

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

代田 寧^{*1}・大場 武^{*2}・谷口無我^{*3}・十河孝夫^{*4}・原田昌武^{*4}

Temporal variation of the fumarolic gas composition (C/S ratio) in 2017 at north side slope of Owakudani geothermal area, Hakone volcano

by

Yasushi DAITA^{*1}, Takeshi OHBA^{*2}, Muga YAGUCHI^{*3}, Takao SOGO^{*4} and Masatake HARADA^{*4}

1. はじめに

神奈川県西部に位置する箱根山は、しばしば地震の多発や山体が膨張する地殻変動などが観測される活火山であり、近年では2001年、2006年、2008年、2009年、2011年、2013年、2015年に比較的規模の大きな群発地震を伴う火山活動の活発化が発生している（原田ほか、2013；Mannen *et al.*, 2018）。特に2001年の活動では、群発地震や、山体がわずかに膨張するような地殻変動（代田ほか、2009）に加え、大涌谷にあ

る温泉造成のための蒸気井（深度500m）が地下の圧力上昇により制御不能（暴噴状態）になった（辻内ほか、2003）。さらに、それまで噴気活動が認められなかった大涌谷の北側から県道734号線にかけての斜面に新たな噴気が複数出現するなど、顕著な噴気異常が観測された（原田ほか、2012）。また、2015年には、山体の膨張、地震活動の活発化、蒸気井の暴噴現象発生を経て、大涌谷においてごく小規模ながら観測史上初めてとなる水蒸気噴火が発生し、新たな火口や噴気孔が形成された

