

第4期中期研究計画「箱根火山の活動に関する研究」の総括

萬年一剛^{*1}・安部祐希^{*1}・代田寧^{*2}・道家涼介^{*1}・原田昌武^{*1}・本多亮^{*1}・行竹洋平^{*3}

A review of studies on activity of Hakone volcano during the fourth medium-term research plan of the Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

by

Kazutaka MANNEN^{*1}, Yuki ABE^{*1}, Yasushi DAITA^{*2}, Ryosuke DOKE^{*1}, Masatake HARADA^{*1}, Ryou HONDA^{*1}
and Yohei YUKUTAKE^{*3}

1. はじめに

箱根火山では21世紀に入ってから、地震や地殻変動が数年に1度の頻度で活発化してきた。こうした背景から、第3期中期研究計画（平成23～27年度）では、「箱根火山」の研究が研究所全体で取り組むべき最重要課題として位置づけられ、その活動特性や、温泉湧出機構の解明による総合的理解が目指された。計画最終年度の2015年には偶然にも規模の大きい活発化があり、同年6月29日にはごく小規模な噴火に至った。その翌年に策定された第4期中期研究計画では、2015年噴火で得られたデータを活用し、県民の安全安心の確保に還元していく必要を認識し、3大テーマのひとつとして「箱根火山の活動に関する研究」が設定された。この報告では、このテーマに関する研究の総括を行う。

「箱根火山の活動に関する研究」では、「熱水活動、地殻構造の解明」と「モニタリングおよびシミュレーション手法の開発・高度化」を目指した研究を進めるものとした。具体的な研究内容として、「熱水活動、地殻構造の解明」については、浅部地下構造の解析とモデル化、基盤構造に関する解析、マグマ及び熱水領域の解析、地殻内における流体分布の解析、活動活発化に関する地球化学的解析が挙げられた。また、「モニタリングおよびシミュレーション手法の開発・高度化」については、GPSスタッキングを活用した観測機能の高度化、火山活動評価のための火山ガス連続観測手法の確立、温泉・熱水を活用した観測手法の検討、が例示された（表1）。

一方で、こうした研究内容はあくまでも例示で、研究としては最新の手法やトレンドを踏まえて柔軟に実施さ

表1 第4期中期研究計画の箱根火山の活動に関する研究内容

研究内容	例示
熱水活動、地殻構造の解明	浅部地下構造の解析とモデル化
	基盤構造に関する研究
	マグマ及び熱水領域の解析
	地殻内における流体分布の解析
	活動活発化に関する地球化学的解析
モニタリング及びシミュレーション手法の開発・高度化	GPSスタッキングを活用した観測機能の高度化
	火山活動評価のための火山ガス連続観測手法の確立
	温泉・熱水を活用した観測手法の検討

*1 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0032 神奈川県小田原市入生田 586

*2 神奈川県環境科学センター 〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮 1-3-39

*3 東京大学地震研究所 〒113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1

れてきた。このため、上記の項目立てに従って研究の進展状況を総括することは困難である。そこでこの総括では、箱根火山 2015 年噴火に関する研究と対応、地殻構造と熱水活動の解明、モニタリング及びシミュレーション手法の高度化の 3 つに大別して、この 5 年間の調査研究活動を総覧する。

2. 箱根火山 2015 年噴火に関する研究と対応

2.1. 2015 年噴火のプロセスに関する研究

箱根火山では、2001 年以降、数年に 1 度の頻度で山体の膨張と地震活動の活発化が認められてきた。このうち 2001 年の活発化では大涌谷の蒸気井から放出される蒸気の勢いが制御不能な状態までに高まった暴噴と呼ばれる状態になり、数ヶ月間継続した。こうしたことから (1) マグマまたはマグマ性流体の深部貫入 (= 山体膨張)、(2) それに刺激された地震活動の活発化、そして (3) 蒸気井の暴噴に示唆されるような熱水活動の高まり、の順番で火山活動が進展するものと考えられてきた。こうした進展は、2015 年噴火の前後でも認められたが、詳しい観測と解析により、本中期研究計画期間中にさらなる詳細が明らかになった。ここでは、深部から浅部の順に、本中期研究計画期間中に明らかになった噴火にいたるプロセスを概観する。

2.1.1. 深部膨張と関連する観測

マグマまたはマグマ性流体の深部貫入は、従来は山体膨張から漠然と想像されていたが、本中期研究計画期間中に、深部低周波地震活動の高まりからも示唆されるようになった。箱根火山で深部低周波地震活動が観測されることは以前から報告があったが (原田ほか、2010 ; 棚田ほか、1998 ; 棚田、2015)、検知数が少ないため火山活動との関連は明らかでなかった。Yukutake *et al.* (2019) はマッチドフィルター法と呼ばれる、地震計の連続波形から自動的に低周波地震を検知する方法を導入して、箱根火山における深部低周波地震の検知数を飛躍的に増加させることに成功した。また検知数が高まった深部低周波地震の記録に統計解析を加えることで浅部地震活動に先駆して深部低周波地震の活動が増加することを明らかにした。深部低周波地震の発生原因は明らかでないが、一般には流体の移動に伴う地震活動であると考えられており、地殻変動とほぼ同時に観測されることから、山体の膨張がマグマないしマグマ性流体の移動と箱根直下での貫入によるものであることが示唆される。マッチドフィルター法による深部低周波地震の監視は自動化されて、現在、当所における研究用の火山監視に用

いられているが (行竹、2017)、今後は気象庁による火山監視などにも実装されることを期待したい。

なお、沈み込み帯においては沈み込むスラブを源とする流体が地殻内を移動する過程が、最近の研究で注目されるようになっており (岩森ほか、2019)、それを示唆する深部低周波地震の観測はますます重要性を増してくるものと考えられる。

地殻変動については、地下 7 km 以深の深部膨張源と、海水準付近の浅部膨張源があることが知られていた (代田ほか、2009)。Harada *et al.* (2018) は GNSS の観測を元に、深部膨張源と浅部膨張源それぞれの、2015 年の噴火前後の膨張速度を計算によって求めた。この結果、浅部膨張源は噴火前後で膨張速度が変化しなかったことや、深部膨張源は噴火の約 2 週間前頃に膨張速度が減少したことなどが明らかとなった。浅部膨張源の膨張は熱水の貫入によって引き起こされると考えられるが、噴火によって膨張速度が変化しないことから、噴火による熱水の放出は地下の圧力を短時間で低下させるためには十分でないことが示唆された。

