

REVIEW

火山ガスと防災[†]

Volcanic Gas and Prevention of Disaster

平 林 順 一*

Junichi HIRABAYASHI

(Received September 27, 2002; Accepted November 21, 2002)

A large amount of SO₂ gas was discharged from Miyakejima volcano since the end of September, 2000. The averaged SO₂ flux was about 50,000 ton/day in 2000. About 4,000 people could not returned to the island, because SO₂ gas has been discharged, and more than 5 ppm of SO₂ gas concentrations has been observed frequently around the island. In generally, volcanic gas contains mainly water vapor. The dry gas is largely composed of HF, HCl, SO₂, H₂S and CO₂ with small amount of N₂, H₂, He, Ar, CH₄ and CO. HF, HCl, SO₂ and H₂S gases have high toxicity. The volcanic gas disaster occupied about 2.5% of volcanic disaster based on the dead since 1900. In Japan, disasters by volcanic gas occurred 28 times around eleven active volcanoes and 49 people were died during the recent 50 years. Occurrence of volcanic gas disaster is mainly dominated by the configuration of ground around fumarolic area and meteorological conditions such as windless, cloudy, foggy weather and formation of inversion layer. SO₂ has been released at Oyama volcano in Miyakejima island for more than two years, and the inhabitants had to leave the island. Volcanic gas disaster is influenced by meteorological conditions and local geology. In case of big eruption, volcanic gas ascends to the stratospheric, and aerosol causes low temperature in the world. To reduce the disaster of volcanic gas, it is needed to monitor with a selective gas sensor and to alarm people the forecasted dangers.

1. はじめに

一昨年6月から活動を始めた三宅島では、同年9月以降山頂に形成された陥没火口から大量の火山ガスが放出されるようになった。そのうち、二酸化硫黄 (SO₂) ガスは、多いときには1日に5万トンを超え、現在でも5,000～15,000トンが放出されている (図1)。このために海岸線近くでは、環境基準である1時間値 0.1 ppm, 日平均濃度 0.04 ppm をはるかに超える SO₂ 濃度がしばしば測定されている。二酸化硫黄は濃度が 20 ppm を超えると咳き込んだり、涙がでるようになり、500 ppm を超えると死に至る毒性の強いガスである。このため、約 4,000 名の島民は帰島のめどが立たないまま長い避難生活を余儀なくされている。日本での SO₂ ガスによる災害は、阿蘇山で時々発生している。

火山ガスのなかには SO₂ 以外にも、毒性の強い成分が含まれている。1997年9月15日、安達太良山沼の平火口で硫化水素 (H₂S) による火山ガス事故が発生し、ハイカー4名が亡くなり、同年7月には青森県八甲田山麓で、高濃度

の二酸化炭素 (CO₂) のたまっていた窪地に落ちた自衛隊員3名が亡くなった。

本総説では、各地の火山から放出されている火山ガスについて、その化学的特長やその危険性、火山ガスによる災害例と対策などについて紹介する。

2. 火山ガスはどこから出てくるか？

その化学的特長と噴出量

日本には86の活火山があり、北方領土と海底火山を除く67火山のうち、約80%にあたる54火山から常時火山ガスが放出されている (図2)。火山ガスは、地下のマグマに溶けている水素 (H)、酸素 (O)、塩素 (Cl)、硫黄 (S)、炭素 (C)、窒素 (N) などの揮発性成分が圧力低下などによって発泡し、水蒸気 (H₂O)、フッ化水素 (HF)、塩化水素 (HCl)、SO₂, H₂S, CO₂, 水素 (H₂)、窒素 (N₂)、一酸化炭素 (CO)、メタン (CH₄) などとなって地表に放出される。マグマから分離した火山ガスは、地表に到達するまでの間に、地下水との触、ガス成分相互の反応、地下にたまっている硫黄や有機物から SO₂, H₂S, CO₂, CH₄ の供給などにより、個々の火山で、あるいは噴出している場所、温度などによって含まれる成分と濃度が異なる。

一般に、火山ガスの主成分は水蒸気 (H₂O) で、90% 以上を占める。H₂O 以外の化学組成はその温度によって異なる。

* 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)

Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology (2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan)

[†] Congratulations on winning the 2002 Nobel Prize

I would say congratulations on Mass Spectrometry Society for two Nobel Prizes, Fenn & Tanaka.

