

桜島における火山ガスの成分変化と火山活動

平 林 順 一

VARIATION OF CHEMICAL COMPOSITIONS OF VOLCANIC GASES AND VOLCANIC ACTIVITY AT SAKURA-JIMA VOLCANO

By *Jun-ichi* HIRABAYASHI

Synopsis

Sakura-jima Volcano have been erupted since October of 1955, and a large amount of volcanic gases and ashes have been thrown out from the summit crater of Minamidake. Geochemical researches about water-soluble fraction of volcanic ashes, volcanic gases absorbed into alkaline solution, and HF, HCl and SO₂ gas in atmosphere by using automatic gas meter were carried out from 1974.

From comparison between the variation of chemical compositions of volcanic gases and geo-physical data it was considered that the chemical research described above is one of methods for the estimation of volcanic activity at Sakura-jima Volcano.

1. ま え が き

桜島火山は1955年10月に活動を再開して以来今日まで爆発をくり返し、南岳山頂火口から噴煙を放出し続けている。この一連の研究は噴煙中の火山ガス成分を連続して測定し、その成分変化から桜島火山の活動状況を把握することを目的として始められた。このため筆者らは無線操縦飛行機による噴煙の直接採取をはじめとして、火山灰の水溶性付着成分の分析、静置式アルカリ吸収法、大気中に拡散した火山ガス成分の連続測定など種々の方法を用いて **Fig. 1** に示す島内各観測点において測定を続けて来た¹⁻³⁾。

一般に火山ガスの組成は 97~98 vol.% が H₂O であり、残りが HF, HCl, SO₂, H₂S, CO₂ などのいわゆる酸性ガスと N₂, H₂, Ar などの不活性ガスからなっている。これら各成分の組成割合は温度に大きく依存するものであって、**Table 1** には岩崎ら⁴⁾ による本邦各地の火山ガスの分析結果から求めた噴気孔温度の違いによる火山ガスの成分特徴を示した。それによると噴気孔温度の低い火山ガスの成分は酸性ガスのうち CO₂ と H₂S が主成分であるが、温度が高くなるとこれらに加えて SO₂ が含まれるようになる。さらに高温になると、H₂S にくらべ SO₂ の割合が増加し、また HF, HCl も含まれるようになる。

この温度による火山ガス組成についての経験則にもとづいて、桜島火山においてはこれらの成分のうち HCl と SO₂ の両成分に着目し、上述の各種方法を用いてそれらの変化、特に両成分の割合の変化を求め、

Table 1. Classification of volcanic gases by their orific temperatures.

	Chemical constituents	Temperature range
1	H ₂ O, HF, HCl, SO ₂ > H ₂ S, CO ₂ , N ₂ < H ₂	1200-800°C
2	H ₂ O, HF, HCl, SO ₂ > H ₂ S, CO ₂ , N ₂ > H ₂	800-100°C
3	H ₂ O, (HF, HCl), SO ₂ ≥ H ₂ S, CO ₂ , N ₂	
4	H ₂ O, SO ₂ < H ₂ S, CO ₂ , N ₂	100-60°C
5	H ₂ O, H ₂ S, CO ₂ , N ₂	lowere than 60°C

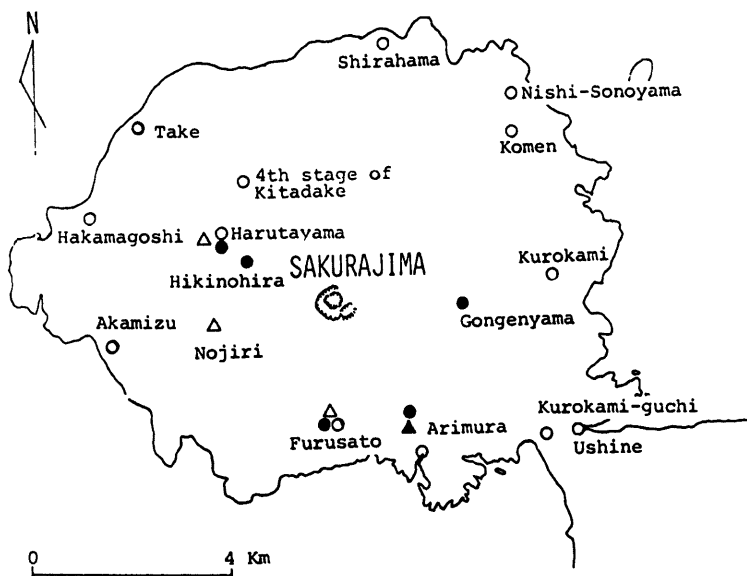


Fig. 1. Sakurajima Volcano and position where volcanic gases were measured.