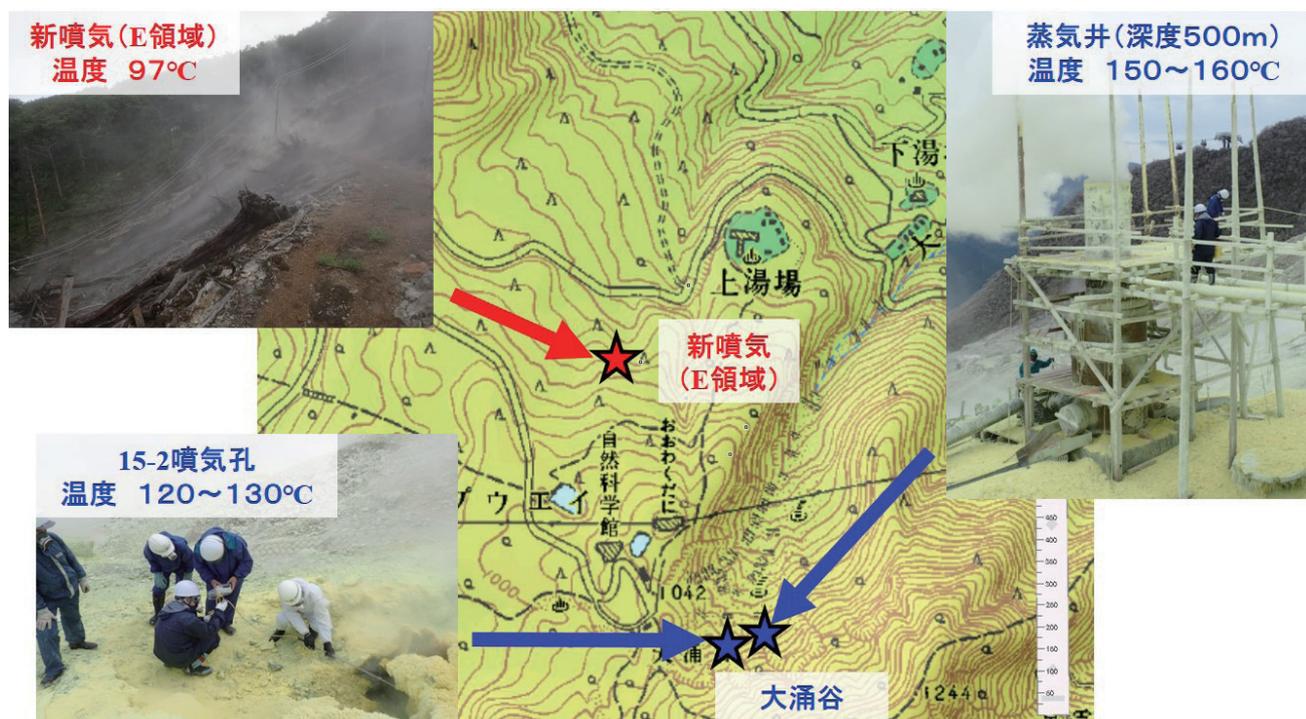


図1 噴気孔の位置（新噴気（E領域）および大涌谷）。国土地理院発行の2万5千分の1地形図「箱根」を使用した。

*1 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

*2 東海大学理学部化学科 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

*3 気象庁気象研究所火山研究部 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1

*4 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

(Mannen *et al.*, 2018)。

これまで著者らは、2001年の活動以後に新たに出現した大涌谷北側斜面の噴気域（新噴気域）において、原田ほか（2012）におけるB領域ならびにE領域の噴気孔を対象に火山ガスの採取と検知管法による分析を継続し、成分の時間変化について検討してきた。B領域については2005年6月6日から観測を開始した。2006年の活動前後には観測を実施していなかったが、2008年及び2009年の活動においては測定頻度が低かったために明瞭ではないものの、火山活動の活発化に関連してC/S比の上昇変化が生じている可能性があることを指摘した（代田・板寺、2010）。その後、B領域では噴気の勢いが衰えたため、E領域の噴気孔で2012年3月13日から観測を開始した。E領域は2003年頃に発見され、2011年頃から急激に拡大し、現在では沸点以下の噴気が多数見られる活発な噴気地となっている。E領域の噴



