

九重山1995年10月噴火後の活動状況と地球化学的研究*

Geochemical study on volcanic activity of Kuju Volcano,
after the 1995 eruption

東京工業大学 草津白根火山観測所
Kusatsu-Shirane Volcano Observatory, Tokyo Institute of Technology

1. はじめに

1995年10月11日九重火山星生山北東中腹の硫黄山近くで水蒸気爆発が発生し、雁行状に割れ目が開口した。その後12月18日に再噴火がはじまり23日ごろまで断続的に火山灰を放出した。翌年1月13日にも小規模な噴火が発生し、現在も活発な噴煙活動が続いている。九重硫黄山は古くから噴気活動が活発で、最近まで硫黄鉱山が稼働していた。噴火が起こった場所は、かつて硫黄を生産していた噴気活動のあった場所に極めて近い。

火山ガスの化学組成・同位体組成およびその変化、噴出物に付着する可溶性成分、火山ガス放出量の変化などは、活動の様式やその推移を推定する一つの手段として重要である。今回の九重山の噴火様式、活動の推移などを検討する目的で噴火開始直後から火山ガス、噴出物、周辺の火山性湧水などの調査を行った。

今回の噴火で星生山北東中腹に開口した火口のうち、噴火開始直後はa火口列やb火口では活発に噴煙を放出していたが、火口が大きく火山ガスの採取が困難な状態にあった。そこで比較的接近が容易で火山ガス採取に適したb火口列の東端(b-1火口)と約10m西寄りの火口(b-2)において10月13日火山ガスの採取を行った。幸い両火口とも現在まで噴気活動が継続しており、その後も同一火口で10月31日、12月2日、1996年1月11日、2月26日、5月14日に火山ガスを採取した。

第1表 九重硫黄山の火山ガス組成

Sample	Date	Temp. °C	H ₂ O V%	Composition of dry gas (V%)						Composition of R-gas (V%)						AET °C	
				HF	HCl	SO ₂	H ₂ S	CO ₂	R	He	H ₂	N ₂	CH ₄	CO	Ar		
Iwoyama	60.Nov.29**	508	96.9		2.1	3.8	74.7	17.6	1.8								
	59.Oct.31*	480	98.9	5.6	14.6	8.2	14.6	55.8	1.2								
	61.Nov.11**	400	96.9	3.0	14.8	21.3	43.5	13.9	3.5		86.6	13.0	0.12	0.21	0.095		
	84.Nov.17**	350	98.9	0.7	18.6	18.6	34.4	27.0	0.7	0.067	40.9	58.1	0.33		0.62		
Iwoyama C-region	95.Oct.14	325	99.0		3.04	15.7	42.8	37.9	0.55		29.8	67.3	2.40	0.076	0.46		
	96.Jan.11	310	98.3		5.96	27.8	48.7	17.1	0.42		19.4	77.2	3.48	0			
	B-region 95.Oct.31	222	98.0		10.1	25.2	46.1	18.6	0.02	0.052	17.2	79.7	3.00				
b-1 crater	95.Oct.13	131	99.0		0.05	5.32	24.0	64.9	5.75		78.2	20.6	0.981	0.226			535
	95.Oct.31	133	99.5		3.05	7.77	28.7	54.7	5.77		81.2	17.8	0.808	0.177			534
	95.Dec.2	182	99.2		2.02	17.3	35.6	42.0	3.07		92.0	6.76	1.05	0.202			532
	96.Jan.11	180	99.3		1.96	6.57	29.2	58.6	3.69		88.8	9.84	1.13	0.182			508
	96.Feb.26	185	99.2		0.99	8.25	25.3	62.7	2.81		66.0	33.1	0.81	0.105			476
	96.May14	194	99.2		2.47	5.29	28.1	61.0	3.13		87.2	11.7	0.895	0.175			498
b-2 crater	95.Oct.13	134	99.5		0.99	5.42	25.4	62.8	5.38		69.5	29.4	0.869	0.174			520
	96.Jan.11	170	99.3		0.69	7.00	28.7	59.5	4.04		81.2	17.7	0.915	0.129			497
	96.Feb.26	171	99.4		3.21	6.77	29.0	58.6	2.43		69.6	29.4	0.852	0.128			478
	96.May14	191	99.3		1.79	5.42	29.4	60.5	2.94		87.7	11.2	0.858	0.206			503