- : Sampling station of volcanic ashes.
- : Station where gases were absorbed into alkaline solution.
- △: Station where HCl, SO₂ and HF gas were measured by automatic recorder.
- ▲: Station where volcanic gases were collected by radio-controlled aeroplane.

桜島火山観測所で測定された火山活動に関する地球物理学的諸測定の結果と比較し、同火山の活動状況と火山ガス成分の変化との関係についての検討を試みた。

2. 火山灰の水溶性付着成分

桜島火山はほとんど山頂火口からのみ火山ガスを放出し、しかも頻繁に爆発をくり返しているため、直接山頂火口で火山ガスを採取することは危険を伴い不可能である。そこでまずはじめに 1 l のガラス製真空ビン 2 本を胴体に抱かせた無線操縦飛行機を使用して上空の噴煙中の火山ガスを直接採取し、捕集した火山ガス成分の分析を行った。その結果 (Table 2) によれば大気により拡散、希釈されているものの HCl が 3~37 ppm, SO₂ が 17~68 ppm 含まれており、両者の比 (モル比) は 0.18~0.77 で平均値は 0.40 であることが明らかとなった。またこの観測期間中に有村で採取した降下火山灰の水溶性付着成分の分析を行ったところ、Cl⁻ の付着量は 197 mg/kg, SO₄²⁻ は 1460 mg/kg で著しく多量の火山ガス成分が付着していることが認められ、しかも両成分の比 Cl/S (モル比) は 0.37 であり、先の噴煙中の HCl/SO₂ の平均値にきわめて近いことが判明した (Table 3)。

この結果から火山灰の水溶性付着成分の Cl⁻ と SO₄²⁻ の比は火口から放出される火山ガスの HCl と SO₂ の比に変わりうるものと考え、Fig. 1 に示した春田山、赤水、古里、有村、黒神などの各観測点で1974年以

Table 2. Chemical compositions of volcanic gases collected by radio-controlled aeroplane.

Sample			HCl	SO ₂	HCl/SO ₂
Feb. 14, 1975	Blank		0 ppm	1 ppm	—
	9 ^h 28 ^m	300 m	37	56	0.67
Feb. 15	13 ^h 20 ^m	1100 m	8	32	0.25
	13 ^h 20 ^m	1100 m	20	52	0.38
	16 ^h 05 ^m	2 m	0	4	—
	17 ^h 00 ^m	450 m	24	30	0.77
	17 ^h 00 ^m	450 m	27	68	0.40
Feb. 16	9 ^h 40 ^m		5	20	0.25
	9 ^h 40 ^m		3	17	0.18
	12 ^h 14 ^m		7	24	0.29

ppm = ml/1000 l

Table 3. Chemical composition of water-soluble components from volcanic ash.

Sample		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl/S*
Arimura	'75 II 12-16	197 mg/kg	1460 mg/kg	0.37

* molar ratio

降, 降下直後の新鮮な火山灰を出来るかぎり多く採取し, その水溶性付着成分のうちの Cl⁻ と SO₄²⁻ の分析を行った。その結果, Cl⁻ は 5.9~8730 mg/kg, SO₄²⁻ は 29.8~13600 mg/kg とそれぞれの火山灰で著しく付着量が異なり, また広範囲にわたっているが両者の比 Cl/S の値は一部大きな値を示すものもあるが大部分は0.2~1.5の範囲に集中していることが明らかとなった。そこで Cl/S の値が1.5以上のものを除いて1ヶ月ごとの平均値を求め, その変化を桜島火山の表面活動の一つである月別爆発回数(火口から約 2.7 km はなれた春田山において地震の振幅が 10 μ 以上で, 空振が 0.1 mb 以上の爆発)の変化とを Fig. 2 に示した。同図に示されているように爆発回数の多い時期には Cl/S の値も大きく, 逆に爆発の少ない時期にはその値が小さく, Cl/S の値の変化は爆発回数の増減と比較的よく対応していることが判明した。このこ