写真1 火山ガス採取の様子

気孔において、測定頻度を高めて観測を継続した結果、2013年と2015年の火山活動活発化の際に、群発地震の発生など火山活動の活発化に対応して噴気中の二酸化

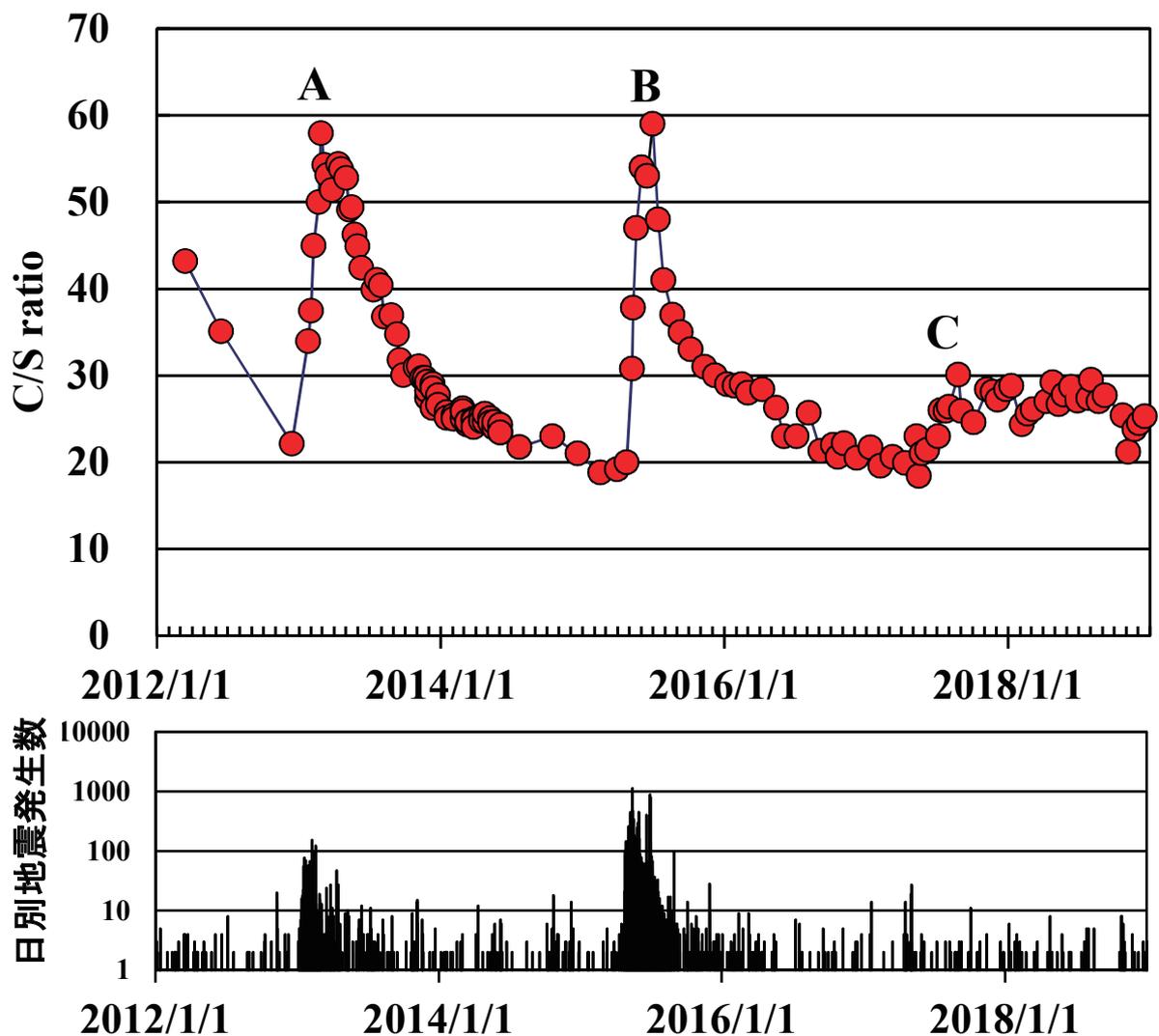


図2 C/S比の時間変化と日別地震発生数の推移（2012/3/1から2018/12/31まで）。A：2013年の火山活動活発化に伴う変化。B：2015年の火山活動活発化に伴う変化。C：2017年の顕著な群発地震を伴わない変化。

化炭素 (CO₂) と硫化水素 (H₂S) の体積濃度比 (以後、C/S 比と呼ぶ) が変化する現象を捉え、この噴気域における火山ガス中の C/S 比観測が箱根山の火山活動予測に有効である可能性を示した (代田、2013; 代田ほか、2017)。

2015 年の活動以降も E 領域の噴気孔で観測を継続していたところ、2017 年の 6 月頃から再び噴気組成が変化する現象を捉えたが、その際、2013 年や 2015 年のケースとは異なり、顕著な地震活動の活発化 (群発地震の発生) は観測されなかった。本報告では、この 2017 年に観測された噴気組成の変化について報告する。

2. 火山ガスの採取・分析方法

火山ガスの採取・分析方法は、代田ほか (2017) と同様である。すなわち、チタン製のロートを噴気孔にかぶせ、ロートと地面の間隙を土などで埋めることにより、

できるだけ大気が混入しないようにしたうえで、ロートの口からシリンジで噴気を採取した。シリンジとロート間に氷水で冷却したトラップ管を挿入して水分を凝縮させ、水蒸気以外のガスがシリンジに採集されるようにしたうえで、シリンジ中の CO₂ と H₂S の濃度を検知管により測定した。噴気孔の位置を図 1 に、火山ガスの採取状況を写真 1 に示した。

3. 2017 年の C/S 比の変化

2012 年 1 月から 2018 年 12 月までの E 領域の噴気孔における C/S 比の変化を、箱根地域の日別地震発生数とともに図 2 に示した。また、2017 年の変化が見やすいように、短期間のグラフを図 3 に示した。なお、地震発生数は温泉地学研究所の地震カタログによるものである。図中の A は 2013 年の火山活動活発化に伴う C/S 比の上昇変化に、B は 2015 年の火山活動活発化に伴う

