

報告(Note)

箱根山大涌谷の蒸気井および自然噴気孔から放出される火山ガス組成の変化

代田 寧, 十河孝夫*, 五十嵐恵美子, 藤松 淳**, 板寺一洋**

(調査研究部, *大気水質課, **温泉地学研究所)

Temporal variation of the volcanic gas composition emitted from the steam well and the fumarole at Owakudani in Hakone volcano, Japan

Yasushi DAITA, Takao SOGO*, Emiko IGARASHI, Jun FUJIMATSU** and Kazuhiro ITADERA**

(Research Division, *Air and Water Quality Division, **Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture)

キーワード: 大涌谷, 火山ガス, 時間変化, 火山活動

1 はじめに

箱根山は、しばしば群発地震が発生する活火山である。2001年に活発化した際には、群発地震の発生に加え、山体のわずかな膨張を示す地殻変動が観測された¹⁾。さらに、大涌谷に温泉造成のため掘削された蒸気井(深度500m)が地下の圧力上昇により制御不能(暴噴状態)となった²⁾ほか、これまで噴気活動が認められなかった大涌谷の北側斜面の複数か所で新たな噴気が出現する^{2,3)}など、表面現象にも顕著な異常が確認された。その後、2006、2008、2009、2013年に山体膨張を伴う比較的規模の大きな群発地震活動が起こった⁴⁾が、これらの活動は表面現象の異常を伴わなかった。そして、2015年には山体の膨張、地震活動の活発化、2001年の活動以来となる蒸気井の暴噴を経て、大涌谷においてごく小規模ながら水蒸気噴火が発生し、新たな火口や噴気孔が形成されるなど、非常に活発化した⁵⁾。

2015年の活動では、5月6日に噴火警戒レベルが2(火口周辺規制)に引き上げられ、大涌谷園地内は立入禁止となり、さらに水蒸気噴火の発生に伴い、6月30日には噴火警戒レベルは3(入山規制)にまで引き上げられた。その後、地震活動が低下し、地殻変動も停滞したことから、11月20日に噴火警戒レベルは1(活火山であることに留意)に引き下げられたが、火山ガス濃度が高いことなどから大涌谷園地内の立入規制は継続され、水蒸気噴火の発生から1年以上経過した2016年7月26日に

なってようやく同園地の一部が開放された。しかしながら、2021年12月現在においても大涌谷自然研究路内は立入規制が継続されたままであり、全面開放にまでは至っていない。

大涌谷では深度数百メートルの蒸気井が複数掘削され、放出される蒸気を温泉造成用水(地下水)と混合させることによる温泉造成事業が営まれている⁶⁾。これらの蒸気井や火口・噴気孔からは、二酸化硫黄(SO₂)、硫化水素(H₂S)、塩化水素(HCl)などの有害成分を含む火山ガスが放出され、風向や風速によっては駐車場周辺などの観光客等が立ち入ることができるエリアにおいても高濃度(園地内で屋内退避や避難などの規制措置が行われる濃度)になる可能性がある^{7,8)}。

有害成分のうちSO₂およびHClは水への溶解度が高いため、温泉造成によって温泉水中に一定程度溶解し、大気への放出量は低減されることが期待される。ところが、大涌谷に複数ある蒸気井のうち、52号蒸気井(以後「52号井」という。)が2015年9月頃に損壊し、温泉造成ができずに有害ガスを含む火山ガスがそのまま大気中に放出された状態になっていた。当センターでは、2016年7月に52号井の改修工事が完了したことに伴い、再稼働(温泉造成用水投入)による有害ガスの低減効果を検証するための調査、ならびに2015年の活動で新たに形成された自然噴気孔(以後「15-2噴気」という。)中の火山ガス組成の調査を定期的に行なっており、2017年2月までの結果に

については、すでに報告した¹⁰⁾。本報では、2021年3月までの調査結果に基づき、温泉造成用水投入による有害ガスの低減効果や、52号井および15-2噴気から放出される火山ガス組成の変化と火山活動との関連性などについて検討したので報告する。

2 方法

調査地点は既報¹⁰⁾のとおりであり、図1に示した。また、対象物質および調査方法も既報¹⁰⁾のとおりであるが、以下に簡単に述べる。対象物質は火山ガスに含まれる成分のうち、有害性の高いH₂S、SO₂、HClの3成分とし、52号井の温泉造成用水の投入前・後、および15-2噴気について小沢の方法¹¹⁾に準じて火山ガスの採取・分析を行った。すなわち、全硫黄(H₂S+SO₂)及びHClについては、火山ガスを水酸化カリウム(KOH)溶液に吸収させ、その吸収液を全硫黄(H₂S+SO₂)は重量法により、HClはチオシアン酸水銀(Ⅱ)法により分析し、全硫黄(H₂S+SO₂)とHClの割合を求めた。また、よう素酸カリウム-よう化カリウム溶液による採取を行い、H₂Sは自然硫黄に、SO₂は硫酸イオンに酸化させることにより分別定量した。これらの結果から、H₂S、SO₂、HClの3成分の構成比率を求めた。なお、52号井の温泉造成用水の投入前および後については、以後、それぞれ「52号井(水投入前)」および「52号井(水投入後)」と呼ぶこととする。52号井(水投入前)のガス採取は、事業者が井戸の清掃をする際に、一時的に造成用水の投入を停止してもらい、20～