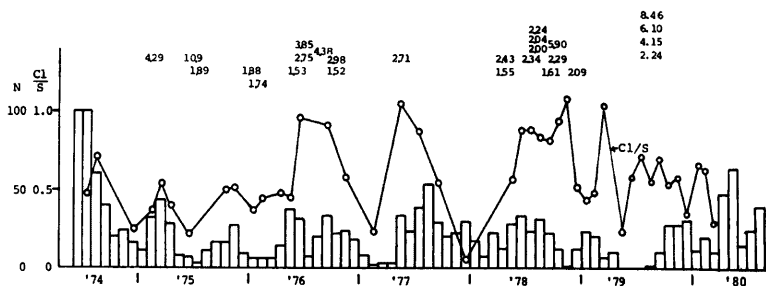


Fig. 2. Averaged monthly Cl/S molar ratio of water-soluble fraction of volcanic ashes vs monthly frequency of explosion.

とから火山灰の水溶性付着成分のうちの Cl^- と SO_4^{2-} の比の変化は桜島火山の表面活動の変動を知る一面の指標になりうるものと考えられる。

3. 静置式アルカリ吸収法

前章の火山灰の水溶性付着成分の Cl/S の変化を求める方法は、降灰が無くては行うことが出来ず、また水溶性成分を測定するため雨にぬれた火山灰は使用することが出来ないなどの制約があり、新鮮な火山灰が得られた時のみの断続的な情報しか得られない。そこでこれらの欠点を補う意味もあり、また1～2ヶ月間の平均的な火山ガスの成分変化の傾向を知るためにも1976年1月から Fig. 1 に示した南岳周辺の中腹および山麓の引の平、春田山、古里、有村、権現山の5ヶ所にアルカリ吸収液を設置して観測をはじめた。装置は吸収液に雨水の混入をさけるために覆をし、火口から放出され大気中を拡散してきた火山ガスが液面で自然に吸収されるようにしただけのものであるが、この吸収液を1～2ヶ月ごとに交換し、この間に液に吸収された HCl と SO_2 ガスの総量を求めた。この結果から一日当りの吸収量を計算すると各地点で HCl は $0.009 \sim 1.3 \text{ mg/day}$, SO_2 は $0.011 \sim 1.55 \text{ mg/day}$ であった。この両成分の各測定期間ごとの測定地点によ

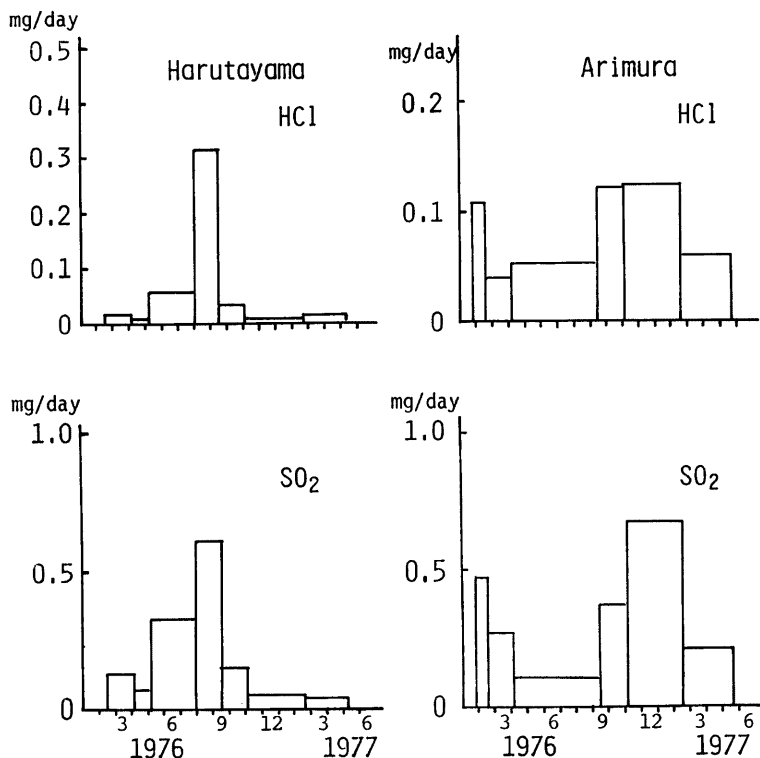


Fig. 3. Variation of daily amounts of HCl and SO_2 gas absorbed into alkaline solution for each period at Harutayama and Arimura.

