

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

代田 寧*

Temporal variation of the fumarolic gas composition during the swarm earthquake activity in Hakone volcano in 2013

by

Yasushi DAITA*

1. はじめに

箱根火山では、しばしば群発地震が発生するなど活動が活発化し、近年では 2001（平成 13）年に温泉地学研究所によるテレメーター観測の開始以降、最大規模の活動があり、山体がわずかに膨張するような地殻変動が観測された（代田ほか、2009）。この活動では、大涌谷にある深度 500 m の蒸気井が暴噴したほか、群発地震活動の終息後には、それまで噴気活動が認められなかった大涌谷北側斜面の数カ所において新たな噴気（以後、新噴気域とよぶ）も出現した（辻内ほか、2003）。その後も、箱根火山では 2006（平成 18）年、2008（平成 20）年、2009（平成 21）年、2011（平成 23）年に、比較的規模の大きい群発地震活動が発生している。

大場ほか（2008）は、2001（平成 13）年の活動で暴噴した蒸気井およびその蒸気井から 200m ほど南側に位置する自然噴気孔において火山ガスの採取・分析をおこない、それらの火山ガス成分の時間変化について検討した結果、2001（平成 13）年、2006（平成 18）年、2008（平成 20）年の群発地震活動に関連して火山ガス中の C/S 比（硫化水素と二酸化硫黄の合計濃度に対する二酸化炭素濃度の割合）が増加する可能性を指摘した。さらに、代田・板寺（2010）は、2001 年以後に出現した噴気孔（原田ほか（2012）における B 領域に位置する）において、継続的に噴気ガスの採取・測定をおこない、新噴気域においても群発地震活動に関連して火山ガス成分の C/S 比が増加する可能性を示し、引き続き観測を継続していくことの必要性を指摘した。このように、群発地震活動（火山活動の活発化）と火山ガス組成の変化との関連性が明らかになりつつある。

箱根火山では、2013（平成 25）年 1 月から主に中央火口丘直下を震源とする群発地震活動が発生し、山体のわずかな膨張を示す地殻変動も観測された（板寺ほか、

2013）。地震活動や地殻変動の観測結果から、この活動の推移は 2001（平成 13）年の活動に類似していたものの、活動の規模は数分の 1 程度であった。著者は、今回の群発地震活動が発生する 10 ヶ月ほど前から、新噴気域の中でも、近年、特に噴気活動が活発になっている領域（原田ほか（2012）における E 領域）に位置する噴気孔において、数ヶ月に 1 回程度の頻度で噴気ガスの採取・測定をおこなっていた。今回、群発地震活動が発生したことから、測定頻度を 10 日に 1 回程度に増やし、継続的に噴気ガスの採取・測定を実施した。その結果、大場ほか（2008）などの従来調査に比べて、時間分解能の高いデータを得ることができた。本報告では、その調査結果に基づき、噴気ガスの組成変化と群発地震活動との関連について検討した結果を報告する。

2. 噴気ガスの採取・分析方法

噴気ガスの採取・分析を実施しているのは、原田ほか（2012）における B 領域および E 領域に位置する噴気孔である。本報告では、主に E 領域にある噴気孔（E 噴気孔とよぶ）の調査結果について報告する。E 噴気孔における観測は、2012（平成 24）年 3 月 13 日から 2013（平成 25）年 9 月 26 日まで実施し、2013 年の群発地震活動以後については、ほぼ 10 日に 1 回程度の頻度でおこなった。また、B 領域では、代田・板寺（2010）以降も調査を継続してきた噴気孔（B1 噴気孔とよぶ）が、2011（平成 23）年 1 月に閉塞してしまったため、5m ほど離れた別の噴気孔（B2 噴気孔とよぶ）で観測を続けている。それぞれの噴気孔の位置は、図 1 に示したとおりである。

噴気ガスの採取・分析方法には、一般に Ozawa（1968）の方法が用いられているが、時間と労力を要することから、測定頻度を増やすには限界がある。今回は、ある程度の頻度で、継続的に噴気ガスの組成変化を調べる目的

* 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 45 巻, 29-34, 2013 (この原稿はホームページにてカラーでご覧いただけます。)

から、検知管による簡易な測定法を適用した。具体的には、代田・板寺（2010）の方法3と同様であり、噴気孔にチタン製のパイプを挿入し、二口注射器で吸引して噴気ガスを採取する方法である（写真1）。チタン製パイプと二口注射器の間には、氷水で冷却した捕集ビンが取り付けられており、噴気ガスは、水分が除去された後、二口注射器内に導入される。この水分除去後のガスについて、硫化水素、二酸化硫黄、二酸化炭素、酸素の濃度