*: Iwasaki et al., 1962, **: Mizutani et al., 1986

* Received 20 Aug., 1996

2. 火山ガスの化学組成と活動の推移

b火口で採取した火山ガス、硫黄山の噴気ガス (B-region および C-region) の化学組成を文献値の主なものと併せて第1表に示した。同表には、化学組成から求めた平衡温度も示した。噴火直後にb火口で採取した火山ガスの温度は130℃と低いが、平衡温度520~535℃と高い値であった。化学組成は、水の含有量が99%以上と多く、酸性ガス成分、Dry gas baseでHClが1%以下と少なく、SO₂、H₂S、CO₂が主成分である。R-gas成分は、H₂S、CO₂が主成分である。R-gas成分は、H₂が70%と著しく多く、また通常この程度の温度の火山ガスでは検出されないCOも0.2%含まれている。

第1図にb火口の火山ガスと併せてB、C-regionのガスおよびその文献値のH₂O (magmatic) - ΣC (CO₂) - ΣS (SO₂ + H₂S) の3成分比を示した。b火口で採取したガスと硫黄山の噴気ガスはいずれもCO₂の割合は変わらない。硫黄山噴気地帯の火山ガスは、時期や温度によってH₂OとΣSの割合、SO₂とH₂Sの割合が大きく変動している。このことは、十勝岳でも観測されたように (Hirabayashi et al., 1990)、山頂直下でSO₂ + 2H₂S = 3S + 2H₂Oの反応により、硫黄の析出や硫黄成分のガスへの付加が起こっているためと考えられ、噴火に関与した火山ガスの起源は、これまで噴出を続けている硫黄山の火山ガスと基本的には変わらないと云える。

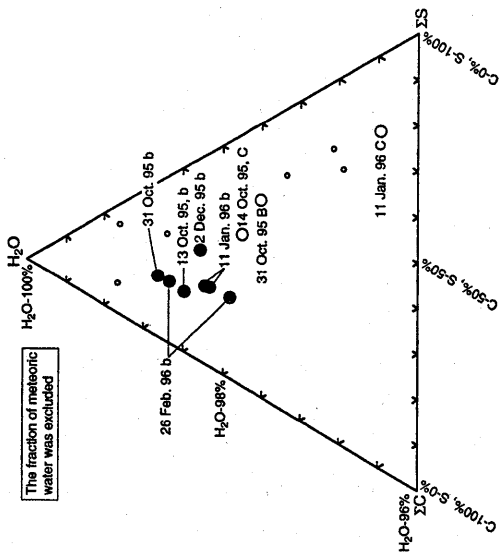
噴火直後から1996年5月の間にb火口で採取した火山ガス組成・温度の経時変化を第2図に示した。噴気温度は噴火開始直後から10月末の間は約130℃で変化はなかったが、12月2日には180℃と約50℃高くなった。翌1996年1月11日、2月26日の噴気温度は約180℃で大きな変化は認められなかったが、5月14日には195℃に上昇した。

