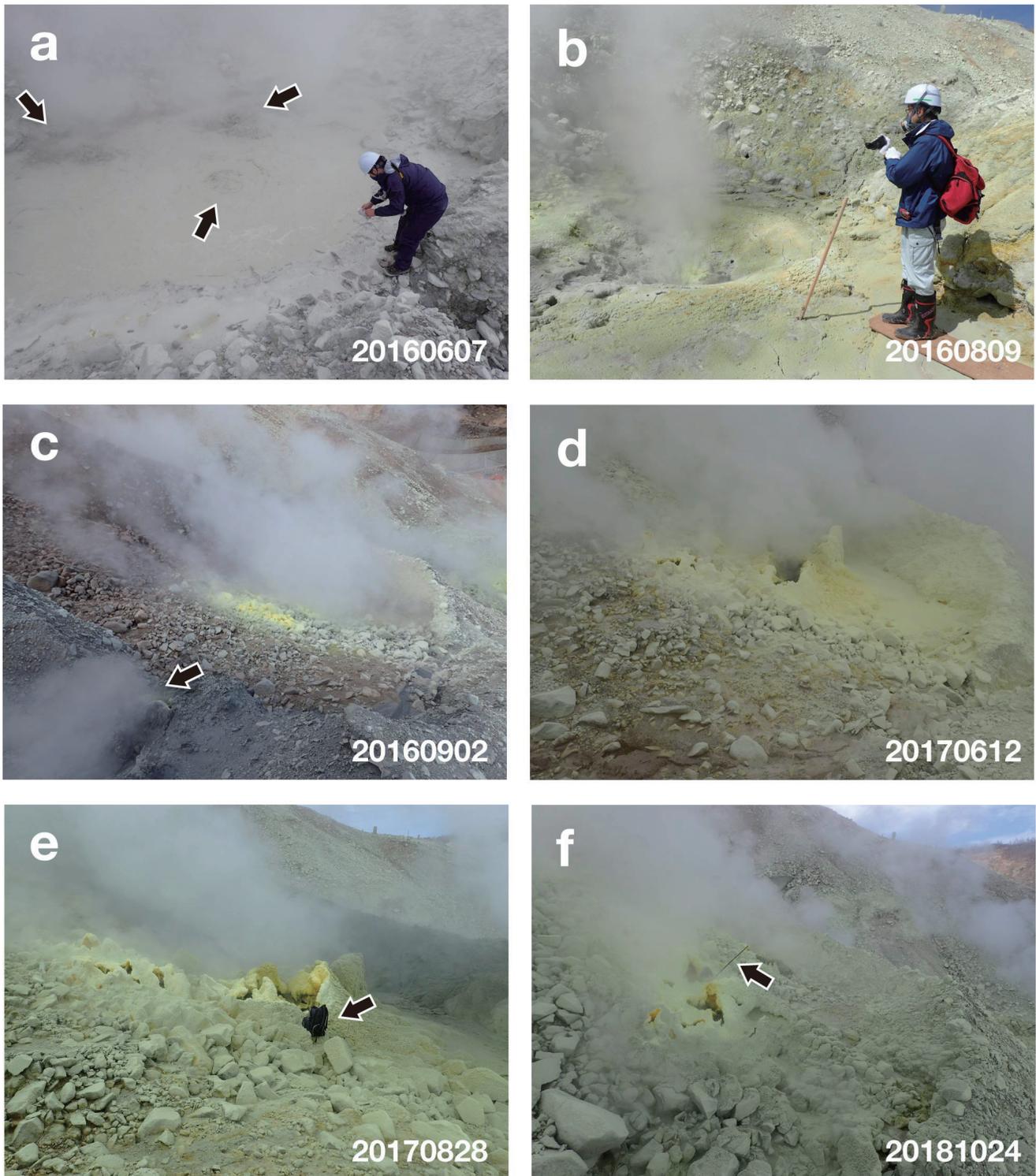


図3 15-1 火口内の時間変化。右下の数字は年月日。a) 火口内部の様子。灰色の泥水で満たされた池があり、沸騰する湧きだし口が3つ認められる(矢印)。b) 干上がった池の底に噴気孔ができています。周囲は柔らかい泥のため足を取られないように木板の上に乗って撮影をしている。c) 台風による土砂崩れで干上がった池は完全に埋積された。手前は15-5 噴気孔(矢印)。d) 噴気塔が成長してきた様子。e) 周囲に緑灰色の硫黄が堆積した。リュックサック(矢印)の大きさは高さ約28cm。f) 最近の様子。噴気孔に刺した杖(矢印)の長さは140cm。

Fig.3 Temporal change of interior of the 15-1 crater. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) A mud pool was formed within the crater. On the surface of the mud pool, three bubbling points (arrow) were recognized. b) A fumarole formed within the bottom of dried-up pool. Since the pool bottom is soft the observer is on a wood board not to be trapped by the mud. c) A land slide caused by a typhoon filled

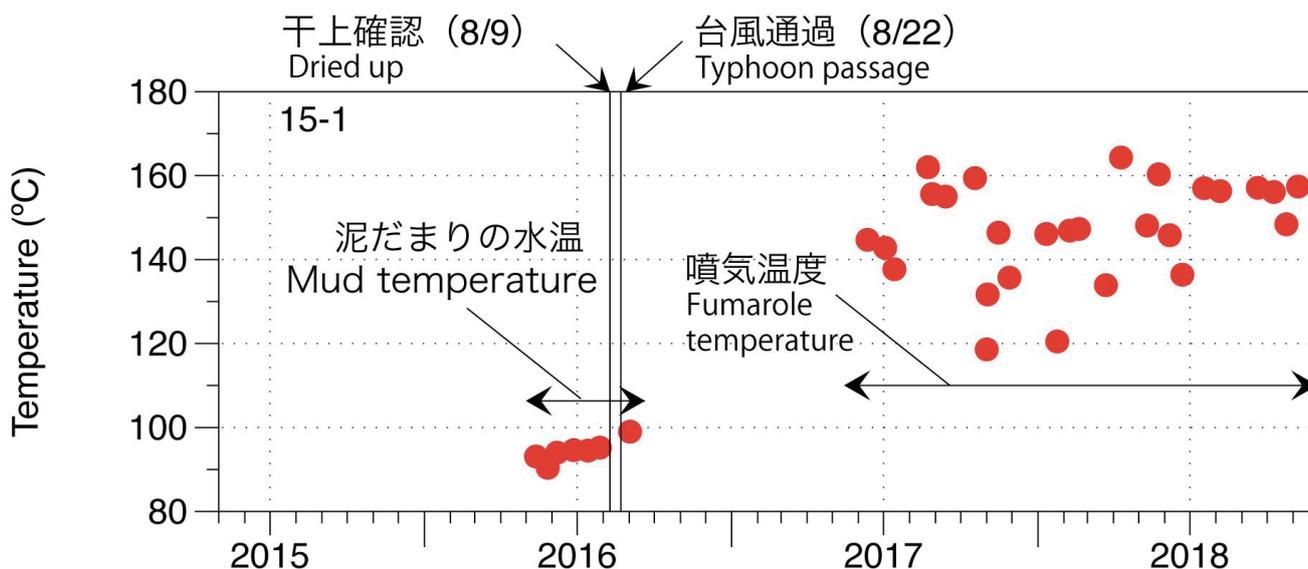


図4 15-1 群の噴気温度の時間変化。ただし、2016年の値は泥だまりの泥か、泥だまりが干上がった直後の噴気の温度。
 Fig. 4 Temporal change of steam temperature of the 15-1 fumarole group. The temperature in 2016 indicates temperature of the mud pool or fumarole formed just after the pool dried up.

変化が認められなかったが、東側は火口や多数の噴気孔が形成された。筆者らは、噴火後、立入制限が緩和されてから月2回程度のペースで、噴気孔や周辺の様子を観察し、噴出する噴気の温度を測定してきたほか、最近は、ガス検知管による噴気孔近傍の火山ガス比の測定を始めた。本報告ではこれらの結果について報告する。

2. 噴気孔と噴気温度の測定

2.1. 噴気孔の名称と定義

2015年噴火と関連して開口した火口および噴気孔の分布を図2、座標を表1に示す。火口及び噴気孔の名称は種類による区別なく、15-1、15-12など15ともうひとつの数字をハイフンで結んだ形で表記される。読み方は15-1であれば、「15の1」である。15とは2015年に形成されたということを示し、これは気象庁の命名規則による。後ろの数字は発見された順番に付けたもので、開口した時間的な順番を示すものではない。火口、噴気孔の命名は噴火直後に火山噴火予知連絡会に提出した資料（神奈川県温泉地学研究所・伊豆半島ジオパーク推進協議会, 2015）による。

今回の噴火については、周囲に岩石や土砂を吹き飛ばし小規模な噴石丘を形成したものを火口、ほぼ噴気だけ

表1 2015年の噴火に伴って形成された火口及び噴気孔の座標

Table 1 Coordinates of craters and fumaroles formed associated with the 2015 eruption of Hakone volcano.

火口・噴気孔名 Name	種別 Type*	東経 (°) Longitude	北緯 (°) Latitude
15-1	火口 (C)	139. 021801	35. 242285
15-2	噴気孔 (F)	139. 021511	35. 242482
15-3	噴気孔 (F)	139. 021603	35. 242601
15-4	噴気孔 (F)	139. 021418	35. 242876
15-5	火口 (C)	139. 022011	35. 242272
15-6	火口 (C)	139. 022218	35. 242337
15-7	噴気孔 (F)	139. 022065	35. 242528
15-8	噴気孔 (F)	139. 022171	35. 242699
15-9	火口 (C)	139. 022237	35. 242193
15-10	噴気孔 (F)	139. 022764	35. 243194
15-11	噴気孔 (F)	139. 022154	35. 242970
15-12	噴気孔 (F)	139. 022291	35. 243138
15-13	噴気孔 (F)	139. 022224	35. 242726
15-14	噴気孔 (F)	139. 021884	35. 243130
15-15	噴気孔 (F)	139. 022010	35. 242706
15-16	噴気孔 (F)	139. 022542	35. 243426
15-17	噴気孔 (F)	139. 021399	35. 242962
15-18	噴気孔 (F)	139. 022081	35. 243389
15-19	噴気孔 (F)	139. 022212	35. 242687
16-1	噴気孔 (F)	139. 021415	35. 243213

*C, Crater; F, fumarole vent.

the dried pool. The fumarole before the crater (arrow) indicates 15-5 fumarole. d) Developing sulfur tower. e) Sulfur colored greenish gray deposits around the fumarole. The arrow indicates a backpack (approximately 28 cm in height). f) Recent photograph. The length of the stick put on the fumarole is approximately 140 cm (arrow).