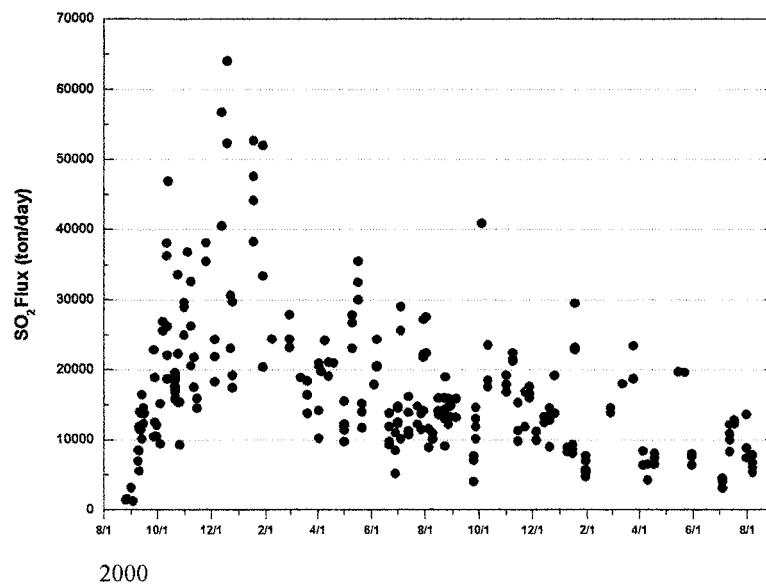


図1. 三宅島からの SO_2 放出量（気象庁，産総研，東工大資料）



図2. 日本の活火山分布（北方領土，海底火山を除く）と常時火山ガスを放出している火山

表 1. 主な火山からの二酸化硫黄放出量

火 山	SO ₂ 放出量 (ton/day)	継続時間 (年)	マグマ中の SO ₂ 濃度 (ppm)
三宅島 ^{a)}	15,000	2	3,000
伊豆大島 1988~90	350	2.2	540
1970~74	430	3.8	540
桜島	2,000	50	960
薩摩硫黄島	480	>1,000	600
エトナ	6,000	>1,000	6,000
ストロンボリ	400	>5,000	5,800
ポポカトペトル	8,000		

^{a)} 現在の放出量、活動開始からの総 SO₂ 放出量は 15,000,000 トン

る。温度の高い火山ガスには HF, HCl, SO₂, H₂, CO などが多く含まれ、温度の低い火山ガスでは H₂S, CO₂, N₂ などが主成分となる。

表 1 に主な火山からの SO₂ の放出量をまとめた。表に示したように、三宅島では、今でも 1 日に平均 15,000 トンが放出されており、これは全世界の火山から放出される SO₂ の約 40% にあたる。また、これまでに放出された総 SO₂ 量は約 15,000,000 トンで (表 1)、これは中国が 1 年間に燃やす化石燃料から出る SO₂ 量に匹敵する。三宅島の火山ガス放出活動は、まだ 2 年間であるが、桜島では 50 年間にわたって 1 日に 1,000~2,000 トンの SO₂ が定常的に放出されている。この SO₂ 放出量と火山ガス組成から計算した全火山ガス放出量は、1 日に 10,000~20,000 トンとなる。同火山ではしばしば爆発的噴火が発生しているが、爆発時には短時間に数万トン~数十万トンの火山ガスが放出される。外国では、メキシコのポポカトペトル火山やイタリアのエトナ火山からも大量の SO₂ が放出されている。また、大きな噴火では、例えばアイスランドのラキ火山 1783 年の噴火では、90,000,000 トンの硫酸 (H₂SO₄, SO₂ に換算すると約 60,000,000 トン) が放出された。