る吸収量の変化について検討するために南岳をはさんで西側の春田山と東側の有村における同観測の結果を Fig. 3 に示した。Fig. 3 に示されているように春田山では HCl 、 SO_2 共に夏期に吸収量が増加し、冬期には減少しており、有村では逆に冬期に両成分の吸収量が多く、夏期には少なくなっている。この変化傾向は、桜島周辺では夏期には東風が、また冬期には北西風が卓越するためであり、桜島火山の活動とはほとんど関連が無く、主に風向に強く支配されることが明らかとなった。しかしこれら5観測点における観測値から HCl と SO_2 両成分の比をとってみると、Fig. 4 に示すようにいずれの観測点でも同様な変化傾向を示しており、先に述べた季節の違いによる風向等の気象条件の影響はほとんど除去されるものと考えられる。またこれらの比の値と表面活動との関連についてしらべるため、これらの値の変化傾向とその同じ吸収液交換期間の日平均爆発回数とを同図に併記したところ、この両者はよく関連して変動することも確かめられた。そこでこれら5観測点での各吸収液交換期間ごとの HCl/SO_2 の平均値を求めこの変化と各期間ごとの日平均爆発回数の増減とを比べ Fig. 5 に示した。同図によれば、日平均爆発回数の多い期間は HCl/SO_2 の値も大きく、逆に日平均爆発回数の少ない時には HCl/SO_2 の値も小さくなっており、 HCl/SO_2 の値の変化は爆発現象の変動とよく対応していることが認められた。しかし'79年5月から8月にかけては爆発がまったく無い静穏な期間であったにもかかわらず6月から8月にかけて HCl/SO_2 の値が約1.5と著しく大きな値を示している。このことはその後9月から徐々に爆発が再開し活動が活発化したことを考えると、この活動期に先行した現象と考えられる。この方法は吸収液を長期間放置してあるために降下火山灰あるいは堆積火山灰等の若干の混入、風送塩の影響、風向による各観測点での火山ガス吸収量の違いなどの問題はあるが、1～2ヶ月間の平均的な HCl/SO_2 の値の変化が求められ、それにより桜島火山の表面活動の消長をとらえることが出来たものとする。しかも同火山の数ヶ月間の静穏期の後の再活発化に際しては、爆発が多発する約1ヶ月前にこの値が先行して増大することが認められた。

この方法での野口ら⁵⁾ による伊豆大島火山における結果によれば噴火の1～2ヶ月前に Cl/S の値が0.5～0.7と一旦大きくなり、噴火直前に0.2前後に小さくなることが認められており、桜島火山とは異なり常時噴火をしていない大島火山では上述の先行現象が顕著に表われているものと思われる。また同氏の浅間火山における観測や筆者らの阿蘇火山⁶⁾ での同様な観測では噴火前後の HCl/SO_2 に特に著しい傾向は認めることは出来ず、これは個々の火山の性質の違いや吸収液の設置場所によるものと考えられる。

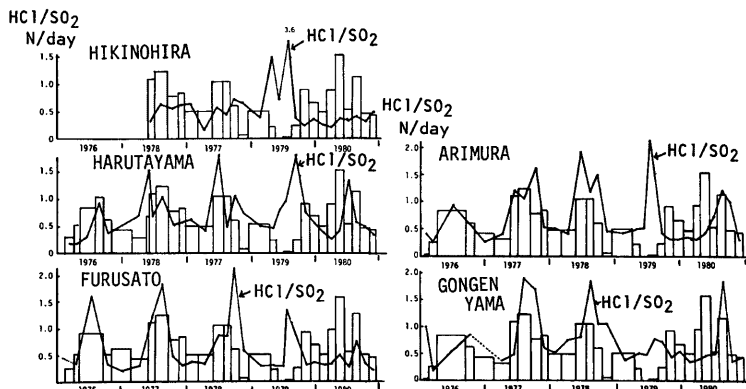


Fig. 4. Variation of HCl/SO_2 molar ratio of gases absorbed into alkaline solution at each station vs averaged daily frequency of explosion for each period.