図1 調査地点(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)

30分程度の間を実施した。ガス採取の終了後、直ちに温泉造成を開始してもらい、1時間程度経過した後に52号井(水投入後)のガス採取を実施した。また、現地ではデジタル温度計によりガス温度の測定も行った。

3 結果および考察

3.1 火山ガス組成の構成比率とガス温度

表1に、H₂S、SO₂、HClの3成分の構成比率をガス温度とともに示した。一部の結果では、端数処理の関係上、合計が1にならない(表1中の*1)。また、52号井について、造成した温泉は井戸の下部から取り出す構造になっているものの、一部は上部から放出され、造成施設付近では雨のように降ることがある。2017年9月27日の調査では、サンプリングの準備中にその造成温泉の雨に降られ、サンプリング器材(ガラス器具等)の造成温泉による汚染が疑われる。造成水投入後の結果をみると、HClの構成比率はほとんどが0.01以下であるのに対して、2017年9月27日の調査のみ0.09とかなり高い。52号井で造成された温泉にはHClが含まれていることから¹²⁾、造成温泉が混入した可能性が高いと考えられる。なお、それ以降の調査では、同様の原因により器材が汚染されないよう十分に留意した。

3成分の構成比率を図2に示したが、上記の理由から2017年9月27日の結果は除外した。また、2017年7月4日は15-2噴気では採取できなかったため、比較用データとしては採用しなかった。調査を実施した4年半程度の期間を通じ、52号井(水投入前・後)および15-2噴気のすべてにおいて、特定の成分の比率が増加または減少するなどの一定の傾向は認められない。52号井(水投入前)の結果をみると、HClが2割前後を占めており、52号井が大涌谷におけるHClの放出源の一つになっていることがわかる。一方で、水投入後では、ほとんどHClは検出されず、温泉造成により大気への放出量は低減されていた。温泉造成による低減効果の詳細については、次節で述べる。また、ガス温度についてみると(図3)、52号井(水投入前)では、やや変動はあるものの、おおむね150～160℃で推移していたが、2020年11月18日以降、やや低下している可能性がある。一方、水投入後をみると、おおむね95℃前後で推移していたが、2020年11月18日と2021年3月5日ではや

表 1-1 蒸気井から放出される H₂S, SO₂, HCl の 3 成分の構成比率およびガス温度

	採取日	ガス温度	H ₂ S	SO ₂	HCl
52 号井 (水投入前)	2016/7/8	152 °C	0.47	0.32	0.21
	2016/7/20	152 °C	0.44	0.36	0.20
	2017/2/28	145 °C	0.52 ^(*1)	0.33 ^(*1)	0.16 ^(*1)
	2017/5/31	158 °C	0.37	0.49	0.14
	2017/7/4	161 °C	0.30	0.45	0.25
	2017/9/27 ^(*2)	154 °C	0.29	0.49	0.22
	2017/11/30	152 °C	0.33	0.37	0.30
	2018/3/2	158 °C	0.32	0.49	0.19
	2018/5/31	153 °C	0.44	0.32	0.24
	2018/8/29	159 °C	0.45	0.39	0.16
	2019/1/10	141 °C	0.47	0.39	0.14
	2019/11/28	151 °C	0.29	0.52	0.19
	2020/3/6	151 °C	0.36	0.44	0.20
	2020/7/31	150 °C	0.48 ^(*1)	0.37 ^(*1)	0.16 ^(*1)
	2020/11/18	143 °C	0.47	0.39	0.14
2021/3/5	131 °C	0.55 ^(*1)	0.29 ^(*1)	0.15 ^(*1)	
52 号井 (水投入後)	2016/8/5	95 °C	0.73	0.27	< 0.01
	2016/9/12	96 °C	0.82	0.18	< 0.01
	2016/11/21	95 °C	0.87	0.13	< 0.01
	2017/2/28	— ^(*3)	0.89	0.11	< 0.01
	2017/5/31	96 °C	0.45 ^(*1)	0.54 ^(*1)	< 0.01 ^(*1)
	2017/7/4	95 °C	0.45 ^(*1)	0.55 ^(*1)	0.01 ^(*1)
	2017/9/27 ^(*2)	95 °C	0.40	0.51	0.09
	2017/11/30	94 °C	0.62 ^(*1)	0.38 ^(*1)	0.01 ^(*1)
	2018/3/2	96 °C	0.39 ^(*1)	0.60 ^(*1)	0.02 ^(*1)
	2018/5/31	96 °C	0.69 ^(*1)	0.30 ^(*1)	< 0.01 ^(*1)
	2018/8/29	96 °C	0.60	0.40	< 0.01
	2019/1/10	96 °C	0.67	0.33	< 0.01
	2019/11/28	95 °C	0.44 ^(*1)	0.55 ^(*1)	< 0.01 ^(*1)
	2020/3/6	95 °C	0.45	0.55	< 0.01
	2020/7/31	95 °C	0.57	0.43	< 0.01
2020/11/18	91 °C	0.66	0.34	< 0.01	
2021/3/5	93 °C	0.95	0.05	< 0.01	