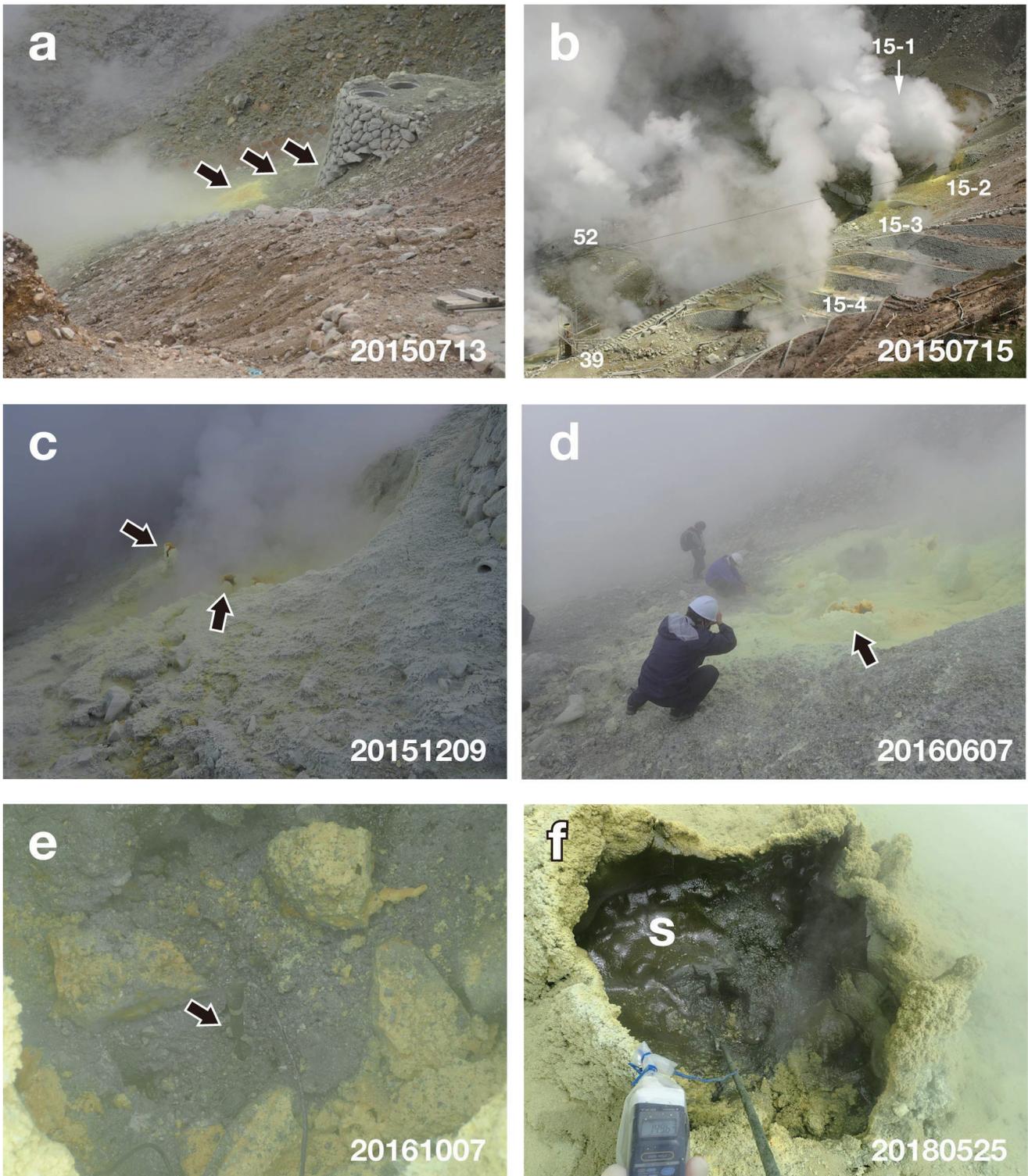


図5 15-2 群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火直後は3つほど穴が開いているのが認められるが(矢印)、噴気しているのはもっとも北側のものだけであった(写真中、一番左)。b) 遠望した様子。c) 2015年の年末頃迄には、噴火時に開口した穴の中で複数の噴気塔(矢印)が成長するのが確認できた。d) 噴気塔は成長し続けるわけではなく時折崩壊する模様。矢印の穴で温度測定を実施していた。e) 2016年の年末ごろまで、噴気塔内部の底は岩石が露出していて、噴気が出てくる穴(矢印)も比較的容易に確認できた。f) 2017年以降は火口内部に溶融硫黄やそれが固結したもの(s)が溜まるようになった。

Fig. 5 Temporal change of the 15-2 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) At least three openings were recognized just after the eruption and only in the southernmost was active. b) A view of 15-2 and its surroundings from a distance. c) Before end of 2015, multiple active sulfur

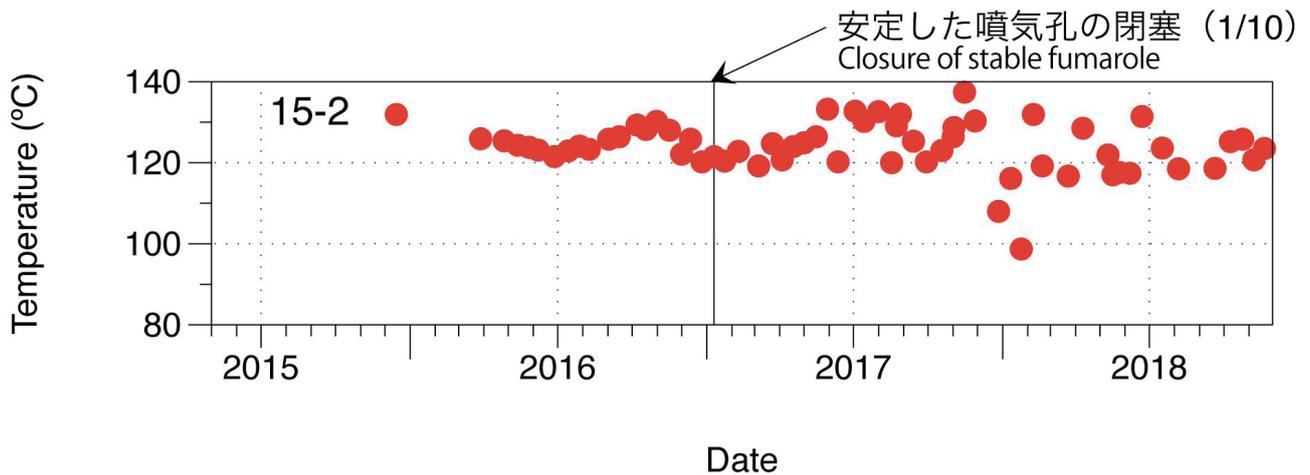


図6 15-2 群の噴気温度の時間変化。2016 年中は噴気孔の形状が安定していたが、2017 年 1 月に閉塞した。その後は測定を実施する噴気孔が一定しないため、値もばらついている。

Fig. 6 Temporal change of steam temperature of the 15-2 fumarole group. Before the 2016, steaming opening within the sulfur tower was stable; however, it closed in January 2017. After then, the temperature fluctuates since the measured steaming opening changes frequently.

を噴出しているものを噴気孔と呼んでいる。ただし噴気孔でも周囲に土砂を吹き飛ばしているものもあり、火口丘と噴気孔は連続的なものと考えられる。また、火口と呼んでいるものには、噴火後に活動を完全に停止したもの（15-6, 15-9）、火口の中に噴気孔が形成され、しばらく活動（例えば 15-5）、あるいは現在まで活動中のもの（例えば 15-1）がある。

2.2. 噴気孔の形成

箱根火山では噴火の約 2 か月前の 5 月 3 日に箱根温泉供給株式会社第 39 号蒸気井（以後 39 号井）が暴噴状態になった。5 月 7 日の In-SAR による観測で 39 号井の周囲で局所的な隆起が認められたことから、5 月 12 日以降、39 号井から半径 200m の範囲への立入は、供給会社の社員や研究者なども含め全面的に取りやめることとなった。噴火後の 2015 年 9 月頃から、県や町による安全確認のための立入調査が行われたが、許可を受けたうえで全面的に立入が出来るようになったのは 2016 年 4 月のことである。従ってそれまでの噴気の観察は園地からの遠望観察と、ドローンによる撮影しか手段がなかった。噴火直後にまとめられた火口、噴気孔の分布（神奈川県温泉地学研究所・伊豆半島ジオパーク推進協議会, 2015）はこうした観察に基づくものである。

遠望観察によれば噴火直後、噴気孔は地表に開口したひとつの穴から、蒸気を勢よく出す単純な形状をしていたが、2015 年 10 月頃から噴気孔の周辺に硫黄が堆積して噴気塔を作るようになった。また、時間が経つと、噴気塔が複数になる場合も多くなった。したがって、噴火直後には噴気孔と呼んではいたが、その後は噴気塔群ないし噴気孔群と言うべきものに変化した。そこで、本研究では従来、15-2 噴気孔などと呼んでいたものを、15-2 群などと読み替えることにする。

2.3. 噴気の温度測定

噴気温度の測定は、群の中で接近可能で、噴気ももっとも強い噴気塔に対して行ってきた。1 つの噴気塔の中には直径数 cm 以下の小さな噴気孔があるが、それが複数ある場合は、強そうに見える噴気孔をいくつか選んで、温度計のプロープを挿入し、最高の値をその群の噴気温度とした。なお、もっとも強い噴気の温度が最も高いとは限らなかった。また、風向きによっては噴気塔の中が見通せず、適切な噴気孔にプロープが挿入できたか不明な場合もあった。

噴気温度の測定は、高温の噴気を発見できるか、また噴気孔に温度プロープを深く挿入できるかなどの成否に大きく依存する。噴気が強力で、噴気孔の形状が安定し

towers (arrows) were found active. d) The sulfur tower seems collapse occasionally. The arrow indicates sulfur tower where we measured fumarole temperatures. e) The bottom of sulfur tower formed with rocks. The opening where steam come out is easy to be recognized until end of 2016. f) Since 2017, the bottom of the sulfur tower tended to be covered by molten sulfur (s).

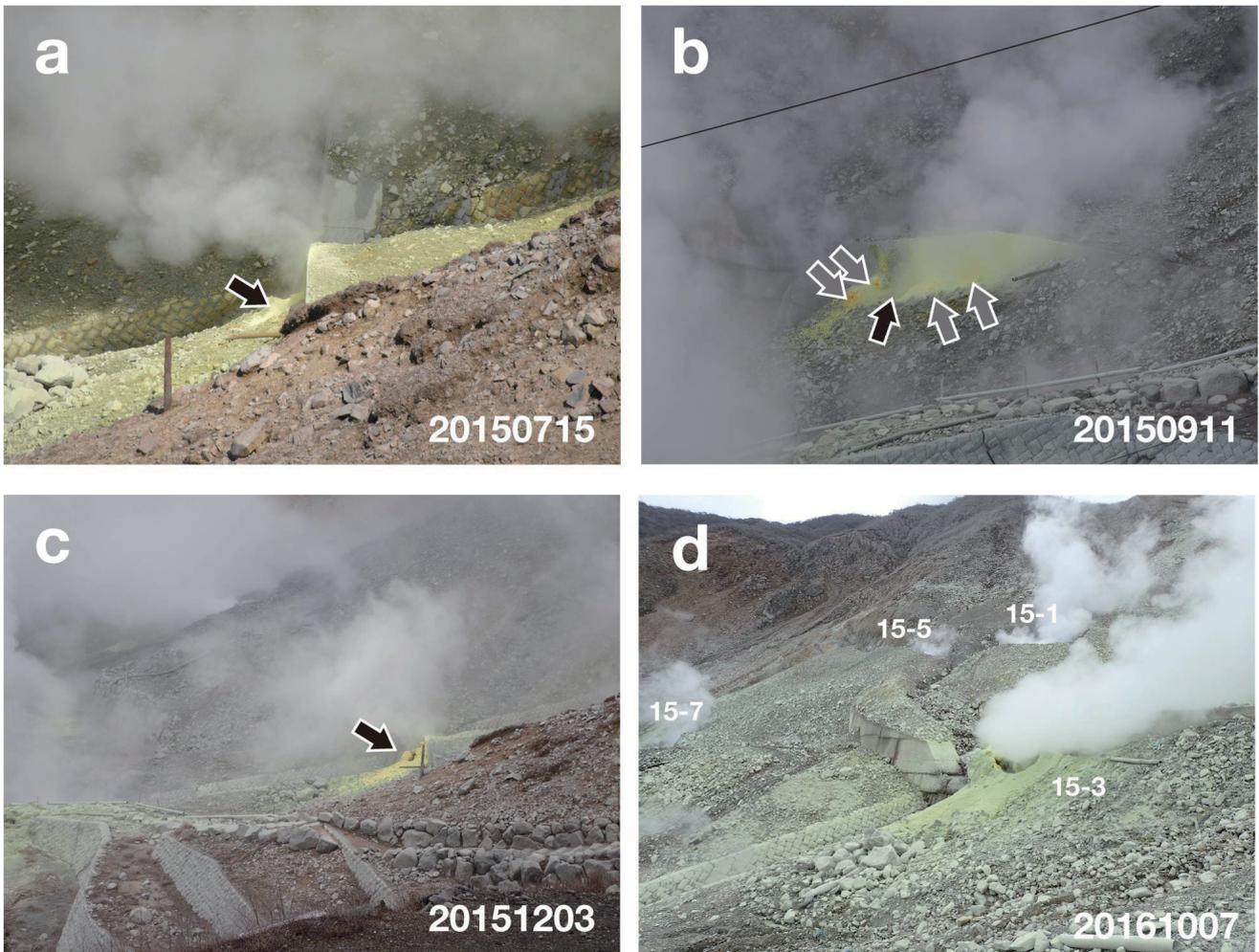


図7 15-3群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火直後は大きな穴が開いているだけであった(矢印)。b) その後、周囲に小さい噴気(灰色の矢印)ができて見えるようになるが、主要な噴気は当初生じた大きい穴から放出されている(黒色の矢印)。c) 2015年の年末頃には、穴の周りに硫黄が溜まりはじめ噴気塔が成長をはじめた。d) 15-3群とその周辺の様子。

Fig. 7 Temporal change of the 15-3 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) A large single hole (arrow) was steaming just after the eruption. b) Small minor fumaroles (gray arrows) formed around the major fumarole (black arrow). c) Sulfur started to accumulate around the fumarole. d) The 15-3 fumarole and fumaroles around it.