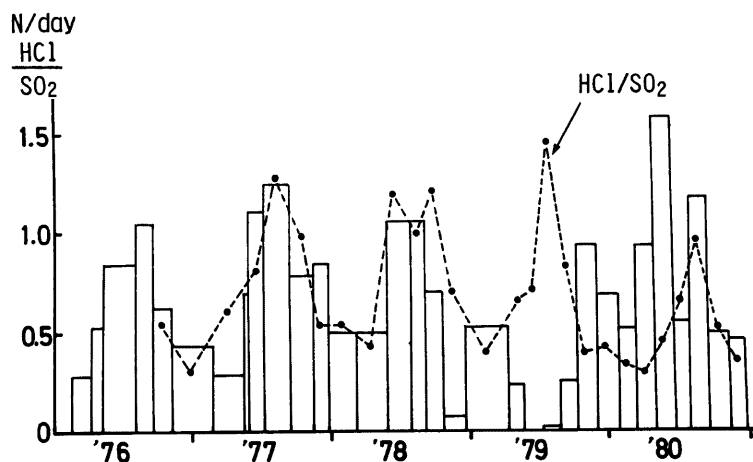


Fig. 5. Variation of averaged HCl/SO₂ molar ratio of gases absorbed into alkaline solution at five station *vs* averaged daily frequency of explosion.

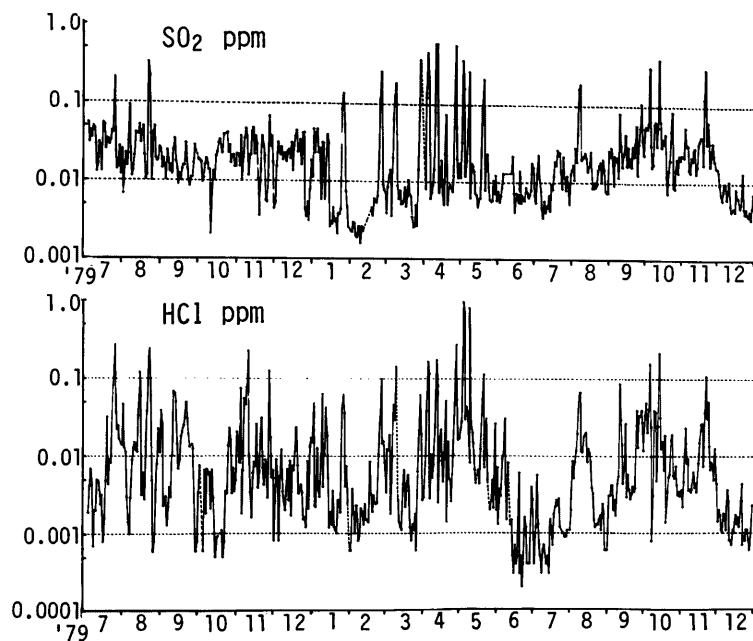


Fig. 6. Variation of HCl and SO₂ gas concentration in atmosphere by automatic recorder at Harutayama.

4. 火山ガスの自動連続測定

前章の方法では、吸収液交換期間の間の長期的な成分変化傾向を知るには好都合であるが、さらに短かい時間単位での火山ガス成分の変化を求めるために1978年11月から火口から約 2.7 km 離れた春田山において大気中の HCl 、 SO_2 両成分の連続自動測定を開始した。用いた測定器はいずれも大気環境測定用に開発された機器で、 HCl はロダン水銀による比色分析法を、 SO_2 は伝導度測定法によるものである。Fig. 6 に '79 年 7 月以降の HCl 、 SO_2 ガスの日平均濃度の変化を示したが、 HCl は 0.0008~0.98 ppm、 SO_2 は 0.0002~0.61 ppm と著しい変動が認められ、また図には示さなかったが 1 時間値の変動も大きく、しかも短時間で変化することが明らかとなった。このことは火口から一旦放出され、大気によって拡散されたガス成分を測定しているため風向、風速などの気象条件に影響を受けることも多いためと考えられる。

次にこれまでの方法と同様に HCl 、 SO_2 両成分の比を取って、その変化について検討した。Fig. 7 にはこの値の変化と桜島火山観測所で測定された桜島火山の活動状況に関する地球物理学的諸測定の結果のいくつかを併記した。即ち第一段目に HCl/SO_2 の 5 日間の移動平均値の変化を、第二段目以下に日別爆発回数、火口直下 1 km 付近で発生するマグマの発泡等によって起ると考えられている B 型地震の日発生回数（5 日間の移動平均値）、火山性地震と微動の振動エネルギー（火口から 1.6 km はなれた引の平観測点での測定、5 日間の移動平均値）、火口直下 2~5 km 付近でマグマの移動に関連して発生する A 型地震の日別発生回数の変化を順に示した。まず第一段目の HCl/SO_2 の変化についてみると '79 年 7 月から 10 月にかけて 1.0~2.0 の大きな値が続いており、その後は Fig. 7 のような変化をくり返し '80 年 4~5 月にかけて再び著しく大きくなり最高 2.6 を示し、6 月以降は全体に値が小さくなっている。一方表面活動である爆発は '79 年 5 月