2.1.2. 浅部膨張と関連する観測

地殻変動に関しては合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) の導入が図られたことが、本研究期間中の特筆すべき進展と言える。日本の合成開口レーダを搭載した人工衛星である ALOS-2/PALSAR-2 (だいち 2 号) の解析で、2015 年 6 月 29 日の噴火前から、大涌谷で局所的な隆起が認められた (道家ほか、2015 ; 道家ほか、2016 ; Doke *et al.*, 2018a)。解析により、この膨張は地表からの深さ約 100 m に力源があると推定された (Doke *et al.*, 2018a)。後に電磁探査の結果から、この力源は箱根火山のキャップロック中に発達した蒸気だまりであるとするモデルが提示され (Mannen *et al.*, 2019b; Seki *et al.*, 2020)、熱水系の活発化が隆起をもたらしたことが支持された。ちなみに、この局所的な隆起は、2015 年 5 月には想定火口域として周囲に立入禁止領域が設けられるなど、観測は防災行政的にも役立てられたが (Mannen *et al.*, 2018)、実際にこの膨張範囲内で噴火が発生し、SAR によるおそらく世界初の噴火地点の予測事例となった。加えて、噴火の 4 日前からはこの局所的な隆起をモニターするために地上設置型 SAR による連続観測が行われ、噴火直前の急激な隆起が観測された (Kuraoka *et al.*, 2018)。このように、SAR は噴火の直前予知に応用できる可能性を秘めており、今後ますます研究が進展すると考えられる。

衛星 SAR の解析からは、噴火前後に生じたクラック

による地殻変動も検出され、クラックの姿勢の解析が行われた (Doke *et al.*, 2018a)。衛星 SAR は衛星の周回周期に観測が規制されるため、時間分解能が十分でない。しかし、傾斜計と広帯域地震計の詳細な解析から、噴火当日の朝に発生した地殻変動から衛星 SAR で検出されたクラックとほぼ同じ姿勢を持ったクラックの活動が明らかになった (Honda *et al.*, 2018)。このことから、このクラックは噴火当日に形成されたものと推定される。Doke *et al.* (2018a) では、地殻変動の解析からクラックの下に、シル状の収縮源を検出しており、収縮源からクラックへの流体移動が噴火の引き金になったとするモデルが提示されている。

なお、上述のクラックの直上の地表では、火口列の地形が認められ歴史時代の噴火により形成したものと考えられている (小林ほか, 2006; 土屋ほか, 2017; 山口ほか, 2021)。同様の火口列地形は複数認められるが、箱根火山では熱水活動の活発時にはクラックが再活動することと、再活動が大きい場合は割れ目噴火にいたる可能性が指摘できる。この点は防災上の大きな留意点であろう。

2.1.3. 噴火の観測

箱根火山の 2015 年噴火は当所として初めておこなう火山噴火観測であったが、きわめて興味深い観測が行われた。Yukutake *et al.* (2018) は、噴火中心で発生した空振を地震計と空振計記録の相互相関解析により検出した。空振は、噴火当日の午前 7 時 32 分に発生しはじめたが、噴火時は視界が悪かったため、噴火開始の正確なタイミングは不明で、火口近傍のタイムラプスカメラで泥混じりの雨が確認された午後 0 時 20 分頃が噴火の開始時刻とされた (Mannen *et al.*, 2018)。しかしその 5 時間近く前の午前 7 時 32 分には何らかの噴出現象が始まっていたものと推定される。ちなみに、この時刻は、噴火の引き金となった最初のオープンクラックの形成タイミングで (Honda *et al.*, 2018)、7 時 32 分頃に形成されたクラックが地表近くまで到達して、噴火に至ったというモデルが考えられる。噴火の確認は、箱根火山 2015 年噴火のように火口付近の視界が不良だと極めて困難であるが、こうした空振計記録の解析は噴火開始の判断を遠隔で行うことができるツールとして有用であろう。

また、2015 年噴火では箱根火山での観測史上初めての明瞭な火山性微動を観測した。Yukutake *et al.* (2017) は、この火山性微動の震源位置を、波形エンベロープの相互相関解析を用いて噴火の噴出口付近と推定した。微動の振幅は、パルス状の空振波の発生と同時に増加し、

噴火の終わりに最大の振幅が観測された。解析結果から、ガススラグが噴出口の表面で破裂した際に、地震波と空振波の両方が発生したと考えられる。また、タイムラプスカメラ記録から推定される火口開口時期と、火山性微動の振幅が大きい時間帯は近く、新しい火口の開口時に、ガススラグの破裂が活発になったものと推定される。

2.2. 2015 年噴火とその後の対応

箱根火山の 2015 年噴火は、有史以来初めての噴火であったが、近年の活発化や御嶽山 2014 年噴火を背景に、行政による様々な防災対策も事前に行われ、大きな混乱は生じなかった。一方、噴火が発生したことで、大涌谷周辺の立入が長期間規制されるなど、新しい防災対応を実際に経験することになった。こうした貴重な経験について、当所の定期出版物で紹介された (里村, 2016; 竹中ほか, 2015; 竹中・片山, 2016; 本間ほか, 2017)。また、噴火発生により、箱根火山の最近の活動や噴火前後の観測について紹介が求められて外部の雑誌に投稿された (萬年, 2016a; 2016b)。加えて、前年の御嶽山 2014 年噴火で多数の犠牲者がでたため、日本火山学会が登山者向けの啓発方法を検討した (萬年, 2016c; 萬年ほか, 2016)。

箱根火山の 2015 年噴火の前後に観測された諸々の事象や防災対応については Mannen *et al.* (2018) で総括された。この総括を含む、当所が実施した箱根火山 2015 年噴火の観測に関する速報的な報告や類似の火山における観測についての知見は、日本火山学会など地球惑星科学関連 5 学会が発行する英文誌 *Earth, Planets and Space* 誌で特集号が発行されたほか (Mannen *et al.*, 2019a)、現在、東京地学協会発行の地学雑誌において邦文の特集号が出版準備中である。また、当所では水蒸気噴火に関する知見を広く集め、今後の研究に資するため研究集会を 2019 年と 2020 年の 2 回実施した (安部, 2019; 萬年・加藤, 2020)。

なお、本県にとっては、富士山の噴火に伴う災害も懸念のひとつである。こうしたことから、箱根山と富士山を対象とした防災訓練が 2017 年 10 月 24 日に箱根町内で開催され、その概要が報告された (本間ほか, 2018)。

3. 地殻構造と熱水活動の解明

地震や地殻変動、噴気異常などの火山活動の変化の原因を考える上で、そうした変化を起こす地殻内の場所がどのような性質を持っているのかを知ることは大変重要である。箱根火山の場合、地震地殻変動はマグマや温泉