ている15-12群や16-1群では長期にわたって安定した測定が出来ているが、その他の群では、噴気孔の形状変化や測定噴気孔の変更などが原因となり値がばらついていく。こうした問題については、次の章で個別に記述する。なお、測定された噴気温度は付録1に示した。

3. 各群の様子

3.1. 15-1群

2015年噴火では、4つの火口が形成されたが、噴火の最中に活動的な火口が東から西へと移動した。15-1火口はその最西端にあり、噴火3日目の2015年7月1日早朝に開口したと考えられる。噴火直後の7月3日

には火口内に泥だまりの形成が確認され、激しく沸騰している様子が遠望観察された。15-1火口に接近して、泥だまりの様子を初めて間近で確認できたのは、2016年3月28日である。この時以降の観察では、泥だまりの中には最低3箇所の湧きだし口があり、直径数十cmに達する気泡が激しく湧き上がっていた(図3a)。泥だまりの温度は岸近くでしか測定できなかったが、90.4℃から95.2℃を記録した(付録1)。しかし、泥だまりの水位は徐々に低下し、2016年8月9日に現地調査したところ泥だまりは乾いて無くなり、噴気孔が露出していた(図3b)。その後、8月22日の台風9号通過の際、風雨により背後の崖が崩れて、もたらされた巨礫により



図8 15-4群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火直後は大きな穴が開口しているだけであった。b) 硫黄の粉を噴出しながらも噴気塔はしばらく形成されなかった。c) 2015年10月頃には硫黄の噴気塔が成長をはじめた。d) 2016年夏頃には噴気塔は数十cmの高さまで成長した。e) 2018年5月17日には暗灰色の泥水が噴出し、噴気塔を黒く覆い、一部が流下した(矢印)。f) 東側に噴気塔が形成されて噴気がでているが、明瞭な噴気孔はない。矢印の棒は長さ140cm。

Fig. 8 Temporal change of the 15-4 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) Only a single hole found steaming just after the eruption. b) The fumarole found dispersing sulfur powder; however, sulfur tower was still yet to be formed. c) Since around October 2015, a sulfur tower seemed to be developing. d) The sulfur tower developed up to several tens centimeters high. e) On May 17, 2018,

噴出現象 (5/17)
Mud discharge event

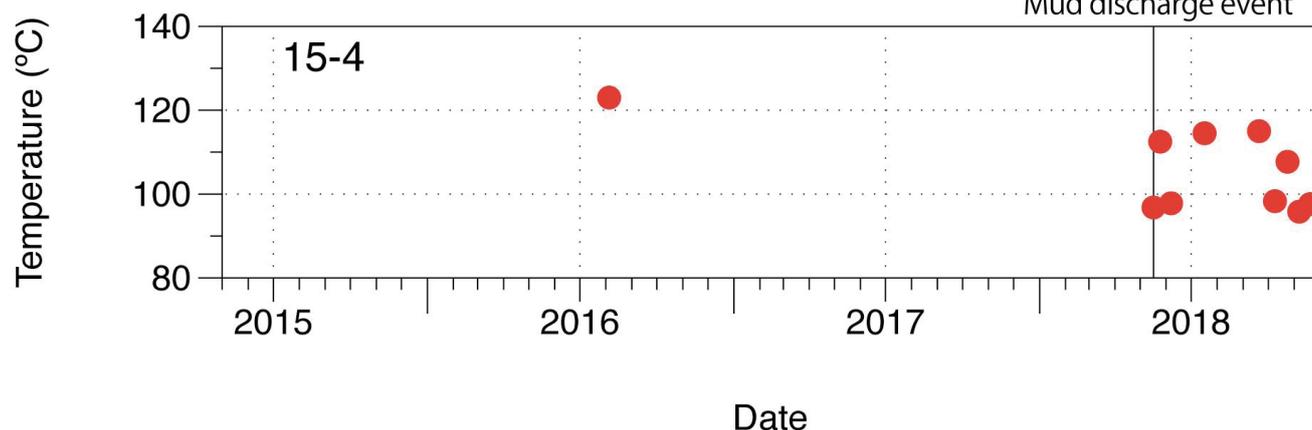


図9 15-4 群の噴気温度の時間変化。

Fig. 9 Temporal change of steam temperature of the 15-4 fumarole group.

火口底が埋められた。以上の過程や、泥だまりの水の化学組成等は Mannen *et al.* (2018) にもまとめられている。

火口底埋積後、噴気は崖崩れで溜まった巨礫の間隙から噴出しており (図 3 c)、その温度は 2016 年 9 月 2 日の測定で当地の沸点 (約 97°C) をわずかに超える 99.0 °C であったが、埋積土砂は空隙に富んでいることからみて、この温度は大気が相当混入した後のものと考えられた。このため、継続的な温度測定の対象とはみなされず、接近もしばらく試みられなかった。

その後、2017 年 6 月 12 日に接近したところ、噴気孔の周囲に硫黄が堆積し、硫黄の噴気塔も形成されているのが確認できた (図 3d)。また噴気も「ゴー」という音をたてて勢いが強い様子が確認できた。以降は噴気孔の形状や位置が変化しつつも、温度測定は継続して実施されている (図 3 e, f)。

15-1 群の噴気温度の時間変化を図 4 に示す。2018 年 10 月までの値は、最高 164.3 °C (2018 年 4 月 10 日)、最低 118.6 °C (2017 年 11 月 1 日) である。ただし、最低の記録は適切な噴気孔に挿入できたか確認が出来なかったときのものである。また、2 番目に低い記録 (2018 年 1 月 24 日; 120.5 °C) は、背後の崖の崩壊により、15-1 噴気孔が埋積された直後のものである。挿入の良否によって測定温度が変化していると考えられるが、高いものだけ抜き出すと、おおよそこれまで 150 °C 台後半の温度測定が最近まで続いていて、明瞭な温度の上昇

や低下は認められない。

3.2. 15-2 群

15-2 噴気孔は噴火初日の 2015 年 6 月 29 日夕方にはタイムラプスカメラが撮影した映像で存在が確認されており、噴火開始と同時に開口したものと考えられる。火口・噴気孔の中でもっとも接近しやすい場所にあるため、2015 年末に 1 回、その後は翌年 3 月以降毎月測定が行われている。

この群は 2016 年末まで、もっとも北側に一番優勢な噴気塔があり (図 5a, c, d)、この底に明瞭な直径数 cm の噴気孔が開口している (図 5e)、安定的に温度測定を行うことが出来た。しかし、2017 年 1 月に閉塞したため、その後はその都度、もっとも高温な噴気を探索し測定している。2017 年 5 月以降は噴気塔の底部に溶融硫黄が溜まるが多くなった (図 5f)。また同年 8 月 28 日の調査では、周辺に緑灰色の硫黄が顕著に堆積をしているのが初めて確認できた。

15-2 群の噴気温度の時間変化を図 6 に示す。2018 年 10 月までの値は、最高 137.4 °C (2017 年 11 月 15 日)、最低 98.7 °C (2018 年 1 月 24 日) である。最低の記録は風の状態が悪く、適切な噴気孔に挿入できたか確認が出来なかったときのものである。噴気孔の選択や、温度計プローブの挿入の良否に、測定温度が影響されていると考えられるが、2015 年から 2018 年まで 130°C 前後の温度が記録されており、明瞭な温度の上昇や低下

the fumarole discharged dark gray mud. The mud covered sulfur tower and a small mud stream flowed down.
f) A sulfur tower developed eastern part of the depression. Although steam comes out from the tower, any clear opening that emit steam cannot be found. Length of the stick (arrow) is 140 cm.that the scan is not interpreted to detect emitted SO₂ successfully.

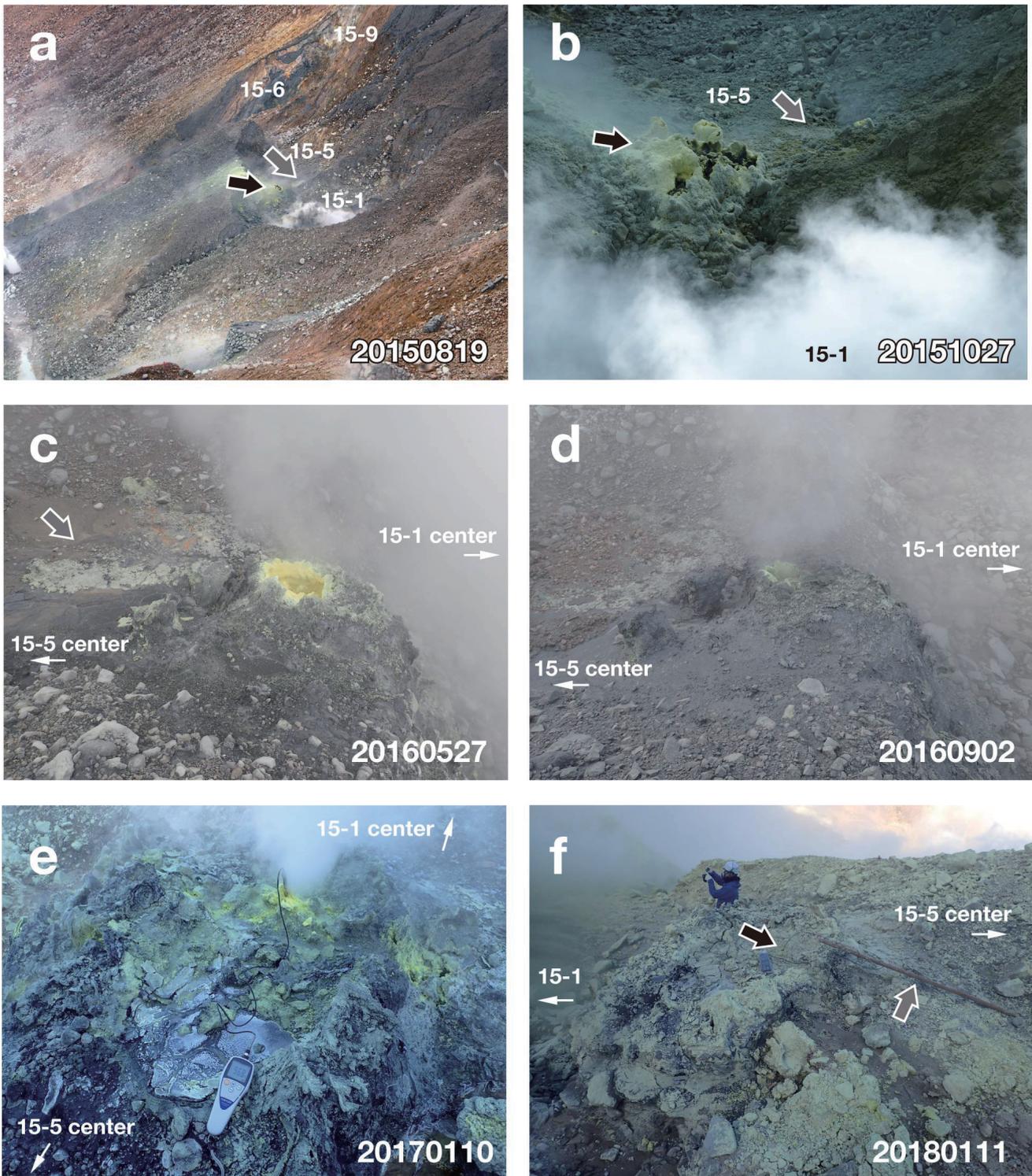


図 10 15-5 群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 2015 年噴火火口群の遠望。15-1, 15-5, 15-6 および 15-9 は火口名称で、この写真ではそれぞれの文字を火口中心部に配置した。15-5 火口は火口地形の底部には噴気が認められず、15-1 火口との境界に優勢なものが（黒色の矢印）、15-5 火口内側でも弱い噴気が認められた（灰色の矢印）。b) 15-1 火口との境界近くにある噴気孔は周囲に硫黄が王冠状に成長した（黒色の矢印）。この時点では火口内側の噴気（灰色の矢印）はまだ活動しているように見える。c) 弱い噴気（灰色の矢印）はこの頃には活動を停止している。15-1 火口との境界の噴気（画面中央）は活発に噴気をしている。d) 噴気孔の径はだいぶ小さくなった。e) 15-1 火口との境界の噴気孔の径は更に小さくなり直径 1cm ほどしかなくなってしまった。手前にある温度計の本体は長さ約 18 cm。f) 15-1 火口との境界の噴気孔（黒色の矢印）からはもはやほとんど噴気が見えず閉塞したと考えられる。杖（灰色の矢印）は長さ約 150 cm。