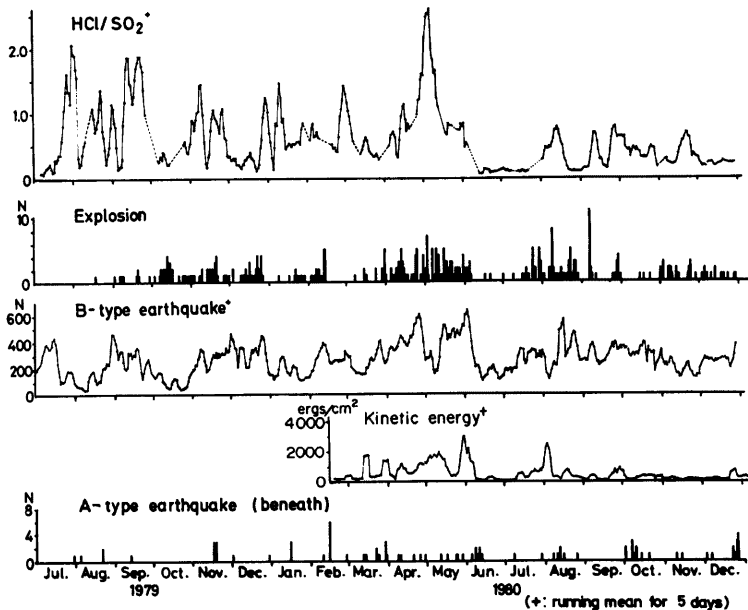


Fig. 7. Variation of HCl/SO_2 molar ratio at Harutayama vs several geophysical data about intensity of volcanic activity.

以降8月19日までの約100日間はまったく無く最近の桜島火山としてはむしろ異常な静穏期であった。その後9月から徐々に爆発回数が増加し12月頃まで再び活発な状態に復した。また'80年4～5月には爆発が著しく多発し、8月にもやや爆発が多かったがそれ以降は回数が減少してきている。この両者の変動から、'79年7～10月にかけての HCl/SO_2 の大きな値は同5月から約3ヶ月間の静穏期の後の、9月からの表面活動の再活発化に先行した現象と考えることが出来、 HCl/SO_2 の値が約1ヶ月半前に増大することが認められた。

次にB型地震は'79年9～12月にかけての表面活動の活発化のはじまる約1ヶ月前の8月中旬よりその発生回数が増加している。このB型地震に較べても HCl/SO_2 の変化がさらにそれより約1ヶ月早いことが認められた。しかし一旦活動期に入った後は、 HCl/SO_2 の変化が爆発回数、B型地震の回数、振動エネルギー、A型地震の回数の変化と徐々に対応が良くなることが明らかとなった。

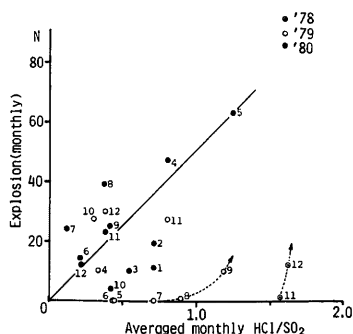


Fig. 8. Averaged monthly HCl/SO_2 molar ratio at Harutayama vs monthly frequency of explosion.

これら諸関係のうち、爆発回数と HCl/SO_2 との関係をさらに検討するために HCl/SO_2 の月平均値とそれに対応した月爆発回数とを Fig. 8 に示した。これによれば両者の間には同図に示したようにほぼ直線で示される関連が認められたが、この直線から大きくはずれる点についてみると、これらの点は'78年11、12月、'79年5～9月のものに相当する。これら各月の HCl/SO_2 の値は爆発回数の割には大きく、'78年11月と12月、'79年の5月から9月を結ぶ線の方はいずれも上述の直線に向っており、それぞれその後の爆発回数の多い活発化への顕著な前兆現象と考えることが出来よう。また'80年1～3月もやや直線からはずれており、これもその後の4～5月の活動期の先行現象と言えよう。このように火山ガス中の HCl/SO_2 の変化を調べることで桜島火山の火口直下および表面での活動の変化をとらえることが出来、しかも数ヶ月間の静穏期の後