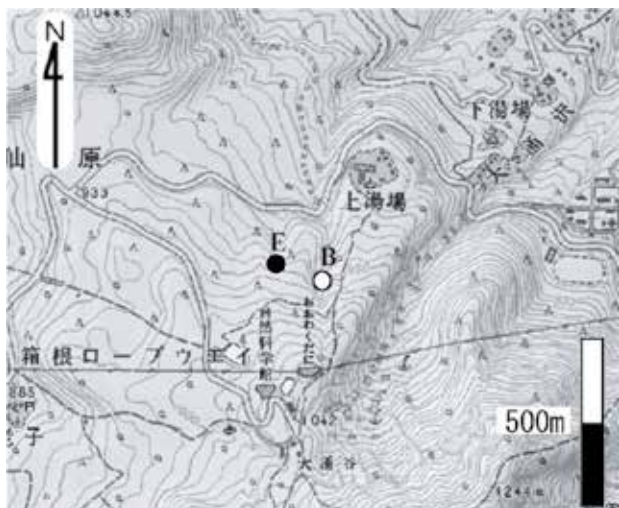


図1 噴気孔の位置。●印が本報告の噴気孔（原田ほか（2012）のE領域に位置する噴気孔）で、○印は代田・板寺（2010）で調査した噴気孔（原田ほか（2012）のB領域に位置する噴気孔）である。国土地理院発行の2万5千分の1地形図「箱根」を使用した。



写真1 噴気ガス採取の様子。チタン製のパイプを噴気孔に差し込み、二口注射器で吸引して噴気ガスを採取する。その際、チタン製のパイプと二口注射器の間に氷水で冷却した捕集ビンを取り付け、噴気ガス中の水分を除去する（代田・板寺（2010）の方法3と同様）。水分除去後のガスについて、硫化水素、二酸化硫黄、二酸化炭素、酸素の濃度を検知管で測定する。

を検知管で測定した。噴気ガスの採取時に空気が混入すると、濃度の測定結果に影響を及ぼすことが想定される。そのため、各測定日において、噴気ガスの採取・測定を複数回実施し、それらのうち酸素濃度が最も少ない結果を、最も空気の混入が少ないものとして、その日の観測値とした。

3. 2013（平成25）年1月から発生した群発地震活動の概要

箱根火山において2013（平成25）年1月から発生した群発地震活動の詳細については、板寺ほか（2013）にまとめられている。ここでは、次節で議論する噴気ガス組成の変化と地震活動との関連性にポイントにおいて、地震活動の推移を時系列で整理しておく。地震の回数は温泉地学研究所の地震カタログによるものである。

箱根火山における1日あたりの地震数の推移でみると、2012（平成24）年12月の時点では、平均1回程度と定常的な状態であったが、2013（平成25）年1月3日から10日までは3回程度に増加した。1月11日は10回、12日は16回と1日10回を超すようになり、15日以降は1日20回以上に増加した。17日には1日56回の地震が発生し、それ以降は非常に地震数の多い状態が続いた。その後、2月初旬にやや地震数が減少したが、2月7日に1日で153回の地震が発生し、10日には今回の活動で最大規模のM2.3の地震が発生した。2月18日以降は地震数が減少し、その後4月12日（1日に47回）と16日（1日に27回）に一時的に地震数が増加した。

ポイントとなるのは、1月11日頃から地震が増加し始め、17日から多発、約1ヶ月間地震数の多い状態が続き、2月18日から地震数が減少、4月12日と16日に一時的に地震数が増加した、ということである。

4. 結果および考察

4.1. E噴気孔のガス組成

E噴気孔における観測結果を表1に示した。二酸化硫黄については、全ての観測機会において検出限界（0.5ppm）以下であったため表には示していない。二酸化硫黄は水に溶解しやすく、さらに、大涌谷噴気地帯ではもともと濃度が低いことに加えて、熱水系が発達している（大場ほか、2007）ため、火山ガスが上昇する過程で容易に除去されてしまうと考えられる。この結果は、これまでにB領域の噴気孔で観測された結果（棚田ほか、2008；代田・板寺、2010）と同様である。