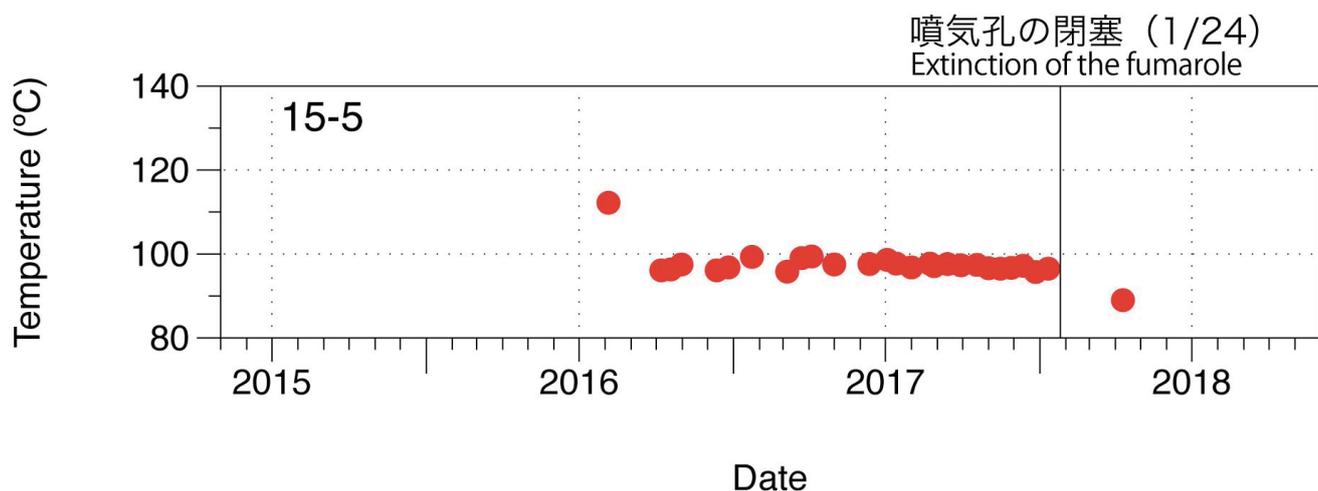


図 11 15-5 群の噴気温度の時間変化。2018 年 4 月の値は 15-5 噴気跡の地中温度。

Fig. 11 Temporal change of steam temperature of the 15-5 fumarole group. The data of April 2018 is underground temperature after extinction of the steaming.

は認められない。

3.3. 15-3 群

15-3 噴気孔も 15-2 噴気孔と同様、噴火初日の 2015 年 6 月 29 日夕方にはタイムラプスカメラが撮影した映像で存在が確認されており、噴火開始と同時に開口したものと考えられる。15-3 群の様子を図 7 に示す。15-3 群への接近は容易であるが、噴気孔が大きい上に深すぎてプローブを挿入するには、観測者の危険を伴う。このため、噴気孔の温度測定は 1 回しか行われておらず (144.2 °C ; 2016 年 8 月 5 日)、連続的な測定対象とはなっていない。

3.4. 15-4 群

15-4 噴気孔は、大涌谷の展望台に最も近く、噴火初日の 2015 年 6 月 29 日午後にはタイムラプスカメラが撮影した映像で存在が確認されており、噴火開始と同時に開口したものと考えられる。この噴気孔は、周囲に陥没孔が形成されるなど足場に不安があったため (図 8a,

b)、2018 年 5 月まで噴気孔の温度測定は 1 回しか行われておらず (123.0 °C ; 2016 年 8 月 5 日 ; 図 8d)、連続的な測定対象とはならなかった。

しかし、2018 年 5 月 17 日に小規模な泥水の噴出現象が確認され (神奈川県温泉地学研究所・産業技術総合研究所, 2018 ; 図 8e)、それ以降、月 1 回程度のペースで温度測定が行われている。ここでは、当初は直径約 1 m、深さ不明の噴気孔が開口しているのを遠望できたが、2018 年 5 月の噴出現象後は閉塞し、9 月以降は噴気孔の中に人が立ち入ることが出来るまでになった。その後の噴気は噴気孔の東側にある噴気塔の壁面から、勢いはないものの、風向きが悪いと 2 m 程度より近くには接近できない (図 8f)。噴気温度の変化は激しいが、おおむね沸点を超えている (図 9)。

3.5. 15-5 群

15-5 火口は、噴火 2 日目の 2015 年 6 月 30 日朝に開口し、噴出を開始したが、翌朝にはほぼ停止した (Mannen *et al.*, 2018)。15-5 火口ではいくつかの地点

Fig. 10 Temporal change of the 15-5 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) View of craters formed during the 2015 eruption from distance. 15-1, 15-5, 15-6 and 15-9 are name of the crater and located at the center of each crater. There is no steaming from the bottom of the 15-5 crater; however intensive steaming and weak steaming are recognized near the boundary with 15-1 crater and inner margin of the 15-5 crater. b) The intensive fumarole near the boundary with 15-1 crater (black arrow) formed crown shaped sulfur deposit. At this timing, the weak steaming at the inner margin of the 15-5 crater (grey arrow) remains still active. c) The weak steaming (grey arrow) seems to be extinct at this time. The steaming near the boundary with 15-1 (black arrow) still remains active. d) The diameter of the opening of the steaming near the boundary seems to be narrower than the previous. e) The diameter of the opening getting narrower than 1 cm. f) The steaming near the boundary (black arrow) seems to extinct. The length of the stick (grey arrow) is approximately 150 cm.



図 12 15-7 噴気孔・15-7B 群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火前にすでに活発な噴気を上げている 15-7 噴気孔（黒色の矢印）の遠望。灰色の矢印は 15-7B 群が形成される場所。b) 噴火前から 15-7 噴気孔の中で坊主地獄が出来て激しく沸騰していた（黒色の矢印）。灰色の矢印は 15-7B 群が形成される場所だが噴気などは見られない。c) 15-7 噴気孔では活発な噴気が継続する一方、15-7B 群が形成される場所の手前では水が染み出しているの見える（黒色の矢印）。灰色の矢印は給水管メンテナンスのための木蓋。d) 新たに形成された 15-7B 群には坊主地獄が形成された（灰色の矢印）。15-7 噴気孔があった位置には何も認められない（黒色の矢印）。e) 15-7B 群の坊主地獄は水が失われることもあった。c に示した木蓋の残骸を矢印で示した。f) その後、坊主地獄は硫黄の堆積物で埋積され、乾いた噴気孔が形成された。矢印は c, e と同じ木蓋の残骸。

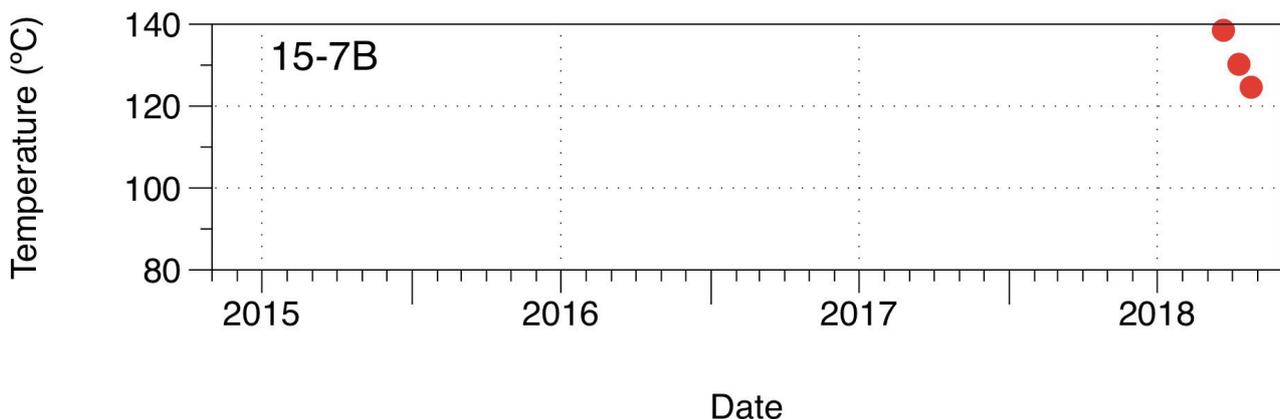


図 13 15-7B 群の噴気温度の時間変化。

Fig. 13 Temporal change of steam temperature of the 15-7B fumarole group.

で噴気が認められたが、そのうち 15-1 火口との境界付近のものが優勢で (図 10a)、噴気温度の繰り返し測定はこの噴気を対象として実施した。

この噴気は、噴火直後の遠望観測では噴気孔直上で透明で、過熱蒸気と考えられた (図 10b)。実際、2016 年 8 月 5 日の測定では、112.2 °C を記録した。しかし、2016 年 10 月以降の測定では、ほぼ沸点の弱い噴気で終始した (図 10e, 図 11)。その後、2018 年の 1 月に閉塞し、現在は地中温度が若干高い程度で、明瞭な噴気は認められない (図 10f)。

3.6. 15-7B 群

2015 年 6 月 29 日の噴火で 15-7 噴気孔が形成された場所には、噴火前の 2015 年 6 月 2 日頃から、坊主地獄 (沸騰する小規模な泥だまり) が形成されていた (図 12a, b)。噴火後は 2015 年 11 月末ごろまで活発に噴気活動を行っていたが (図 12c)、12 月頃にはほとんど閉塞した。この頃、15-7 噴気孔の 3m ほど西側で 2m × 1m ほどの楕円形の凹地が生じその中に新たに坊主地獄が生じた (図 12d)。

この坊主地獄は、日によって満水からほとんど水が無

いような状態 (図 12e) まで大きく水位変化していたものの、2017 年 3 月頃まで存続し、その後は噴気活動が卓越するようになった (図 12f)。この新しい噴気は、15-7 噴気孔と若干位置が異なるため、15-7B 群と呼ぶことにする。なお、15-7 のあった場所は崖錐に覆われて、噴気孔の凹地や、噴気など、かつて噴気孔があったことを窺わせる形跡は全く認められず、現在、正確な位置を知ることは不可能である (図 12d)。

15-7B 噴気孔は深く奥まっていたため足場確保が難しく、長らく温度測定の対象となっていなかったが、2018 年 9 月から測定が行われ、これまでに 3 回の温度測定により 138.5 ~ 124.6 °C の値が得られている (図 13)。

なお 2015 年中に行われた遠望観察では、15-7B のある位置は、15-7 噴気孔が活発な時期でも、温泉が地面から染み出ているようにもみえ、弱いながらも温泉の湧出活動があった可能性がある (図 12c)。

3.7. 15-12 群

15-12 群は、沢の中に形成されているが、噴火前の 2015 年 5 月末にはすでに活発に噴気しているのが確認

Fig. 12 Temporal change of the 15-4 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) The 15-7 fumarole (black arrow) was active even before the eruption. The place where 15-7B fumarole group would form is shown by grey arrow. b) The 15-7 fumarole (black arrow) formed a splashing mud pot before the eruption. The place for 15-7B (grey arrow) shows no sign of fumarole or water springs. c) The 15-7 remains active. Water is seeping out to the surface where 15-7B (black arrow) would be formed. Grey arrow indicates wooden rid for underground plumbing. d) 15-7B formed as a mud pot (grey arrow). The place where 15-7 was active host no vent or sulfur deposit. e) The 15-7B sometimes dried up. The arrow shows the wooden rid. f) The depression of 15-7B was filled with sulfur deposit and new dry steaming vents were formed.