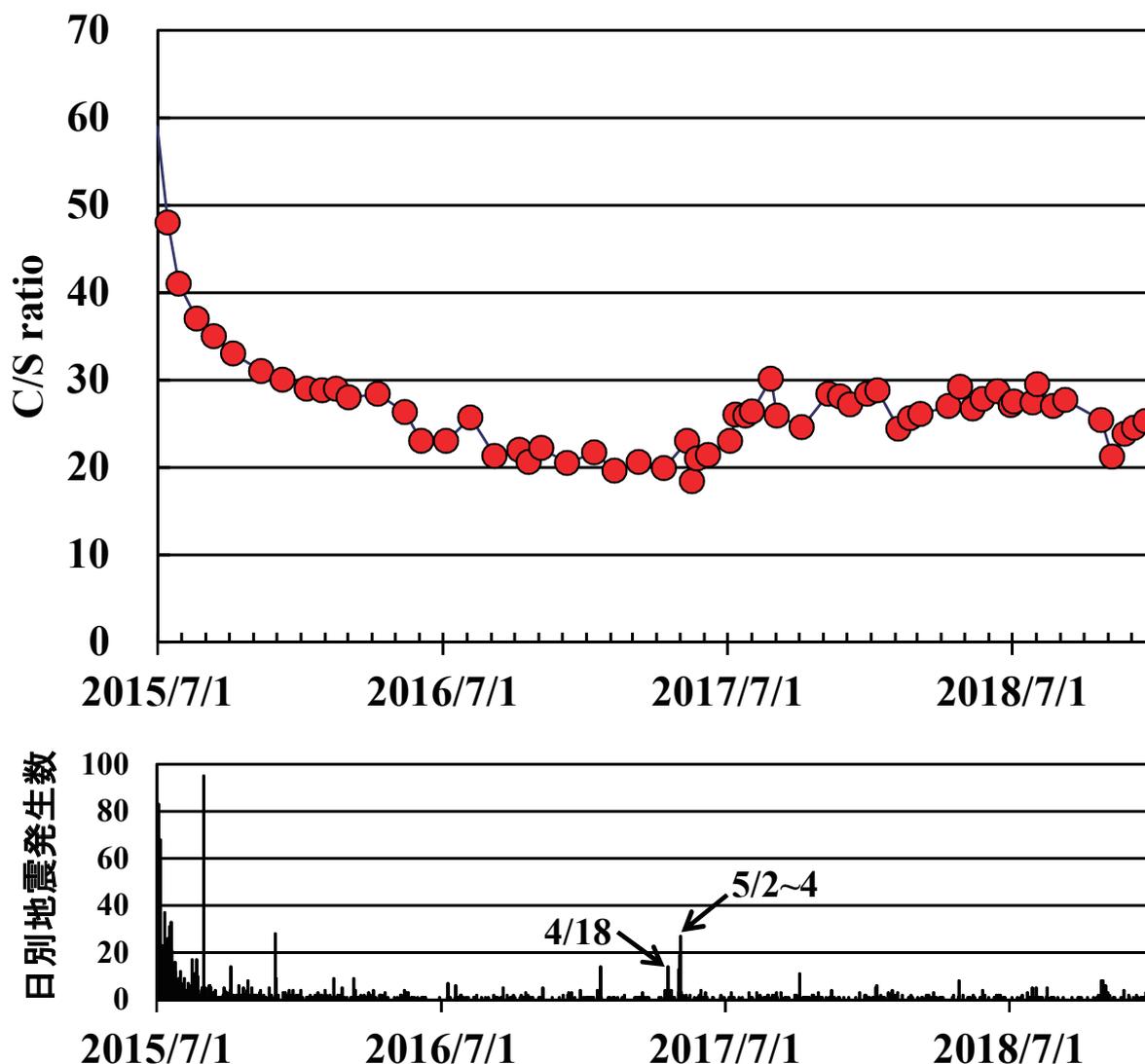


図3 C/S 比の時間変化と日別地震発生数の推移 (2015/7/1 から 2018/12/31 まで)。

図中の 4/18 と 5/2 ~ 4 は金時山付近で活発化した地震活動を示す。

C/S 比の上昇変化にそれぞれ対応し、C は今回議論する 2017 年に観測された C/S 比の上昇変化を示す。

2015 年の火山活動活発化では、4 月初旬頃から箱根をまたぐ基線長の増加が GNSS により観測されはじめ、4 月末に群発地震の状態となり、5 月 3 日には蒸気井の暴噴が始まった。この年、C/S 比は 4 月 24 日の観測までは 20 前後であったが、次の測定が行われた 5 月 8 日には 30.8 を記録するなど急上昇し、噴火 2 日目の 6 月 30 日には 59 に達した(図 2 の B)。その後、C/S 比は徐々に低下し、2017 年 2 月 6 日に 19.6 を記録した後は 20 前後で推移するようになった。

C/S 比はその後、2017 年 5 月 23 日の測定から再び上昇し始め、8 月 25 日に最高値 (30.6) を記録した後、ほぼ横ばい傾向となった (図 2 の C)。しかし、2017 年に観測された C/S 比の上昇は図 2 でも明らかなように、2013 年および 2015 年の活発化時の変化とは異なっていた。すなわち、C/S 比の増加速度 (傾き) が緩やかで、最高値も 30 前後と、60 前後だった 2013 年、2015 年の活動時に比べると半分程度であった。また、明瞭なピークが認められず、最高値に達した後、短期間で低下せずにはほぼ横ばいから極めてゆっくりとした低下を示した。

4. 火山活動との関連性

これまでの観測から、2013 年および 2015 年に火山活動の活発化に対応して E 領域の噴気孔における C/S 比が増加する現象が捉えられている (代田、2013; 代田ほか、2017)。

2013 年の活動では、日別地震数の増加と同期して C/S 比が急上昇し、地震数のピークに対して 2 週間程度遅れて C/S 比がピークとなり、その後は減少傾向へと変化した。また、2015 年の活動では、やはり日別地震数の増加と同期して C/S 比は急上昇し、5 月中旬に地震数がピークを迎え、地震活動が低下していた 6 月に入っても C/S 比は上昇を続けた。その後、水蒸気噴火が発生し、火山活動が低調になるとともに C/S 比は急速に減少した。地震活動が低調になった後も C/S 比は上昇を続けており、2015 年においてはその後水蒸気噴火に至ったことから、C/S 比は地震活動そのものに対応しているわけではなく、火山活動の状況を反映して変化する可能性が考えられる。