(*1) 端数処理の関係上、合計が 1 にならない

(*2) 準備中に造成温泉がサンプリング器材に混入した可能性あり

(*3) 温度計故障により測定できなかった

表 1-2 自然噴気孔から放出される H₂S, SO₂, HCl の 3 成分の構成比率およびガス温度

	採取日	ガス温度	H ₂ S	SO ₂	HCl
15-2 噴気 (自然噴気孔)	2017/2/28	—(*3)	0.88	0.12	< 0.01
	2017/5/31	131 °C	0.45	0.53	0.02
	2017/7/4(*4)	116 °C	0.50	0.50	< 0.01
	2017/9/27(*2,4)	114 °C	0.51(*1)	0.36(*1)	0.12(*1)
	2017/11/30	128 °C	0.55	0.40	0.05
	2018/3/2	127 °C	0.44	0.47	0.09
	2018/5/31	127 °C	0.48	0.29	0.23
	2018/8/29	117 °C(*5)	0.64(*1)	0.32(*1)	0.05(*1)
	2019/1/10	116 °C(*5)	0.71	0.21	0.08
	2019/3/14	119 °C	0.41	0.47	0.12
	2019/3/20	118 °C	0.41	0.51	0.08
	2019/6/3	118 °C	0.12(*1)	0.61(*1)	0.28(*1)
	2019/11/28	116 °C	0.29(*1)	0.54(*1)	0.17(*1)
	2020/3/6	116 °C	0.39	0.40	0.21
	2020/7/3	105 °C	0.38	0.61	0.01
	2020/7/31	116 °C	0.54	0.35	0.11
	2020/11/18	115 °C	0.69	0.25	0.06
2021/3/5	115 °C	0.68	0.22	0.10	

(*1) 端数処理の関係上、合計が 1 にならない

(*2) 準備中に造成温泉がサンプリング器材に混入した可能性あり

(*3) 温度計故障により測定できなかった

(*4) 採取環境が悪く、15-2 からガス採取できなかったため、近傍の自然噴気孔で採取した

(*5) 噴気孔の正確な位置が分からなかったため、測定に影響した可能性あり

や低い温度であった。52 号井（水投入後）のガス温度は、造成用水の温度や投入量などにより変動することが推定されるが、2020 年 11 月 18 日と 2021 年 3 月 5 日でやや低い温度となったのは、元となる蒸気自体の温度低下が影響している可能性も考えられる。

15-2 噴気は、噴火初日の 2015 年 6 月 29 日に新たに開口した噴気孔と考えられている¹³⁾。大涌谷では、2015 年の活動以前から複数の噴気孔が存在しており、それらの温度はほぼ水の沸点以下であった⁹⁾。それに対して、15-2 噴気の温度は 120°C 前後である。火山ガスは、地下深部から上昇してくる過程で低温の地下水と接触した場合、熱を奪われるため、地下水が優勢な場合には沸点以下の温度になる。一方で、地下水との接触が少ない場

合、沸点を超える温度になることがあり、これを過熱蒸気と呼ぶ。大涌谷の場合、1933 年までは過熱蒸気が存在が知られていたが、その後少なくとも 1973 年以降は確認されていない¹⁴⁾。15-2 噴気は過熱蒸気であり、その点で 2015 年の活発化以前から存在していた噴気孔とは異なる。さらにこのほかにも、2015 年の活動時やそれ以降に、水の沸点を超える多数の噴気孔が新たに形成された^{13,15)}。15-2 噴気では、調査当初の 2017 年 5 月 31 日が 131°C で最高値であり、その後はおおむね低下傾向を示した。2018 年 8 月 29 日以降はほぼ横ばいとなり、最近では 115°C 程度で推移している（図 3）。