表1に示した酸素濃度の実測値は、いずれも数%以下と低く、酸素が全く検出されない場合もあることから、

表1 E噴気孔の観測結果。換算値は、酸素濃度が全て空気の混入によるものと仮定したときの計算値を示す。

調査日	実測値			換算値		G/S比
	H ₂ S濃度(%)	CO ₂ 濃度(%)	O ₂ 濃度(%)	H ₂ S濃度(%)	CO ₂ 濃度(%)	
2012/3/13	1.78	77	4.0	2.20	95	43.2
2012/6/14	2.44	86	0.5	2.50	88	35.1
2012/12/13	3.02	67	6.5	4.38	97	22.2
2013/1/24	2.20	75	5.0	2.89	98	34.0
2013/1/31	2.20	83	3.5	2.64	99	37.5
2013/2/7	2.20	99	0.0	2.20	99	45.0
2013/2/20	1.82	91	0.0	1.82	91	50.0
2013/2/26	1.52	88	1.5	1.63	95	58.0
2013/3/7	1.75	95	0.5	1.79	97	54.3
2013/3/14	1.76	94	1.0	1.85	98	53.1
2013/3/26	1.77	91	1.5	1.91	98	51.4
2013/4/11	1.62	88	2.5	1.84	100	54.4
2013/4/19	1.67	90	2.0	1.85	99	53.8
2013/5/2	1.71	90	2.0	1.88	99	52.8
2013/5/9	1.75	86	2.6	2.00	98	49.1
2013/5/16	1.78	88	0.0	1.78	88	49.4
2013/5/23	1.84	85	0.3	1.86	86	46.3
2013/5/31	1.96	88	0.0	1.96	88	44.9
2013/6/10	1.98	84	0.7	2.05	87	42.4
2013/7/11	1.98	79	1.0	2.08	83	39.9
2013/7/19	2.07	85	0.7	2.14	88	41.1
2013/7/30	2.04	83	0.7	2.11	85	40.4
2013/8/7	2.20	81	0.4	2.24	83	36.8
2013/8/26	2.38	88	0.2	2.40	89	37.0
2013/9/10	2.53	88	0.7	2.62	91	34.8
2013/9/17	2.42	77	2.8	2.79	89	31.8
2013/9/26	2.86	86	0.5	2.93	88	30.1

噴気ガス中には、もともと空気(酸素)は含まれておらず、測定された酸素はサンプリング時における空気の混入とみなすことができる。そこで、検知管により測定された酸素濃度が全て空気の混入によるものと仮定して、硫化水素と二酸化炭素の実測濃度を補正し、換算値として表1に示した。なお、空気中の酸素、硫化水素、二酸化炭素の濃度は、それぞれ21%、0%、0%とした。二酸化炭素は空気中に400ppm(0.04%)程度含まれているが、噴気ガス中の二酸化炭素濃度(80%以上)と比較して遥かに少ないので、近似的に0%とした。以後の議論は、この換算値に基づいておこなうこととする。

E噴気孔における硫化水素濃度の時間変化を図2に示した。なお、硫化水素濃度の測定誤差については、検知管の繰り返し測定により検討したところ、±0.04%程度であった。図2には、B領域の噴気孔(B1およびB2)の測定結果も示しているが、それと比較してE噴気孔の硫化水素濃度がかなり高いことがわかる。

現地における目視によって、E領域の噴気活動はB領

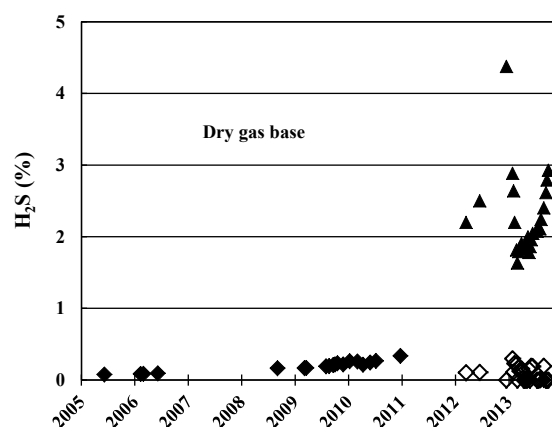


図2 硫化水素濃度の時間変化。それぞれ水分除去後の濃度であり、◆印はB1噴気孔、◇印はB2噴気孔、▲印はE噴気孔の結果をそれぞれ示す。

域と比較して非常に活発であることが認められる。また、原田ほか（2012）は、新噴気域を見渡せる外輪山から熱赤外カメラによる観測をおこない、新噴気域のうちE領域の噴気活動がとくに活発であることを報告している。さらに、萬年ほか（2013）は、大涌谷において50cm深地中温度の測定値から放熱量を算出し、E領域における放熱量が、従来から噴気活動が活発な大涌沢に匹敵するほど高いことを示した。これらのことから、E領域の噴気活動が非常に活発化しているために、E噴気孔ではB領域の噴気孔に比べて硫化水素濃度が高くなっている可能性が考えられる。

