大場 武*・代田 寧*2・澤 毅*3・平 徳泰*・撹上勇介*

Temporal variation in the composition of volcanic gases at Owakudani geothermal area

developed on the central cones of Hakone volcano caldera

by

Takeshi OHBA *, Yasushi DAITA * 2, Takeshi SAWA * 3, Noriyasu TAIRA *, Yusuke KAKUAGE *

Abstract

The volcanic gases discharged from a bore hole and a natural fumarole were sampled repeatedly since 2001 at Owakudani geothermal area, developed on the flank of central cone of Hakone volcano. The discharge rate of steam, SO_2/H_2S ratio, HCl concentration and stable isotope of H_2O in the gas from bore hole showed the decreasing trend after the activation of Hakone volcano in 2001, although the decreases in the chemical and isotopic parameters were much gradual relative to the steam discharge rate. The temperature of gas from bore hole dropped and the C/S and CO_2/H_2O ratios of gas from bore hole increased coincidently when earthquake swarms happed beneath Owakudani geothermal area and the region at the north end of Lake Ashi. The changes could be explained if we assume the generation of a cool cracks when the earthquake swarm happened, and also if we assume that the cracks acted as the channel of volcanic gas. The temperature of crack would be much lower than the volcanic gas. A part of H_2O vapor could be removed as condensate and an associated removal of sulfur bearing gases would occur, resulting in the drop of the temperature and the increase in C/S and CO_2/H_2O ratios of gas.

1. はじめに

箱根山は、神奈川県の西部に位置する活火山で、カ ルデラ構造を有し、中央火口丘の山腹には地熱地帯が発 達している(Fig. 1)。中央火口丘を形成するマグマ噴火 活動は、約5万年前(久野、1972)に始まり、約3千年 前(Kobayashi et al., 1997)まで継続したと考えられて いるが、最終のマグマ噴火活動から現在に至る期間の長 さは、全体の活動継続期間に比べはるかに短く、今後マ グマ活動が再開しないとは断言できない(町田、1971)。 約3千年前の噴火時には、中央火口丘神山が山体崩壊し 発生した岩屑なだれによって、早川が堰き止められ、芦 ノ湖が形成された(大木・袴田、1975)。

箱根山で有史の噴火活動はないが、カルデラ内では たびたび火山性地震が群発する(萬年、2003)。特に、 2001年6月から10月にかけて発生した地震活動は活発 で、中央火口丘の地下で体積膨張が観測され、山体に地 殻変動をもたらした。この地殻変動は、深さ7kmの球 状圧力源と、大涌谷と駒ケ岳の浅部における潜在的な開 口割れ目により説明することが可能である(代田ほか、 2007)。2001年7月には大涌谷に掘削されていたボー リング孔の蒸気放出圧力が異常に増大した(辻内ほか、 2003)。

箱根山のカルデラ内には、15000人が居住し、平均し て毎日5万人の観光客が訪れている。箱根山における火 山災害を防止するために、火山活動を監視する必要があ る。神奈川県温泉地学研究所は箱根山で、微小地震観測、 GPS 観測、光波測量、および傾斜観測等の多項目の観 測を1961 年以来、継続している。

火山活動の本質はマグマの脱ガス現象であり、マグ マ脱ガスに伴い放出される揮発性成分の一部は、火山ガ

*東京工業大学・火山流体研究センター 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1
*2 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
3 SMG 株式会社(旧所属は)
論文,神奈川県温泉地学研究所報告,第40巻,1-10,2008.



- 図1 箱根山カルデラ内における群発地震震源領域。 点線(R)はカルデラリム。実線の円あるいは楕 円(A~E)は、群発地震震源領域を示す。Ka、 Koはそれぞれ、神山、駒ケ岳山頂、Oは大涌谷 地熱地帯、Lは芦ノ湖。群発地震の発生時期を 表3に示す。
- Fig. 1 Regions of hypocenter for volcanic earthquake swarm within Hakone caldera. R, L, O is the caldera rim, Lake Ashi, Owakudani geothermal area, respectively. Ka and Ko is the summit of central volcanic cone, Kamiyama, Komagatake, respectively. The elliptical circles with A to E indicate the hypocentral region of volcanic earthquake swarm with various periods of occurrence listed in Table 3.

スの成分を構成する。火山ガスは、火山現象を理解する 上で本質的に重要な研究対象と言える。著者らは、2001 年以来、大涌谷地熱地帯で火山ガスを繰り返し採取・分 析してきた。本研究では、大涌谷地熱地帯の火山ガス化 学組成および同位体比の時間変化について、箱根山の火 山活動と関連させて論じる。

2. 火山ガス試料

大涌谷地熱地帯に掘削されたボーリング孔から放出 される火山ガスと、自然に放出される噴気を採取・分析 した。試料の詳細な採取位置を Fig. 2 に示す。

大涌谷の 52 号ボーリング孔 (Fig. 2 の GB) は、箱根 温泉供給株式会社の敷地内に掘削されている。ボーリン グ孔の孔底深度は 500m である。同社は、大涌谷で複数 のボーリング孔から放出される蒸気を筒状の構造物(以 下、ドラムと記す)の中で冷水と混合し、温泉水を造成