の元となる熱水の動きを示していると考えられ、地殻構造と熱水活動を同時に理解してモデル化する必要がある。地殻構造と熱水活動の解明は、2015年の噴火を受けた解析が進むことにより、本研究期間中に大幅な進展を遂げた。

3.1. 地震波速度構造

箱根火山では地震波トモグラフィと呼ばれる解析手法により、地震波の縦波と横波の速度 (V_p 、 V_s)、及びそれらの比 (V_p/V_s) の地殻内での空間分布が明らかになった。地殻を構成する岩盤に流体が存在すると、存在しない場合に比べて地震波速度は低下するが、低下の度合いは流体の種類 (マグマか水かなど) や流体で満たされた空間の形状によって異なるため、地震波速度構造から流体の分布や存在形態が推定出来る。Yukutake *et al.* (2015) は地震波速度構造を明らかにし、マグマだまりと熱水系の分布を推定するとともに、箱根地域で発生する構造性地震と深部低周波地震の発生場との関連を論じた。これによると箱根火山直下では、低 V_p ・低 V_s ・低 V_p/V_s の領域が地下 3～10 km 付近を中心に、低 V_p ・低 V_s ・高 V_p/V_s の領域が地下 10～20 km に認められ、それぞれ熱水系とマグマだまりであると解釈された。

Yukutake *et al.* (2021) では、Yukutake *et al.* (2015) よりさらに空間分解能が向上した地震波速度構造が示された。これによると、(1) 低 V_p/V_s の領域は流体やガスに富む領域と解釈されること、(2) 低 V_p/V_s 領域の上限は地震の下限に一致することから、この付近の温度が 350°C 前後に推定されること、(3) 地殻変動観測で検出される深部膨張源 (後述) は明らかに低 V_p/V_s の領域にあること、(4) 深さ 9 km 付近にある低 V_p ・低 V_s ・高 V_p/V_s 領域は解析によりマグマの比率が 4% 程度と、これまで同様の手法によりマグマの比率が推定されている火山に比べると、かなり結晶化が進んだマグマだまりであると解釈されること、(5) 箱根火山の深部低周波地震はマグマだまりより深部に連なる低 V_p ・低 V_s ・高 V_p/V_s 領域で発生しておりこの領域がマグマ供給経路であると推定されること、などが示された。

3.2. 比抵抗構造

比抵抗構造とは、地下の岩盤の電気の通しにくさ (= 比抵抗) が、平面的、深さ方向的にどのような分布をしているのかを示すもので、電気探査や電磁探査によって解析される。比抵抗構造に関する知見は、本中期研究計画期間中に飛躍的に向上した。大涌谷付近では、垂直電気探査により解析深度約 30 m の比抵抗構造の測定

が行われたことがあったが (馬場ほか, 2009)、2008 年以降は人工信号源を用いた電磁探査である CSAMT 法が用いられ、大涌谷とその周辺の東西約 1 km、南北約 1.4 km の範囲に 10 前後の測線が設定されて、最大深度約 500 m までの比抵抗構造がたびたび測定された (Mannen *et al.*, 2018; Mannen *et al.*, 2019b)。比抵抗構造が何度も測定されたのは大涌谷から 700 m ほど北に離れた森林内で、新たな噴気地帯が生じたり、2015 年に大涌谷で噴火が発生したため、熱水の上昇系路を探る必要が高まったためである。また自然信号を利用した AMT 法による電磁探査が、大学等の主導により当所の研究員も加わって、2010～2013 年に箱根全山で (Yoshimura *et al.*, 2018)、2017 年に大涌谷付近で実施された (Seki *et al.*, 2020)。これらの探査の結果、箱根火山には神山付近を頂点とするベル型の低比抵抗体 (< 10 Ω m) と、その下に高比抵抗を示す層に大別されることが分かった。これらは各々、熱水変質によって生じた粘土鉱物であるスメクタイトが発達した難透水層と、熱水が循環する熱水系と解釈された。また、低比抵抗でスメクタイトの発達する難透水層が、大涌谷付近では極めて局所的に高比抵抗を示し、これが蒸気溜まりである可能性が指摘された。これらの結果により、従来観念的なものに留まっていた箱根火山の熱水系について、実際の観測を基にした具体的な描像を初めて描くことができた。

3.3. 熱構造

箱根火山において、これまで温泉温度が上昇するいわゆる異常昇温現象が、いくつか報告されている。たとえば、2001 年の箱根群発地震活動の際には、その直前から強羅および二ノ平で源泉の温度が約 3～5°C 上昇していたことが観測されている (石坂ほか, 2002)。このような異常昇温は、火山体内の熱構造や火山活動時の熱水系が熱輸送に重要な役割を果たしていると思われる。

そこで、当所で実施した温泉井の温度検層データ (1958 年～1978 年のデータを使用) を用いて、箱根火山地域の地温勾配や地中温度構造を推定した。その結果、中央火口丘西側で地温勾配が小さく、東側の一部では高いことが分かった。また、局所的に熱水の流入による高温域や、地下水の流入による低温域が確認された (原田ほか, 2016b)。現在は実施されていないが、こうしたデータに基づいた熱水系シミュレーションは、火山活動のみならず温泉の成因解明に寄与することが期待される。

3.4. 大涌谷西側におけるかくれ熱水だまりの存在

道家 (2017) および Doke *et al.* (2020) は、2006～2011年に運用されていた ALOS/PALSAR のデータに対し干渉 SAR 時系列解析を実施し、大涌谷の西側において、直径約 500 m の範囲が沈降していることを明らかとした。この沈降は、深さ約 300 m における収縮で説明ができ、地表における噴気活動が衰退していることと関連づけ、かつて活発だった熱水だまりが衰退している様子を見ているものと解釈された。箱根火山の噴気地帯の下には、従来の地殻変動観測では検出されていなかった、「かくれ熱水だまり」とも言うべきこのような熱水もしくはガスだまりが複数存在していることが示唆された (道家ほか、2021)。

3.5. GNSS による箱根火山活動活発化時の地殻変動観測および解析

箱根火山には、温泉地学研究所が独自に設置している GNSS 観測点が多数分布している。国土地理院の GEONET 観測点、気象庁の仙石原観測点を含めると、箱根火山周辺では、平均して 5 km 程度の間隔で観測点が分布していることになる。温泉地学研究所では、これらの観測点を統合的に解析し、その結果を可視化する仕組みを構築し、火山活動に伴う地殻変動の観測を行なっている (Doke *et al.* 2018b; 道家ほか、2020)。加えて、地殻変動を可視化する工夫として、箱根火山周辺の歪の時間変化の可視化も行なった (道家、2018)。