15-2 噴気には、調査を開始した 2017 年 2 月 28 日には HCl は含まれていなかったが、2017 年 5 月

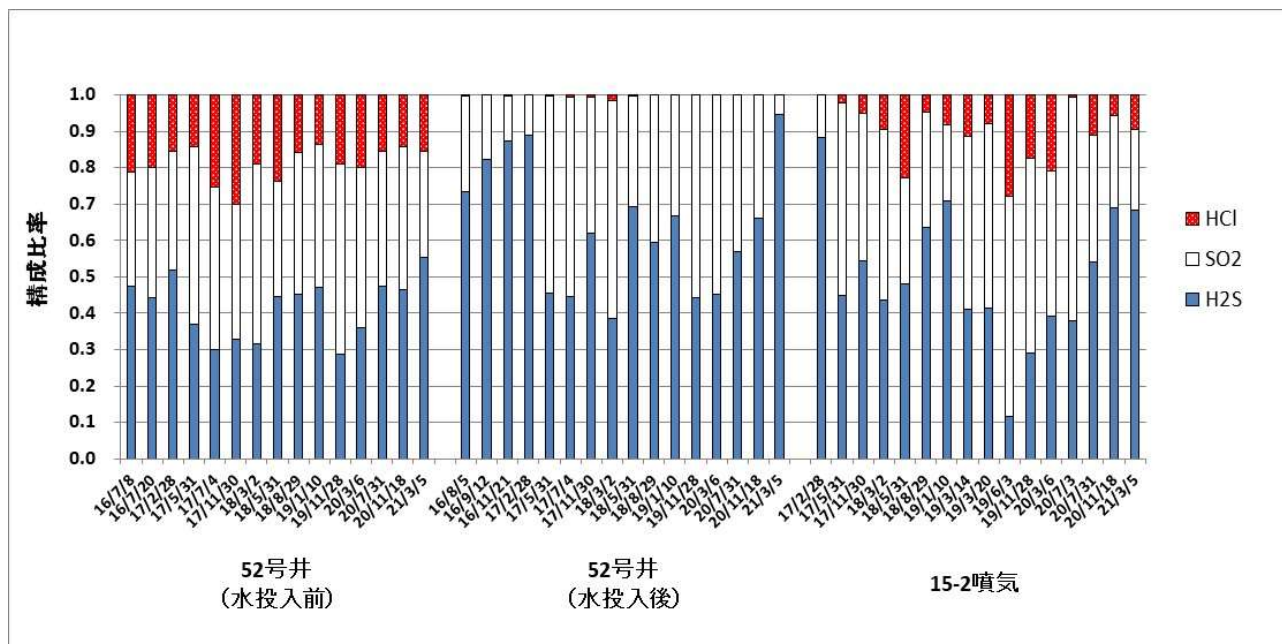


図2 H₂S, SO₂, HCl の3成分の構成比率

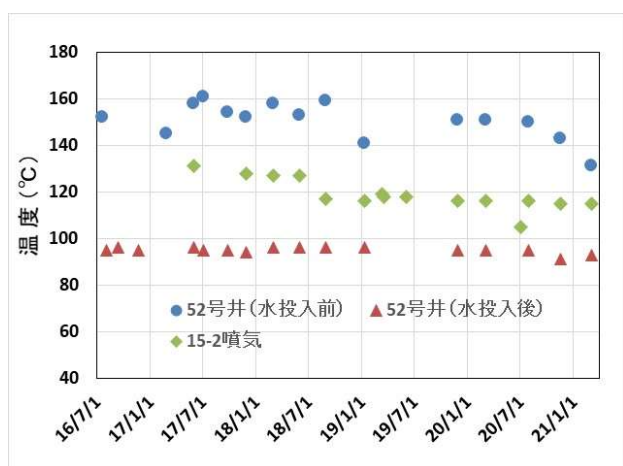


図3 ガス温度の時間変化

31日以降は全ての調査で含まれており(図2)、15-2噴気もHClの放出源となっていることがわかった。HClは3成分のうち、おおむね1割程度を占めているが、2018年5月31日や2019年6月3日など、2割以上を占めることもあった。大場ら⁹⁾は、2005年に大涌谷内の7つの自然噴気孔について詳細な火山ガスの採取・分析を行っている。その結果からH₂S, SO₂, HClの3成分の構成比率を求めると、H₂Sが98%を占め、SO₂とHClはそれぞれ1%程度であり、2015年の活動以前は、自然噴気孔から放出されるSO₂とHClの量はごくわずかであったと考えられる。一方、15-2噴気に

は、SO₂が一定程度含まれており、H₂Sと同程度かそれ以上の場合もみられ、SO₂の有力な放出源となっていることが確認された。また、15-2噴気と同様に2015年の活動時やそれ以降に形成された沸点を超える複数の噴気孔もSO₂の放出源となっている可能性がある。

3.2 温泉造成用水投入による有害ガスの低減効果

2015年の活動では、地震活動の低下や山体が膨張する地殻変動の停滞により、11月20日に噴火警戒レベルは1(活火山であることに留意)に引き下げられたが、火山ガス濃度が高いことなどから大涌谷園地内の立入規制は継続された。大涌谷園地内の立入規制の解除には火山ガス対策が重要であり、暴噴状態となっていた52号井から放出される火山ガスが懸念材料となっていた。水への溶解度が高いSO₂およびHClは、温泉造成によって温泉水中に一定程度溶解し、大気への放出量は低減されることが期待されるが、どの程度低減されるのかを検証した。

H₂Sの水に対する溶解度は他の2成分に比べて小さい(20°Cの水に対する溶解度:H₂S 0.33, SO₂ 9.4, HCl 70(単位はg/100g H₂O)¹⁶⁾ことから、既報¹⁰⁾と同様にH₂Sの温泉造成用水への溶解は無視できるものと仮定し、水投入前後における

表2 H₂S に対する SO₂ および HCl の比率

調査日	状況	H ₂ Sに対する比率			調査日	状況	H ₂ Sに対する比率		
		H ₂ S	SO ₂	HCl			H ₂ S	SO ₂	HCl
2016/7/8	水投入前	1	0.66	0.45	2018/5/31	水投入前	1	0.71	0.54
	(再稼働前)					水投入後			
2016/7/20	水投入前	1	0.81	0.45	2018/8/29	水投入前	1	0.87	0.41
	(再稼働前)					水投入後			
2016/8/5	水投入後	1	0.36	<0.01	2019/1/10	水投入前	1	0.83	0.29
	(再稼働後)					水投入後			
2016/9/12	水投入後	1	0.21	<0.01	2019/11/28	水投入前	1	1.81	0.67
2016/11/21	水投入後	1	0.14	<0.01		水投入後	1	1.25	<0.01
2017/2/28	水投入前	1	0.63	0.30	2020/3/6	水投入前	1	1.22	0.55
	後					水投入後			
2017/5/31	水投入前	1	1.31	0.38	2020/7/31	水投入前	1	0.78	0.33
	後					水投入後			
2017/7/4	水投入前	1	1.50	0.84	2020/11/18	水投入前	1	0.84	0.30
	後					水投入後			
2017/11/30	水投入前	1	1.12	0.91	2021/3/5	水投入前	1	0.53	0.30
	後					水投入後			
2018/3/2	水投入前	1	1.56	0.6					
	後				水投入後	1	1.54	0.04	