2017 年に観測された C/S 比上昇は、2015 年や 2013 年の C/S 比上昇と様相が大きく異なる。このため、2017 年の C/S 比上昇が火山活動を反映したものであるのか疑問が残るところである。そこで、他の観測におい

て火山活動の活発化を示す変化が捉えられていないかを検討した。

GNSS 観測による地殻変動についてみると、C/S 比の上昇が始まる 1 ヶ月程度前の 2017 年 4 月下旬頃から、C/S 比の上昇が停滞する 9 月中旬頃にかけて、膨張の変化を示すと考えられる中央火口丘を挟む基線において伸びの変化が観測された (図 4)。この変化は、2013 年や 2015 年の活動時と比較すると、緩やかで変化量が小さい特徴があるものの、火山活動の高まりによって山体が膨張したことを示すと見られる。

地震活動に目を向けると、2013 年および 2015 年には地震活動の高まりとともに C/S 比が上昇をした。一方、2017 年の C/S 比の上昇期間中には、カルデラ内における顕著な地震活動は観測されていないものの、上記の山体膨張変化の初期にあたる 4 月 18 日および 5 月 2~4 日にカルデラ北部の金時山付近で一時的に地震活動が活発化した (図 3 および図 5)。

さらに、著者らが隣接する大涌谷において、2001 年および 2015 年の活動時に暴噴した蒸気井および 2015 年の活動で新たに形成された噴気孔 (15-2 噴気孔) において湿式分析法 (Ozawa, 1968) により実施している火山ガスの観測結果によれば、蒸気井および噴気孔の両方において、2017 年 2 月 28 日の測定に対して同年 5 月 31 日の測定では $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が顕著に上昇しており (図 6)、4 月下旬頃から基線長の伸びが観測されていることと連動している可能性が指摘できる。また、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比ほど顕著な変化ではないが、噴気温度も 5 月 31 日の測定では上昇していた (図 7)。

これらの地殻変動や地震活動、大涌谷の火山ガスに見られた変化は、2017 年にも火山活動の高まりがあったことを示唆しており、2017 年に認められた C/S 比の上昇変化はこれに関連した変化であったと考えられる。一方、GNSS により観測された地殻変動は 2013 年や 2015 年の活動時に比べて緩やかで変化量も小さかったことから、2017 年の活動は規模が小さかったものと考えられ、顕著な群発地震活動を伴わなかった理由の一つとして挙げる事ができる。また、2015 年の活動において水蒸気噴火が発生し、新たな火口・噴気孔も多数形成されたことから、大涌谷一帯の地下構造が変化し、火山ガスの移動や地震発生状況に影響を及ぼした可能性も考えられる。

