遠隔FT-IR測定による昭和火口と南岳火口の火山ガスHCI/SO2比

森 俊哉

東京大学大学院理学系研究科

要 旨

桜島火山では、現在、昭和火口と南岳火口の二つの火口から噴煙を継続的に噴出しており、昭和火口では活発な噴火活動が続いている.2009年11月と12月に、桜島火山において 遠隔FT-IR測定を行い、火山ガス組成(HCl/SO₂比)の現在の状況を調べた.その結果、二 つの火口が噴出する火山ガスは異なる化学組成を持ち、昭和火口のHCl/SO₂比は約0.1であ り、南岳火口の火山ガスのHCl/SO₂比はそれよりも高い値を持つことが明らかになった.

キーワード: 桜島火山, 火山ガス, 遠隔測定

1. はじめに

桜島火山では、2006年6月に昭和火口が活動を再開 してより、南岳火口と昭和火口の二つの火口から火 山ガス放出を続けている. 桜島火山は、頻繁に爆発 的な噴火を繰り返すので、山頂付近で火山ガスを採 取することはできない. そのため、火山ガス組成を 知るためには遠隔測定が有効である. Notsu and Mori (2010)は、1999年から2001年に実施した遠隔FT-IR測 定により、南岳火口の噴煙中のHCI/SO₂比が0.24-0.48 であったと報告しているが、それ以降火山ガス組成 の報告はない.

今回,2009年11月19日と12月4日に遠隔FT-IR観測 を桜島火山において実施した. 桜島火山では,山頂 の南岳火口と活発な噴火活動を続ける昭和火口の二 つの火口が噴煙活動を続けている. 桜島火山での遠 隔FT-IR測定の目的は,現在のガス組成を測定し,南 岳火口と昭和火口のガス組成が同じか異なるか,そ して,異なるとすれば,どのように組成が異なるか を明らかにすることにある.

2. FT-IR分光放射計による火山ガス遠隔測定

FT-IR分光放射計は, 1990年代初頭に初めて火山ガ ス化学組成の遠隔測定に使用された(Mori et al., 1993; Notsu et al., 1993). 現在では, イタリアやハワ イの火山でルーチン観測の一つとして使用されてい る.この遠隔測定法では、火山ガス噴煙を透過し、 火山ガス成分により赤外吸収を受けた赤外光スペク トルを赤外分光放射計で測定し、その後スペクトル を解析することで、測定視野方向にある火山ガス成 分のガス量を定量する. 複数の火山ガス成分を同時 に測定することができるので、1つのスペクトルを解 析することで火山ガスの組成比(例えば, HCl/SO2 比)を求めることができる.実際,多くの火山ガス 成分が赤外域に吸収帯をもち、これまでにSO₂, HCl, HF, SiF₄, CO, CO₂, COS, H₂Oの8つの火山ガス成 分の定量が行われている.火山観測では、目的とす る火山ガス噴煙の背後に赤外光の光源が必要であり, 人工光源 (Francis et al., 1995) の他, 噴気や溶岩の 高温表面(Mori et al., 1993, 1995, 1997), 太陽光 (Francis et al., 1998), 太陽散乱光(Love et al., 1998)な どが使用されてきた.

2.1 測定装置

桜島火山における観測には、米国MIDAC社のAir Monitoring System (AM System)の赤外分光計を使用 した.この赤外分光計の波長分解能は0.5 cm⁻¹で、検 出器には液体窒素で冷却したInSb検出器を使用した. このため、観測スペクトルの波数範囲は1800 – 5000 cm⁻¹である.

MIDAC社AM Systemは直径12インチのニュートン

式望遠鏡で光を集め分光計へと導入する装置である が,望遠鏡と三脚を合わせた総重量は60 kgを超える ため,一人での設置と観測を行うことは難しい.後 述のように桜島火山での観測は,太陽光を赤外光源 とするSolar Occultation法を用いる.この方法であれ ば太陽光を集光せずに分光計へ導入するだけで測定 が可能である.そこで,桜島火山での観測には,AM Systemから望遠鏡や三脚を取り外し,分光計の入射 窓の正面20-35 cmの位置に設置角度可変の鏡を取り 付けた形で使用した.この鏡の向きを調整して太陽 光を入射窓に導入し測定する.上述の装置全体の軽 量化により,装置の運搬や設置が1人でも可能になる.