E噴気孔における硫化水素濃度の時間変化（図3）について詳しくみると、群発地震発生前の2012（平成24）年12月までは、時間の経過とともに硫化水素濃度は増加している。代田・板寺（2010）は、定常的な状態におけるB1噴気孔の硫化水素濃度について、火山ガスが上昇する経路での硫化水素と岩石中の2価鉄との反応により硫化水素が除去されており、時間の経過とともにガスの通路を構成する岩石中の2価鉄が消費されて硫化水素の除去反応が抑制されるため、硫化水素濃度が次第に高くなると類推している。群発地震発生前のE噴気孔の硫化水素濃度の変化も、同様な状況を反映している可能性が考えられる。

これに対し、地震活動が活発化した2013（平成25）年1月以降、硫化水素濃度は低下に転じている。その後、わずかな濃度の増減はあるものの、少なくとも8月以降は定常的な状態に戻っているように見える。1月以降に観測された硫化水素濃度が低下する原因の解明については今後の課題であるが、火山活動の活発化に関連した変化である可能性が考えられる。Ohba *et al* (2011) は、

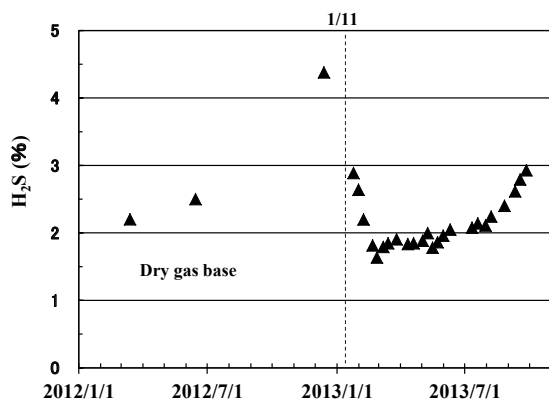


図3 E噴気孔における硫化水素濃度の時間変化。水分除去後の濃度であり、酸素濃度が全て空気の混入によるものとして換算した値で示す。

箱根火山で群発地震活動が発生した2001（平成13）年、2006（平成18）年、2008（平成20）年において、火山活動の活発化に伴い、地下深部から二酸化炭素と二酸化硫黄に富んだマグマ性ガスが供給されたと推定している。このような現象が起こっているとすると、相対的に硫化水素濃度が低下する可能性があり、今回の観測結果を説明できるかもしれない。

一方、図4のとおり、二酸化炭素濃度についてはバラツキが大きく、5月上旬以降は濃度が低下したように見えるものの、硫化水素濃度について見られたような系統的な変化は認められない。検知管の繰り返し測定により、二酸化炭素の測定誤差について検討したところ、±3.5%程度と誤差が大きかった。そのため、データのバラツキが大きくなり、変化が見えていない可能性が考えられる。上述したような、火山活動の活発化に伴い二酸化炭素に富んだマグマ性ガスの供給があったとすると、活発時に二酸化炭素濃度が高くなり、活動の終息に向かって低下する変化が現れると考えられる。

4.2. C/S比の時間変化と群発地震活動との関連性

大場ほか（2008）は、2001（平成13）年の活動で暴噴した蒸気井およびその蒸気井から200mほど南側に位置する自然噴気孔において火山ガスの採取・分析を継続的におこなった。その結果、2001（平成13）年の活発な火山活動で増加した噴気ガスのC/S比が、時間とともに低下していき、2006（平成18）年の活動に伴い増加、その後また低下していき、2008（平成20）年の活動で再び増加するという、階段状の時間変化を示すことを明らかにした。さらに、代田・板寺（2010）は、2001（平成13）年以後に出現したB1噴気孔において、継続的に