図14 15-12 群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火前にすでに活発な噴気を上げている15-12噴気孔（黒色の矢印）の遠望。15-14噴気孔、39号井もあわせて示した。39号井からの噴気孔で隠れているが灰色の矢印付近に52号井がある。b) 噴火1ヶ月後の15-12噴気孔（矢印）。王冠状に硫黄が堆積し、噴気は透明でかなり上昇してから白変していることに注意。c) 接近初日の15-12群。黒色の矢印付近で温度測定を実施した。d) 台風による増水で噴気塔が流され、噴気孔に流れ込んだ沢水が噴気とともに噴出している様子。e) 噴気塔が復旧する途上の15-12群（矢印）。f) 最近の15-12群。中央部にも黄色い硫黄が堆積するようになっている。矢印の棒は長さ約140cm。

Fig.14 Temporal change of the 15-12 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) The view of 15-12 from distance before the eruption. The 15-14 fumarole and No. 39 steaming wells are also shown. b) The 15-12 fumarole a month after the eruption (arrow). Notice transparent portion below the white steam. c) The first close view of 15-12 fumarole. Temperature of the steam was measured near

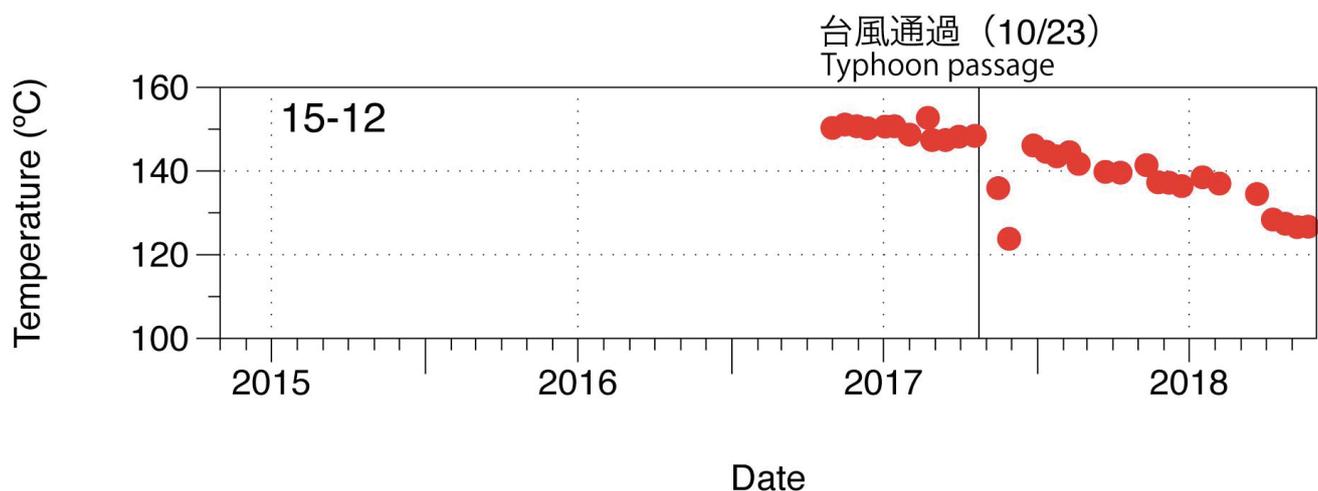


図 15 15-12 群の噴気温度の時間変化。

Fig. 15 Temporal change of steam temperature of the 15-12 fumarole group.

されていた (図 14a)。噴火後も噴気の勢いは強く、噴気孔直上では噴気が透明であることから、過熱蒸気であると推定された (図 14b)。この噴気孔は長径 2m、短径 1.5m ほどの硫黄のマウンドをつくり、周囲が黄色い硫黄で縁取られ、内側が暗灰色のおそらく硫黄の塊が積み上がった、王冠状の形をしている。噴気は内側のあちこちからでてるように見えるが、非常に優勢な噴気孔がマウンド内の北端付近にあり、ここに温度計プローブを挿入することで、安定な温度測定が可能となった (図 14c)。

温度測定は、2017 年 5 月 1 日から現在まで連続して行われている。ただし、2017 年 10 月 23 日に通過した台風 21 号による大雨で、沢が増水し硫黄のマウンドが流され、噴気孔に流れ込んだ沢水と噴気が混じり合って噴き上がり、噴水のようになった (図 14d)。この後、年末に硫黄のマウンドが再生する (図 14e) まで約 2 ヶ月にわたって、噴気温度は元に戻らなかった。最近では、非常に優勢な噴気孔が安定して存在するが、周囲には硫黄の噴気塔が形成されつつある (図 14f)。

15-12 群の噴気温度の時間変化を図 15 に示す。2018 年 10 月までの値は、最高 152.7 °C (2017 年 8 月 23 日)、最低 123.8 °C (2017 年 12 月 12 日) である。最低温度は、台風によるマウンド流失後の再生過程で記録されたものである。しかし、マウンド流失時の一時的な温度低下の影響を除いても、測定開始後、徐々に温度低下しており、最近では 130 °C を下回るようになった。

3.8. 15-14 群

15-14 噴気孔は、39 号井の東北東 15m 付近にあり、噴火前の 2015 年 5 月末にはこの付近で活発な噴気が上がっているのが認められたが、その噴気孔は谷の中にあるため遠望観察の場所からは死角にあたり、正確な位置は確認できなかった (図 16a)。噴火後、2015 年 7 月 15 日のドローンによる調査で、はじめて位置が確認でき、沢の右岸にあるひとつの噴気孔から噴気がでてるように見えた (図 16b)。

しかし、はじめて立ち入りしたとき、この付近は沢の兩岸をまたぐ直径 10 m 程度の範囲に複数の噴気塔が密集する巨大な噴気孔群になっていた (図 16c)。測定は 2016 年 12 月 12 日から行われ、この時はドローンによって確認された噴気孔で測定を行ったが、2017 年 11 月はじめまでに閉塞し、やや下流に出来た噴気塔で測定するようになった (図 16d)。しかし、この噴気塔も崩壊したため噴気孔が埋まり、温度測定が出来なくなった。このため 2018 年 3 月から左岸のもっとも優勢な噴気を測定することになった (図 16e)。

15-14 群の噴気温度の時間変化を図 17 に示す。2018 年 10 月までの値は、最高 153.0 °C (2017 年 12 月 12 日)、最低 112.2 °C (2017 年 7 月 14 日) である。15-14 群は測定期間こそ 2 年近くと長いものの、測定している噴気孔の変遷が激しいため、長期的な傾向を見出すのは難しい。最近では安定した噴気孔 (図 16f) から 150 °C を超える温度が観測されており、繰り返し測定を

the arrow. d) The stream water is erupting with fumarole since sulfur depot of 15-12 was swept out by a typhoon. e) Resurrecting sulfur tower of the 15-12. f) Recent view of 15-12. Yellow sulfur deposits in the central part of the fumarole.

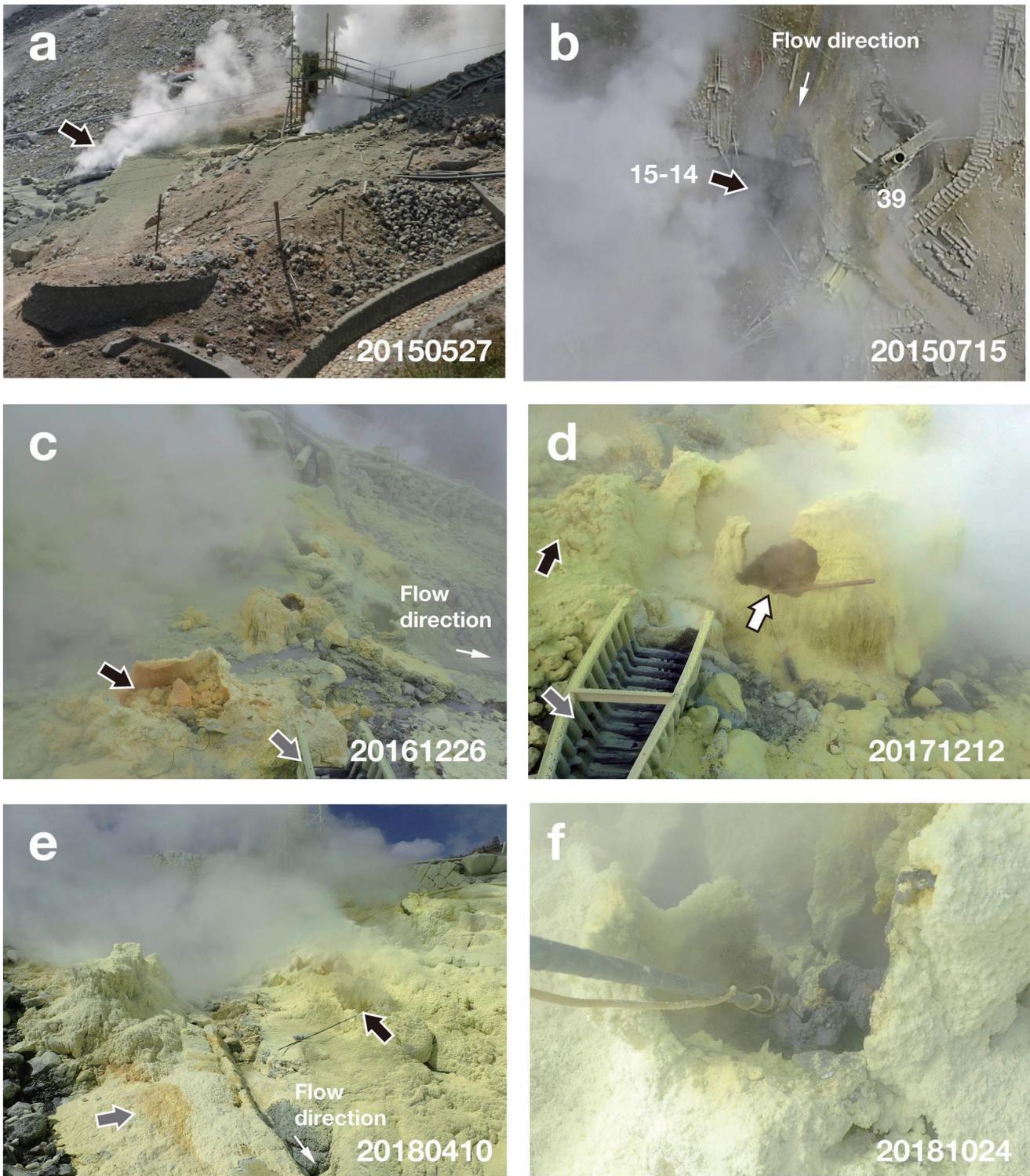


図16 15-14群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火前にすでに活発な噴気を上げている15-14噴気孔(黒色の矢印)の遠望。右側の蒸気井は39号井。b) 噴火1ヶ月半後の15-14噴気孔(矢印)の空撮。39号との間に沢があり、右岸から噴気が上がっているように見える。c) 接近初日の15-14群。黒色の矢印付近で温度測定を実施した。灰色の矢印は樹脂製の導水溝。画面の左側では不明瞭だが、画面右中央に沢が見える。d) 従来測定していた噴気孔(黒色の矢印)が閉塞したため2m弱下流の噴気で温度測定を試みた(白色の矢印)。灰色の矢印はcと同じ樹脂製の導水溝。e) 2018年3月から測定を始めた左岸側の噴気孔(黒色の矢印)。黒色の矢印から左に延びる棒は長さ約140cm。右岸側の噴気孔から流下した新鮮な溶融硫黄の流下跡が認められる(灰色の矢印)。cと比較すると、兩岸の噴気孔から流れ出した溶融硫黄が沢を埋積しているのがわかる。f) 噴気塔の内部。画面ほぼ中央部の温度計プローブが刺さった3cmほどの穴がもっとも優勢な噴気孔。

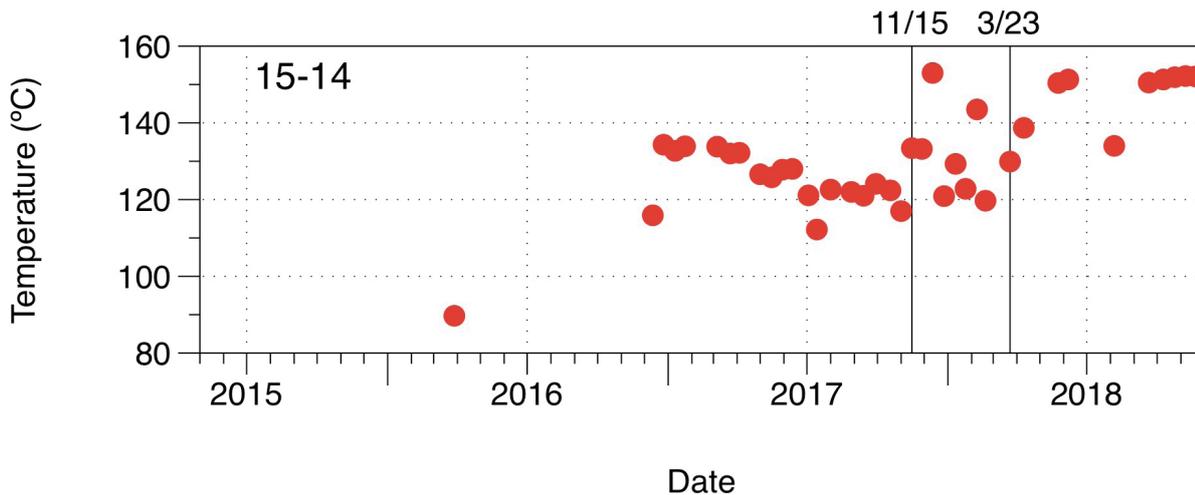


図 17 15-14 群の噴気温度の時間変化。縦の線は測定する噴気孔を変えた時期を示す。

Fig. 17 Temporal change of steam temperature of the 15-14 fumarole group. The sulfur tower for temperature measurement was changed on November 15, 2017 and March 23, 2018.