測定した赤外スペクトルの解析は,森・野津(2005) と同様な手法を用いた.今回は,火山ガス成分のう ちSO₂とHClの吸収に着目して解析を行った.

3. 桜島火山での観測

桜島火山での遠隔FT-IR測定の場合,山麓からは火 口を覗き込むことができず,赤外光源となるような 高温物質も山麓からでは使用することができない. したがって,太陽光または太陽散乱光を光源とする ことが考えられる.太陽散乱光を用いた測定では, 太陽が噴煙の比較的近くに存在すれば,測定は可能 であるが,太陽光を光源とするSolar Occultation法 (Francis et al., 1998)では,太陽が噴煙の裏側に来 る位置からでないと測定することができない.ただ し,後者では,前述のように軽量化された装置での 観測が可能なので,今回は,Solar Occultation法を採 用した.

これまで行われてきたSolar Occultation法では, 上空を流れる噴煙の測定を行う(Oppenheimer et al., 1998) ため、火山の風下側に回り、太陽が噴煙の裏 側に来るような位置に移動して観測を行うのが一般 的である. 桜島火山では、二火口から噴煙が噴出し ており,風下側数キロ離れた位置で上空の噴煙を測 定した場合,二火口からの噴煙は混ざってしまい, それぞれの噴煙の火山ガス組成比を分けて測定する ことは難しい. イタリア・エトナ火山ではSolar Occultation法を用い、複数の火口の火山ガス組成を 求めているが,これは,二つの噴煙を別々に測定で きる距離に近付いて上空の噴煙の測定をそれぞれ行 っている (Burton et al., 2003). 桜島火山では, 昭和 火口と南岳火口の噴煙を別々に測定できる位置まで 近づいて測定することは、爆発的な噴火活動が続い ているため難しいのが現状である.

そこで、今回の測定では火口の背後に沈む太陽を 利用することで二火口のガス組成をそれぞれ測定す ることにした.図1に、今回用いた測定方法の模式図 を示す.この図は、桜島火山を東(黒神付近)から 西の方向をみる形で描いた図である. 二つの火口か らの噴煙の様子も模式的に示した.図1の場合は南か らの風により噴煙が北方向に流れている例を示した. Solar Occultation法では、太陽の移動とともに測定す る位置が刻々と変わっていく. 図1の太陽軌跡1のよ うに太陽が移動したときに観測を行った場合、観測 開始直後は、太陽光は噴煙を透過してこないので、 観測した赤外スペクトルには火山ガス成分による赤 外吸収は見られない. 太陽が, 昭和火口に近付き, 昭和火口の背後に隠れる直前は、昭和火口の火山ガ ス組成を測定することができる.一方.太陽軌跡2 のように太陽が南岳火口の背後へと沈む場合、観測 前半は,昭和火口のガス組成が測定でき,南岳火口 の背後に太陽が沈む直前には,南岳火口のガス組成 が測定できると期待される.

実際の噴煙は、図1のようにきれいに分かれて流れ ることはほとんどなく、山頂直上でも二つの火口か らの噴煙が有る程度混合する.しかし、噴煙の流れ る様子を確認しながら、火口背後に沈む太陽を光源 として測定することで、二つの火口のガス組成を区 別できると考え観測を行った.



Fig. 1 A Schematic diagram of Sakurajima volcano viewed from the east side of the volcano looking toward the west. The volcano emits plumes from Showa and Minamidake craters. Solid curves 1 and 2 are the sun track setting behind the two craters, respectively.

実際の火山観測では、どの地点から観測をすると、 太陽がどのように移動し、どの地点へ沈むかを調べ、 その日の噴煙状況に合わせ、観測に適した位置を決 定する.そして、目的の位置へ移動したのちに測定 を行うことになる.桜島火山での観測は、2009年11 月19日と12月4日の夕刻に、山の北東側より行った. 観測の際、スペクトルは8スキャンを積算し、約13 秒間隔で測定した.