- 図2 火山ガスの採取位置。GB、GO6がそれぞれ、52
 号ボーリング孔、自然噴気。Ka、Koはそれぞれ、
 神山、駒ケ岳山頂。黒丸(●)は、温泉水の湧
 出地点。白丸(○)は自然噴気の放出地点を示す。
 四角(□)はボーリング孔.背景として国土地
 理院発行二万五千分の一地形図を使用。
- Fig. 2 Location of volcanic gases for this study. GB and GO6 indicate the location of No.52 bore hole and natural fumarole, respectively. Ka and Ko shows the peak of Kamiyama and Komagatake central volcanic cones, respectively. The open and filled circles indicate the location of fumarolic gas and hot spring water discharge, respectively. The open rectangles indicate the location of bore holes.

している。同社は毎朝、冷水の供給を一時的に止め、ド ラム内に蓄積した自然硫黄を除去する作業を行ってい る。ボーリング孔からの火山ガスの採取は、冷水の供給 を止めているおよそ 30 分程度の短時間内で実行した。 自然噴気の採取は Fig. 2 の GO6 の地点において行った。

3. 火山ガスの採取・分析法

火山ガスの採取には、ガラス製の二口注射器を用い

同位体比および、蒸気放出量 箱根山大涌谷 52 号ボーリング孔で採取した火山ガスの温度、化学組成、

袠

ğ
8
S
Ð
Ē
9
Ť
I
_
a
ž
ω
a
Ξ
Ē
Ĕ
ы
ĕ
တ
Ξ.
a
В
Ī
۲a
Š
U.
Je
ŧ
⊆
e
ЭŤ
ö
<u> </u>
Ф
ō
Ĕ
Φ
5
ă
2
വ
o.
Š.
t No.
at No.
le at No.
nple at No.
imple at No.
sample at No.
s sample at No.
as sample at No.
: gas sample at No.
ic gas sample at No.
anic gas sample at No.
canic gas sample at No.
olcanic gas sample at No.
volcanic gas sample at No.
of volcanic gas sample at No.
ι of volcanic gas sample at No.
on of volcanic gas sample at No.
tion of volcanic gas sample at No.
sition of volcanic gas sample at No.
oosition of volcanic gas sample at No.
nposition of volcanic gas sample at No.
omposition of volcanic gas sample at No.
composition of volcanic gas sample at No.
ic composition of volcanic gas sample at No.
pic composition of volcanic gas sample at No.
topic composition of volcanic gas sample at No.
otopic composition of volcanic gas sample at No.
isotopic composition of volcanic gas sample at No.
d isotopic composition of volcanic gas sample at No.
and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
I and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
al and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
nical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
mical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
hemical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
Chemical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
1 Chemical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
e 1 Chemical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.
ble 1 Chemical and isotopic composition of volcanic gas sample at No.

ġ.

$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$								R− _€	gas						
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	0 ₂ H ₂ S		SO_2	HCI	R-gas	He	H_2	02	N_2	CH₄	Ar	δ D _{sMow}	δ ¹⁸ O _{SMOW}	Remark	Flux
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	l/mol mmol/mol m	۲	Imol/mol	mmol/mol	mmol/mol	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)		ton/day
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	63 2.66		6.02	2.14	58.20	ī	I	19.5	80.5	I	0.94	-16	4.9	AC	
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	56 1.75		8.17	0.13	670.60	ı	I	19.7	80.3	I	0.60	-26	2.4	AC	
$ \begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	53 1.26		5.21	1.46	15.91	ı	ļ	19.8	79.1	I	1.05	-24	2.4	AC	207
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	15 1.69 3.	č	44	0.22	64.18	I	I	20.0	80.0	I	*	-29	1.3	AC	99
	40 2.28 4.5	4.5	0	1.95	0.11	0.016	1.31	4.6	93.8	I	0.28	-20	3.2		37
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	57 3.99 1.78	1.78	~	0.17	0.12	0.011	1.20	4.8	94.0	I	*	-32	0.6		41
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	42 6.68 2.91	2.91		1.61	0.27	0.034	1.56	0.0	97.6	0.024	0.80	-30	0.8		42
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	27 2.24 2.58	2.58		0.30	0.29	0.008	0.39	5.6	93.7	I	0.26	-27	1.5		35
0.24 0.17 0.013 0.80 2.5 96.4 - 0.29 -32 0.2 34 0.30 0.11 0.027 0.91 1.7 97.1 0.027 0.30 -32 0.9 27 0.19 0.11 0.016 0.92 1.0 97.6 0.062 0.43 -33 -0.2 28 0.25 0.37 0.010 0.28 5.7 93.5 - 0.52 -29 1.6 25	52 3.96 2.10	2.10		0.02	0.21	0.013	0.77	2.6	96.2	0.014	0.31	-41	-1.1		45
0.30 0.11 0.027 0.91 1.7 97.1 0.027 0.30 -32 0.9 27 0.19 0.11 0.016 0.92 1.0 97.6 0.062 0.43 -33 -0.2 28 0.25 0.37 0.010 0.28 5.7 93.5 - 0.52 -29 1.6 25	05 3.98 1.66	1.66		0.24	0.17	0.013	0.80	2.5	96.4	I	0.29	-32	0.2		34
0.19 0.11 0.016 0.92 1.0 97.6 0.062 0.43 –33 –0.2 28 0.25 0.37 0.010 0.28 5.7 93.5 – 0.52 –29 1.6 25	28 4.48 0.20	0.20		0.30	0.11	0.027	0.91	1.7	97.1	0.027	0.30	-32	0.9		27
5 0.25 0.37 0.010 0.28 5.7 93.5 - 0.52 -29 1.6 25	51 3.61 1.47	1.47		0.19	0.11	0.016	0.92	1.0	97.6	0.062	0.43	-33	-0.2		28
	83 3.54 2.6	2.6	5	0.25	0.37	0.010	0.28	5.7	93.5	Ľ	0.52	-29	1.6		25