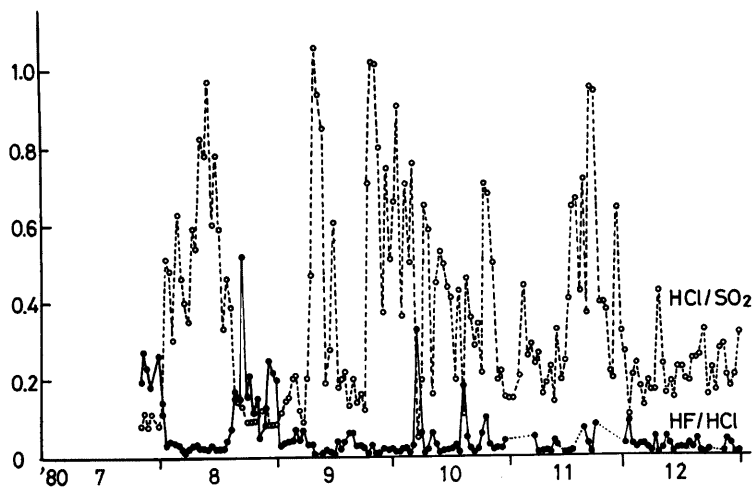


Fig. 9. Variation of daily HCl/SO_2 and HF/HCl molar ratio at Harutayama.

の再活発化に際してはその前兆現象が特に顕著であることが判明した。

これまで述べてきた HCl, SO₂ ガス成分に加えて、火山の Activity が高くなった場合に火山ガス中でその割合が増加すると考えられる HF ガスについても'80年7月から春田山観測室において連続測定を開始した。これまでに得られた結果によれば、7月から12月までの日平均濃度の範囲は 0.00001~0.0024 ppm で、この期間の平均値は 0.00029 ppm であり、HCl の平均値 0.0133 ppm, SO₂ の 0.0306 ppm に較べて著しく濃度が低く、またこれら三者の変動はいずれも似たパターンであることが明らかとなった。またこれら三成分の日平均濃度から HF/HCl と HCl/SO₂ の変化を求め Fig. 9 に示したが、図に明らかなように両者の変化傾向は異っており、逆の相関があるように思われる。特に7月末および8月中旬から8月末までの変化についてみると、HCl/SO₂ に比べ HF/HCl の値が大きく、その後 HCl/SO₂ が増大していることを考えると、HF/HCl が HCl/SO₂ よりもやや先行して変化したためとも考えられるが、まだ観測期間も短かく今後の観測結果に期したい。

5. ま と め

これまで述べてきたように、桜島火山における各種測定法による火山ガスの観測とそれにより求められた成分割合の変化が火山活動とどのような関連があるかを検討・考察して来た。その結果得られた HCl/SO₂ (Cl/S) の値は0.2~2.0の範囲にあり、これはこれまでの他の火山での火山ガスおよび火山灰の水溶性付着成分の値⁷⁻¹³⁾と比較してみても高温型のガス組成を示しており、桜島火山が連続的に高いレベルの活動状態を保っていることを示すものである。以下これまでに明らかになったことをまとめた。

(1) 1974年以降の火山灰の水溶性付着成分の測定では、Cl/S の値がほとんど0.2~1.5の範囲にあり、その月平均値の変化は月別の爆発回数の増減とよく対応している。

(2) 桜島島内5ヶ所に設置した静置式アルカリ吸収法では、その吸収液設置場所によって風向、地形などの影響により火山ガスの吸収量が著しく異なるが、その成分比 HCl/SO₂ の値の変化はほぼ近似したものであり、この値と各吸収液交換期間中の日平均爆発回数の変動とよく対応している。また静穏期の後の活発化に際しては HCl/SO₂ の値が先行して増加することが認められた。

(3) 火山ガスの連続自動測定の結果では、各成分の濃度は著しく変動することが明らかとなった。しかし HCl/SO₂ の値は前項同様数ヶ月間の静穏期の後の再活発化の際に、火口直下で発生するB型地震の発生回数の変化よりも約1ヶ月、表面活動である爆発回数の増加よりも約1ヶ月半先行して変化し増大することが認められた。また爆発が連続して起る活動期に入ると、HCl/SO₂ の変化は地球物理学的諸測定による活動状況の変化と良く対応するようになる。

以上桜島火山における火山ガス成分の変化は、それぞれ利点、欠陥はあるがいずれの方法を用いてもその HCl と SO₂ の比を求めることによって表面活動および火口直下で起る活動の変化をある程度とらえることが出来、しかも静穏期の後の再活発化を予察することが出来るようになるものと考ええる。