4. 2009年11月19日観測

観測は、昭和火口の北東約4.1kmの地点(北緯 31.59770°東経130.70256°)から16:05~16:17の時間 帯に行った.観測位置から見た太陽は、南岳の南側 斜面上部、昭和火口に向かって沈んで行った.観測 時間帯、二つの火口からの噴煙はほとんど火口リム から上昇せずに、観測地点から見て左方向へ流れて いた.このため、観測の初期は、南岳火口の火山ガ スの影響を大きく受けていたと考えられる.太陽は 南岳火口リムよりもやや低い位置の斜面に沈んでい たので、観測終盤は南岳火口の火山ガスの影響は受 けておらず、昭和火口の火山ガスのみを測定してい たと考えられる.



Fig. 2. HCl vs. SO_2 column amount plot for the spectra observed on Nov. 19, 2009. White circles correspond to data of last 10 spectra before the sun sets behind the crater rim. Thick gray solid line correspond linear fit using all the data. Solid, short dashed, and long dashed lines corresponds to HCl/SO₂ ratios 0.1, 0.24 and 0.48, respectively.

図2に、観測したスペクトルのSO₂カラム量とHCI カラム量のプロットを示す.カラム量の単位はppmm で、濃度ppmは気圧882 mbと気温10℃における値で ある.図には、HCI/SO₂比が0.1、0.24、0.48の時の直 線を示した.HCI/SO₂比が0.24-0.48は1999年から2001 年の間に遠隔FT-IR測定をした南岳火口噴煙の値に 対応する(Notsu and Mori, 2010).HCl vs.SO₂プロ ットをみるとわかるように、観測時間帯の平均的な HCI/SO₂比は0.11程度の値を持つことが分かるが、詳 しく見ると線形フィットから外れる点がある.一方、 観測終盤10スペクトルのデータ(白丸)は、傾き0.1 の直線に乗っていることが分かる.SO₂カラム量と HCI/SO₂比の時間変化プロットを図3に示す.図3上図 をみるとわかるようにSO₂のカラム量は、火口に近 付くにつれ増加しているのが分かる.16:11と11:12 にみられるSO₂カラム量のピーク状の増加は、昭和 火口から噴出したパフ状の噴煙が通常よりも高く上 がり測定視野に入った(太陽にかかった)ことに対応 している.一方、図3下図のHCI/SO₂比は観測開始の2 分間はHCI/SO₂比で0.2を超える値がみられるが、基 本的には減少傾向にあり、観測終盤はHCI/SO₂が約 0.1になっている.

この日の噴煙状況を考慮すると、観測初期は南岳 火口の噴煙の寄与が大きく、昭和火口の背後に太陽 が沈む観測終盤は昭和火口の噴煙を測定していると 考えられる.このことから南岳火口の噴煙中の HCI/SO₂は0.2以上の値を持ち、昭和火口の噴煙は約 0.1であると考えられる.また、昭和火口から上昇し てきたパフ状の噴煙が測定視野に入っていた16:11 と16:12には、昭和火口の噴煙に伴うSO₂カラム量の 上昇に対応してHCI/SO₂比が0.1近い値まで減少して いることも、昭和火口のHCI/SO₂比は南岳火口の HCI/SO₂比が約0.1の値を持つことをサポートしてい る.



Fig. 3. Temporal variations of SO₂ column amount (upper) and HCl/SO₂ ratio (lower) between 16:05 and 16:17 observed by the remote FT-IR measurements on Nov. 19, 2009

5. 2009年12月4日の観測

観測は、昭和火口の北東約4.2 kmの地点(北緯 31.6051°東経130.6966°)から15:25~16:07の時間帯 に行った.観測点から見た太陽は南岳火口の北端付 近背後に沈んでいった.二つの火口からの噴煙は一 度火口直上で数百メートル上昇したのち,南から南 東の風により観測地点から見て右方向へ流れていた. このため,観測初期は、上昇し北方面に流れた昭和 火口の火山ガスの影響を大きく受け、その後太陽高 度が下がるとともに南岳火口の影響が大きくなり、 太陽が沈む前は南岳の火山ガスの影響が優位になる と考えられる.ただし、目視観測からは、南岳火口 の直上でも、昭和火口の火山ガスの影響を若干受け ていたと思われる.