る簡便かつ迅速な方法 (Ozawa, 1968) を用いた。この 方法は、20mlの5MKOH水溶液を、二口注射器に満たし、 ガスを導入する。この方法では、使用する 5M KOH 水 溶液は、大気と溶解平衡にあり、空気成分が含まれるの で、火山ガスに本来含まれる希ガスなどの分析には適し ていないが、主要な化学成分の分析に支障なく用いられ る。

実際の採取では、先ず、噴気孔の出口にチタンパイ プを挿入し、パイプの出口にゴム管を接続し、しばらく 様子をみた。パイプが火山ガスの熱で温まり、自然にゴ ム管の端から蒸気が漏れ出るようになったら、20mlの 5M KOH 水溶液を満たした二口注射器をゴム管を介し て接続する。注射器のシリンジをゆっくり引き、ガスを 導入する。ガスは大部分が水蒸気からなり、注射器に導 入されると凝縮し、熱を発するので、導入の間は、冷水 でぬらした布を用いて、注射器を冷却させる。

KOH 水溶液に吸収されないガス成分(R-gas)は注 射器内に気相を形成する。R-gas は、N₂、O₂、H₂、CH₄、 希ガスなどの混合物であり、Ar ガスをキャリアに用い たガスクロマトグラフ(GC)で分析した。ガスの SO₂/ H,S モル比は、採取現場で、ヨウ素溶液とガスを反応 させ、生成した硫酸イオンと自然硫黄の量を測定する Ozawa (1968) の方法を用いて決定した。ガス試料の主要 な化学組成(CO₂、全硫黄、HCI等)は、注射器で採取 した KOH 溶液を Ozawa (1968) の方法に従い、湿式分析 した。ガス試料のH2O量は、試料採取前と後のKOH水 溶液の体積差を測定し、それが採取した H₂O に相当す ると仮定して計算した。

試料ガスの水蒸気の安定同体比(D/H、¹⁸O/¹⁶O)を測 定するために、注射器による採取とは別に、二重ガラス 管からなる凝縮器で、凝縮水を 20ml 程度採取した。凝 縮水の D/H 比は、金属亜鉛を用いた水素還元法 (Coleman et al., 1982)、¹⁸O/¹⁶O は CO₂-H₂O 平 衡 法 (Epstein and Mayeda, 1953) で CO₂ 試料を調製し、MAT252 質量分析 計を用いて同位体比を測定した。

4. 火山ガスの分析結果

Table 1 に 52 号ボーリング孔から採取したガス試料、 GBの採取年月日、出口温度、化学組成、安定同位体比 を示す。Table 2 に GO6 地点で採取した噴気の化学組成、 安定同位体比を示す。

自然噴気の出口温度は、採取地点の標準的な気圧にお ける水の沸点、96.5℃に近い。出口温度の変動は少なく、 95.5~97.9℃の間に限定された。これに対し、ボーリン グ孔から放出されるガスの出口温度は、132~163℃の

表 2 大涌谷自然噴気(GO6)の温度、化学組成、同位体比

Table 2 Chemical and isotopic composition of fumarolic gas sampled at Owakudani geothermal are, Hakone volcano.