5. 検知管法による C/S 比観測の有用性と今後の活用方法

2015 年の活動では、大涌谷内の噴気孔において

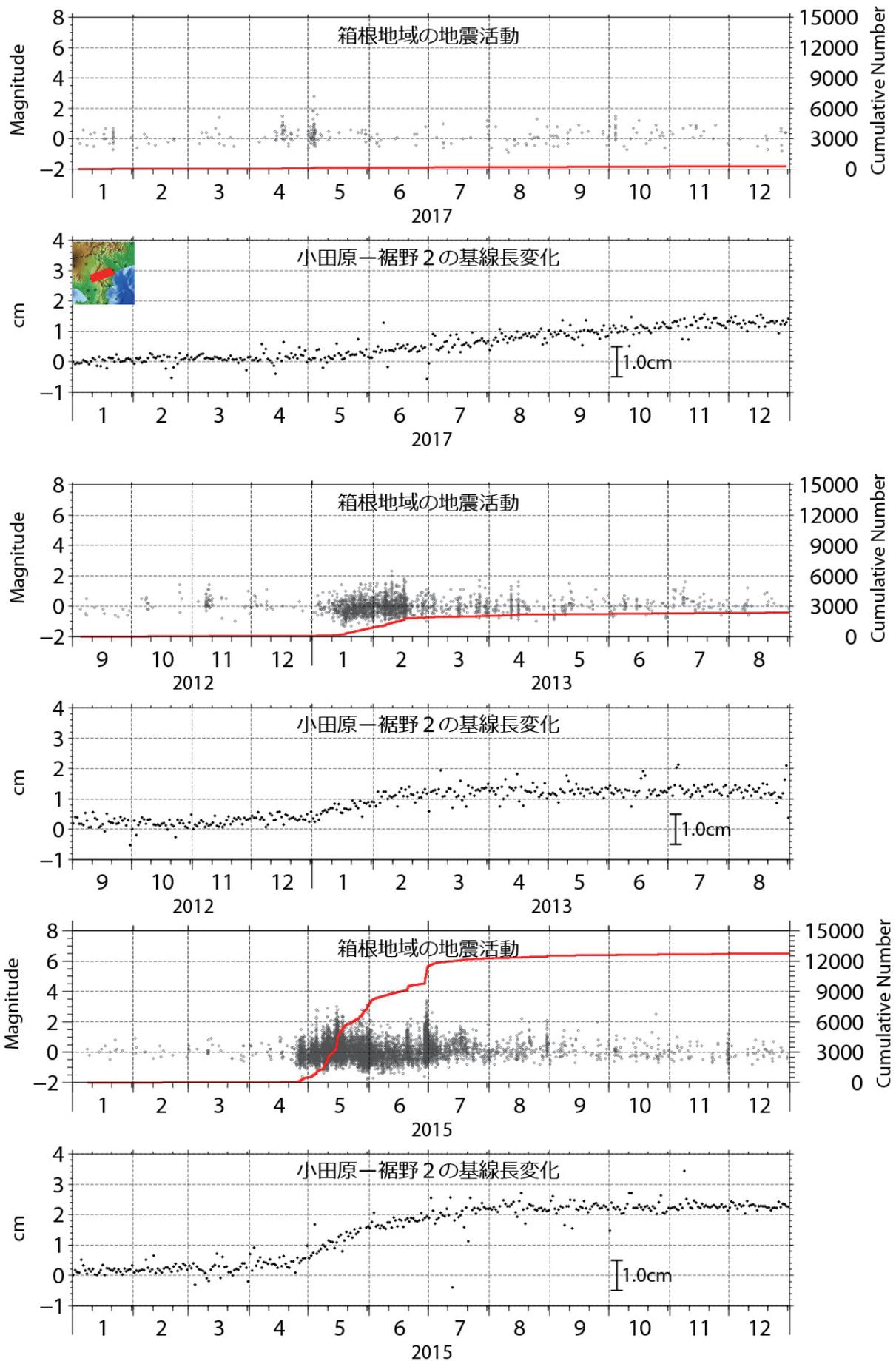


図4 小田原 - 裾野 2 における基線長変化と日別地震発生数の推移。
上段から 2017 年、2013 年、2015 年の活動にそれぞれ対応する。

群発地震活動に先行した明瞭な火山ガス組成の変化 (Ar/CO_2 比および N_2/He 比の低下) も捉えられている (Ohba *et al.*, 2019) が、現在までの観測事例では、 C/S 比の増加は群発地震の発生とほぼ同時期に観測されており、 C/S 比によって地震活動の活発化を早期に予測することは難しい。一方、4 節で述べたように、 C/S 比は火山活動の状況を反映して変化する可能性が考えられたため、火山活動が活発化した後の活動予測 (活発な状態が続いているのか、それとも終息に向かっているのか) に活用できるのではないかと考えられる。特に 2015 年の活動では、地震数がピークを迎え、地震活動が低調になった後も C/S 比は上昇を続けたことから、地震数が減少していても火山活動としては低調になっていないとの判断に寄与できた。実際に火山活動の状況を判断するには、GNSS 観測等による地殻変動と併せて評価してい

くことが重要であると考えられる。

2013 年の火山活動活発化に対応して増加した C/S 比は、ピークを迎えた後に急速に低下したが、 C/S 比が 30 を下回ったぐらいから緩やかな低下に変わり、20 程度まで低下した後、2015 年の火山活動活発化に対応して再び急上昇した。その後、ピークを迎えた後は急速に低下し、 C/S 比 30 ぐらいから緩やかな低下となり、やはり 20 程度まで低下した後に 2017 年 6 月頃から再び上昇の変化となった。このように、 C/S 比が 20 程度まで緩やかに低下、その後火山活動が活発化、というサイクルが繰り返されていることから、 C/S 比が 20 程度まで低下すると次の活動が近づいていると考えることもできるかもしれない。すなわち、今後もこの現象が繰り返されることが前提ではあるが、活発化後に低下していく C/S 比の挙動から次の活動が近づいているかどうかを推