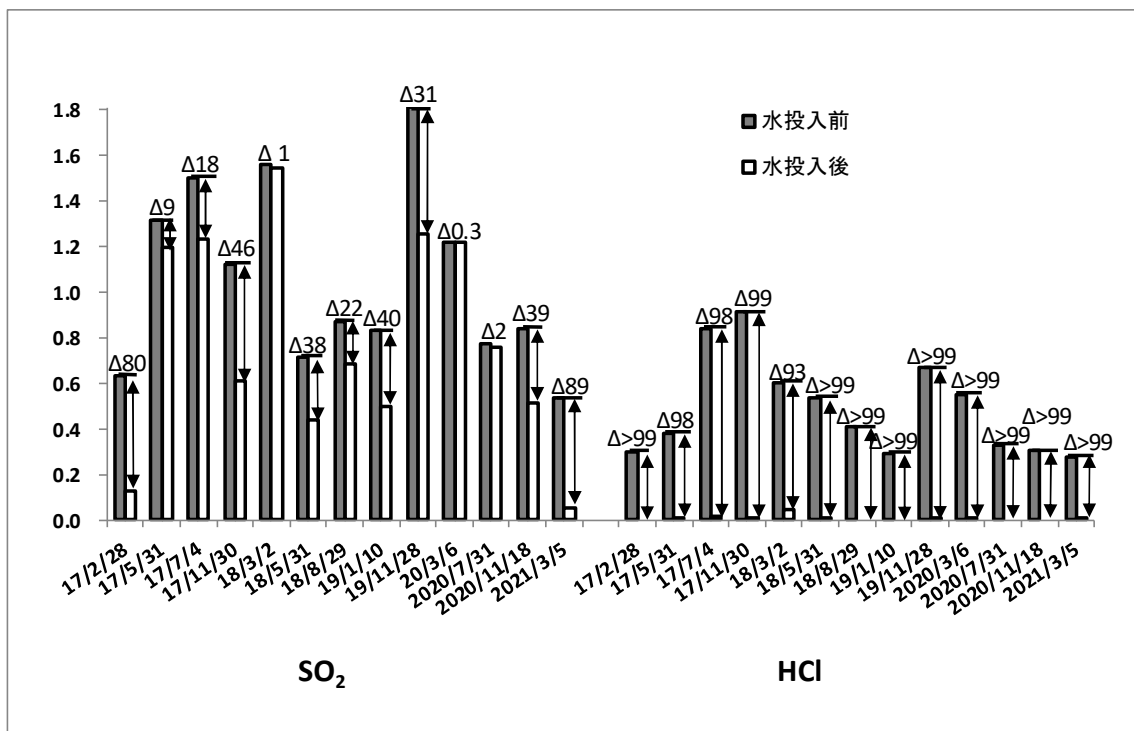


図4 52号井への水の投入効果（ΔはSO₂およびHClそれぞれの低減率）

H₂S に対する SO₂ および HCl の比率の変化から、それぞれの低減率を計算した。表2に、H₂S に対する SO₂ および HCl の比率を示した。図4には、同日に水投入前後で調査を実施した2017年2月28日以降について、水投入前後の比率および低減率（Δ）を示した。

図4より、HCl の低減率については、14回の調査中11回が99%以上、2回が98%であった。また、1回だけ98%未満（2018年3月2日）であったが、それでも低減率は93%であり、温泉造成を行うことによるHClの低減効果は非常に高く、温泉造成が行われている限り52号井から大気中へ

はほとんど放出されないことが明らかとなった。大涌谷は複数の蒸気井があるが、それらも同様に温泉造成によりHClの大気放出が抑制されていると考えられる。

一方、SO₂の低減率については、最小が0.3%（2020年3月6日）、最大が89%（2021年3月5日）であり、かなりのばらつきがみられた。全ての結果を単純に平均すると33%、極端に低かった3回（それぞれ低減率が0.3%、1%、2%）を除くと平均41%であり、温泉造成によりSO₂においても一定程度（平均3割から4割程度）の低減効果はあるものと考えられる。ただし、ほとんど低減されない場合もあることに注意が必要である。図5に、3成分におけるSO₂の構成比率と温泉造成によるSO₂の低減率との関係を示した。全体的には、SO₂の構成比率が高いと低減率は低くなる傾向であった。しかしながら、ばらつきが大きく、このことだけでは説明がつかないと考えられ、その他にも影響因子が存在するものと考えられる。この原因については、蒸気の勢い（蒸気放出量）などの放出源の状況の違いや、造成用水の投入量などの造成条件の違いが影響しているものと考えられる。2001年および2015年に火山活動が活発化した際、52号井は蒸気放出量が増加し、暴噴状態となった。大場ら¹⁷⁾によれば、52号井の蒸気放出量は、火山活動が活発化した2001年のデータはないものの、1年後の2002年7月には207 ton/dayと高く、その後火山活動の低下とともに急激に減少し、2003年10月には66 ton/day、2004年