										ſ					
										R-	gas				
Date	temp.	H_2O	CO_2	H_2S	SO_2	HCI	R-gas	He	H_2	02	N_2	CH₄	Ar	δ D _{SMOW}	δ ¹⁸ O _{SMOW}
	ပ	mmol/mol	mmol/mol	mmol/mol	mmol/mol	mmol/mol	mmol/mol	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	%0	%0
2001/9/21	96.7	983.80	12.57	3.03	0.050	I	0.545	#	58.8	1.8	39.2	0.22	#	-52	-7.6
2001/11/2	97.8	989.23	7.92	2.61	0.014	I	0.222	#	44.9	2.6	52.2	0.20	#	-50	-5.2
2002/7/12	96.2	983.17	13.85	2.80	0.011	I	0.166	#	12.9	8.7	<i>T.TT</i>	0.15	0.56	-47	-6.0
2003/10/22	96.4	990.26	6.38	3.09	0.044	I	0.222	#	49.8	1.5	48.2	0.32	0.16	-52	-4.1
2004/9/1	95.5	992.12	4.88	2.81	0.013	I	0.179	#	51.1	4.7	44.0	0.21	#	-48	-5.9
2004/9/16	97.2	990.78	5.57	3.38	0.016	I	0.251	#	57.9	2.2	39.7	0.24	#	-55	-6.9
2004/10/7	96.9	992.14	4.85	2.79	0.014	I	0.197	#	55.2	2.7	41.9	0.21	#	-44	-5.1
2004/11/11	96.6	993.20	4.07	2.51	0.015	I	0.206	0.0040	46.0	3.6	50.3	0.14	#	-45	-4.4
2004/11/30	96.4	993.42	4.10	2.31	0.017	I	0.150	#	55.3	3.1	41.3	0.23	#	-41	-3.6
2005/1/24	96.6	992.97	4.30	2.45	0.029	I	0.242	#	37.7	4.9	57.0	0.16	0.22	-40	-4.4
2005/3/7	95.7	993.74	3.68	2.41	0.005	I	0.167	#	55.8	4.1	39.8	0.23	0.02	-46	-3.9
2005/4/6	95.9	993.22	4.05	2.54	0.021	I	0.162	#	58.1	1.2	40.2	0.24	0.16	-44	-4.2
2005/5/25	95.9	993.89	3.65	2.27	0.029	I	0.161	#	22.4	13.7	63.9	0.08	#	-45	-4.0
2005/7/3	96.3	993.52	4.03	2.26	0.022	I	0.166	#	28.6	11.2	60.1	0.11	#	-43	-4.5
2005/8/3	96.8	993.80	3.72	2.32	0.024	1	0.137	#	50.5	2.1	47.0	0.21	0.22	-43	-4.5
2005/10/25	97.0	995.14	2.79	1.87	0.024	0.054	0.131	#	60.5	2.0	37.3	0.25	#	-39	-0.1
2005/11/8	95.9	994.17	3.44	2.26	0.012	I	0.120	#	58.3	3.4	38.0	0.28	#	-35	-1.5
2006/1/10	96.4	994.30	3.14	2.33	0.024	0.013	0.192	#	41.1	7.7	50.8	0.21	0.24	-39	-4.0
2006/7/27	97.4	994.94	2.72	2.04	0.026	0.011	0.260	#	35.8	2.5	61.1	0.14	0.52	-44	-4.5
2006/11/2	96.7	987.05	9.06	3.52	0.022	0.012	0.340	#	49.7	1.1	48.9	0.18	0.12	-48	-5.4
2007/3/19	96.5	991.69	5.86	2.22	0.046	I	0.186	#	54.1	1.2	44.4	0.19	0.08	-41	-4.6
2007/11/29	96.5	991.51	5.72	2.48	0.052	0.002	0.234	#	48.7	3.0	47.9	0.23	0.17	-47	-4.9
2008/3/27	96.0	994.27	3.70	1.82	0.049	0.003	0.154	#	59.4	1.3	39.0	0.22	0.07	-50	-2.0
2008/9/9	97.9	992.65	5.28	1.88	0.019	0.002	0.172	0.0082	46.9	2.2	50.7	0.08	0.11	-43	-4.2
-: less than d€	stection li	mit. #: no de	stection due	to the large	∋ H₂ peak.										

- 4 -



- 図3 52 号ボーリング孔からの蒸気放出量の時間変化。 縦の破線は群発地震が発生した時期を示してい る。aの期間は群発地震が断続的に発生した。
- Fig. 3 Temporal variation of steam discharge rate at No.52 bore hole. The vertical dashed lines indicate the occurrence of earthquake swarm. During the period of a, earthquake swarm took place intermittently.



- 図5 ボーリング孔ガスと自然噴気の C/S 比時間変化。 黒丸、白丸がそれぞれ、ボーリング孔ガスと自 然噴気の時間変化を示す。図中シンボルの意味 は、図3と共通。
- Fig. 5 Temporal variation of C/S ratio of volcanic gas from the bore hole (filled circles) and the fumarole (open circles). The meaning of other symbols in figure are common to those in Fig. 3.

範囲で変動した。

2001 年 9 月から 2003 年 10 月までは、ガスの放出の 勢いが非常に強く、採取のためにチタンパイプをボーリ ング孔の出口に挿入しても、大気の混入を防ぐことがで きなかった。2001 年 11 月の H₂O の濃度が極端に低いの



- 図4 52 号ボーリング孔ガスの出口温度時間変化。図 中シンボルの意味は、図3と共通。
- Fig. 4 Temporal variation of temperature of gas at the outlet of No. 52 bore hole. The meaning of other symbols in figure are common to those in Fig. 3.