Fig. 4. HCl vs. SO_2 column amount plot for the spectra observed on Dec. 4, 2009. White circles correspond to data of first 10 spectra from the beginning of observation. Thick gray solid line correspond linear fit using all the data. Solid, short dashed, and long dashed lines corresponds to HCl/SO₂ ratios 0.1, 0.24 and 0.48, respectively.

図4に、観測したスペクトルのSO₂カラム量とHCI カラム量のプロットを示す.カラム量は図2と同様の 条件での値である.観測データを回帰直線フィッテ ィングにより求めたHCI/SO₂比は約0.13で、図2より も大きくばらついているが、昭和火口からの火山ガ スの影響を大きく受けていると考えられる観測初期 10データ(白丸)は、傾き0.1の直線にほぼ乗ってい る.SO₂カラム量とHCI/SO₂比の時間変化のプロット を図5に示す.図5をみるとわかるように、データは 時間飛びが多い.これは測定時、噴煙の後方に雲が 有り、雲の切れ間またはうすくなっているところ以 外では十分な太陽光が得られなかったので測定がで きなかったためである.観測開始最初の10分程度は、 SO₂カラム量が1000-6000 ppmmまで変化しても、

HCI/SO₂比は約0.1で変化はなく、観測初期は昭和火 口の火山ガスが優勢であるという目視観測を考慮す ると、この比の値は昭和火口の火山ガスに対応する ものと考えられる.12月4日の観測では、SO₂カラム 量が最大となるのは、山の背後に太陽が隠れる20分 程度前で、このことは目視観測で噴煙が数百メート ル程度上昇したのち、北方向に流れていたことに対 応している.太陽が南岳火口の北辺火口リムに沈む 直前には,ガス量は2000 ppmm程度で,南岳火口の 火山ガスが大部分を占めていたものの,昭和火口の 火山ガスの影響も受けていたと思われる.12月4日の 観測からも,昭和火口のHCl/SO₂比は約0.1で,南岳 火口の値は昭和火口の値よりも高く,0.25以上の値 を持っていたものと考えられる.



Fig. 5. Temporal variations of SO_2 column amount (upper) and HCl/SO₂ ratio (lower) between 15:25 and 16:07 observed by the remote FT-IR measurements on Dec. 4, 2009

6. 桜島の火山ガス組成の状況

2009年11月19日と12月4日の観測結果から,昭和火 口と南岳火口の火山ガスは異なる火山ガス組成を持 っていたことが明らかになった.HCl/SO₂比の値は, 南岳火口の火山ガスの方が大きな値を持ち,昭和火 口の火山ガスは約0.1,そして南岳火口の火山ガスは 0.25より大きな値を持つと考えられる.この南岳火 口の値は,1999年-2001年に行われた南岳火口の火山 ガスの遠隔測定により求めたHCl/SO₂比0.24-0.48 (Notsu and Mori, 2010)の範囲に入る.

昭和火口と南岳火口の火山ガスの組成が異なる原 因としては:

1. そもそも昭和火口と南岳火口でマグマが異なる.

2. 地下水や天水の影響の違い.

3. 二つの火口の下で、火山ガスがマグマと平衡の 状態にあったi最終深度が昭和火口の方が深い.

二つの火口に対応する火道が分岐した時点で、すでにマグマ中にはバブルが存在し、分岐する過程で、昭和火口側の火道に相対的に多くのバブルが移動した。

などが考えられるが,現時点ではさらに細かく言及 することは難しい.

7. おわりに

遠隔FT-IR観測により,2009年11月後半から12月初 めの時点で,昭和火口と南岳火口の火山ガス組成が 異なっていたことが明らかになり,HCl/SO₂は,昭和 火口の火山ガスの方が低い値を持っていたことが分 かった.今後は,スペクトル解析法を改良すると伴 に,SO₂とHClだけでなくHFの解析を進め,3成分の 組成を調べる.加えて,メルトインクルージョンの データと比較検討していくことが必要である.