一方、平衡温度は噴火直後から12月2日までは約530℃で変化はなかったが、1996年1月には約30℃、2月末にはさらに20℃低下した。しかし、5月の平衡温度は約20℃上昇し500℃となった。火山の活動度を示す指標の一つであるSO₂/H₂比は噴火直後は0.2であったが、その後大きくなり12月2日のガスは0.5となった。その後のガスのSO₂/H₂比は再び小さくなり5月までの値は0.2~0.3である。噴気孔温度の上昇は、九重硫黄山の山頂直下の地下水 (Mogi and Nakama, 1993) が活動の継続で枯渇し、冷却効果が減少したためで、噴火直後から12月2日にかけてのSO₂/H₂比の増加も水に対して溶解度の大きいSO₂の地下水への移行が少なくなったことでも説明される。しかし、その後噴気温度は大きくは変わっておらず、活動の継続で地下水の影響はさらに少なくなったにもかかわらずSO₂/H₂比は小さくなっている。このことから12月2日のSO₂/H₂比の増加は、単に地下水の影響だけでは説明できない。

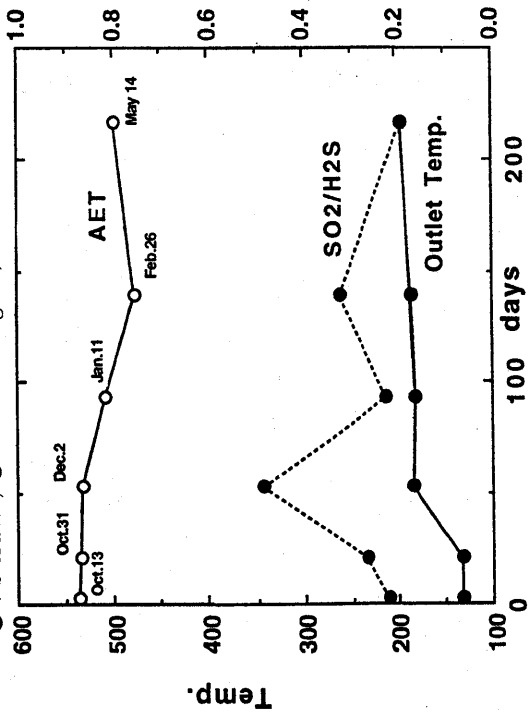
第3図にHCl-CO₂-Total sulfurの3成分比の経時変化を示した。伊豆大島 (平林ほか, 1988)、三宅島 (平林ほか, 1984)、十勝岳 (Hirabayashi et al., 1990) などの研究で、火山活動が活発な時はHClやTotal sulfurが増え、活動が終息に向かうとCO₂の割合が増加することが明らかとなっている。九重山では、噴火直後に較べ10月31日のガスはHClとTotal sulfurの割合が若干増加し、更に12月2日にはTotal sulfurの割合が増加した。その後の変化は、CO₂の割合が増える方向に転じ、1996年2月26日および5月のこれら3成分は噴火直後の割合に近い。

一般に高温 (マグマ性) の火山ガスに多く含まれ、火山活動の変化を見る上で重要な成分であるH₂とCOは、変動はあるものの時間経過に伴って徐々に減少する傾向で変化している。(第4図)。

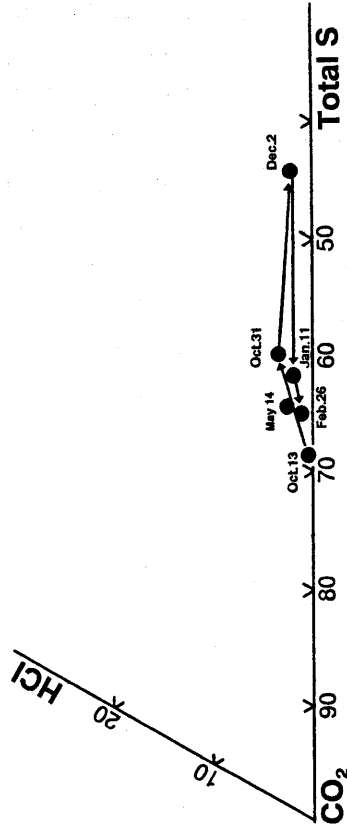
火山ガスのSO₂/H₂比やHCl-CO₂-Total sulfurの3成分比から、火山活動は12月2日頃が最も活発であったことが推定され、これらガス成分比の変化は12月18日に始まった再噴火の前兆的变化と考えられる。しかし、噴火開始から1996年5月までの間の火山活動レベルは、全体的にはH₂やCO濃度の減少や火山ガス成分比の変化が示すように低下していると考えられる。噴火直後のC-regionの火山ガス中にb火口のガスと同程度含まれていたCOは、1996年1月11日のガスでは検出されなかったことも活動の低下を示していると考えられる。