- 図 6 ボーリング孔ガスと自然噴気の CO₂/H₂O 比時間 変化。黒丸、白丸がそれぞれ、ボーリング孔ガ スと自然噴気の時間変化を示す。図中シンボル の意味は、図 3 と共通。
- Fig. 6 Temporal variation of CO_2/H_2O ratio of volcanic gas from the bore hole (filled circles) and the fumarole (open circles). The meaning of other symbols in figure are common to that in Fig. 3.

は、大量の空気の混入が原因である。ボーリング孔ガス の H₂O 濃度は、初期の空気の混入が高い試料を除くと、 97.42 ~ 98.6% であった。これに比較して、自然噴気の H₂O 濃度は、全体的に高く、98.4 ~ 99.5% であった。

マグマ性の流体に特徴的な成分である SO2、HCI はボ

- 表3 箱根山群発地震の発生時期と震源領域(棚田ほか、 2002;棚田ほか、2003;伊東ほか、2004;伊東ほか、 2005;伊東ほか、2006;棚田ほか、2007;本多ほか、 2008)
- Table 3. Region of hypocenter during the activety of earthquake swarm.

Duration of eartho	uake activity	Region of hypocenter
2001/6/12 ~	2001/10/22	A, B, C, E
2003/2/5 ~	2003/2/5	С
2004/2/4 ~	2004/2/5	A
2004/4/15 ~	2004/4/15	С
2004/4/23 ~	2004/4/23	С
2005/8/14 ~	2005/8/15	С
2005/10/26 ~	2005/10/26	В
2006/9/27 ~	2006/9/28	С
2006/10/2 ~	2006/10/4	С
2006/10/9 ~	2006/10/18	В
2006/11/18 ~	2006/11/19	В
2007/2/16 ~	2007/2/18	D
2007/2/28 ~	2007/2/28	E
2008/9/9 ~	2008/9/15	E

The region of hypocenter is shown in Fig. 1.

ーリング孔ガスで高い濃度が観測されたが、自然噴気での濃度は低かった。ボーリング孔ガスのSO₂、HCl濃度は、 2004年10月ころまで高い濃度が頻繁に観測されている が、それ以降は、相対的に低い濃度が続いている。

ボーリング孔ガスの R-gas 成分は、窒素が主成分で あり、He、H₂、CH₄の濃度は高々 1% 程度に過ぎない。 2003 年までの R-gas に He や H₂ が検出されないのは、 大量の空気の混入により、ガス本来の成分が希釈されて いるためである。自然噴気の R-gas には H₂ が 38 ~ 78% の高濃度で含まれている。R-gas の組成は、ガスクロマ トグラフで分析している。自然噴気の R-gas を分析する と、H₂の大きなピークが発生し、He や Ar のピークと 重なり、He や Ar の定量ができない場合が多かった。自 然噴気の R-gas はメタンを含み、濃度は最大で、0.3% に達した。

ボーリング孔ガスに含まれる $H_2O \circ \delta^{18}O$ は、2004 年 10 月まで、1.3‰ を超える高い値が続いたが、それ以降 は相対的に低下した。それでも 2006 年 11 月、2008 年 9 月には、それぞれ、1.5、1.6‰ が観測された。自然噴気 $\circ \delta^{18}O$ は、-4‰ 以下の低い値を示したが、2005 年 10 月、 11 月には、特異的に、それぞれ、-0.1、-1.5‰ という高 い値が観測されている。

箱根温泉供給会社は、52 号ボーリング孔から放出さ れる蒸気をドラム内で冷水と接触させて、温水を造成し ている。供給する冷水の流量、温度、造成される温水の 温度は、計測されている。温水が造成される過程で、熱 量と水および水蒸気の量が保存されると仮定すると以下 の式が成立する。

$$E_{V}F_{V} + E_{CW}F_{CW} = E_{HW}(F_{V} + F_{CW})$$
(1)

ここで、EとFを、蒸気、冷水、温水に対して、それぞれ、 エンタルピー、流量とする。下付文字の、V、CW、HW は、それぞれ、蒸気、冷水、温水を示す。式1の左辺は 蒸気と冷水の熱流量の合計、右辺は造成された温水の熱 流量を表している。式1を変形し、

$$F_{V} = \left(\frac{E_{HW} - E_{CW}}{E_{V} - E_{HW}}\right) F_{CW}$$
(2)

上式から蒸気の流量、Fv が求まる。蒸気は乾き蒸気 であるとし、蒸気と水のエンタルピーは、日本機械学会 発行の蒸気表を参照にした。計算した値を Table 1 に載 せる。温水造成のためのドラムは 2001 年 12 月に再建さ れた。それ以前の蒸気流量は計算できない。蒸気の流 量は、2002 年 7 月には、207 ton/day と高かったが、急 激に減少し、2004 年 10 月には 36 ton/day まで低下した。 その後は、大きな変動がなく、低い流量が継続している。