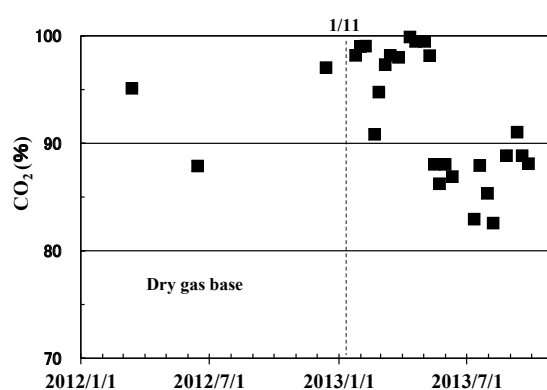


図4 E噴気孔における二酸化炭素濃度の時間変化。水分除去後の濃度であり、酸素濃度が全て空気の混入によるものとして換算した値で示す。

噴気ガスの採取・測定をおこない、新噴気域においても同様の変化が生じる可能性が高いことを示した。以上のように、大涌谷の噴気ガス中のC/S比については、定常時は低下傾向を示し、群発地震の発生（火山活動の活発化）に関連して増加し、活動が収まるとまた低下傾向に転じるといった変化が確認されている。

ここで、今回の活動において、E噴気孔のガス組成について同様なC/S比の変化があったどうか検討する。図5に、2012（平成24）年3月から2013（平成25）年9月までの、E噴気孔における噴気ガスのC/S比の推移を示した。図5によれば、群発地震が発生する前の2012（平成24）年12月まではC/S比が低下しており、これまでの報告と同様の変化をしていることがわかる。一方、群発地震が発生した2013（平成25）年1月以降は、C/S比は増加に転じている。これは、噴気ガス中の硫化水素濃度の低下が、主に寄与していると考えられる。図6に、2012（平成24）年12月13日から2013（平成25）年5月31日までのC/S比の推移をクローズアップして

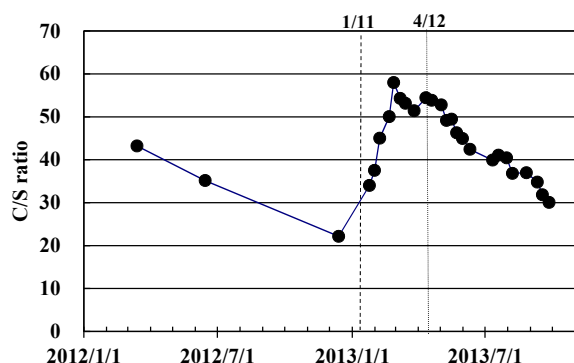


図5 C/S比の時間変化。

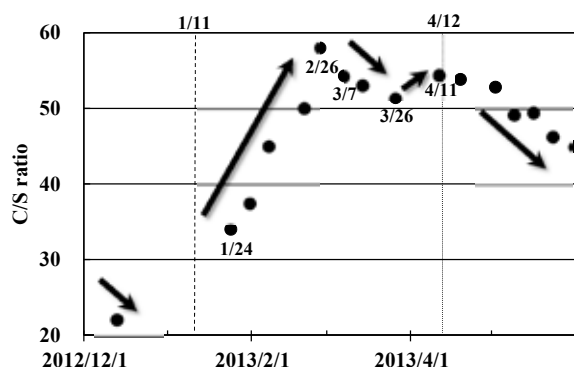


図6 C/S比の時間変化（2012/12/13から2013/5/31まで）。C/S比は、1月初旬からそれまで低下傾向だったのが増加に転じ、2/26まで増加が続く。その後、3/26までまた低下傾向になり、4/11に増加した。その後はまた低下傾向に転じた。

示した。図中、矢印で示したように、それまで低下傾向だったC/S比は、1月初旬から増加傾向となり、2月26日まで増加が続いたのち再び低下傾向に転じている。3節で述べたように、地震数は2月18日から低下しており、噴気ガス組成の方がやや遅れて変化したことになる。このC/S比の低下傾向は3月26日までの約1ヶ月間続いており、その間の地震活動も低調であった。4月11日に再びC/S比が増加し、翌12日には、一時的な地震数の増加が観測されている。4月11日の直前の観測が3月26日であり、2週間程度間隔が空いているため、いつからC/S比が増加傾向に転じたか特定することはできないが、少なくとも1日程度は地震活動の活発化に先行して噴気ガス組成に変化が生じた可能性がある。その後C/S比は低下に転じたが、地震活動はやはり低下している。