2019年の群発地震活動の際には、新たに機動観測用の GNSS アンテナおよび受信機を、観測点の分布密度が少ない箱根火山の外輪山西側 (山伏峠) に設置し、臨時観測を実施した (道家、2019)。2019年の活動に伴う地殻変動は、深さ約 10 km における茂木ソースと、深さ (海拔下) 0.4～3.3 km に分布するクラックの開口で説明される (道家ほか、2019)。なお、干渉 SAR 解析では、2019年の活動に伴って顕著な地表面の変位は観測されなかったが、上記のモデルに基づく地表面変位のシミュレーション結果からは、ノイズレベルの地表面変位しか観測されないことが確かめられた (道家ほか、2019)。

3.6. 地殻の亀裂に関する研究

本多 (2016) では箱根火山の亀裂系について、S 波スプリッティング解析によりその特徴を検討した。この研究では解析によって得られたスプリッティングパラメータが有効となる周波数範囲を位相差スペクトルによって推定し、観測点ごとの特徴についてまとめた。その結果、

小塚山、元箱根では信頼区間の高周波側への広がりが顕著であり、10 Hz 程度までは同じパラメータで説明できることがわかった。また、大涌谷、駒ヶ岳、湖尻もやや広がりは小さいが、解析対象周波数帯よりも高周波側まで信頼区間の広がりがある。金時では、信頼区間の広がりが解析対象周波数の高周波側の上限よりも低い周波数までとなり、他の観測点に比べて亀裂系の特徴的なサイズが大きいことを示唆している。

Yukutake *et al.* (2016) は地震波干渉法により箱根火山の地震波速度の時間変化を検出し、こうした変化が箱根火山の地殻変動に伴って発生していることを示した。検出された地震波速度の変化は、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震直後にカルデラ内で観測された 1% 程度の低下と、2013年の活動活発化に伴って中央火口丘で観測された 0.6% 程度の低下である。これらは、東北太平洋沖地震によって箱根火山にかかる応力が大きく変化したことによる熱水の移動と、活動活発化で浅部に生じたオープンクラックの開口にともなう歪の変化を反映したものと考えられている。

S 波スプリッティングや地震波干渉法によるモニタリングは、火山地域の地殻変動に伴う応力変化を検知する重要なツールとして今後のさらなる研究の進展が期待される。

4. モニタリング及びシミュレーション手法の開発・高度化

4.1. 地球化学的観測の強化

火山の地下ではマグマが蓄積しているが、マグマから揮発成分が放出されたり、地下の温度変化に伴う化学平衡条件の変化に伴って、噴気地帯で放出されるガスの量や比率が変化する。火山ガスを精密に分析するためには、多大な労力と特殊な設備が必要であるが、箱根では 21 世紀に入るまで長い間火山活動が低調であったため、当所では火山ガスのモニタリングをしようとする動きがほとんど無かった。しかし、最近になっていくつかのガス観測手法が試されて第 4 期中期研究期間中には大幅な進展を見た。

4.1.1. 火山ガスのモニタリング

大涌谷と大涌谷の北 700 m 程のところに入ってから新たに生じた上湯噴気では、東海大学との共同研究により、噴気中の二酸化炭素と硫化水素の比率 (C/S 比) が 2013 年頃から繰り返し測定されている。この測定では、噴気中の水蒸気を凝結させた後に残ったガスを検知管で測定しているが、地殻変動や地震活動の高まり

と同時に C/S 比が顕著に増加し、活動の低下とともに緩やかに低下するパターンが 2013 年、2015 年、2017 年、2019 年の活発化で認められた (代田, 2016; 代田ほか, 2017; Ohba *et al.*, 2019; Mannen *et al.*, 2021)。噴気の CO₂ はマグマ起源、H₂S は熱水系起源と考えられる。CO₂ 増加の要因についてはマグマだまりの上にあるシーリング層にトラップされていた CO₂ が放出されるために引き起こされるという点では一致している。しかし、シーリング層は活発化の数ヶ月前に形成されるという考え方と (Ohba *et al.*, 2019)、シーリング層は常時存在するが活発化の時に破壊されるという考え方 (Mannen *et al.*, 2021) があり、一致していない。C/S 比については大涌谷や上湯などで「多項目火山性ガス成分観測システム」が 2015 年噴火後に整備された (原田ほか, 2016a)。このシステムは一定時間おきに噴気中のガス組成をセンサーで測定し、火山ガスモニタリングの時間分解能を飛躍的に向上させようとする挑戦的な試みで、センサー劣化や結露など様々な課題をクリアする必要があったが、最近になって安定的な観測が行われつつある。

大涌谷地域では C/S 比のほか、パッシブ型検知管による噴気孔周囲の雰囲気中火山ガス濃度の繰り返し測定が実施され、火山活動の高まりに応じたマグマ性ガスの比率増加が観測されている (Mannen *et al.*, 2021)。大涌谷地域ではこのほか、大気中への火山ガス放出の温泉造成による低減効果を評価するため、火山ガス採取とガス比の測定が行われたり (十河ほか, 2017)、観光客等の安全確保のため常時観測している大気中の SO₂ および H₂S 濃度から、火山活動や火山ガス放出の状況を把握する試みが行われるようになった (池貝ほか, 2017; 代田・十河, 2020)。

4.1.2. DOAS による二酸化硫黄放出率の測定

大涌谷では噴火後にそれまで噴気中に少量しか含まれていなかった二酸化硫黄が大量に放出されるようになった。そこで当所では、箱根火山の活動評価のために、2017 年から大涌谷において放出される二酸化硫黄の放出率の繰り返し測定を行った (安部ほか, 2017; 2018)。当所が繰り返し測定を開始する以前は、箱根火山における二酸化硫黄放出率の測定は 2015 年から 2016 年までの間に気象庁 (2016) および気象研究所 (2016) により数回行われただけで、継続的な測定は行われてこなかった。二酸化硫黄放出率の測定には、二酸化硫黄が特定の波長の紫外線を吸収する性質を利用して自然光の波長分布の観測から自然光の到来方向に存在する二酸化硫黄の

全量を算出する DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 法 (例えば, Mori *et al.*, 2007) を用いた。現在に至るまで数トン/日から数十トン/日程度の放出率が継続的に測定されており、2015 年の噴火直後に測定された 100 トン/日を超える放出率は測定されていない。