5. 考察

5.1. 群発地震活動との関係

Fig. 3 に 52 号ボーリング孔から放出される蒸気の流 量の時間変化を示す。2003年以降、流量は急激に低下 し、安定な状態が 2008 年まで継続している。2002 年に 高い流量が観測されているのは、2001年に発生した火 山活動の後退過程を意味していると思われる。Fig.4に 52 号ボーリング孔から放出される蒸気の出口温度の時 間変化を示す。蒸気の温度は、2001年の後半に、一度、 低下したが、その後に、徐々に上昇し、2006年7月に 極大に達し、同年11月に14℃の大きな低下を示した。 Fig. 5 にボーリング孔ガスと自然噴気の C/S 比の時間変 化を示す。ここで、C/S 比とは、ガスに含まれる H,S と SO2の合計モル濃度に対する CO2 モル濃度を意味する。 ボーリング孔ガス(黒丸)と自然噴気のC/S比(白丸) の時間変化は極めて類似している。この類似は、両者に 含まれる CO,およびS含有ガスの起源が共通すること を強く示唆している。Fig.6に、ボーリング孔ガスと自 然噴気のCO₂/H₂O比の時間変化を示す。CO₂/H₂O比には、 C/S比変化と同様に、両ガスの間に強い類似性がみられ る。

Fig. 3、4、5、6において、温度や成分比の変化

とほぼ同期する群発地震の発生時期を縦の破線で示し た。Table 3 に示すように、箱根山ではしばしば群発地 震が発生しており、群発地震の震源位置はさまざまに 変化する(棚田ほか、2002;棚田ほか、2003;伊東ほ か、2004;伊東ほか、2005;伊東ほか、2006;棚田ほか、 2007;本多ほか、2008)。2001年と2006年の群発地震は、 大涌谷近傍である Fig. 1のB領域で発生している。これ に対し、2008年の群発地震は Fig. 1のE領域で発生した。 一方で、ガスの変化と同期しない群発地震は、A, C, D領域で発生している。これらの領域は、いずれも、大 涌谷から離れている。

群発地震の発生に同期して、ボーリング孔ガスの温度 低下と、C/S 比、CO₂/H₂O 比の上昇が見られる。また、 2002 年から 2006 年の群発地震前にかけて、ボーリング 孔ガス温度の緩やかな上昇と、C/S 比、CO₂/H₂O 比の緩 やかな低下が起きている。これに対し、ボーリング孔か らの蒸気の放出量には、群発地震の影響が見られない。

先ず、群発地震に同期した、組成や温度の変化は、マ グマ脱ガス活動などの活発化とは考えられない。なぜな ら、Fig. 3 に示されるように、ボーリング孔蒸気の放出 量は、群発地震とは関係する変化を示していないからで ある。

大場ほか(2007)によると、大涌谷の火山ガスに関して、 含有されるCO₂ガスは「保存成分」と認められる。ここで、 保存成分とは、ガスが供給源から放出されて地表に到達 する過程で、減少も増加もしない成分である。H₂OやS 含有ガスは、保存成分ではない。H₂Oは地下水との相互 作用で、容易に付加され、また ガスの冷却に伴い、部 分的に凝縮し失われ易い。S含有ガスについては、

$$4SO_2 + 4H_2O \to 3SO_4^{2-} + H_2S + 6H^+$$
(3)

$$SO_2 + 2H_2S \rightarrow 3S + 2H_2O$$
⁽⁴⁾

などの反応や、岩石との反応により、二次鉱物として失われる可能性がある。よって、C/S比の増加は、S含有ガスが、ガスの移動過程で除去された可能性が高い。同様に、CO₂/H₂O比の増加は、H₂Oの除去を意味する。

BあるいはE領域における群発地震の発生は、C/S比 とCO₂/H₂O比の増加と同期するので、群発地震の発生 に伴い、ガスの通路で、S含有ガスの除去と、H₂O蒸気 の除去が起きていると考えられる。また、同時にボーリ ング孔ガスの温度が低下することから、この除去過程は、









ガスの冷却と関係しているだろう。

以上のような火山ガスの時間変化を説明するひとつの 可能性として、BあるいはE領域における群発地震によ り、地殻内にガスの新たな通路が作り出されたと考える。 地震で新たな亀裂が形成され、そこがガスの新たな通路 になる。新しい通路は、これまでガスが流れている通路 の周辺に比べて、温度が低いであろう。そのような冷た い通路をガスが通ることにより、ガスは冷却され、水蒸 気の一部は凝縮して、液相として気相から失われるだろ う。同時に、式3、4のような反応でS含有ガスが失わ れるだろう。

C/S 比と CO₂/H₂O 比の低下は、逆に、H₂O や S 含有 ガスが、付加されるのではなく、除去の効果が低下した と考えられる。新たに形成されたガスの通路が、ガスの



 図 9 ボーリング孔ガスと自然噴気の H₂O 同位体比時間変化。黒丸、黒四角が、それぞれ、ボーリング孔ガスのδ
 ¹⁸O、δ D を示す。白丸、白四角が、それぞれ、自然噴気のδ¹⁸O、δ D を示す。δ¹⁸O、δ D の値は、それぞれ、 左 y 軸、右 y 軸を参照。

Fig. 9 Temporal variation of stable isotope ratios of H₂O in the gas from bore hole and fumarole. The filled circles and rectangles indicate the δ ¹⁸O and δ D of bore hole gas, respectively. The open circles and rectangles indicate the δ ¹⁸O and δ D of fumarolic gas, respectively. The value of isotope ratio is referred to the left and right side y axes for δ ¹⁸O and δ D, respectively.