実施している中では、15-1 に次いで高温の噴気孔と言える。

なお、15-4 群の噴気塔からは溶融硫黄が流出した跡が確認できるが（図 16e）、流出中の状態を目撃したことはなく、また噴気塔周囲の微地形について詳しい記載をしてこなかったため、流出の頻度などは不明である。

3.9. 15-15B 群

15-15 噴気孔は箱根温泉供給株式会社第 52 号蒸気井のすぐ南に形成された噴気孔について与えられた名称であった（温泉地学研究所・伊豆半島ジオパーク推進協議会、2015；図 18a, b）。しかし、2016 年 10 月までには閉塞し、代わりにやや東側に新たな噴気孔群が形成された（図 18c）。位置が当初とことなるため、この新しい噴気孔群について、15-15B 群と呼ぶことにした。この群は大きい硫黄のドームを作ることと、ドームの中に溶融硫黄の溜まりが存在すること、活発な噴気が移動するなどの特徴がある（図 18c, d）。

15-15 群の噴気温度の時間変化を図 19 に示す。2018 年に入ってから噴気温度の繰り返し測定が実施されるようになり、2018 年 10 月までの値は、最高 149.8 °C（2018

年 5 月 25 日）、最低 116.8 °C（2018 年 5 月 11 日）である。挿入の良否により温度測定結果が変動するが、140°C 前後の値が得られている。明瞭な温度の上昇や低下は認められない。

なお、神奈川県温泉地学研究所・伊豆半島ジオパーク推進協議会（2015）では、15-15 噴気孔について噴火前から活発としているが、たとえば 15-7 や 15-12 のような明瞭な噴気ではなかった。改めて噴火前に撮影したビデオを検証したところ、2015 年 5 月 14 日にはとくに噴気は認められなかった。7 日後の 21 日には 15-15 が形成された場所の地面から、弱い噴気が上がっているのを確認できたが、噴気孔の存在は確認できなかった。

3.10. 16-1 群

16-1 群のある場所には、2016 年 9 月 15 日の調査まで何の噴気も認められなかったが（図 20a）、2016 年 10 月 7 日の調査で、直径 50cm ほどの噴気孔が生じ、噴気が勢いよく噴出しているのが確認できた（図 20b）。接近は 2017 年 1 月 10 日にはじめて試みられ（図 20c）、123.7 °C が記録された。この時には携帯式のガスアラートで二酸化硫黄が検出されなかった。噴気

Fig.16 Temporal change of the 15-14 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) A distal view of 15-14, which was active even before the 2015 eruption. No. 39 steaming well is also shown. b) Aerial photo of the 15-14 one month after the eruption. The steam seems to be coming out from the right bank of the stream. c) The first close view of the 15-14. Temperature measurement was attempted at the vent near the black arrow. Grey allow shows ductile half pipe. d) Since the vent in (c) closed, temperature measurement was attempted for the new steaming (white arrow). Grey allow shows the ductile pipe. e) The left bank fumarole (black arrow) has been used for temperature measurement since March 2018.

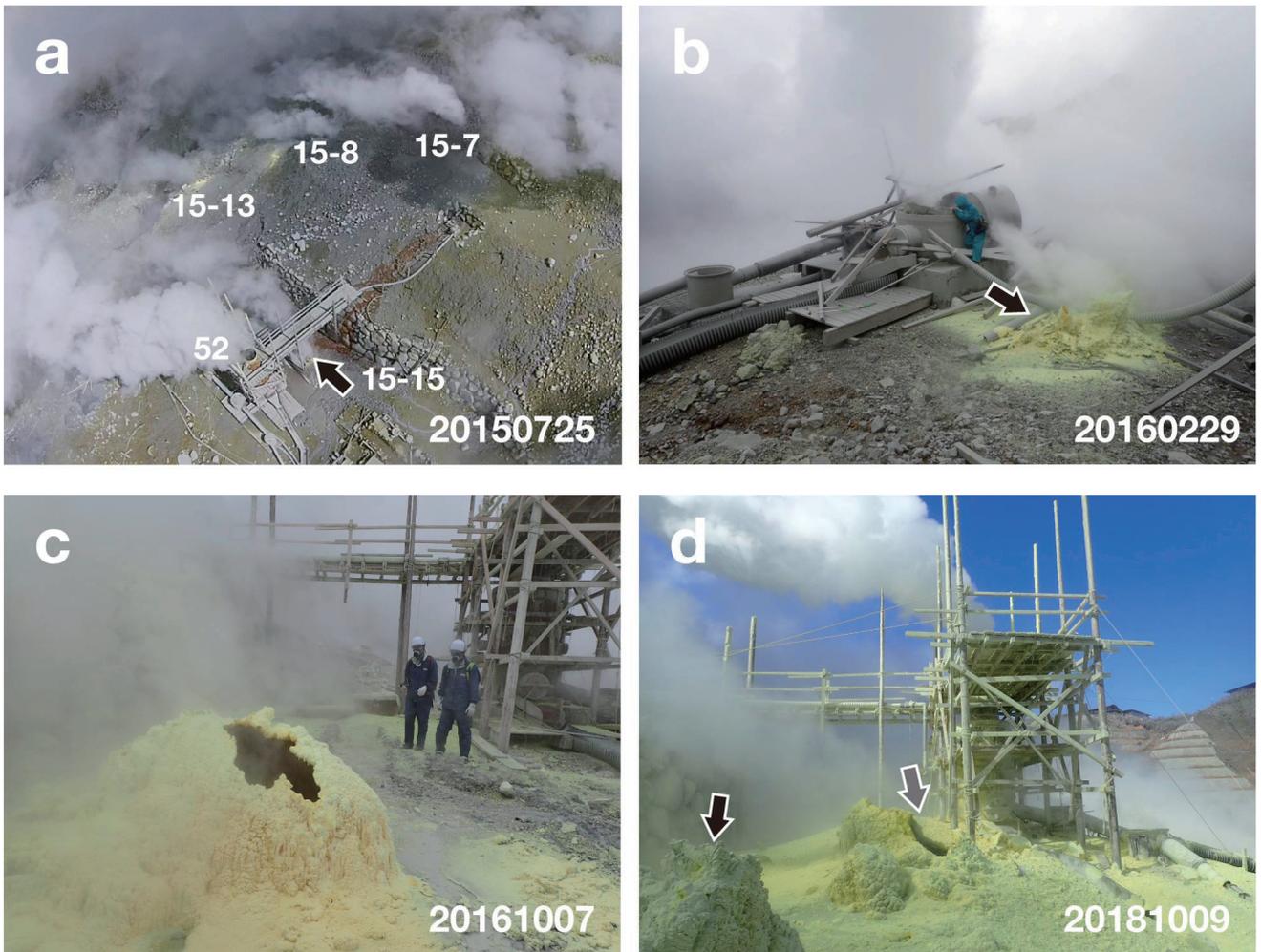


図 18 15-15 噴気孔および 15-15B 群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 噴火 2 ヶ月後の空撮では 15-15 (矢印) は活発な噴気を上げているのが確認できる。近隣の蒸気井 (52 号井) および噴気の位置も示した。写真撮影は伊豆半島ジオパーク推進協議会。b) 2016 年 2 月の 15-15 (矢印) は元の位置で小さい噴気塔を作っているのがわかる。画面中央の人物は造成塔が倒壊して孔口が露出した 52 号井の噴気温度を測定している。c) 元の位置から東に新たにできた噴気孔。半径 1m 弱の半球型の噴気塔を形成している。d) c の噴気孔は閉塞しかかっているが (矢印)、その西側に新たに形成された噴気孔 (画面ほぼ中央) が活発に噴気をしている。

Fig.18 Temporal change of the 15-4 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) Active steaming from 15-15 fumarole was verified by this aerial photo taken by UAV 2 months after the eruption. b) The 15-5 fumarole was still active (arrow). The person in a green rain gear is measuring temperature of No. 52 steaming well, mixing tower of which was collapsed. c) New fumarole (arrow) was formed east of No. 52 steaming well, mixing tower of which (behind the two persons in blue) is re-built. d) The fumarole shown in c) (arrow) is getting inactive and a new fumarole is developing in front of the tower.

孔はその後同年 4 月までに、南へ 2m ほど移動した (図 20d, e)。

繰り返し測定が始まったのは、2018 年 1 月 11 日からであるが、噴気のいきおいが強く、噴気孔がひとつで深いため (図 20f)、温度測定は安定的に行われている (図 21)。2018 年 10 月までの値は、最高 140.9 °C (2018 年 2 月 8 日)、最低 123.7 °C (2017 年 1 月 10 日) である。最近ではガスアラートで二酸化硫黄の放出が示唆されるほか、検知管により二酸化硫黄の放出が確認されて

いる (表 2)。2018 年の測定を取り出してみると低下傾向は明瞭で、最近では 130 °C 台前半を記録している。

4. その他の観察

4.1. 火山ガス成分の比率

火山ガスは、水蒸気以外に二酸化炭素や二酸化硫黄、硫化水素、塩化水素などの成分が含まれる。これらは人体にとって有害であることにくわえて、火山活動と関係して組成が変化すると考えられ、そのモニタリングは重

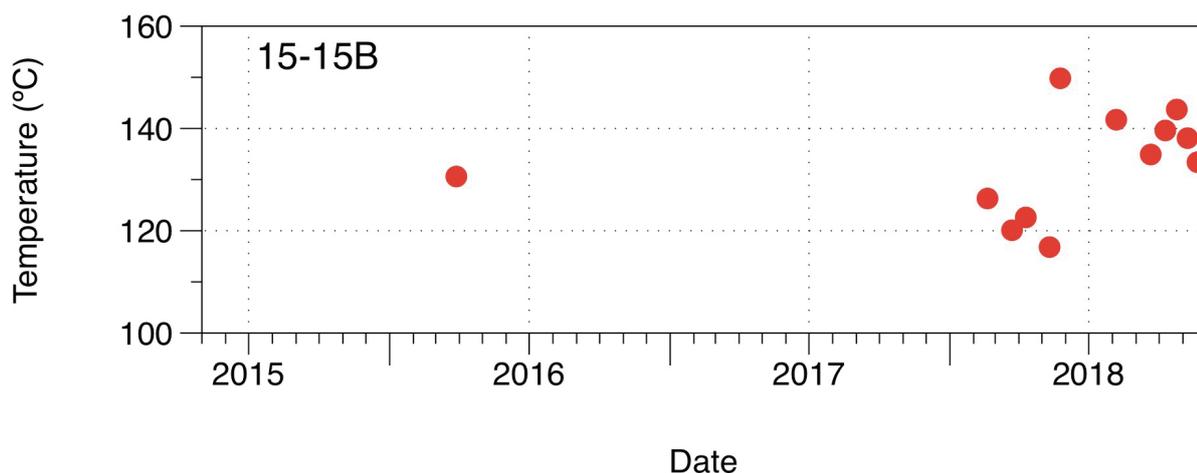


図 19 15-15 群の噴気温度の時間変化。

Fig. 19 Temporal change of steam temperature of the 15-15 fumarole group.