図7には、C/S比の時間変化について、地震活動が活発化する前の2012（平成24）年12月までと、活発化した後の2013（平成25）年1月から2月までの、各々の期間における最小二乗法による近似線を示した。活動前後の近似線の交点は1月5日頃であり、この日からC/S比が増加に転じたと断定することはできないが、地震数が顕著に増加し始めた1月11日より前に、噴気ガス組成の変化が生じた可能性がある。

以上のように、2013（平成25）年1月から始まった群発地震活動に際して、E噴気孔における噴気ガスのC/S比についても、大場ほか（2008）が報告しているのと同様に、群発地震の発生（火山活動の活発化）とともに増加傾向に転じ、地震活動が低調になるとともに低下傾向へと変わる変動を確認することができた。さらに、今回、群発地震発生後から測定頻度を高め、時間分解能の

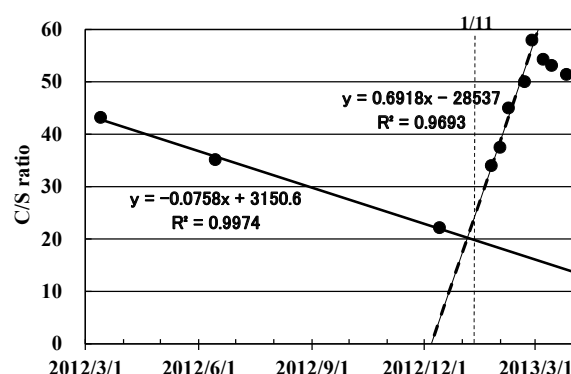


図7 C/S比の時間変化（2012/3/13から2013/3/26まで）。実線は2012/3/13から12/13までの線形近似線を、破線は2013/1/24から2/26までの線形近似線をそれぞれ示す。

高いデータが得られたことから、群発地震の発生に先行して C/S 比の増加が生じる可能性も見いだされた。

5. おわりに

これまでの研究成果により、群発地震活動に関連して大涌谷における噴気ガス中の C/S 比が増加する可能性が指摘されてきた(大場ほか(2008);代田・板寺(2010))が、測定頻度が低いため、時間変化についての詳細は明確ではなかった。今回、2013(平成25)年1月から箱根火山で活発化した群発地震活動に際して、測定頻度を10日に一回程度に高めることで、時間分解能の高いデータに基づき、地震活動の消長と、大涌谷地熱地帯における噴気ガス組成の変動との関連について詳細に把握することができた。その結果、噴気ガス組成(C/S比)が、地震活動の活発化に先行して増加し、活動低下とともに減少する変化を確認することができた。火山活動の消長に応じてガス組成が変化するという事は、今後、活動が活発化するのか、終息に向かうのかを判断する有力なデータとなりうることを意味しており、今回の観測結果は、箱根火山における火山活動の予測において、噴気ガス組成の連続観測が有効な手段であることを示している。今後は、噴気ガス組成の自動連続観測装置の開発や、火山活動の活発化に対応して噴気ガス中の C/S 比が変化するメカニズムの解明が課題である。

謝辞

噴気ガスの調査および結果の解釈においては、東海大学理学部教授の大場武氏に大変貴重な意見を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

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, 温地研報告, 42, 49-56.

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.

板寺一洋・代田寧・本多亮・原田昌武・行竹洋平・道家涼介・宮岡一樹・萬年一剛(2013) 2013年1~2月の箱根火山群発地震活動について(概報), 温地研報告, 45, 17-28.

萬年一剛・原田昌武・板寺一洋・代田寧・寺田暁彦(2013) 箱根大涌谷における浅部比抵抗構造と地熱活動, 日本火山学会2013年度秋季大会講演予稿集, 155.
大場武・澤毅・平徳泰・大和田道子・森川徳敏・風早康平(2007) 箱根カルデラ中央火口丘熱水系における火山性流体の化学的進化, 温地研報告, 39, 1-42.

大場武・代田寧・澤毅・平徳泰・攪上勇介(2008) 箱根カルデラ中央火口丘大涌谷地熱地帯における火山ガス組成の時間変化, 温地研報告, 40, 1-10.

Ohba, T., Daita, Y., Sawa, T., Taira, N. and Kakuage, Y. (2011) Coseismic changes in the chemical composition of volcanic gases from the Owakudani geothermal area on Hakone volcano, Japan, Bull Volcanol, 73, 457-469.

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.

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, 温地研報告, 40, 23-28.

辻内和七郎・鈴木征志・粟谷徹(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, 温地研観測だより, 53, 1-12.