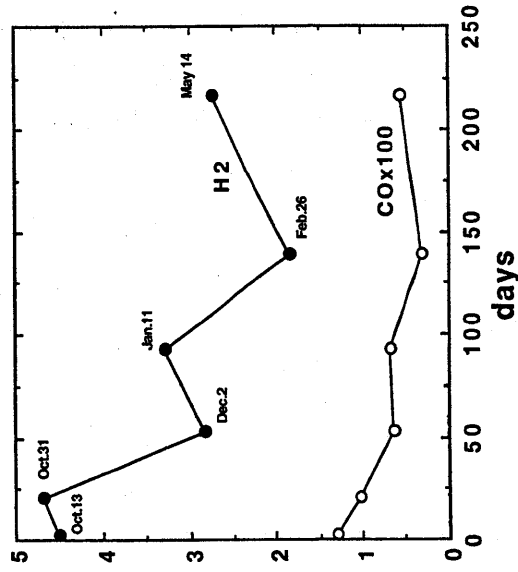
第 1 図 九重火山の火山ガス中の $H_2O - \Sigma C - \Sigma S$ 成分割合の変化
 ● : b-crater, ○ : B and C-region, ○ : after Mizutani et al., 1986
 Fig. 1 $H_2O - \Sigma C - \Sigma S$ diagram of volcanic gases from Kuju volcano.
 ● : b-crater, ○ : B and C-region, ○ : after Mizutani et al., 1986



第 2 図 火山ガス (B-crater) の噴気温度, 平衡温度および SO_2/H_2S 比の変化
 Fig. 2 Variation with time of outlet temperature, equilibrium temperature (AET) and SO_2/H_2S ratio.



第 3 図 1995年噴火後の b 火口の火山ガスの成分変化 ($HCl - CO_2 - Total S$ 比)
 Fig. 3 $HCl - CO_2 - Total S$ diagram of volcanic gases from the b-crater collected after the 1995 eruption.



第 4 図 b 火口の火山ガス中の H_2 と CO の濃度変化
 Fig. 4 Variation with time of chemical compositions in volcanic gases from the b-crater.

3. 同位体組成

火山ガス中の水の酸素、水素同位体比は、水の起源などについての情報を得ることができる。硫黄山の噴気ガス中の水および周辺の温泉水、河川水の酸素、水素同位体比は、これまでも Mizutani et al. (1986)、北岡ら (1996) によって測定されている。筆者らも火山ガス中の水の起源、噴火様式を検討するため、噴火後 b 火口の火山ガスおよび既存の硫黄山の噴気ガス (B-region, C-region)、周辺に湧出する温泉水、河川水などを採取し、酸素、水素同位体比および火山ガス中の CO₂ の炭素同位体比を測定した。第 5 図に b 火口の火山ガス凝縮水 (●)、硫黄山の噴気ガス凝縮水 (○)、温泉・河川水 (□) の酸素、水素同位体比の関係を示した。同図には Mizutani et al. (1986) による硫黄山の火山ガスの値も併せて示した (○)。Mizutani et al. によれば九重硫黄山のマグマ起源の火山ガスの持つ酸素、水素同位体比はそれぞれ +10%、-20% となる。一方、周辺の温泉水や河川水に代表されるこの地域の天水の酸素、水素同位体比はそれぞれ -10%、-50~-60% である。b 火口で採取した火山ガスの酸素、水素同位体比はそれぞれ -1.9~-7.9%、-49% と -75% である。また硫黄山 C-region の 310~325℃ のガスの酸素同位体比は -1.1~-1.3%、水素同位体比は -47~-50% である。B-region の 222℃ のガスの値はそれぞれ +1.4% と -45% で C-region のガスに較べやや重い同位体比を持つ。一般に温度の低い火山ガスの水は天水が混入していることが多く、その酸素、水素同位体比は、その火山のマグマ水の持つ酸素、水素同位体比と天水のそれを結ぶ線上に位置し、天水とマグマ水の混合比率が計算される。九重山の場合、火山ガスはマグマ水と周辺の天水を結ぶ線よりはややずれた線上にプロットされる。このことは、火山ガスに混入する天水はすべてが液体ではなく、地下で熱により天水が沸騰し、その気相部分が火山ガスに混入していることを示している。火山ガス中の天水とマグマ水との比率を求めると、噴火直後の b 火口のガスは約 70% が天水となる。その後、b 火口のガスに混入する天水は約 60% に減少した。このことは、活動の継続によって山頂直下に胚胎する帯水層の水が枯渇し、火山ガスに混入する地下水が少なくなったことを示している。硫黄山 B-region のガスの天水の混入率は約 40% で、C-region、b 火口のガスよりマグマ性の水が多い。