4.1.3. 噴気温度の連続観測

大涌谷では噴気が多数あるが、高温で酸性であるため、装置による連続測定は困難とされてきた。加藤ほか (2019; 2020) では、2015 年の噴火で生じた自然噴気孔にテフロン樹脂などで防護したグローブをおいて、噴気温度の連続測定を実施し 3 ヶ月以上の連続測定に成功したが、噴気孔周囲の陥没により測器を失ったり、噴気孔の移動があるなどして、安定的な温度測定には至らなかった。しかし、蒸気井での連続測定には成功しており (加藤ほか, 2020)、今後は蒸気井の噴気温度測定が期待される。

4.2. 地球物理的観測の強化

当所では従来から箱根火山を中心に多数の地震や地殻変動の観測点を複数設置してきたが、2015 年噴火以降、新たな地球物理的観測が加わった。

4.2.1. 重力による火山活動モニタリング

箱根火山では地下構造を推定するための重力測定が実施されてきたが、本中期研究計画期間中には、箱根火山の火山活動に伴う密度の時空間変化を検出することが試みられた。この試みでは、相対重力値の繰り返し観測を 2018 年 7 月に開始し、温泉地学研究所および箱根カルデラ内 8 地点において、1 年に 2 度の頻度で重力値を観測した (風間ほか, 2019)。その結果、大涌谷において陸水分布の年周変化と解釈できる 50 μ Gal 程度の変化が検出された。

4.2.2. 広帯域地震計の設置

2015 年噴火の当日朝には傾斜計と臨時に設置した広帯域地震計によって約 2 分程度の長周期イベントが観測され、解析の結果、大涌谷付近での流体貫入により形成された、北西-南東走向、開口量 5 cm の開口クラックによるものと推定された (Honda *et al.*, 2018)。このように、広帯域地震計による観測は火山研究に必要な強力なツールであるが、箱根火山における当所の定常的な地震観測は短周期地震計によるもののみであったため、2015 年から広帯域地震観測点を構築する予定であっ

た。噴火による対応が多忙であったため遅れたものの、下湯場、駒ヶ岳、早雲山、大涌谷地蔵尊の4か所に広帯域地震観測点を構築できた(本多・行竹、2015;行竹ほか、2017)。同時に、手薄であった箱根火山西側の観測点を補完するため、5か所の機動観測点を設置し、オンラインでのデータ収集が可能となった。

4.3. 熱画像、可視画像による火山活動モニタリング

噴気地帯からは膨大な熱が定期的に放出されているが、噴気地帯は面積的な拡がりがあり、いくつもの噴気があるため全体を把握することは難しい。原田(2018)では、2016年1月以降、大涌谷に設置された赤外線カメラで5分おきに噴気地帯の赤外面像を撮影し、画像全体および強い噴気や温泉造成塔などを切り取った画像の部分の最高温度を抽出してその時間変化をプロットした。その結果、画像全体やいくつかの部分画像で明瞭な温度変化を検出した。多くは低下傾向を示しており、2015年噴火以降の噴気の減衰によるものとみられる。今後の活発化の際は、噴気地帯の熱的な変化を確実に捉えることが出来るツールとして期待される。なお、この手法については気象庁の火山監視でも取り入れられている(例えば、気象庁、2020)。

大涌谷では噴火前後の2015年5月から2016年7月まで、活動監視のために安価なタイムラプスカメラが設置され大量の可視画像が撮影され解析がされた(萬年、2017)。正午前後に撮影された画像の輝度の日ごとの変化を見たところ、2015年12月頃に輝度の高まりがあった。この時期には地震や地殻変動は認められなかったが、火山ガスの観測では異常が見られており(Mannen *et al.*, 2018; Ohba *et al.*, 2019)、何らかの熱的活動の高まりがあった可能性が指摘された。一方、可視画像は天候や太陽光線の影響も大きく、安価なカメラでは露出補正が自動で行われてしまう問題もあり、監視の実用化にはまだ相当の努力が必要と考えられる。

4.4. 当所観測網に関する基盤的研究

火山活動の研究やモニタリングは当所の定常観測点による観測が基礎となることが多いが、その基盤的な情報を整備することは重要である。

温泉地学研究所の地震観測点は、1990年代に現在の観測網が構築されて以降、いくつかの機器の更新はあったものの観測点位置の変更はない。しかし、他機関との共有においてなんらかの行き違いから正しい情報が共有されていないことが分かったため、改めて観測点の位置情報を調査した(本多、2015)。観測点の設置当時は

1/25000の地図から標高を読み取っていたと考えられるが、今回は国土地理院提供の基盤地図情報(数値標高モデル)を使用した。具体的には、フリーソフトウェアのカシミールに観測点座標値を入力し、得られた標高を観測点の地表面の標高とした。使用した標高基盤地図情報のデータは、レーザー測量による5mメッシュと、等高線データから作成された10mメッシュの数値標高モデルである。埋設型の観測点では、観測点構築時の報告書に記載されたセンサーの着底深度(設置深度)分を標高から引いた値を、センサーの標高とした。

加えて、「火山災害対策事業」において2015(平成27)年10月現在で整備されたまたは予定の広帯域地震観測点、及び群発地震活動の活発化を受けて緊急に整備された機動的な地震観測点の観測点位置及び観測点の仕様などについて紹介した(本多・行竹、2015)。2015(平成27)年以前は箱根火山で設置されていた地震計のすべては、短周期型地震計で固有周期1Hzであり、より長周期の地震動に対して高感度で観測することができないという状況であった。そこで2015(平成27)年度は、大涌谷に近い下湯場(箱根温泉供給株式会社敷地内)及び湯の花沢噴気域に近い温泉地学研究所駒ヶ岳観測施設内に広帯域地震計を設置することとなった。設置した地震計はいずれもNanometrics社のTrillium Compact 120sであり、4ch低消費電力型ロガー(計測技研製、HKS-9700)を使用して200Hzサンプリングでデータを収録し、光回線で温地研に送信する。また、箱根火山の活発化をうけ、地震活動を監視するためにオンラインでデータを収集できる機動観測点を5か所(大涌谷の極楽茶屋裏の駐車場(大涌谷)、明神林道(金時山)、長尾峠(仙石原)、山伏峠、鞍掛山(元箱根))設置した。地震計とテレメータ装置は固有周期2Hzの3成分速度型地震計(CDJ-S2C-2)、計測技研製HKS9700(ユビキタスモジュール搭載)である。これによってこれまで裾野観測点しかなかった箱根火山の西側に観測点ができ、観測点のカバレッジが大幅に向上した。

また、本多・行竹(2015)の報告以後には大涌谷地蔵尊と早雲山にも広帯域地震観測点が整備され、大涌谷周辺における火山性微動や低周波イベントの検知・解析能力が大幅に向上した。