流通に伴い、温度が上昇したとすれば、除去の効果は低下する。この過程は、2002年から2006年の群発地震前の、 ボーリング孔ガスの温度と組成変化をよく説明する。

2008年の群発地震がE領域のみで起きているにも拘 わらず、ガスに変化が現れていることは、E領域の特殊 性を暗示している。萬年(2008)はE領域に、潜在カル デラ構造の存在を指摘している。箱根山カルデラは、中 央を南北方向に走る北伊豆断層帯により分断され、東部 が西部に対し北上する地殻変動が存在する。その影響に より、カルデラ内にクラックが開口する地殻変動が誘起 され、それがマグマの上昇を助け、小規模なカルデラを 形成したと推定されている。E領域で群発地震によりク ラックが形成され、それが、大涌谷で放出されるガスの 通路と連結し、ガス通路のバイパスの役割を果たすなら、 E領域の群発地震と大涌谷で放出されるガスの変動が結 び着く。

以上の考えは、ガスの組成変化は、もっぱら地震活 動に影響されたとしている。地震が原因であり、ガスの 組成変化は結果だとしている。一般に、地殻内に分布す る流体の間隙圧の上昇は、地殻の物理的強度を低下させ、 地震発生の引き金になると考えられている。地殻内で流 動する火山ガスの圧力がなんらかの原因で上昇し、それ が群発地震を引き起こし、冷たい亀裂を発生させ、ガス 自らの組成変化をもたらした可能性はないだろうか?こ の考えでは、群発地震の発生原因を地殻内流体に帰する ことができる。群発地震の発生原因として、萬年(2008) は同様なモデルを提案している。

2006年にボーリング孔からの蒸気の放出量に増大は 見られない。少なくとも2006年の群発地震はマグマ性 蒸気の流量増加で引き起こされたとは考えられない。地 殻内における流体の圧力増加の原因としては、所謂、シ ーリングゾーンの形成がある。Fournier (1999)は、冷却 しつつあるマグマの周囲に熱水性の二次鉱物層(=シー リングゾーン)が形成されると考えた。二次鉱物層の形 成がマグマ性流体の発散を阻害するために、領域内の圧 力が増加し、ついには、シーリングゾーンの破壊が起こ り、マグマ性流体の突発的な放出が起きると考えている。 仮に、似たような現象が、火山ガスの通路で定常的に起 きているとするなら、間歇的に発生する群発地震の原因 となりうるかもしれない。

5.2.火山活動の後退

2001年におきた火山活動は、中央火口丘山体の膨張 を伴い、深さ7km 程度に球状圧力源が推定されている (代田ほか、2007)。これは、マグマあるいは、マグマ性 流体の貫入によると考えられている。マグマから脱ガス する気体の特徴は、H₂Oの δD、δ¹⁸O が高いこと、SO₂、 HCl などの酸性ガス濃度が高いことが挙げられる。Fig. 7、8、9に、それぞれ、ボーリング孔ガスの SO₂/H₂S 比、 HCl濃度、安定同位体比の時間変化を示した。SO₂/H₂S 比は経年的に低下する傾向が見られる。2005年以降に は、相対的に高い値は現れていない。HCI 濃度は時間的 に大きく変化する傾向が見られる。HCI は水に溶解しや すい成分なので、ボーリング孔ガスが地表に到達する過 程で、H₂O 蒸気の凝縮などが起き、発生した液相に溶解・ 除去され、濃度が低下したのかもしれない。しかし、そ れでも、2006年11月以降に高い濃度は見られない。ボ ーリング孔ガスの δD と δ¹⁸O はほぼ平衡した時間変化を 示し、全体的な傾向としては、緩やかな低下を示してい る。Fig. 7、8、9に示されるボーリング孔ガスの変化は どれも2001年以来、マグマ性ガスの寄与率が低下して いることを示しているが、Fig.3に見られる、流量の低 下傾向と比べると、マグマ性ガスの寄与の低下は相対的 に緩やかである。

Giggnbach (1987) によるニュージーランド、ホワイ ト島のマグマ熱水系モデルでは、脱ガスしつつあるマグ マの周辺は、SO₂や HCI に富んだ酸化的なマグマ性ガス で満たされた領域が存在し、さらにその外側を還元的な 化学組成を有する熱水領域が取り囲んでいる。地表に放 出される火山ガスは、それぞれの領域に分布する気相部 分の混合物であるとされる。火山活動が後退した場合、 マグマ性ガスの寄与は低下し、熱水領域の気相の影響が 強くなる。Fig. 7、8、9の時間変化は、Giggenbach (1987) のモデルから予想される火山ガスの変化と整合してい る。