b 火口の火山ガス中の CO₂ の炭素同位体比は -7.4~-6.9‰ (PDB) の狭い範囲に限定され、噴火後の経時変化は認められず、CO₂ がマグマ起源であることを示している。この値は 1961 年に測定された C-region のガス値 (Mizutani et al., 1986) とほぼ一致するが、1974 年、1984 年の値よりは約 1‰ 重い。

4. 噴出物の付着可溶性成分

火山灰に付着する可溶性成分は同時に噴出する火山ガスの化学組成を反映しており (例えば、Hirabayashi et al., 1982)、付着している塩化物イオンと硫酸イオンの量およびその割合は火山活動レベルや火山ガスと地下水との接触の有無などを反映している。

今回の活動による噴出物には、Cl⁻ が 700~7,600mg/kg、CO₄²⁻ が 700~6,300mg/kg 付着している。12月18日の再噴火で放出された火山灰は、最初の噴火での噴出物に較べると両成分とも付着量がやや多い。これら付着量を最近噴火した各火山の噴出物の値と較べると、Cl⁻ 付着量はマグマ噴火タイプの有珠山、桜島、ドーム出現後の雲仙岳などの火山灰に較べ約一桁多く、水蒸気爆発を起こした木曾御獄山や 1982 年草津白根山噴火での噴出物と同程度である。また、SO₄²⁻ 付着量は両者の中間的値である。両付着成分の割合 (モル比) は 0.83~3.3 である。最初の噴火は水蒸気爆発であり、12月18日以後の噴火は、噴出物にマグマ物質が微量混入していることから (中田ほか, 1996) マグマ水蒸気爆発とされているが両噴火での噴出物の大部分は既存の山体構成物であるこの種の噴火による噴出物としては九重山の、Cl⁻/SO₄²⁻ モル比は大きい。すなわち木曾御獄山、草津白根山、新潟焼山のような水蒸気爆発での噴出物の値は大きくても 0.5 程度である。また雲仙岳の屏風岩火口あるいは地獄跡火口でのマグマ水蒸気爆発の噴出物の値も 0.1 程度である。一方、有珠山、桜島からの火山灰の Cl⁻/SO₄²⁻ モル比は平均して 1 程度である。(第 6 図)。九重山の Cl⁻/SO₄²⁻ モル比が平均 2.6 と大きい理由は、上述したように噴火に関与した火山ガスは 500~600℃ と高温であったことと、可溶性成分の付着量は極めて大きいことから次のように説明される。すなわち、マグマから上昇してきた高温の火山ガスが山頂直下に存在した帯水層を接触し、火山ガスから水に溶解易い HCl の大部分と、SO₂ の一部が地下水に溶解移行した。噴火ではこの帯水層周辺の山体構成物が噴出した。このことは、噴火直後の火山ガス中に HCl が極めて少なく、SO₂ もやや少ないことから支持される。