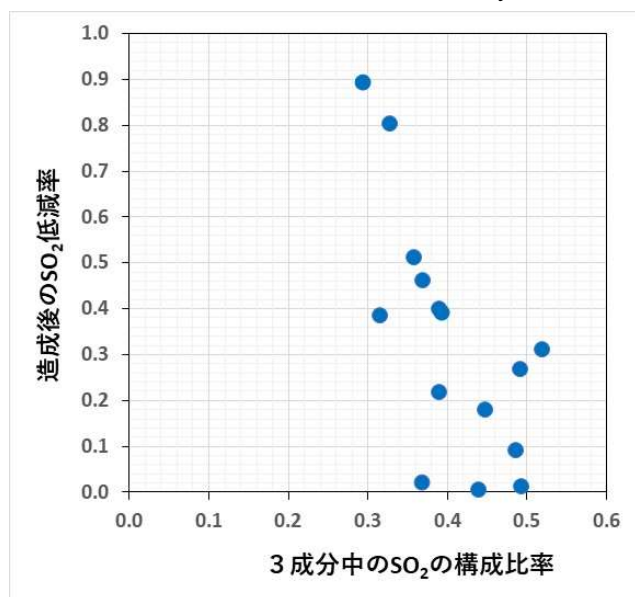


図5 SO₂の構成比率と温泉造成による低減率との関係

10月には36 ton/dayまで減少したことが報告されている。このように、蒸気放出量は火山活動の状況に応じて変動するものと考えられる。造成用水の投入量などの造成作業が一定であると仮定した場合、蒸気放出量が大きくなれば、同じSO₂濃度であっても低減率は下がるものと推定されるので、図5のばらつきの原因になりうるものと考えられる。逆にいえば、今後の課題とはなるが、これらのデータから蒸気放出量についての情報を得られる可能性もあるのではないかと考えられる。

3.3 火山活動との関連性

箱根山において、群発地震発生などの火山活動活発化に対応した火山ガス組成の変化が何度か確認されている¹⁸⁻²⁰⁾。代田ら²⁰⁾は、2001年の箱根山の活発化以後に大涌谷の北側斜面に新たに形成された噴気域（以後、「新噴気域」とよぶ（図1））において、継続的に噴気孔の調査を行ない、火山ガスに含まれる二酸化炭素（CO₂）とH₂Sの濃度比（CO₂/H₂S比）が、火山活動の活発化に伴い上昇し、活動の低下とともに下降することを見出した。さらに、火山活動が活発化した後の活動状況について、活発な状況が続いているのか、それとも終息に向かっているのかの今後の推移を予測する指標として有効であると述べている。また、複数の火山において、噴火の発生などの火山活動の活発化に伴い、CO₂/H₂S比以外にもSO₂放出率、Cl/S比、CO₂/SO₂比、SO₂/H₂S比、CO₂/H₂O比などが変化する事例が報告されている²¹⁾。そこで、52号井（水投入前）と15-2噴気においても、同様に火山活動活発化に伴う変化が認められるのかについて検討した。

上記に示した報告事例から、今回の測定成分ではHCl/H₂S比およびSO₂/H₂S比が活発化の指標になり得るのではないかと考え、52号井（水投入前）と15-2噴気におけるHCl/H₂S比およびSO₂/H₂S比の時間変化をそれぞれ図6および7に示した。箱根山では、2019年3月から徐々に火山性地震の発生頻度が高まり、5月に入るとさらに地震数が増加し、5月18日には154回、翌19日には290回の地震が群発的に発生したことから噴火警戒レベルが2に引き上げられるなど、火山活動が活発化した²²⁾。火山活動が活発な期間を正確に示すのは難しいが、5月に入ったところから明瞭に地震数が増加し、9月末にはほぼ定常的な地震数になって

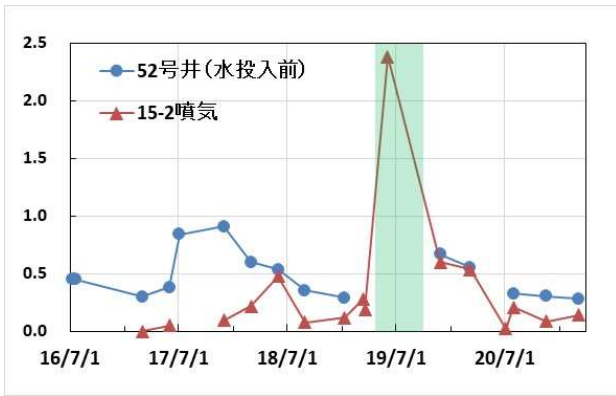


図6 HCl/H₂S 比の時間変化

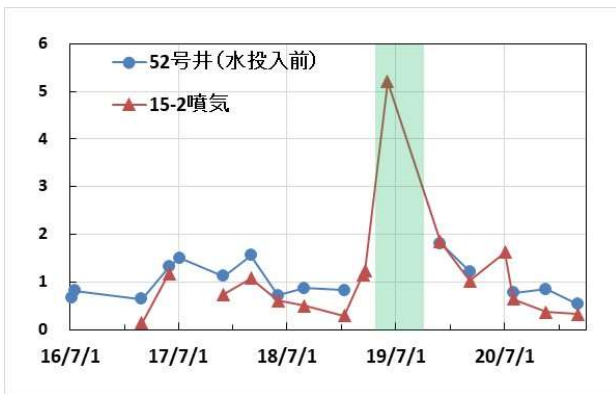


図7 SO₂/H₂S 比の時間変化

いたことから²²⁾、活発な期間はおおむね5月から9月とし、図6と7にハッチをかけて示した。

15-2 噴気の結果をみると、火山活動が活発であった2019年6月3日はHCl/H₂S比およびSO₂/H₂S比のどちらも顕著に高い値となっていた。そして、次に調査した11月28日にはどちらも低下していた。その後、多少の増減はあるものの、おおむね低下傾向が継続し、最新の2021年3月5日の結果では、2019年の活発化以前とほぼ同じ値まで低下していた。このような15-2 噴気の火山ガス組成は、上述した地震活動の推移とよく対応して変動しており、新噴気域の噴気ガス組成と同様に、火山活動の活動状況の把握に利用できる可能性があるものと考えられる。