火山ガス放出量の測定は、ガスの放出されている状態によって方法が異なる。SO₂ ガス放出量の測定は、SO₂ が太陽からの特定の波長の紫外線を吸収する性質を利用する方法が使われる。この方法で測定した SO₂ 放出量と火山ガスの化学組成から、火山ガスの総放出量が推定できる。また、噴煙の移動する状態から主成分である水蒸気量を測定する方法もよく使われている。

噴気孔などから放出される火山ガスは、マグマから脱ガスして地表で放出されるまでに地下水の混入、岩石との反応ガス成分相互の反応などにより、その化学組成や同位体比は変化することが多い。火山ガスの起源を知る目的で、質量分析計を用いた H₂O の水素、酸素同位体比や CO₂ の炭素同位体比などの測定が行われている。

雨や雪などの天水の水素、酸素同位体比は一定の関係があり、 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ で表される直線上にある。一方、マグマと同位体平衡にある水 (マグマ水) は $\delta D = -10 \sim -30\text{‰}$, $\delta^{18}O = +5 \sim +10\text{‰}$ であり、天水の値とは異なる領域に存在する。また、CO₂ の炭素同位体比はその起源により $\delta^{13}C$ 値が異なる。大気中の CO₂ は -8‰ 前後でほぼ

一定であり、生物起源は $-20 \sim -35\text{‰}$ の範囲に入る。一方、マグマ起源の CO₂ の値は $-4 \sim -6\text{‰}$ の範囲に分布する。したがって、H₂O の水素、酸素同位体比や CO₂ の炭素同位体からその起源の情報を得ることが可能である。

(δ は標準物質に対する各同位体比の千分率偏差 (‰) で

$$\delta = [(R_X/R_{ST}) - 1] \times 1,000$$

で表される。R_X は試料の同位体比、R_{ST} は標準物質の同位体比を示す。)

3. 火山ガスによる事故

火山ガスによる死亡事故は、火砕流や泥流と比べれば少ないが、1900 年以降の火山災害で見ると、死亡者の約 2.5% にあたる 1,900 名が火山ガスで亡くなっている [表 2, 宇井編 (火山噴火と災害, 1997, 東大出版会)]。最も大きな火山ガス事故は、1986 年、アフリカのカメルーン国で発生した。この事故は火口湖であるニオス湖の湖水に溶けていた火山性の CO₂ が約 1 km³ 突出したことによって発生し、1,734 名が死亡し、約 7,000 頭のウシが死んだ。また、1979 年には、インドネシアのディエン高原でも、噴火によって放出された CO₂ によって 142 名が死亡した。

日本では、このように一度に多くの人命が奪われる火山ガス事故は発生していないが、時々火山ガスによる死亡事故が発生している。表 3 に 1950 年以降に発生した火山ガス事故をまとめた。この 50 年間に、28 回の火山ガス事故が発生し、49 名が亡くなっている。これら事故の原因となった火山ガスの成分は、全体の 80% が H₂S で、次いで SO₂ が原因となっている。ただし、SO₂ による事故は、阿蘇山で発生しているだけである。阿蘇山は、活動的な中岳火口から HCl や SO₂ を多く含む火山ガスが放出されていること、その火口縁に年間 100 万人近い人が立ち入る観光地であること、これまで被害にあった人の多くは喘息の持病があり、低濃度の SO₂ によっても発作を起こすことなど、阿蘇山の SO₂ によるガス災害は特殊である。また、日本での CO₂ によるガス事故は、八甲田山の事故だけである。

これまでの多くの火山ガス事故は、火山ガスが噴出している周辺の窪地や谷地形などで発生している。また、風が弱く、曇天のときに発生している。これは、表 4 に示したように、H₂S, SO₂, CO₂ など成分は、空気に比べて 1.2~2.2