5. 火山ガス放出量

九重硫黄山からのSO₂放出量は鎌田・太田(1977)より紫外線関連スペクトロメータを用いて測定がなされ、その量は11~53ton/dayである。また、江原ら(1981)は噴気量の直接測定を行い、硫黄山から平均3,180(793~5,650)ton/dayの火山ガスが放出されていると報告している。江原らによるSO₂の放出量は6~57ton/dayで鎌田・太田の結果と矛盾しない。最近、神宮司・江原(1996)はビデオ画像解析手法により、噴気放出量を求めている。それによると、噴火前の1995年7月28日の硫黄山からの噴気水蒸気量は約3,000(2,662~3,374)ton/dayで、江原らが1978年に求めた水蒸気放出量2,925ton/dayと大きく変わっていない。

松尾ら(私信)は10月の噴火開始直後からは紫外線関連スペクトロメータを用い、トラバース法でSO₂放出量の測定を行っている。その結果を使わせていただき火山ガスの化学組成から、計算により火山ガスの各成分の放出量を求めた(第2表)。噴火直後の火山ガス放出量は約 1×10^5 ton/dayである。放出されている火山ガスの98%は水で、その70%は天水起源で、マグマからもたらされた水は約 3×10^4 ton/dayである。噴火直後の硫黄山からの火山ガス放出量の約30倍にあたる。水以外の火山ガス成分ではSO₂の放出量が最も多く約1,200ton/day、次いでH₂S放出量が345ton/dayである。噴火後、火山ガス放出量は時間経過とともに減少し、11月13日には 4.5×10^4 ton/day(Total H₂O: 4.4×10^4 ton/day, Magmatic H₂O: 1.8×10^4 ton/day)と半減した。しかし、噴火直後5.4ton/dayであったHCl放出量は14ton/dayと約3倍となった。この増加は、活動の継続で山頂直下の地下水が枯渇し、火山ガスから地下水へのHClの溶解移行が少なくなったことを示していると考えられる。同時期に、京都大学によってプリュームライズ法(鍵山, 1975)を用いた水蒸気放出量が求められている。その量は 5×10^4 ton/day(私信)で、筆者らが算出した値 4.4×10^4 ton/dayと大きく異ならない。1996年2月の火山ガス放出量はさらに減少し、 $1 \sim 2.5 \times 10^4$ ton/day(Total H₂O: $1 \sim 2.46 \times 10^4$ ton/day, Magmatic H₂O: $4 \sim 9.8 \times 10^3$ ton/day)で噴火直後に比べ1/10~1/5となった。また、5月の放出量は 2×10^4 ton/dayであり、2月の値と大きな違いはない。この火山ガス放出量の変化は、目視観測による新火口の噴気活動の推移とも一致している。

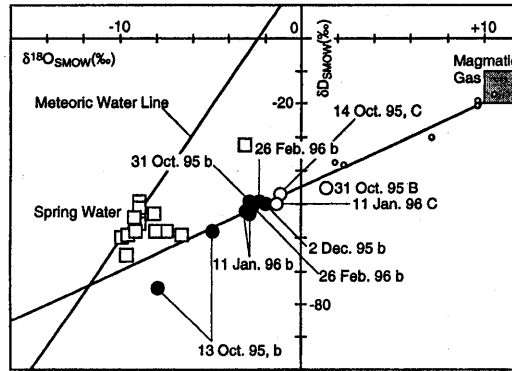
6. まとめ

火山ガスの化学組成・同位体組成、噴出物の付着可溶性成分、火山ガス放出量など研究結果と同火山の地下構造に関する知見(江原, 1994, Mogi and Nakama, 1993, 須藤ほか, 1996など)と併せると、今回の噴火様式は以下のように説明されよう。