一方、52号井(水投入前)については、火山活動活発化を受けた安全面の配慮から、2019年6月3日には調査できなかった。そのため、火山活動との対応については正確にはわからないが、HCl/H₂S比およびSO₂/H₂S比のどちらも、活発化前の2019年1月10日に対して活発化後の11月28日の結果が高い値であり、その後おおむね低下傾向が続いている。この変化傾向は、15-2 噴気と

類似しており、52号井においても活発化期間に上昇していた可能性も考えられ、火山活動の活発化に対応して変化することが期待される。しかしながら52号井については、調査にあたって温泉造成を停止してもらうなど事業者の協力が必須であり、現状では調査頻度の確保に課題がある。

3.4 大涌谷園地の安全対策に向けて

今回の結果から、蒸気井から放出される有害成分のうち、HClについては温泉造成による十分な低減効果が確認された。しかしながら、52号井をはじめとした蒸気井からはSO₂およびH₂Sが放出されている。また、15-2 噴気の状態からすると、2015年の活動およびそれ以降に形成された複数の自然噴気孔からも同様にSO₂およびH₂Sが放出されている可能性が高い。このため、数多くの観光客が立ち入る大涌谷では、これらの有害ガスに関わる安全対策が不可欠である。現在、大涌谷園地安全対策協議会では、観光客等が立ち入ることができる駐車場やロープウェイ大涌谷駅付近などにSO₂およびH₂S濃度の自動連続測定装置を設置し、常時ガス濃度のモニタリングを実施している。また、箱根山火山防災協議会では、「大涌谷周辺の観光客等の避難誘導マニュアル」を策定し、SO₂およびH₂S濃度の基準を設け、高濃度になった際には屋内退避や自然研究路の閉鎖などの対応措置を設定している²³⁾。このマニュアルでは、ガス濃度が基準値に達した場合には関係者にアラートメールが送信され、マニュアルに沿って対応することになっている。大涌谷における噴気活動は依然として活発であり、今後もSO₂およびH₂Sが放出されつづけると考えられ、これらのガス濃度が高くなるケースがあり得る。したがって、観光客等の安全確保のためには、マニュアルの適正な運用が重要である。

2014年の御嶽山噴火の際には、噴火警戒レベルが1の段階で噴火したため、多数の登山者が犠牲となった。箱根山の2015年噴火では、大涌谷園地内はすでに立入規制されていたため人的被害はなかったが、今後も同様に事前に立入規制できるかはわからず、火山活動の活発化の兆候をいち早くつかむことが重要となる。火山活動の活動状況の把握には主に地震・地殻変動観測が行われ、箱根山が2015年に活発化した際には火山性地震の顕著な増加や山体膨張を示す地殻変動が観測されている。また、本研究で着目した、15-2 噴気のと

HCl/H₂S 比と SO₂/H₂S 比も良い指標となり得る。52号井についても火山活動に対応した変化が期待される。一方で、火山活動がさらに活発化するのか、それとも静穏な方向に向かうのかなどの活動状況を把握するためには、測定頻度の確保が大変重要である。本報告の方法¹⁰⁾は作業が煩雑であり人手も必要となる。また、採取した試料を実験室に持ち帰って火山ガス成分を分析するが、分析工程が多岐にわたるため、結果が出るまでに10日間程度を要する。このようなことから、頻繁にサンプリングするのは難しい。万年ら¹⁵⁾は、15-2噴気の近傍で長期間用検知管を用いて、H₂S、SO₂、HClの測定を月2回の頻度で実施している。その結果、2019年の火山活動活発化に同期して、HCl/H₂S比およびSO₂/H₂S比が顕著に増加し、火山活動が低調になるとそれぞれ徐々に低下する変化を示したことを報告している。これらの変化は、本報で報告している結果(図6, 7)と同様である。長期間用検知管を用いた方法は、噴気孔から直接採取できないため、風向きにより他の噴気孔や蒸気井から放出される火山ガスの影響を受け、火山活動に伴う変化が捉えにくくなる可能性はあるものの、比較的安価で簡便に測定できるため、測定頻度を増やすことができる。また、短時間(万年ら¹⁵⁾の方法では1時間程度)で結果が出る迅速性もあることから、長期間用検知管を用いた方法は火山活動の状況把握に有効な方法となり得る可能性がある。以上のことから、本報告の方法では直接噴気孔から採取するため、火山ガス組成の変化を捉えやすい利点があるものの、測定頻度に課題があり、一方で長期間用検知管を用いた方法では、他の噴気孔や蒸気井の影響を受けて変化が捉えにくくなる可能性はあるもの、測定頻度を高められる特徴がある。このように、両方の方法にはメリットとデメリットがあり、それらを理解して使い分けていくことが、火山活動の状況把握には効果的であると考えられる。