表 2. 火山災害の原因

災害原因	死亡者数	割合 (%)
火砕流・岩屑なだれ	36,800	48.4
泥流・洪水	28,400	37.4
溶岩流	100	0.4
噴石・降下火砕物	3,000	3.9
津波	400	0.5
噴火後の飢饉・疫病	3,200	4.2
火山ガス・酸性雨	1,900	2.5
その他	2,200	2.9
合 計	76,000	100
年平均死亡者数	880	

表 3. 1950 年以降に日本で発生した火山ガス災害

年 月 日	場 所	事 故 内 容	原 因 ガ ス
1951/11/5	箱根, 湯ノ花沢	露天風呂で 2 名死亡	H ₂ S
1952/3/27	同 上	浴室で 1 名死亡	H ₂ S
1954/7/21	立山, 地獄谷	露天風呂で 1 名死亡	H ₂ S
1958/7/26	大雪山, 御鉢平	2 名死亡	H ₂ S
1961/4/23	立山, 地獄谷	1 名死亡	H ₂ S
1961/6/18	大雪山, 御鉢平	2 名死亡	H ₂ S
1967/11/4	立山, 地獄谷	キャンプ中 2 名死亡	H ₂ S
1969/8/26	鳴子	浴室で 1 名死亡	H ₂ S
1970/4/30	立山, 地獄谷	温泉作業員 1 名死亡	H ₂ S
1971/12/27	草津白根山振り子沢	スキーヤー 6 名死亡	H ₂ S
1972/10/2	箱根, 大涌谷	3 名中毒, 内 2 名死亡	H ₂ S
1972/10/28	那須岳, 湯本	浴室で 1 名死亡	H ₂ S
1972/11/25	立山, 地獄谷	温泉作業員 1 名死亡	H ₂ S
1975/8/12	立山, 地獄谷	1 名死亡	H ₂ S
1976/8/4	草津白根山, 本白根	登山中 3 名死亡	H ₂ S
1980/12/20	安達太良山, 鉄山	雪洞で 1 名死亡	H ₂ S
1985/7/22	立山, 地獄谷	湯溜まりで 1 名死亡	H ₂ S
1986/5/8	秋田焼山 叫び沢	谷で 1 名死亡	H ₂ S
1989/2/12	阿蘇山, 中岳	火口縁で観光客 1 名死亡	SO ₂
1989/8/26	霧島, 新湯	浴室で 2 名死亡	H ₂ S
1989/9/1	那須岳	作業員 3 名死亡	H ₂ S
1990/3/26	阿蘇山, 中岳	火口縁で観光客 1 名死亡	SO ₂
1990/4/18	阿蘇山, 中岳	同 上	SO ₂
1990/10/19	同 上	同 上	SO ₂
1994/5/29	同 上	同 上	SO ₂
1997/7/12	八甲田山, 田代平	ガス穴で 3 名死亡	CO ₂
1997/9/15	安達太良山, 沼ノ平	登山中 4 名死亡	H ₂ S
1997/11/23	阿蘇山, 中岳	火口縁で観光客 2 名死亡	SO ₂

表 4. 火山ガスの比重 (空気を 1 として)

火山ガス成分		比 重
塩化水素	HCl	1.27
二酸化硫黄	SO ₂	2.22
硫化水素	H ₂ S	1.18
二酸化炭素	CO ₂	1.53

倍重いために低い場所にたまりやすい性質であることによる。また、無風・曇天のときには、噴出した火山ガスが拡散しにくく、地表近くが高濃度になりやすいために、事故が起こりやすい。この二つの条件が重なると事故の発生確率が高くなる。