本研究を行うにあたり、この一連の研究を始める端緒となった桜島火山集中総合観測を企画・総括され、現地調査および観測の継続に絶大なる御便宜を賜り、また地球物理学的諸測定の結果の使用を心よくお許し下さった京都大学防災研究所桜島火山観測所長加茂幸介教授に深く感謝致します。また本研究の推行にあたり終始御指導を賜りました東京工業大学小坂丈予教授、ならびに種々有益な御助言をいただきました埼玉大学小沢竹二郎教授に心から感謝いたします。さらに研究の継続、試料の採取等に種々御協力を賜りました桜島火山観測所の職員の皆様、鎌田政明教授をはじめ鹿児島大学理学部化学教室の皆様、鹿児島県公害規制課、同公害衛生研究所の各位にも御礼申し上げます。おわりに本研究の多くは筆者が桜島火山観測所に内地研究員として滞在を許されました間に行ったものでありまして、この機会をあたえられました文部省ならびに防災研究所の各位にも深く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 小坂丈予, 小沢竹二郎: 桜島火山噴出ガスの成分の観測と活動状況, 桜島火山の総合調査報告, 昭50.10, pp. 62-66.
- 2) 小坂丈予, 平林順一, 小沢竹二郎, 君島克憲: 桜島火山噴出ガス成分の連続測定と活動状況の推定, 第2回桜島火山の集中総合観測, 昭52.10, pp. 68-80.
- 3) 小坂丈予, 平林順一, 小沢竹二郎, 君島克憲: 噴出ガス成分による桜島火山の活動状況の推定——特に HCl, SO₂ の変化について——, 第3回桜島火山の集中総合観測, 昭55. 5, pp. 63-76.
- 4) Iwasaki, I., Ozawa, T., Yoshida, M., Katsura, T., Iwasaki, B. and Kamada, M.: Differentiation of magmatic emanation, Bulletin of the Tokyo Insutitute of Technology, No. 74, 1966, pp. 1-57.
- 5) Noguchi, K. and Kamiya, H.: Prediction of volcanic eruption by measuring the chemical composition and amounts of gases, Bulletin Volcanologique, Vol. 26, 1963, pp. 367-378.
- 6) 平林順一, 小坂丈予, 小沢竹二郎, 君島克憲, 実政 勲, 坂元隼雄: 火山ガス観測よりみた最近の桜島と阿蘇, 火山, 第2集, 第24巻, 昭54.10, pp. 186-187.
- 7) 小沢竹二郎, 小坂丈予, 神崎忠雄, 平林順一, 吉池勇雄, 高江洲壁: 1974年新潟焼山噴火の噴出物, その一, 火山ガス, 新潟県焼山火山1974年活動に関する緊急調査報告書, 昭50. 3, pp. 54-59.
- 8) 小坂丈予, 平林順一, 小沢竹二郎, 高江洲壁: 火山ガスその他噴出物の化学成分, 伊豆大島三原山の集中観測, 昭50. 9, pp. 54-58.
- 9) 松尾祐士, 日下部実, 千葉 仁, 牛木久雄, 小坂丈予, 平林順一, 安孫子勲, 野津憲治, 小沢竹二郎, 荒牧重雄, 佐藤和郎, 林 保, 佐藤 純, 藤井直之: 1977年有珠山噴火直後の地下水, 温泉水および火山灰の地球化学的研究, 火山, 第2集, 第22巻, 昭52.12, pp. 201-220.
- 10) 小坂丈予, 平林順一, 小沢竹二郎: 地球化学的手法による噴火予知, 火山, 第2集, 第23巻, 昭53. 4, pp. 33-40.
- 11) 小坂丈予, 平林順一, 小沢竹二郎, 君島克憲: 阿蘇火山ガス成分の測定, 阿蘇火山の集中総合観測報告書, 昭53.12, pp. 64-68.
- 12) 小坂丈予, 平林順一, 小沢竹二郎, 君島克憲: 木曾御岳火山1979年活動における地球化学的調査・研究, 御岳山1979年火山活動および災害の調査研究報告, 昭55. 3, pp. 25-35.
- 13) Ossaka, J., Ozawa, T., Nomura, T., Ossaka, T., Hirabayashi, J. and Takaesu, A.: Variation of chemical composition in volcanic gases and water at Kusatsu-Shirane Volcano and its activity in 1976, Bulletin Volcanologique, Vol. 43, 1980, pp. 207-216.