4 まとめ

本報告では、大涌谷の蒸気井(52号井)について温泉造成用水投入による有害ガスの低減効果や、52号井および15-2噴気から放出される火山ガス組成の変化と火山活動との関連性などについて検討した。その結果をまとめると以下のとおりである。

1) 52号井から放出されるHClについては、温泉

造成を行うことによる低減率がほぼ98%以上であり、低減効果が非常に高く、温泉造成が行われている限り大気中にはほとんど放出されていないことがわかった。

2) 一方、SO₂については、平均的には3割から4割程度の低減率であったが、ばらつきが大きく、ほとんど低減されないこともあり、温泉造成による一定程度の低減効果はあるものの、大気中への放出源となっていることがわかった。

3) 2015年の活動以前には、自然噴気孔からはSO₂とHClはほとんど放出されていなかったが、2015年の活動で形成された15-2噴気にはSO₂とHClが含まれていた。H₂Sを含めた3成分でみると、HClはおおむね1割程度であったが、SO₂はH₂Sと同程度かそれ以上の場合もあった。2015年の活動およびそれ以降に、15-2噴気と同様に沸点を超える複数の噴気孔が形成されており、これらの噴気孔もSO₂の有力な放出源となっている可能性があると考えられた。

4) 2019年の火山活動活発化に対応して、15-2噴気のHCl/H₂S比およびSO₂/H₂S比が明瞭に増加し、活動が低調になるとそれぞれ低下したことから、これらのガス比が火山活動の状況を把握するための良い指標になると考えられた。

5) 火山活動の状況把握を目的とした場合、測定頻度の確保が大変重要となるが、本報告の方法では測定頻度に限界がある。その点を改善する手法としては長期間用検知管を用いた方法があるが、この方法にも課題がある。このようなことから、火山活動の状況把握には、これらの方法のメリットとデメリットを踏まえた使い分けが効果的であると考えられた。

謝辞

本調査を実施するにあたり、株式会社箱根温泉供給にご配慮いただきました。また、箱根町総務防災課、県災害対策課(現危機管理防災課)、元温泉地学研究所(現気象庁)の本間直樹氏と瀧沢倫明氏には火山ガスのサンプリングにご協力いただきました。ここに記すとともに深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 代田 寧, 棚田俊收, 丹保俊哉, 伊東 博, 原田昌武, 万年一剛: 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 (2009)

2) 辻内和七郎, 鈴木征志, 粟屋 徹: 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, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 53, 1-12 (2003)

3) 原田昌武, 小田原 啓, 松沢親悟, 代田 寧, 板寺一洋, 寺田暁彦: 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, 神奈川県温泉地学研究所報告, 44, 55-62 (2012)

4) 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: 箱根火山における群発地震活動の分類, 神奈川県温泉地学研究所報告, 45, 1-8 (2013)

5) Mannen, K., Yukutake, Y., Kikugawa, G., Harada, M., Itadera, K. and Takenaka, J.: 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 (2018)

6) 箱根温泉供給株式会社: 蒸気井温泉について, http://www.hakoneonsen.com/hot_spring.html (参照; 2021.8)

7) 池貝隆宏, 十河孝夫, 代田 寧, 吉田直哉, 菅野重和: 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 (2017)

8) 代田 寧, 十河孝夫: 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 (2020)

9) 大場 武, 澤 毅, 平 徳泰, 大和田道子, 森川徳敏, 風早康平: 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, 神奈川県温泉地学研究所報告, 39, 1-42 (2007)

10) 十河孝夫, 秀平敦子, 代田寧, 本間直樹: 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 (2017)

11) 小沢竹二郎: 地球化学におけるガス分析法 (I) – 火山ガス – 分析化学, 17, 395-405 (1968)

12) 菊川城司, 萬年一剛, 本間直樹: 大涌谷における湧出水、温泉水等のモニタリング結果 (2015~2017年), 神奈川県温泉地学研究所報告, 50, 69-93 (2018)

13) 萬年一剛, 菊川城司, 宮下雄次, 山口珠美, 丹保俊哉, 本間直樹: 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, 神奈川県温泉地学研究所報告, 50, 19-44 (2018)

14) 萬年一剛: 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 (2009)

15) 萬年一剛, 菊川城司, 宮下雄次, 加藤照之: 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 (その2), 神奈川県温泉地学研究所報告, 52, 1-14 (2020)

16) 社団法人日本化学会: 気体の溶解度, 化学便覧基礎編II, 改訂3版, 158-166 (1984)

17) 大場 武, 代田 寧, 澤 毅, 平 徳泰, 撚上勇介: 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, 神奈川県温泉地学研究所報告, 40, 1-10 (2008)

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

19) Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Daita, Y., Sukigara, C., Ito, M. and Tsunogai, U.: 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 (2019)

20) 代田 寧, 大場 武, 谷口無我, 十河孝夫, 原田昌武: 箱根山火山ガス組成による火山活動予測 – 火山防災への活用 –, 地学雑誌, 130, 783-796 (2021)

21) 篠原宏志: 火山ガス観測から推定される火山活動推移過程, 火山, 64, 121-129 (2019)

22) 瀧沢倫明: 2019年の箱根山の火山活動について, 神奈川県温泉地学研究所観測だより, 70, 1-6 (2020)

23) 箱根山火山防災協議会: 大涌谷周辺の観光客等の避難誘導マニュアル, 33 (2019)