火山ガスによる災害は、ガスの毒性による直接的な災害だけではなく、大きな噴火では、数十 km 上空まで上昇した火山ガスがエアロゾルとなり、固体微粒子とともに長期間成層圏に滞留するため世界規模の気温低下の原因となる。大きな噴火で放出された火山ガスの量（硫酸などとして）と噴火後の世界的な気温低下との間には関係が見られる。例えば、前述した 90,000,000 トンの硫酸が放出された 1978 年のアイスランド、ラキ火山の噴火では、噴火後世界の平均気温が約 1°C 低下した。また、成層圏に注入された火山ガスはオゾン層破壊の原因の一つにもなる。噴火で対流圏に放出された火山ガスは酸性雨（酸性霧）の原因にもなる。このため、食物や家畜の餌に被害を及ぼし飢饉をもたらすこともある。ラキ火山の噴火では、300 km 遠方まで酸性雨（霧）が降り、牧草が枯れたために家畜が死滅

し、飢饉となった。鹿児島市内では、桜島からの火山ガスが原因で、pH が 3 以下の酸性の雨が降ることもある。

4. 火山ガスの毒性

火山ガスに含まれる成分のうち、HF、HCl、SO₂、H₂S、CO₂、CO が毒性をもち、その毒性を表 5 にまとめた。

高温のガスに特徴的な HF、HCl、SO₂ は刺激臭を伴い、許容濃度はそれぞれ 3 ppm、2 ppm、5 ppm（アメリカの基準では 2 ppm）で、致死濃度も 500～1,000 ppm と極めて毒性が強い。これらのガス成分を多く含む火山ガスを放出している火山では、火山活動が活発で、火口付近が登山禁止になっていることや近づきにくいこと、またこれらガス成分は刺激臭が強いいためその存在が容易に検知されることなどの理由で、阿蘇山の例を除けば、これらガスによる死亡事後は起こりにくいと言える。

多くのガス災害の原因である H₂S ガスも毒性が強く許容濃度は 10 ppm である。400 ppm を超えると生命が危険となり、700 ppm を超えると即死するとされている。H₂S ガスは 0.06 ppm 程度でも臭気を感じ、低濃度ではいわゆる“卵の腐った臭い”がするが、高濃度になると臭気を感じなくなる。H₂S ガスは火山ガスに普通に含まれる成分であるが、特に低温の噴気ガスに多く含まれている。現在、定常的に火山ガスを放出している 54 の活火山では、桜島、阿蘇山、三宅島、浅間山などを除くと山腹の比較的低温の低い噴気孔から火山ガスが放出されており、そのガス中に H₂S が多く含まれている。また、火山地帯には H₂S

表 5. 火山ガス各成分の毒性

ガス成分/濃度	1 ppm	10 ppm	100 ppm	1,000 ppm	
フッ化水素 ^{a)} (HF)	3 許容 濃度	50 2 時間	250 1 時間	600 30 分	
塩化水素 (HCl)	1 臭い 検知	5 許容 濃度	10 粘膜 刺激	1,000 以上 数分間致命的	
二酸化硫黄 (SO ₂)	0.3～1 臭い 検知	5(2) 許容濃度 上気道刺激	20 目刺激 咳	30～40 呼吸 困難	50～100 1 時間 耐える
硫化水素 (H ₂ S)	0.06 臭い 検知	1～5 不快臭	10 許容 濃度	200 ～ 400 ～ 700 ～ 眼鼻 灼熱性 疼痛	30～60 分 生命危険 中枢麻痺 即死
二酸化炭素 ^{b)} (CO ₂)				5,000 許容 濃度	5% 呼吸間隔 短縮
一酸化炭素 (CO)		50 許容 濃度	600～700 1 時間 頭痛・耳鳴 嘔吐	1,500 1 時間 生命危険	10～20 頭痛 めまい 嘔吐 意識障害

a) モルモットに対する吸入致死濃度。

b) CO₂ 濃度 9% で 5 分間、10% で 1 分間で死亡した例がある。10～15% では数呼吸で昏睡状態になるともいわれている。
許容濃度は日本産業衛生学会の基準による。SO₂ の 2 ppm は米国産業衛生専門家会議による基準。