4.5. 流体貫入時の傾斜計データ

箱根火山に設置している傾斜計は、2015年の水蒸気噴火直前のように流体の貫入などによる傾斜変化をとらえるのに有効である。しかし、観測点近傍で地震が発生すると、地震波到達と同時にクラックの収縮とも解釈さ

れるような傾斜変動が観測され、一見、地震波によって地下のクラックの活動が誘発されたようにも見えることもある。本多（2019）では、地震時に傾斜記録にステップが見られた例を集め、その原因について考察し、箱根で観測された地震時の傾斜ステップはほぼ地殻変動のシグナルではないと考えてよい、という結論に至った。

4.6. 降灰シミュレーションの高度化

神奈川県は1707年に発生した富士山の宝永噴火で広い地域が数cm～数十cmの降灰に見舞われており、降灰対策の確立は重要である。降灰シミュレーションはこうした対策の基礎となるものであるが、世界中で広く用いられているシミュレーションコードTephra2 (Connor *et al.*, 2001; Bonadonna *et al.*, 2005) は、降灰粒子の出発点となる噴煙の形状に大幅な簡略化があるため、再現性に問題が生じる場合があることが指摘されていた（萬年, 2013）。Mannen *et al.* (2020) では風によって噴煙がたなびくケースについて、理論的な噴煙の形状をもとに粒子の出発点を設定するという改良をTephra2に加えた新しいコードWTを開発し、その検証を行った。WTは火口近傍から遠方まで優れた降灰の再現性を示すため、2018~2019（平成30～令和元）年度に設けられた、国の大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループでも利用された（大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ, 2020）。一方、現在ではパラメータ設定に恣意的なところも残っているため、今後は理論的かつ簡単なパラメータ設定を可能にする研究を推進する予定である（萬年, 2021）。

5. まとめ

本総括の末尾にあたり、火山防災の視点から本中期研究計画期間のあゆみを振り返りたい。箱根火山の活動に関しては、本中期研究計画期間の前から2001年以降の活動活発化の経験を踏まえて、深部膨張から熱水活動の高まりに至るパターンが認識されてきた。本中期研究計画期間中には、こうした知見に加えて、深部低周波地震活動の高まりが先駆することや、SARにより地下の圧力増加に伴う局所的な隆起が観測されることなどが明らかになった。このことは深部低周波地震や、SARによる地殻変動モニタリングが、火山活動の評価手法として新たに加わったことを示す。一方、本中期研究計画期間中には、深部膨張が熱水系内で発生していることや、マグマだまりの結晶比率が他の火山に比べて高い可能性が明らかになった。こうしたことは、箱根火山の山体膨張の原因がマグマではなく、マグマ性の流体である可能性

を示唆している。箱根火山が収縮に転じた事実は観測されていないので、マグマ性流体を貯め続けていることになるが、これが火山防災を考える上でどのように評価されるべきかについては、今後の課題である。箱根火山では地形的に過去の水蒸気噴火による割れ目火口列が複数認められるが、本中期研究計画期間中の研究で、これらは地下の開口クラックと関連しており、2015年の活動では歴史時代に活動したことがある開口クラックが再活動したものと解釈された。また、中央火口丘の直下にはSARによる地殻変動観測から複数のかくれ熱水だまりとも言うべき熱水だまりの構造があることがわかった。このような知見は、今後の火山活動を監視する上で重要な知見であることに加え、中央火口丘においても噴火口が開口するポテンシャルには濃淡があることを示し、今後の火山ハザードマップ改訂作業を実施する上で考慮すべき情報と考えられる。本研究期間中にはその他、地震波形の処理、赤外線画像の解析、比抵抗構造探査、噴気の連続測定などによりさまざまな情報を引き出す研究が進展したほか、DOASによる二酸化硫黄放出量測定や重力測定、広帯域地震計などの新しい観測が導入され、火山観測手法が多様化した。今後は多様化した火山観測手法により、箱根火山の理解が更に進み、県民の安全安心に資することが出来るよう、研究活動を推進していきたい。

参考文献

- 安部祐希（2019）水蒸気噴火のメカニズムと予知に関する研究集会参加報告、火山, 64, 139-145.
- 安部祐希・原田昌武・板寺一洋・森健彦・高木朗充（2018）箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率～観測・解析手法と2018年6月までの放出率の推移～、温泉地学研究所報告, 50, 1-18.
- 安部祐希・原田昌武・板寺一洋・森健彦・高木朗充・長岡優（2017）箱根火山大涌谷における二酸化硫黄放出率の測定、温泉地学研究所報告, 49, 21-28.
- 馬場久紀・森沙都未・棚田俊收（2009）箱根大涌谷噴気域における電気探査、日本火山学会講演予稿集2009年秋季大会, 128.
- Bonadonna, C., Connor, C. B., Houghton, B. F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. and Hincks, T. K. (2005) Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 110, B03203. 10.1029/2003JB002896
- Connor, C. B., Hill, B. E., Winfrey, B., Franklin, N. M.