要である。そこで筆者らは、比較的安価で簡便に測定が出来る、長期間用検知管に着目し、2018年3月から、15-2群の近傍で二酸化硫黄、硫化水素、塩化水素の平均的ガス濃度およびガス比率の時間変化検出を試みている。測定に利用している長期間用検知管は、ガステック社製の「パッシブ・ドジチューブ」と称する製品で、型番はNo. 5D (二酸化硫黄)、No. 4D (硫化水素)、No. 14D (塩化水素) である。

この測定では、長期間用検知管をそのままの形で噴気孔の近くに1時間程度放置しているが、噴気により検知管内部が結露する場合が多い。このため、2018年6月からは、穴をあけたポリ瓶に検知管をシリカゲルとともに封入し、結露しない状態で行う測定も並行して行っている (図 22)。

その結果を図 23 に示したが、どちらの測定方法でも、二酸化硫黄と硫化水素、これらの量比 (二酸化硫黄の濃度÷硫化水素の濃度) はいずれも時間が経つにつれて減少しているように見える。また、塩化水素は検出されない時が多い。

噴気中の二酸化硫黄／硫化水素ガス比は、噴気温度と正の相関を示すことが知られている。このことから、15-2群の噴気温度が徐々に低下している可能性が指摘できるが、前述の通り測定している噴気温度に低下傾向が認められない。なお、15-2の南側には目立った噴気がほとんど無いが、北側には造成塔から大量に噴気を放出している52号井や数多の噴気孔が分布しており、風向きによっては15-2群以外の噴気に影響されている可能性もあり、今後とも検討が必要である。

この方法による測定は、15-4群と16-1群についても

単発だが実施している。その結果を表 2 に示す。

4.2. 硫黄の色および飛散の状況

噴気孔周辺には硫黄が堆積している。筆者らは、こうした硫黄の系統的な調査を行っていないが、Ikehata *et al.* (2018) は15-2噴気孔の周りの硫黄の堆積物を観察し、球顆状の粒子であるとし、噴気孔内の溶融硫黄が飛沫となって噴出する際に空中で固化したものであると考えた。球顆状の硫黄は、2017年9月の段階で、2015年噴火の噴出中心域から700 m以上離れた大涌谷橋付近でも、樹枝に付着する直径数 μm ~ 20 μm の粒子として認められた (図 24)。粒子の付着は、火口側に面した樹枝で多く認められ、その反対側ではほとんど認められない。付着した硫黄粒子は、風により火口から輸送されたものとみられる。

噴気孔周辺に堆積する硫黄は黄色を呈する場合が多いが、緑灰色を呈していることもある。色の変化については系統的な記録を行っていないが、15-1および15-2群で2017年8月28日の調査ではじめて顕著に認められ (図 3e)、同年10月18日、11月2日、2018年5月11日、10月24日 (図 3f) の調査でも顕著に認められた。15-2火口では更に、2018年6月22日の調査でも認められた。繰り返し測定を実施している噴気孔の中で15-1や15-2ほど周囲の硫黄の色が顕著に変化するものは、これまでのところないと思われる。

Ikehata *et al.* (2018) は15-2群で採取された黄色の硫黄と (2017年3月23日採取)、緑灰色の硫黄 (2017年11月2日採取) を比較し、黄色い硫黄がほぼ α 硫黄のみからなるのに対し、緑灰色の硫黄はこれにくわえて



図 20 16-1 群の時間変化。右下の数字は年月日。a) 2016 年 9 月 15 日の遠望観測では、後に噴気孔が出来る付近（矢印）を含め、噴気現象は認められない。b) 2016 年 10 月 7 日の遠望観測では噴気が認められる。c) 初めて接近したときの 16-1 群の様子。ひとつの大きい噴気孔から噴気がでている。d) 2017 年 1 月 23 日の遠望観測。矢印は目印となる石。e) 2017 年 4 月には噴気は目印となる石（矢印）に近づき、移動したことがわかる。f) 最近の様子。大きな噴気孔のやや南側に小さい噴気孔が出来ているが、その噴気の勢いは強くない。棒（矢印）の長さは約 140 cm。

Fig.20 Temporal change of the 16-1 fumarole group. The figure at the bottom indicates date the photo taken (YYYYMMDD). a) No steam emission was implied at the site of future 16-1 fumarole (arrow) by the observation from a distance on September 15, 2016. b) Steam emission of 16-1 was first verified by observation from a distance on October 7, 2016. c) Close view of 16-1 at the time of the first approach. d) Observation from a

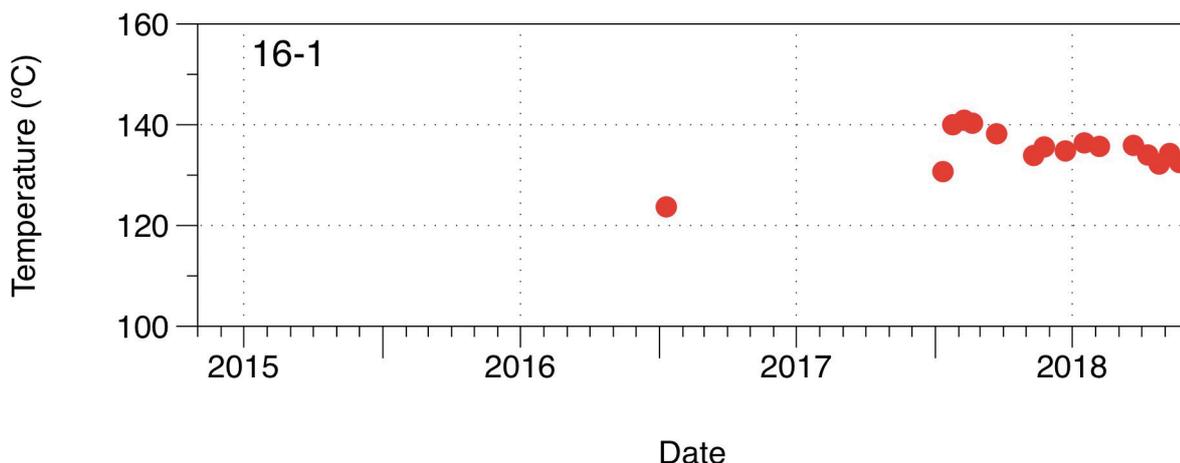


図 21 16-1 群の噴気温度の時間変化。

Fig. 21 Temporal change of steam temperature of the 16-1 fumarole group.

表 2 15-4 群及び 16-1 群の近傍大気の長期間用検知管によるガス濃度測定結果

Table 2 Gas concentration of atmosphere near fumarole using diffusion tube

群 ^{*1}	測定日 ^{*2}	噴気に露出 ^{*3}				穴あきポリ瓶内に静置 ^{*4}			
		SO ₂	H ₂ S	HCl	SO ₂ /H ₂ S	SO ₂	H ₂ S	HCl	SO ₂ /H ₂ S
15-4	2018/5/17	6	6	0	1	—	—	—	—
16-1	2018/12/12	12	81	0	0.15	1.3	34	0	0.04

— は測定を実施しなかったことを示す (No measurement)。

*1, Fumarole name; *2, Date of measurement; *3, Atmospheric gas concentration obtained by diffusion tube exposed near the fumarole; *4, Atmospheric gas concentration obtained within a ventilated container with silica-gel.

非晶質のシリカやパイロフィライト、黄鉄鉱、白鉄鉱の粒子を含む事を明らかにし、緑灰色の硫黄は噴気孔内に何らかの外来物質が流れ込んだことを示唆するとした。噴気孔内に外来物質が流れ込むことがあるのは、15-4 群の 2018 年 5 月 17 日の噴出現象でも示唆される。

硫黄の色や噴出現象と、降雨、噴気温度の関係は判然とせず、何が変化の引き金になっているのかは不明であるが、噴気が相対的に弱くなっているために、地下水などが噴気孔に流れ込みやすくなっている可能性もあり、今後の動向に注目したい。なお、噴火当日、火口や噴気孔から放出された物質は灰色で、火口域は灰色一色となった (図 8a) これら噴気孔からの噴出物については、後日改めて分析結果をまとめて公表したい。

5. まとめ

2015 年 6 月 29 日から 7 月 1 日に発生した箱根火山の噴火前後に、大涌谷の直径約 100m の範囲内で火口や噴気孔が生じ、現在もなお、活発な噴気活動が続いている。温泉地学研究所では、これらの噴気について噴火前から継続的に遠望観測を実施したほか、2015 年の年末以降、噴気温度の測定を繰り返し実施してきた。その結果、150°C を越える噴気を噴出する噴気孔があるものの、噴気温度の上昇が認められる噴気孔はなく、噴気温度の低下が認められる噴気孔が目立つ。また、2018 年に始まった噴気孔近傍での長期間用検知管による火山ガス測定では、二酸化硫黄 / 硫化水素ガス比の低下が認められる。これらの観察から、2015 年の噴火以降、噴気活動は低下傾向にあるものとみられる。

distance on January 23, 2017. The arrow indicates a stone as a mark. e) The fumarole becomes close to the stone in April, 2017. f) The 16-1 of recent. In front (south) of the major fumarole, a minor fumarole forms but its emission is not intensive. The length of the stick is approximately 140 cm.

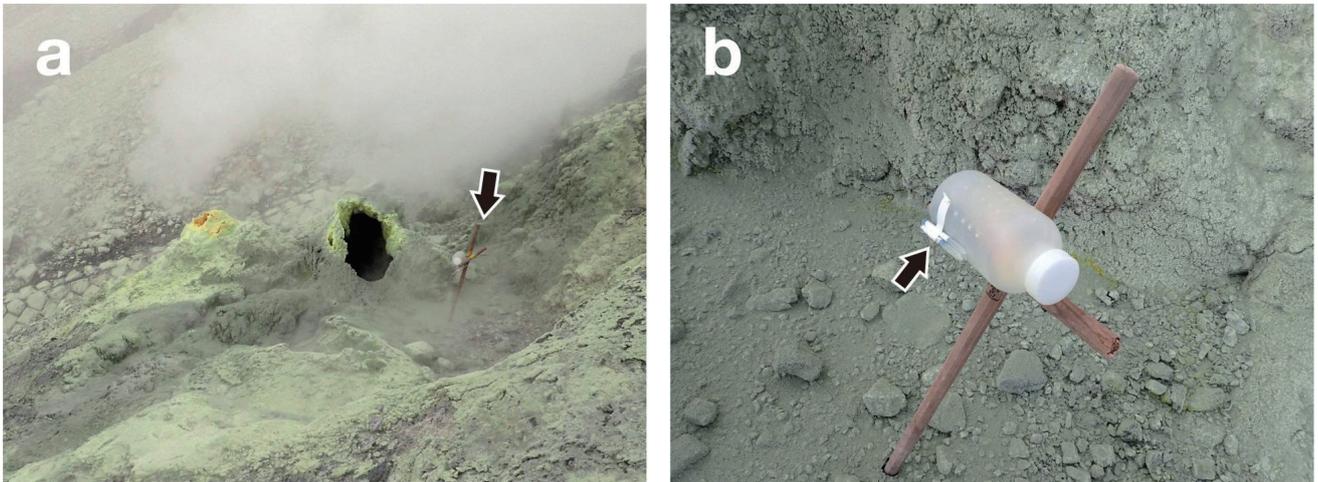


図 22 長期間用検知管の設置状況。a) 噴気孔の近くに棒を立てて、検知管と検知管の入ったボトルを設置している（矢印）。b) 設置状況の近影。縦棒の長さは約 80 cm、ボトルの位置は地表から約 45 cm。矢印は外に置いた検知管。ボトルの表面には径約 2mm の通気口が 20 個ある。ボトルの中には検知管とシリカゲル約 150g が入っている。

Fig. 22 Measurement setting of atmospheric concentration of volcanic gas near the fumarole using diffusion tube. a) The diffusion tubes (arrow) are set near the fumarole vent. b) The diffusion tubes are set exposed (arrow) and within the ventilated container (white plastic bottle) set on the stick (approximately 80 cm long). The distance from the ground surface to the tubes is approximately 45 cm. The container has 20 holes of 2 mm in diameter for ventilation. Within the container, 150 g of silica-gel is also set.