昭和火口の爆発噴火は2009年には548回(気象庁, 2009),2010年5月11日にはすでに500回を超えてお り(気象庁,2010),活発な活動を続けている.火 山ガス化学組成の今後の推移を監視することももち ろんであるが,爆発的噴火に伴う火山ガス組成の変 化をとらえることを目的とした測定も行っていく予 定である.

謝 辞

桜島の観測に当たっては,京都大学防災研究所火 山活動研究センターの方々には大変お世話になりま した.記して御礼申し上げます.

参考文献

- 気象庁 (2009) 桜島の火山活動解説資料(平成21年 12月),火山活動解説資料(平成22年12月).
- 気象庁 (2010) 桜島の火山活動解説資料(平成22年 5月),火山活動解説資料(平成22年5月).
- 森 俊哉・野津憲治(2005):浅間山噴煙中の火山ガ ス化学組成の遠隔観測,火山 第50巻第6号,pp. 567-574.
- Burton, M., Allard, P., Mure, F. and Oppenheimer, C. (2003) FTIR remote sensing of fractional magma degassing at Mount Etna, Sicily. In Volcanic Degassing, Eds. Oppenheimer, C., Pyle, D.M. and Barclay, J., Geological Society Special Publication No. 213, London, pp. 281-294.

- Francis, P., Maciejewski, A., Oppenheimer, C., Chaffin, C. and Caltabiano, T. (1995) SO₂:HCl ratios in the plumes from Mt. Etna and Vulcano determined by Fourier transform spectroscopy. Geophys. Res. Lett. Vol. 22, 1717-1720.
- Francis, P., Burton, M.R. and Oppenheimer, C. (1998) Remote measurements of volcanic gas compositions by solar occultation spectroscopy. Nature, Vol. 396, pp. 567-570.
- Love, S.P., Goff, F., Counce, D., Sieve, C. and Delgado, H. (1998) Passive infrared spectroscopy of the eruption plume at Popocatepetl volcano, Mexico. Nature, Vol. 396, pp. 563-567.
- Mori, T., Notsu, K., Tohjima, Y. and Wakita, H. (1993) Remote detection of HCl and SO₂ in volcanic gas from Unzen volcano, Japan. Geophys. Res. Lett., Vol. 20, pp. 1355-1358.
- Mori, T., Notsu, K., Tohjima, Y., Wakita, H., Nuccio, P.M., and Italiano, F. (1995) Remote detection of fumarolic gas chemistry at Vulcano, Italy. Earth. Planet. Sci. Lett., Vol. 13, pp.219-224.
- Mori, T. and Notsu, K. (1997) Remote CO, COS, CO₂, SO₂, HCl detection and temperature estimation of volcanic gas. Geophys, Res. Lett., Vol. 24, pp. 2047-2050.
- Notsu, K., Mori, T., Igarashi, G., Tohjima, Y. And Wakita, H. (1993) Infrared spectral radiometer: a new tool for remote measurement of SO₂ of volcanic gas. Geochem. J., Vol. 27, 361-366.
- Notsu, K. and Mori, T. (2010) Chemical monitoring of volcanic gas using remote FT-IR spectroscopy at several active volcanoes in Japan. Appl. Geochem., Vol. 25, 505-512.
- Oppenheimer, C., Francis, P. Burton, M., Machiejewski, A.J.H and Boardman, L. (1998) Remote measurement of volcanic gases by Fourier transform infrared spectroscopy. Appl. Phys. B, Vol. 67, pp. 505-515.

Remote FT-IR measurements of HCl/SO₂ ratios in the volcanic plumes of Showa and Minamidake craters, Sakurajima volcano, Japan.

Toshiya MORI

Synopsis

Sakurajima volcano is continuously emitting volcanic gas from two craters, Showa and Minamidake craters, since the reactivation of Showa crater in June 2006. In November and December 2009, remote FT-IR measurements were carried out to monitor the current chemical composition of volcanic gas (HCl/SO₂ ratios) from the volcano. The results showed that the volcanic gases from the two craters have different chemical composition, and HCl/SO₂ ratio of the Showa crater's volcanic gas was about 0.1 and was lower than that of Minamidake crater.

Keywords: Sakurajima volcano, volcanic gas, remote measurements