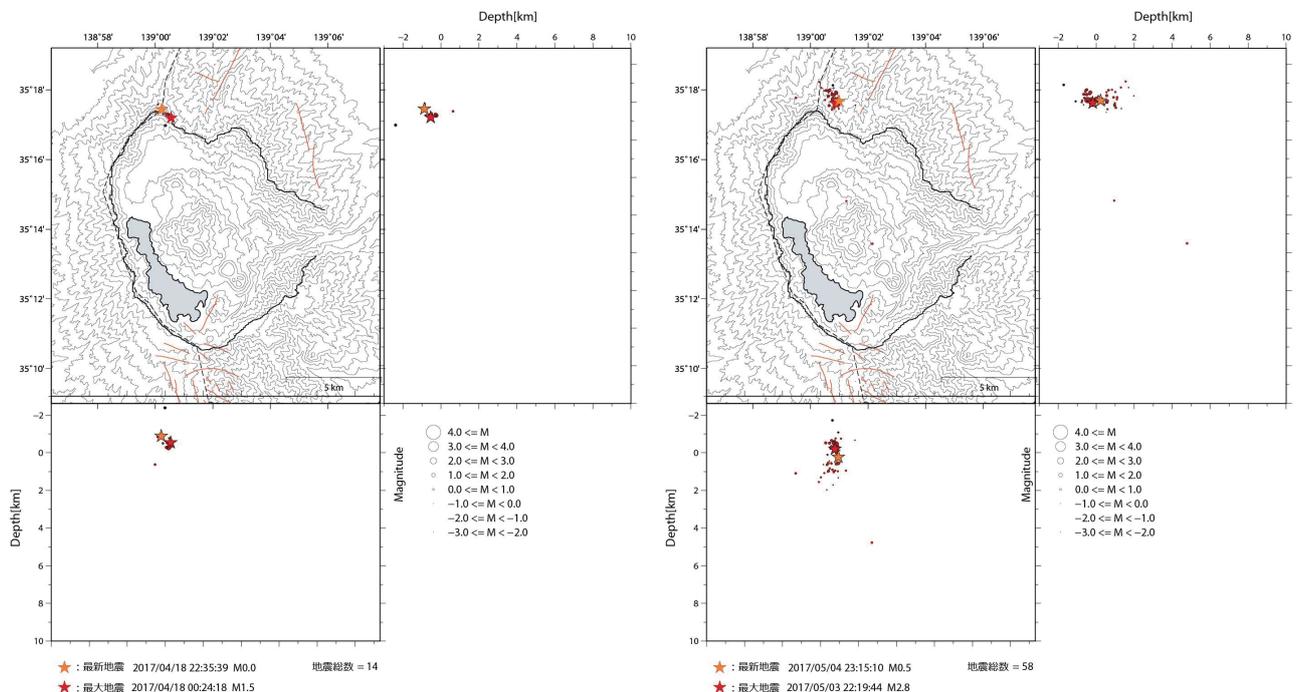


図5 金時山付近で観測された地震活動 (震源分布図)。左が 4/18、右が 5/2 ~ 4 を示す。

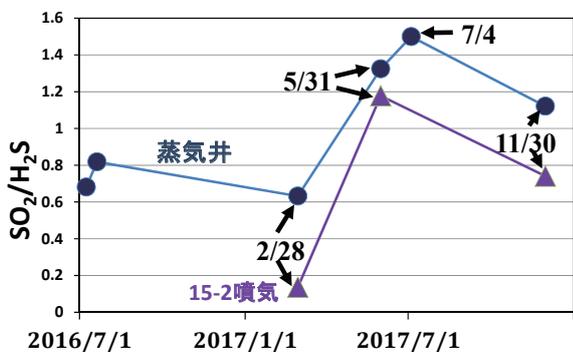


図6 大涌谷の蒸気井および 15-2 噴気孔における $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の時間変化。

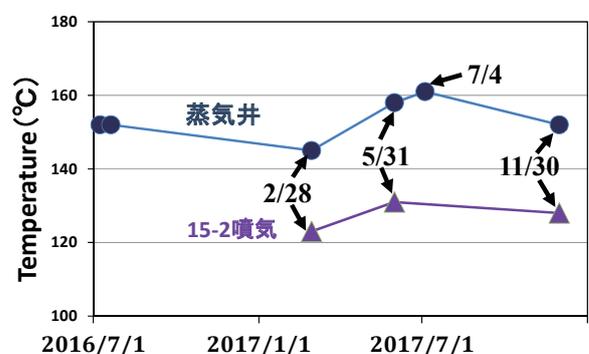


図7 大涌谷の蒸気井および 15-2 噴気孔における噴気温度の時間変化。

測できる可能性はあるものと考えている。また、代田ほか(2017)は、活動規模が大きかった2015年の方が活動の初期段階におけるC/S比の増加速度(傾き)が大きかったことから、その後の活動規模を推測するうえで、C/S比の増加速度(傾き)が指標の一つになる可能性があることを報告している。さらに、検知管法は測定が簡便である上、現地ですぐに結果が得られることから、火山活動の予測ツールとして、迅速な防災対応への貢献も期待できる。