謝辞

伊豆半島ジオパーク推進協議会の鈴木雄介氏には、噴火直後の大涌谷でドローンによる空撮を実施して頂き、その映像は本論文中でも使用させて頂いた。箱根温泉供給株式会社には現地調査にあたり便宜を図って頂いた。赤色立体地図はアジア航測株式会社の千葉達朗氏に作成して頂いた。神奈川県立生命の星・地球博物館の山下浩之主任学芸員には、電子顕微鏡写真の撮影時にご指導頂いた。箱根町および大涌谷火口監視員の皆さまには、現地調査時にご協力を頂いた。以上の機関、方々に感謝申し上げます。

参考文献

Ikehata K, Date M, Ishibashi J, Kikugawa G, Mannen, K (2018) Solid sulfur spherules near fumaroles of Hakone volcano, Japan. *Int J Earth Sci* 0:0. doi: 10.1007/s00531-018-1657-z

神奈川県温泉地学研究所・伊豆半島ジオパーク推進協議会 (2015) 箱根山 2015 年噴火の火口・噴気孔群 (暫定版). https://www.onken.odawara.kanagawa.jp/global-image/units/upfiles/4065-1-20180210230027_b5a7efafb83519.pdf

神奈川県温泉地学研究所・産業技術総合研究所 (2018) 箱根山・大涌谷における 2018 年 5 月 17 日の噴出現象. 第 141 回火山噴火予知連絡会資料 (その 6 の 3) 関東・中部地方, 112-114.

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, 神奈川県温泉地学研究所報告, 41, 23-32.

Mannen K, Yukutake Y, Kikugawa G, Harada M, Itadera, K. and Takenaka J (2018) Chronology of the 2015 eruption of Hakone volcano, Japan – geological background, mechanism of volcanic unrest and disaster mitigation measures during the crisis. *Earth, Planets Sp.* doi: 10.1186/s40623-018-0844-2

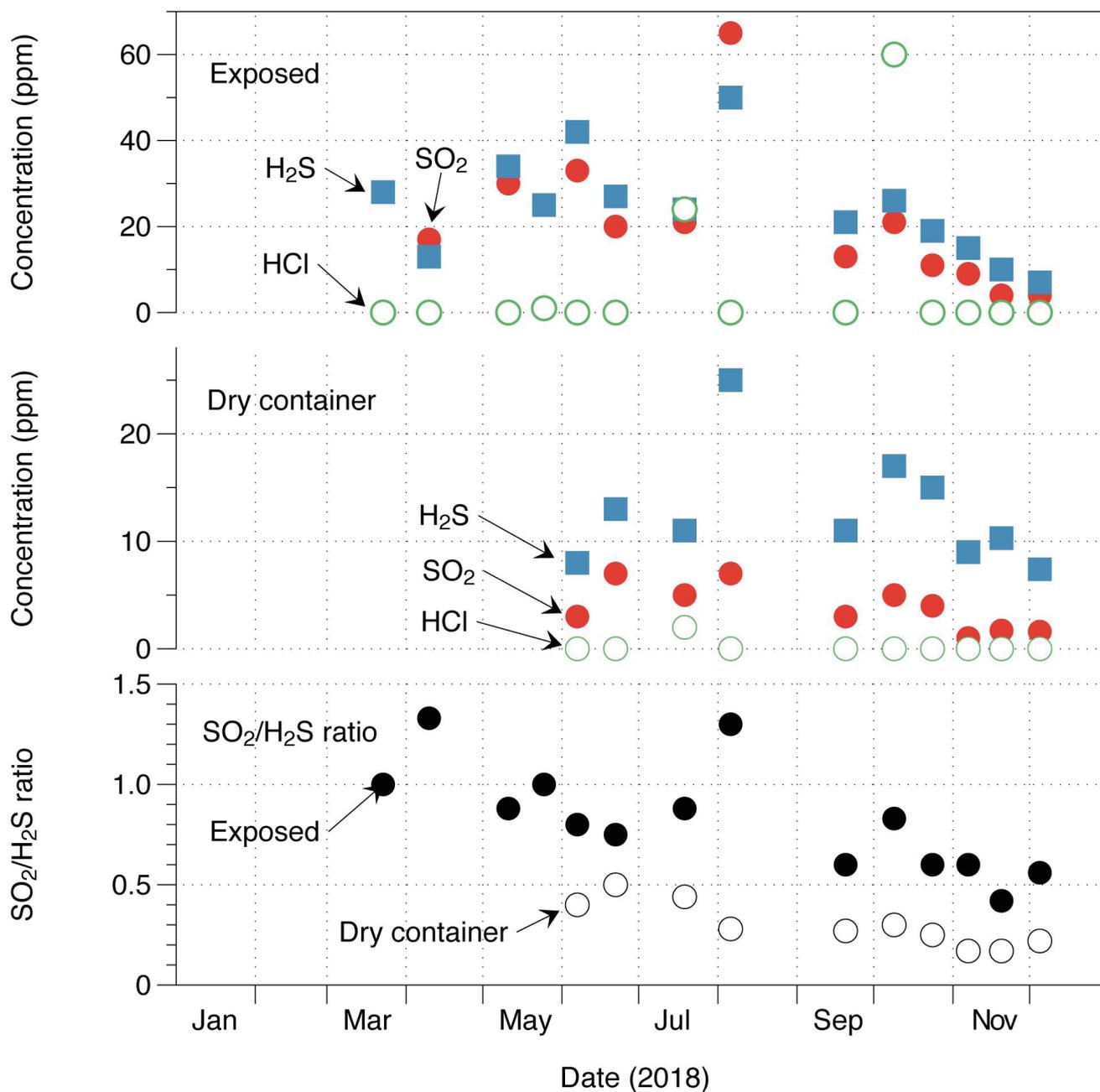


図 23 長期間用検知管による 15-2 群付近雰囲気中の二酸化硫黄／硫化水素比の時間変化。Exposed は露出した、Dry container は乾燥剤を入れた穴あき容器中に静置した検知管の値を示す。

Fig.23 Concentration and ratio of volcanic gas in the atmosphere near the 15-2 fumarole group measured by diffusion tube. The test tube was set in the atmosphere (Exposed) and within the ventilated container with silica-gel (Dry container) and both data are shown.

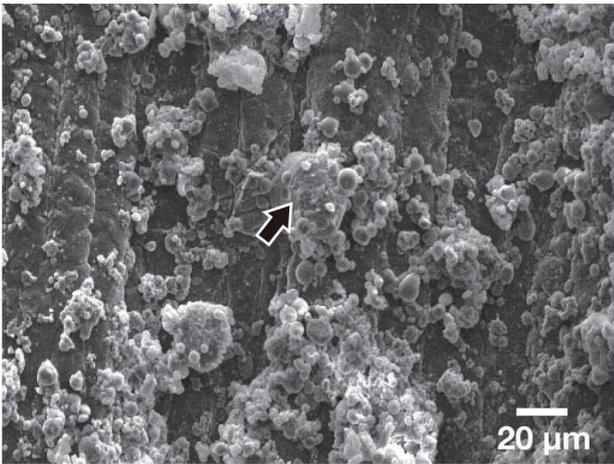


図 24 大涌橋付近で採集した小枝の表面の電子顕微鏡写真。様々な大きさの球顆状粒子が付着しているのがわかる。矢印の粒子について EDS 分析を行い硫黄の粒子であることを確認した。

Fig. 24 SEM image of surface of a twig sampled near Owakubashi bridge. The surface is covered by sulfur spherules of various diameter. A qualitative EDS analysis was attempted for a large spherule (arrow) and verified that the spherule is almost pure sulfur.

付録 1 噴気温度の測定結果 (2015 年 12 月～ 2018 年 12 月) 単位は℃。

Appendix 1 Temperature of fumaroles (Dec.2015 ~ Dec.2018). Temperature is in °C .

Date	Day*	15-1†	15-2	15-3	15-4	15-7	15-5§	15-12	15-14b	15-15	16-1
2015/12/15	233		131.9								
2016/3/28	337		125.9						89.7	130.6	
2016/4/26	366		125.4								
2016/5/13	383	(93.1)	124.3								
2016/5/27	397	(90.4)	123.8								
2016/6/7	408	(94.0)	123.1								
2016/6/27	428	(94.6)	121.5								
2016/7/14	445	(94.5)	122.9								
2016/7/28	459	(95.2)	124.1								
2016/8/5	467			144.2	123.0		112.2				
2016/8/9	471		123.3								
2016/9/2	495	99.0	125.8								
2016/9/15	508		126.4								
2016/10/7	530		129.3				96.1				
2016/10/18	541		128.2				96.3				
2016/10/31	554		130.2				97.5				
2016/11/16	570		128.0								
2016/12/1	585		122.1								
2016/12/12	596		125.8				96.1		115.9		
2016/12/26	610		120.2				96.8		134.3		
2017/1/10	625		121.5						132.7		123.7
2017/1/23	638		120.4				99.3		133.9		
2017/2/9	655		122.8								
2017/3/6	680		119.2				95.8		133.8		
2017/3/23	697		124.7				99.0		132.0		
2017/4/4	709		120.7				99.4		132.2		
2017/4/18	723		124.0								
2017/5/1	736		124.9				97.5	150.3	126.6		
2017/5/16	751		126.4					151.1	125.8		
2017/5/30	765		133.2					150.7	127.8		
2017/6/12	778	144.7	120.2				97.6	150.2	128.0		
2017/6/27	793										
2017/7/3	799	142.8	132.7				98.6	150.6	121.1		
2017/7/14	810	137.7	130.2				97.7	150.7	112.2		
2017/7/25	821										
2017/8/1	828		132.6				96.8	148.7	122.6		
2017/8/17	844		120.0								
2017/8/23	850	162.0	129.1				97.7	152.7			
2017/8/28	855	155.6	132.0				97.1	147.4	122.0		

(つづき)

(continued)

Date	Day*	15-1†	15-2	15-3	15-4	15-7	15-5§	15-12	15-14b	15-15	16-1
2017/9/13	871	155.0	125.3				97.6	147.4	121.0		
2017/9/29	887		120.2				97.3	148.2	124.1		
2017/10/18	906	159.4	123.0				97.4	148.4	122.4		
2017/11/1	920	118.6	126.4				96.6		117.0		
2017/11/2	921	131.7	128.7								
2017/11/15	934	146.4	137.4				96.5	135.9	133.4		
2017/11/28	947	135.7	130.3				96.7	123.8	133.2		
2017/12/12	961						97.2		153.0		
2017/12/27	976		108.0				95.7	146.1	120.9		
2018/1/11	991	146.1	116.1				96.5	144.6	129.3		130.7
2018/1/24	1004	120.5	98.7				ex.	143.5	122.8		140.0
2018/2/8	1019	146.9	131.9					144.5	143.5		140.9
2018/2/19	1030	147.3	119.2					141.7	119.7	126.3	140.3
2018/3/23	1062	133.9	116.7					139.8	129.9	120.1	138.2
2018/4/10	1080	164.3	128.5				(89.0)	139.6	138.7	122.6	
2018/5/11	1111	148.1	121.9					141.4		116.8	133.9
2018/5/17	1117		117.0		96.8						
2018/5/25	1125	160.3	117.6		112.5			137.3	150.4	149.8	135.6
2018/6/7	1138	145.8	117.4		97.8			137.2	151.3		
2018/6/22	1153	136.4	131.4					136.4			134.8
2018/7/17	1178		123.6		114.5			138.5			136.4
2018/7/18	1179	157.0									
2018/7/19	1180										
2018/8/6	1198	156.3	118.5					137.0	134.0	141.7	135.7
2018/9/20	1243	157.1	118.6		115.0	138.5		134.5	150.5	134.9	135.9
2018/10/9	1262	156.1	125.2		98.3	130.2		128.4	151.3	139.6	134.0
2018/10/24	1277	148.4	125.8		107.7	124.6		127.4	151.9	143.7	132.2
2018/11/7	1291	157.4	120.7		95.8			126.6	152.2	138.1	134.3
2018/11/20	1304		123.5		97.6			126.7	152.1	133.4	132.5
2018/12/5	1319	154.3	122.8			130.5		121.3	153.1	144.8	131.0

* 2015年噴火の前兆となった群発地震の開始日(2015年4月26日)を0としたときの経過日数。

† () は泥だまりの泥水温度を示す。§ () は噴気孔があった場所の地中温度を示す。ex. 噴気の消滅。

* Day since the precursor seismic activity started on April 26, 2015.

† Temperature of mud in the mud pool.

§ Figure in () indicates underground temperature where fumarole existed. ex. Extinction of fumarole.