Fig.9に、自然噴気のH₂O安定同位体比の時間変化を 比較のために示した。自然噴気の安定同位体比は全体的 には2001年以来、緩やかな上昇傾向にある。これはボ ーリング孔ガスの変化と対称的である。ボーリング孔の 深度は、地表下500mであり、ボーリング孔ガスは深部 領域の気相成分を代表している。これに対し、自然噴気 は、それよりも浅い熱水領域の気相成分を代表している。 これら両者の間に、同位体比についてみると、相互作用 が起きて、お互いに部分的に混合し、マグマ性ガスの同 位体比は低下し、熱水領域のガスの同位体比は上昇した 可能性がある。

6. 結論

- 52 号ボーリング孔の蒸気は、2002 年には 200 ton/ day を超える高い流量で放出されたが、2003 年に は三分の一以下に低下し、2004 年以降は、45 ton/ day 以下の低い流量で安定的に放出されている。
- 2)ボーリング孔ガスと自然噴気の C/S 比、CO₂/H₂O 比には同期した時間変化が観測された。これらの比は、大涌谷付近あるいは、芦ノ湖の北部領域で群発地震が発生した際に、上昇する傾向がみられた。また、ボーリング孔ガスの出口温度は群発地震の発生で低下する傾向がみられた。群発地震があらたな亀裂を形成し、そこに火山ガスが流通すると考えると、ガス組成とボーリング孔ガス出口温度の時間変化は合理的に説明される。
- 3)ボーリング孔ガスについて、マグマ性ガスの指標となる SO₂/H₂S 比、HCI 濃度は、ボーリング孔蒸気の流量の低下に比べて、緩やかに低下した。これは、ボーリング孔ガスに対するマグマ性ガスの寄与が低下したとして解釈される。マグマ性ガスの領域と、熱水性領域の気相は相互作用しており、同位体比の観点から、相互に混合が起きている可能性が示された。

謝辞

本研究を行うにあたり、神奈川県温泉地学研究所から継続的な支援をうけました。箱根温泉供給株式会社は、 52号井における火山ガスの採取に、多大な便宜を下さると同時に、温泉造成のための冷水供給量、冷水温度、 造成後の温泉温度のデータを提供下さりました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E. and Moore, G.R. (1982) Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. Anal.Chem., **54**, 993-995.
- 代田寧・棚田俊牧・丹保俊哉・伊東博・原田昌武(2007) 2001 年箱根火山で生じた地殻変動の圧力源解析, 日本火山学会講演予稿集,2007 年度秋季大会,p51.

- Epstein, S. and Mayeda, T.K. (1953) Variation of ¹⁸O content of waters from natural sources. Geochim.Cosmochim. Acta, 4, 213-224.
- Fournier, R.O. (1999) Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic-epithermal environment. Econ. Geol., 94, 1193-1212
- Giggenbach, W.F. (1987) Redox processes govering the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. Appl. Geochem., **2**, 143-161.
- 本多亮・永井悟・伊東博(2008)神奈川県内およびその 周辺における 2007(平成 19)年の地震活動. 温地 研観測だより, 58:49-53.
- 伊東博・棚田俊收・代田寧・原田昌武・村瀬圭・丹保俊
 哉(2004) 神奈川県西部地域における 2003(平成
 15) 年の地震活動,温地研観測だより,54,1-6.
- 伊東博・棚田俊收・原田昌武・丹保俊哉(2005)神奈川 県西部地域における 2004(平成 16)年の地震活動, 温地研観測だより, 55, 1-6.
- 伊東博・棚田俊收・本多亮・原田昌武(2006)神奈川 県西部地域における 2005(平成17)年の地震活動, 温地研観測だより, 56, 1-6.
- Kobayashi, M., Okuno, M. and Nakamura, T. (1997) ¹⁴C ages of pyroclastic-flow deposits from central cones on the western slope of old somma of Hakone volcano, central Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 42, 355-358 (in Japanese) .
- 久野久(1972)箱根火山地質図
- 町田洋(1971)箱根火山(日本火山学会編), p77-102.

- 萬年一剛(2003)文献による箱根群発地震活動の再検討 (1917-60);箱根群発地震活動の地学的意義,火山, 48,425-443.
- 萬年一剛(2008) 箱根カルデラ 地質構造・成因・現 在の火山活動における役割 —, 神奈川県博調査研 報(自然), 13, 61-76.
- 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.
- 大木靖衛・袴田和夫(1975)箱根芦ノ湖誕生のなぞをさ ぐる,国土と教育, 30, 2-9.
- 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・伊東博・袴田和夫(2002)2001年 (平成13)年箱根火山の群発地震活動について,温 地研観測だより,52,1-4.
- 棚田俊收・伊東博・代田寧・村瀬圭・丹保俊哉(2003) 2002年(平成14)年12月30日箱根火山で発生し た地震活動について,温地研観測だより,53,23-26.
- 棚田俊收・本多亮・原田昌武・行竹洋平・伊東博(2007) 神奈川県内およびその周辺における 2006(平成18) 年の地震活動,温地研観測だより,57,1-12.
- 辻内和七郎・鈴木征志・栗屋徹(2003)箱根大涌谷で 2001(平成13)年に発生したボーリング孔の暴噴 事故とその対策,温地研観測だより,52,1-12.