- and La Femina, P. C. (2001) Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Natural Hazards Review*, 2, 33-42.
- 大規模噴火時の広域降灰対策検討ワーキンググループ (2020) 大規模噴火時の広域降灰対策についてー首都圏における降灰の影響と対策ー～富士山噴火をモデルケースに～ (報告), <http://www.bousai.go.jp/kazan/kouikikouhaiworking/index.html>
- 代田 寧 (2016) 箱根火山の温泉と火山ガスー温泉の成因モデルおよび火山ガスと火山活動との関連性ー, *化学と教育*, 64, 510-513.
- 代田 寧・大場 武・谷口無我 (2017) 箱根火山における活動活発化に連動した噴気組成 (C/S 比) の変化, *温泉地学研究所報告*, 49, 29-38.
- 代田 寧・大場 武・谷口無我・十河孝夫・原田昌武 (2019) 箱根火山大涌谷北側斜面で 2017 年に観測された噴気組成 (C / S 比) の変動, *温泉地学研究所報告*, 51, 37-44.
- 代田 寧・十河孝夫 (2020) 大涌谷自然研究路内の火山ガス濃度 (2018～2019 年), *神奈川県環境科学センター研究報告*, 43, 50-56.
- 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.
- 道家涼介 (2017) 干渉 SAR 時系列解析による神奈川県西部地域周辺の地殻変動, *温泉地学研究所報告*, 49, 11-20.
- 道家涼介 (2018) 箱根火山を対象とした歪時間変化グラフの作成, *温泉地学研究所報告*, 50, 45-52.
- 道家涼介 (2019) 箱根火山緊急観測のための機動用 GNSS 観測装置の設置について, *温泉地学研究所報告*, 51, 45-49.
- 道家涼介・原田昌武・板寺一洋・加藤照之 (2019) GNSS 観測による箱根火山 2019 年群発地震活動に伴う地殻変動, *温泉地学研究所報告*, 51, 1-9.
- 道家涼介・原田昌武・板寺一洋・加藤照之・中村康弘 (2020) 温泉地学研究所における新たな GNSS 解析戦略について, *温泉地学研究所報告*, 52, 63-68.
- Doke R., Harada M., Mannen K., Itadera K., Takenaka J. (2018a) InSAR analysis for detecting the route of hydrothermal fluid to the surface during the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 70:63. doi: 10.1186/s40623-018-0834-4
- Doke R., Harada M., Miyaoka K. (2018b) GNSS Observation and Monitoring of the Hakone Volcano and the 2015 Unrest. *Journal of Disaster Research*, 13:526-534. doi: 10.20965/jdr.2018.p0526
- 道家涼介・原田昌武・竹中 潤 (2015) 干渉 SAR による 2015 年箱根火山の活動に伴う大涌谷の地表面変位, *温泉地学研究所報告*, 47, 23-29.
- 道家涼介・原田昌武・竹中潤 (2016) 干渉 SAR による大涌谷の地表面変動(2015 年 9 月～2016 年 10 月), *温泉地学研究所報告*, 48, 25-32.
- Doke R., Kikugawa G., Itadera K. (2020) Very Local Subsidence Near the Hot Spring Region in Hakone Volcano, Japan, Inferred from InSAR Time Series Analysis of ALOS/PALSAR Data. *Remote Sensing*. doi: 10.3390/rs12172842
- 道家涼介・萬年一剛・板寺一洋 (2021) 地表面変位から推定される箱根火山浅部熱水系の構造, *地学雑誌*, 130, 811-830.
- 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, *温泉地学研究所報告*, 50, 53-59.
- Harada, M., Doke, R., Mannen, K., Itadera, K., & Satomura, M. (2018). Temporal changes in inflation sources during the 2015 unrest and eruption of Hakone volcano, Japan. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 152. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0923-4>
- 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・板寺一洋・伊藤正規・湯尾康成 (2016a) 緊急的な火山観測施設の整備について～2015 年箱根火山活動への対応録～, *神奈川県温泉地学研究所観測だより*, 66, 17-24.
- 原田昌武・板寺一洋・萬年一剛・道家涼介 (2016b) 温度検層データから推定した箱根火山の地温勾配, *温泉地学研究所報告*, 48, 17-24.
- 本多 亮 (2015) 温泉地学研究所地震観測点の座標値みなおし, *温泉地学研究所報告*, 47, 45-46.
- 本多 亮 (2016) 位相差スペクトルを用いて推定した箱根直下の異方性構造の特徴, *温泉地学研究所報告*, 48, 11-16.
- 本多 亮 (2019) 箱根周辺で観測された地震時の傾斜ステップに関する考察, *温泉地学研究所報告*, 51, 17-23.
- 本多 亮・行竹洋平 (2015) 2015 (平成 27) 年度に実施

- した広帯域地震観測点及び機動地震観測点の整備について, 温泉地学研究所報告, 47, 31-40.
- Honda, R., Yukutake, Y., Morita, Y., Sakai, S., Itadera, K., & Kokubo, K. (2018). Precursory tilt changes associated with a phreatic eruption of the Hakone volcano and the corresponding source model. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 117. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0887-4>
- 本間直樹・濱田紀之・小林彦彦 (2017) 箱根山火山活動活発後の防災対応～大涌谷園地再開に向けて～, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 67, 11-22.
- 本間直樹・富岡嵩昂・中村謙介 (2018) 富士・箱根火山合同防災訓練を実施しました, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 68, 21-24.
- 池貝隆宏・十河孝夫・代田 寧・吉田直哉・菅野重和 (2017) 箱根山大涌谷の火山ガス濃度の推移, 神奈川県環境科学センター研究報告, 40, 1-8.
- 石坂信之・板寺一洋・菊川城司 (2002) 箱根群発地震と温泉温度等の変化, 第 5 5 回日本温泉科学大会 講演集, 19.
- 岩森 光・行竹洋平・飯尾能久・中村仁美 (2019) 地殻流体の起源・分布と変動現象, 地学雑誌, 128, 761-783.
- 風間卓仁・安部祐希・原田昌武・加藤照之 (2019) 箱根火山における相対重力繰り返し測定 (2018 年 7 月～2019 年 10 月), 温泉地学研究所報告, 51, 25-36.
- 気象庁 (2016) 箱根山, 第 135 回火山噴火予知連絡会資料 (その 7), 58-66.
- 気象庁 (2020) 箱根山, 第 147 回火山噴火予知連絡会資料 (その 3 の 3), 128.
- 気象研究所 (2016) 箱根山, 第 135 回火山噴火予知連絡会資料 (その 7), p.67.
- 加藤照之・宮下雄次・萬年一剛・菊川城司・原田昌武 (2019) 箱根火山大涌谷における噴気温度の連続観測, 温泉地学研究所報告, 51, 11-16.
- 加藤照之・宮下雄次・萬年一剛・菊川城司・原田昌武 (2020) 箱根火山大涌谷における噴気温度の連続観測 (第二報), 温泉地学研究所報告, 51, 15-21.
- 小林淳・萬年一剛・奥野充・中村俊夫・袴田和夫 (2006) 箱根火山大涌谷テフラ群: 最新マグマ噴火後の水蒸気爆発体積物, 火山, 51, 245-256.
- Kuraoka S., Nakashima Y., Doke R., Mannen K. (2018). Monitoring ground deformation of eruption center by ground-based interferometric synthetic aperture radar (GB-InSAR): a case study during the 2015 phreatic eruption of Hakone volcano. *Earth, Planets and Space*, 70:181. Doi: 10.1186/S40623-018-0951-0
- 萬年一剛 (2013) 降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 の理論と現状—第四紀学での利用を視野に, 第四紀研究, 52, 173-187.
- 萬年一剛 (2016a) 箱根火山の観測・研究と 2015 年噴火, 地質と調査, 第 1 号 (通巻 145 号), 26-31
- 萬年一剛 (2016b) 箱根火山 2015 年噴火—火山研究と防災対応—, JGL, 12(4), 4-6.
- 萬年一剛 (2016c) 火山と登山—活火山との付き合い方, 登山研修, 32, 22-28.
- 萬年一剛 (2017) 大涌谷噴気地帯を撮影した画像の平均輝度の日別変化と火山活動の関係 (2015-2016), 温泉地学研究所報告, 49, 39-48.
- 萬年一剛 (2021) シミュレーションとインバージョンを用いた噴煙と降灰分布の復元; Tephra2 と WT による最近の成果を中心に, 火山, 66, 101-117.
- Mannen, K., Abe, Y., Daita, Y., Doke, R., Harada, M., Kikugawa, G., *et al.* (2021). Volcanic unrest at Hakone volcano after the 2015 phreatic eruption: reactivation of a ruptured hydrothermal system? *Earth, Planets and Space*, 73(1), 80. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01387-3>
- Mannen, K., Hasenaka, T., Higuchi, A., Kiyosugi, K., & Miyabuchi, Y. (2020). Simulations of Tephra Fall Deposits From a Bending Eruption Plume and the Optimum Model for Particle Release. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(6). <https://doi.org/10.1029/2019JB018902>
- 萬年一剛・加藤照之 (2020) 水蒸気噴火のメカニズムに関する国際ワークショップ, 地学雑誌, 129, N72.
- Mannen, K., Roman, D., Leonard, G., Prejean, S., & Nakagawa, M. (2019a). Special issue “Towards forecasting phreatic eruptions: examples from Hakone volcano and some global equivalents.” *Earth, Planets and Space*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1068-9>
- 萬年一剛・瀧 尚子・吉本充宏・及川輝樹 (2016) 日本火山学会による登山者向けパンフレット「安全に火山を楽しむために」の発行, 火山, 61, 259-262.
- Mannen, K., Tanada, T., Jomori, A., Akatsuka, T.,