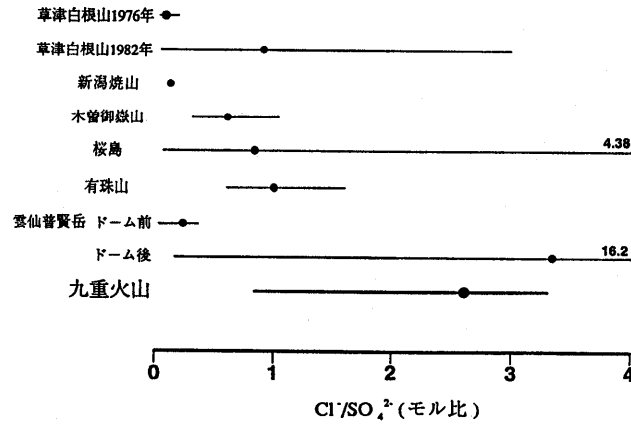
- 1) 火山ガスの化学組成から求めた平衡温度やかつて硫黄山に500℃を越える噴気があったことなどから、マグマからの500~600℃の火山ガスは、深さ2km付近で沸騰した天水起源の地下水の気相部分を取り込んで上昇し、山頂直下の帯水層と接触した。
- 2) 帯水層で水蒸気が一気に増産され爆発が発生した。ここで火山ガス中の水に溶け易いHClの大部分とSO₂の一部が除去され、帯水層周辺の山体構成物が噴出した。
- 3) 結果として、噴火直後の火山ガスは冷却され温度が低下し、HCl, SO₂濃度が下がった。また、噴出物には火山ガスに由来するCl⁻, SO₄²⁻が多く付着し、SO₄²⁻モル比が増大した。
- 4) 活動の継続に伴って、浅所の地下水は除々に枯渇したため、火山ガスに混入する天水の割合が少なくなるとともに冷却効果が減じ火山ガスの温度は高くなった。また、地下水に溶解移行するHCl, SO₂が少なくなり、ガス組成変化の一因となった。

火山ガス組成や放出量の変化などから噴火開始以降の火山活動は、1995年12月の再噴火、火山灰放出、地震の群発などの現象はあるものの、全体としては低下に向かっているように思われる。

今後、深部からのマグマの上昇がなくても、噴気活動の継続で山体浅所の地下水がさらに枯渇し、噴気温度の上昇や火山ガス組成の変化が継続すると考えられる。



第 5 図 九重火山地域の火山ガス、湧水の酸素・水素同位体組成
 ●：b 火口の火山ガス，○：B、C 地域の火山ガス，○：硫黄山の火山ガス (Mizutani et al., 1986), □：湧水
 Fig. 5 Isotope composition of waters from Kuju volcanic area.
 ●：condensates of volcanic gas from b-crater, ○：condensates of volcanic gas from B and C-region, ○：condensates of volcanic gas from Iwoyama (Mizutani et al., 1986), □：spring waters.



第 6 図 噴出物の付着可溶性成分の Cl⁻/SO₄²⁻ 比
 Fig. 6 The Cl⁻/SO₄²⁻ ratio of water-soluble fraction of volcanic ashes.

第 2 表 九重山からの火山ガス放出量

	Oct.13,1995	Nov.13,1995 ^{*1}	Feb.16,1996 ^{*2}	Feb.26,1996	Apr.26, 1996 ^{*3}	May 16,1996 ^{*3}
H ₂ O	98,600	44,100	10,500	24,600	19,500	46,600
HCl	5.4	14	2.9	6.8	6.5	15
SO ₂	142 ^{*4}	140 ^{*4}	20 ^{*4}	47 ^{*4}	28 ^{*4}	67 ^{*4}
H ₂ S	345	179	37	88	79	189
CO ₂	1,170	330	110	260	262	627
H ₂	3.5	1.1	0.1	0.3	0.4	1.0
N ₂	15	2.3	1.0	2.3	0.8	1.9
Total	100,300	44,800	10,800	25,000	19,900	47,500
Magmatic water	29,600	17,600	4,200	9,800	7,800	18,700