6. まとめ

大涌谷北側斜面(E領域)の噴気孔における検知管を用いた継続的な火山ガス観測により、2013年および2015年の活動に引き続き、2017年においても火山ガス組成(C/S比)の上昇変化が観測された。2017年には顕著な群発地震活動は観測されていないが、山体の膨張を示す地殻変動や大涌谷の蒸気井および自然噴気孔における火山ガス組成の変化などから、2017年も火山活動の高まりがあったものと推察され、E領域の噴気孔において6月頃から認められたC/S比の上昇変化も火山活動の高まりに関連した変化であったと考えられた。それにもかかわらず顕著な群発地震活動を伴わなかった理由の一つとして、活動規模が小さかったことがあげられるが、2015年の活動において大涌谷一帯の地下構造が変化した可能性も否定できない。

また、2013年、2015年、2017年の全てにおいて、C/S比が20ぐらいまで低下した後に上昇変化に転じていることから、活発化後に低下していくC/S比の挙動から次の活動が近づいているかどうかを推測できる可能性はあるものと考えられた。

7. おわりに

本報告の期間外ではあるが、箱根山では2019年の3月上旬頃からやや地震数の多い状況が観測されるようになり、5月18日に群発的に地震が多発し、翌19日に噴火警戒レベルが2に引き上げられた。その後、地震活動は増減を繰り返しながらも次第に低調になり、10月7日に噴火警戒レベルは1に引き下げられた。また、山体の膨張を示す地殻変動も観測された。この活動に連動して、今回もE領域の噴気孔においてC/S比の上昇変化が観測されており、やはり20程度まで低下した後に上昇に転じている(代田ほか、2019)。2019年の活動に伴うC/S比の変化については、改めて報告する予定である。

謝辞

火山ガスの採取にあたり、箱根温泉供給株式会社、箱根町総務防災課、県災害対策課の方々にご協力いただきました。板寺一洋氏と萬年一剛氏の大変有益なコメントにより本稿は大幅に改善されました。また本研究の実施のために、以下の研究費を利用しました。ここに記して深く感謝します。災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究(2014~2016年度、東京大学地震研究所)、地震・火山噴火の解明と予測に関する公募研究(2017年度、東京大学地震研究所)、科学研究費助成事業「挑戦的萌芽研究15607310」(2015~2017年度、日本学術振興会)、次世代火山研究・人材育成総合プロジェクト「先端的な火山観測技術の開発」(2016~2017年度、文部科学省)、総合研究機構プロジェクト研究「レーザーによる大気拡散火山ガス観測法の開発と箱根火山モニタリング」(2016~2017年度、東海大学)

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, 温地研報告, 42, 49-56.
- 代田 寧(2013) 箱根火山において2013年1月から発生した群発地震活動に伴う噴気ガス組成の時間変化, 温地研報告, 45, 29-34.
- 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, 温地研報告, 49, 29-38.
- 代田 寧・大場 武・谷口無我・十河孝夫・瀧澤倫明・原田昌武(2019) 箱根山における火山活動活発化に伴う噴気組成の変化, 日本火山学会2019年度秋季大会講演予稿集.
- 原田昌武・小田原 啓・松沢親悟・代田 寧・板寺一洋・寺田暁彦(2012) 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, 温地研報告, 44, 55-62.
- 原田昌武・行竹洋平・宮岡一樹・本多 亮・板寺一洋・道家涼介・里村幹夫・吉田明夫(2013) 箱根火山における群発地震活動の分類, 温地研報告, 45, 1-8.
- 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 and Space*, 70:68. doi: 10.1186/s40623-018-0844-2

Ohba,T.,Yaguchi,M.,Nishino,K.,Numanami,N.,Daita,Y.,Sukigara,C.,Ito,M. and 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*. 71:48. doi: 10.1186/s40623-019-1027-5

Ozawa,T. (1968) Chemical analysis of volcanic gases: I. Chemical analysis of volcanic gases containing water vapor, hydrogen chloride, sulfur dioxide, hydrogen sulfide, carbon dioxide, etc, *Geochem. Int.*, 5, 939-947.

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，*湿地研観測だより*，53，1-12.