ガスを含む温泉も多く、入浴中のガス事故も発生している。

一酸化炭素は許容濃度が 50 ppm で、上述の三つのガス成分に比べればやや毒性が弱い、1,500 ppm を超えると 1 時間で生命が危険となる。CO ガスは血液中のヘモグロビンとの親和力が酸素の 210 倍で、血液の酸素輸送を阻害

する。血液中的一酸化炭素ヘモグロビン (COHb) 濃度が 70% を超えると生命が危険となる。CO ガスは高温の火山ガスに特徴的な成分であるが、その濃度は上述のガス成分に比べれば極めて微量であるため、火山ガス中の CO ガスによる災害は発生していない。

火山ガスに多く含まれる CO₂ は、特に温度の低い火



写真 1. 三宅島の噴煙（撮影：東京都）



写真 2. 三宅島噴火口からのガス採取パイプ設置状況（撮影：東京都）

山ガスや温泉とともに噴出するガスの主成分であるが、その毒性は上述のガス成分に比べれば極めて弱く、許容濃度も 5,000 ppm である。CO₂ ガスの致死濃度は 20～40% と言われているが、10% の濃度でも 1 分間で死に至った例も報告されている。CO₂ は臭気もなく見えないために高濃度の CO₂ が噴出していても認識することができず危険である。八甲田山以外にも北海道の有珠山山麓や九州の霧島で高濃度の CO₂ が噴出している場所がある。また、九州の雲仙岳山麓にも板底と呼ばれていた地表から CO₂ が噴出していた場所があった。

5. 火山ガス事故の対策

ガス災害の発生を防止し、人的被害を軽減するために自治体は、1) 火山ガスの発生源の確認と噴出しているガスの特性と挙動を把握する、2) 危険が予想される地域には柵などを設置するとともに危険を知らせる看板などを立てる、3) さらに必要があれば、草津白根山に設置されているような自動監視・警報システムなどを設置する、4) 住民や観光客にガス災害についての広報活動などの施策を行うことが必要である。

一方、火山地帯を行動する個人は、1) 火山および火山ガスについての最低限の知識をもつ、2) 立て看板に注意し行動する場所の危険性を認識する、3) 危険区域に立ち入らない、4) 決められたルートからはずれない、など個々に身を守る努力をしなければならない。

このような行政の対策と個人の努力によって火山ガスによる被害の多くは防ぐことができる。

草津白根山では、1976 年の H₂S ガス死亡事故を契機に、地方自治体が火山ガスの出ている地域に硫化水素センサーを設置し、一定の濃度を超えるとスピーカーで危険を知らせる自動警報措置を設置した。さらに、火山ガスの危険性を知らせる案内板も設置している。その後同火山では、硫化水素による火山ガス事故は起こっていない。阿蘇山でも SO₂ によるガス事故が続いたことから、自動監視システムを設置して SO₂ 濃度が 5 ppm を超えると観光客の火口付近への立ち入りを規制している。

三宅島では、火山ガス放出量が減少して島民が島に戻った後も、風向きや天候の条件によっては環境基準を超える高濃度の火山ガスが居住地域に到達することが考えらる。このため、火口からの距離やガスが流下しやすい地形などを考慮して、ガス検知装置の設置、防災無線やインターネットなどを用いた情報伝達、避難システムなどについて今から検討しておく必要がある（写真 1、写真 2）。

文 献

- 1) 平林順一，日本集団災害医療研究会誌，3，11（1998）。
- 2) 小坂丈予，平林順一，山本雅弘，野上健治，自然災害科学，17，131（1998）。
- 3) 風早康平，平林順一，森 博一，尾台正信，中堀康弘，野上健治，中田節也，篠原宏志，宇都 浩，地学雑誌，110，271（2000）。
- 4) 宇井忠英編，“火山噴火と災害”，東大出版会（1997）。
- 5) 酒井 均，松久幸久，“安定同位体地球化学”，東京大学出版会（1996）。

Keywords: Volcanic gas, Chemical composition, Discharge rate, Toxicity, Disaster