既存の噴気ガスの SO₂ 放出量を 50 ton/day とした

(Mar.14,1977 ; SO₂ 放出量は 11-53 ton/day、 Jul.1979 ; SO₂ 放出量は 6-57 ton/day)

*¹ : ガス組成は 10 月 31 日と 12 月 2 日の平均値

*² : ガス組成は 2 月 26 日

*³ : ガス組成は 5 月 14 日

*⁴ : SO₂ 放出量は九大データ

参 考 文 献

- 江原幸雄・湯原浩三・野田徹郎 (1981) : 九重硫黄山からの放熱量・噴出水量・火山ガス放出量とそれから推定される熱水系と火山ガスの起源. 火山, 26, 35-56.
- 江原幸雄 (1994) : 冷却するマグマ直上に発達するマグマ性高温地熱系—九重火山におけるケーススタディー. 地質学論集, 43, 169-177.
- Hirabayashi, J., Oosaka, J. and Ozawa, T. (1982) : Relationship between volcanic activity and chemical composition of volcanic gases — A case study on the Sakurajima volcano —. Geotherm. J., 16, 11-21.
- 平林順一・小坂丈予・小沢竹二郎・吉田 稔 (1984) : 1983年三宅島噴火後のガス組成の変化と火山昇華物. 火山, 29, S306-S318.
- 平林順一・小坂丈予・小沢竹二郎・吉田 稔 (1988) : 伊豆大島火山の1986年噴火活動に伴う火山ガスの組成変化. 火山, 33, S271-S284.
- Hirabayashi, J., Yoshida, M. and Oosaka, J. (1990) : Chemistry of volcanic gases from the 62-1 crater of Mt. Tokachi, Hokkaido, Japan. Bull. Volcanol. Soc. Japan, 35, 205-215.
- Iwasaki, I., Ozawa, T., Yoshida, M., Katsura, T., Iwasaki, B., Kamada, M. and Hirayama, M. (1962) : Volcanic Gas in Japan. Bull. Tokyo Inst. Tech., 47, 1-52.
- 神宮司元治・江原幸雄 (1996) : 最大噴気直径を利用した火山噴気放出量及び放熱量測定法. 火山, 41, 23-29.
- 鎌山恒臣 (1978) : 火山からの噴気による熱エネルギーと H₂O 放出量 — Plume rise からの推定 —. 火山, 23, 183-197.
- 鎌田政明・太田一也 (1977) : 桜島火山南岳からの SO₂ (二酸化イオウ) の放出量. 第2回桜島火山の集中総合観測報告書, 98-104.
- 北岡豪一・由佐悠紀・大沢信二・福田洋一・馬渡秀夫・日下部実 (1996) : 安定同位体からみた九重硫黄山における火山性流体の流出. 地球惑星関連学会1996年合同大会要旨, 381.
- Mizutani, Y., Hayashi, S. and Sugiura, T. (1986) : Chemical and isotopic compositions of fumarolic gases from Kuju-Iwayama, Kyushu, Japan. Geochem. J., 20, 273-285.
- Mogi, T. and Nakama, S. (1993) : Magnetotelluric interpretation of the geothermal system of the Kuju volcano, southwest Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res., 56, 297-308.
- 中田節也・渡辺一徳・渡辺公一郎・木村慶信・檀原徹 (1996) : 九重山, 1995年10月-1996年1月噴火: 地質と岩石. 1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究報告書, 33-39.
- 須藤靖明・岡本 茂・筒井智樹 (1996) : 九重火山地域における地震波減衰構造. 火山, 41, 11-22.
- 渡辺公一郎・渡辺一徳・檀原 徹・中田節也・木村慶信 (1996) : 地球惑星関連学会1996年合同大会要旨, 379.