- Kikugawa, G., Fukazawa, Y., *et al.* (2019b). Source constraints for the 2015 phreatic eruption of Hakone Volcano, Japan, based on geological analysis and resistivity structure. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 135. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1116-5>
- Mannen, K., Yukutake, Y., Kikugawa, G., Harada, M., Itadera, K., & 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 and Space*, 70(1), 68. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0844-2>
- Mori, T., Hirabayashi, J., Kazahaya, K., Mori, T., Ohwada, M., Miyashita, M., Iino, H., Nakahori, Y. (2007) A Compact Ultraviolet Spectrometer System (COMPUSS) for monitoring volcanic SO₂ emission: Validation and preliminary observation, *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 52, 2, 105-112.
- Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Daita, Y., Sukigara, C., Ito, M., Tsunogai, U. (2019). Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model. *Earth, Planets and Space*, 71(1), 48. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1027-5>
- 里村幹夫 (2016) 2015 年箱根火山活動を通じて考えたこと, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 66, 1-2.
- Seki, K., Kanda, W., Mannen, K., Takakura, S., Koyama, T., Noguchi, R., Yukutake, Y., Ishikawa, M., Fukai, M., Harada, M., & Abe, Y. (2020). Imaging the source region of the 2015 phreatic eruption at Owakudani, Hakone Volcano, Japan, using high-density audio-frequency magnetotellurics. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2020GL091568>
- 十河孝夫・秀平敦子・代田 寧・本間直樹 (2017) 箱根山大涌谷の 52 号蒸気井から放出される火山ガスの測定結果, 神奈川県環境科学センター研究報告, 40, 18-20.
- 棚田俊收 (2015) 箱根山における深部低周波地震と火山活動との関係, 日本火山学会 2015 年秋季大会講演予稿集, 190.
- 棚田俊收・鶴川元雄・八巻和幸・伊東 博 (1998) 箱根火山直下の深部低周波地震について, 日本火山学会 1998 年秋季大会講演予稿集, 80.
- 竹中潤・本多亮・原田昌武・萬年一剛・松沢親悟 (2015) 御嶽山噴火災害発生に伴う現地調査について, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 65, 5-14.
- 竹中潤・片山真 (2016) 2015 年箱根山火山活動活発化に伴う防災対応, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 66, 3-12.
- 土屋美穂・萬年一剛・小林 淳・福岡孝昭 (2017) 箱根火山大涌谷テフラ群から見つかった 2 種類の火山ガラス—その給源火山と年代への制約—, *火山*, 62, 23-30.
- 山口珠美・山下浩之・萬年一剛・小林 淳 (2021) 箱根火山の地質と形成史: 最近の研究レビュー, 神奈川県立博物館調査研究報告, 16, 136-160.
- Yoshimura, R., Ogawa, Y., Yukutake, Y., Kanda, W., Komori, S., Hase, H., *et al.* (2018). Resistivity characterisation of Hakone volcano, Central Japan, by three-dimensional magnetotelluric inversion. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0848-y>
- 行竹洋平 (2017) Matched filter 法を用いた箱根深部低周波地震の監視システムの開発, 温泉地学研究所報告, 49, 1-10.
- Yukutake, Y., Abe, Y., & Doke, R. (2019). Deep Low-Frequency Earthquakes Beneath the Hakone Volcano, Central Japan, and their Relation to Volcanic Activity. *Geophysical Research Letters*, 1–9. <https://doi.org/10.1029/2019GL084357>
- Yukutake, Y., Abe, Y., Honda, R., & Sakai, S. (2021). Magma Reservoir and Magmatic Feeding System beneath Hakone Volcano, Central Japan, Revealed by Highly Resolved Velocity Structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1–18. <https://doi.org/10.1029/2020jb021236>
- 行竹洋平・本多 亮・安部祐希 (2017) 神奈川県およびその周辺における 2016 (平成 28) 年の地震活動, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 67, 57-66.
- Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Arai, R., & Matsubara, M. (2015). A magma-hydrothermal system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 3293–3308. <https://doi.org/10.1002/2014JB011856>

- Yukutake, Y., Honda, R., Harada, M., Doke, R., Saito, T., Ueno, T., Sakai, S., & Morita, Y. (2017): Analyzing the continuous volcanic tremors detected during the 2015 phreatic eruption of the Hakone volcano. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 164. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0751-y>
- Yukutake, Y., Ichihara, M., & Honda, R. (2018). Infrasonic wave accompanying a crack opening during the 2015 Hakone eruption. *Earth, Planets and Space*, 70(1), 53. <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0820-x>
- Yukutake, Y., Ueno, T., & Miyaoka, K. (2016). Determination of temporal changes in seismic velocity caused by volcanic activity in and around Hakone volcano, central Japan, using ambient seismic noise records. *Progress in Earth and Planetary Science*, 3(1), 29. <https://doi.org/10.1186/s40645-016-0106-5>