

昭和火口と南岳火口の火山ガスHCl/SO₂比の推移

森 俊哉

東京大学大学院理学系研究科

要 旨

桜島火山では、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月より、桜島火山において遠隔FT-IR測定を行い、昭和火口と南岳火口の火山ガス組成(HCl/SO₂比)の測定を行ってきた。2009年11月から2010年3月の測定では、昭和火口のHCl/SO₂比は南岳火口の比より低い値を示していたが、2010年10月と12月の測定では、この関係は逆転していた。2011年2月の2回の測定では、再び昭和火口の比の値の方が低い状態に戻っていた。

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、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。2009年11月19日と12月4日の桜島火山での遠隔FT-IR観測により、山頂の南岳火口と昭和火口で、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(森, 2010)。

桜島火山では2009年度に引き続き、2010年度も遠隔FT-IR観測により、2つの火口から放出される火山ガス噴煙のHCl/SO₂比の測定を実施したので、その結果を報告する。

2. 測定装置と解析方法

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)。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、ガスのカラム

量を定量する。カラム量とは、測定視野方向のガス濃度積分値に対応する値である。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。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。

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(図1)。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。

桜島での測定では、MIDAC社AM System分光計の本体のみを使用し、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て使用した(図1: 円内)。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。図1に示したように、測定には分光計本体、光導入部(ミラー)、12Vバッテリーと測定用PCが必要で、分光計の検出器が冷却状態に

あれば、観測地点に到着後、約10分で観測を開始することが可能である。

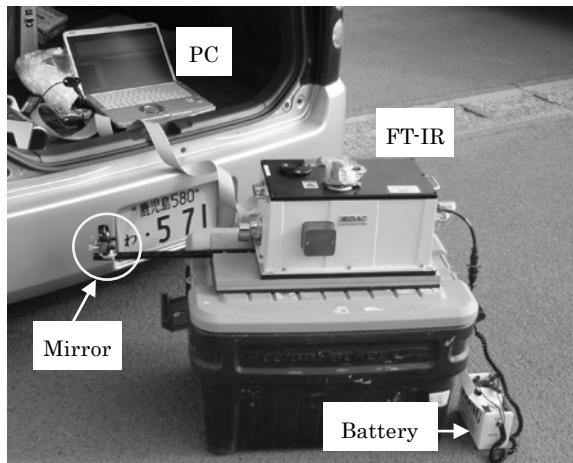


Fig. 1. A photo of FT-IR observation at Sakurajima volcano. A mirror (inside the circle) reflects the sunlight into the window of the FTIR.

森(2010)では、測定した赤外スペクトルの解析に、森・野津(2005)の解析手法によるオリジナルのソフトウェアを用いたが、今回の解析ではBurton(2011)のソフトウェアを使用した。このソフトウェアでは光のパスを通常大気層と火山噴煙層の2層に分けて、赤外の放射伝達を計算し、火山ガス成分のカラム量を非線形最小二乗法により求めるもので、これまで使用していたソフトウェアより解析時間が数十分の一になった。Burton(2011)のソフトウェアを解析に導入するにあたり、これまでのソフトウェアの結果との整合性を調べ、問題ないことを確認した。解析では、火山ガス成分のうちSO₂とHClの2成分の定量を行った。

3. 桜島火山での観測

桜島火山での遠隔FT-IR観測の場合、これまで太陽光または太陽散乱光を光源とする測定がおこなわれてきた(Notsu and Mori, 2010; 森, 2010)。また、二つの火口からの火山ガス噴煙の化学組成の違いを区別して測定するために森(2010)で用いた観測方法を用いて測定を行った。これは、桜島火山山頂の背後に沈む太陽を利用することで二つの火口のガス組成を区別して測定するものである。実際には、このように測定を行ったとしても、二つの火口からの噴煙を完全に分けて測定することはできないが、その日の噴煙の噴出状況などの目視観測やビデオ映像を考慮したうえで二つの火口の火山ガス組成を推定することになる。山頂に沈む夕日を光源とするので、観測は火口の東側から北東側の地点から実施した。観測当日の噴煙状況、風向・風速から、観測地点を

決定した。森(2010)で実施した2009年11月19日と12月4日の観測以降、2010年3月17日、10月26日、12月22日、2011年2月3日、2月24日に遠隔FT-IR観測を実施した。

4. 観測結果

4.1. 2010年3月17日の観測

観測は、昭和火口の東北東約4.5kmの地点(北緯31.59021° 東経130.70919°)から17:00~17:30の時間帯に行った。観測位置から見た太陽は、南岳火口のすぐ北側に沈んで行った。観測時間帯、南からの風が強かったため、南岳火口からの噴煙はほとんど火口リムから上昇せずに、観測地点から見て右方向へ流れていた。一方、昭和火口からの噴煙は、南岳火口の数百mの高さから昭和火口のリムの高さまで広がって右方向へ流れていた。このため、太陽が南岳火口の数百m上からリムに近づくまでは、昭和火口の火山ガスのみを測定していたと考えられる。一方、太陽が沈む直前は、昭和火口と南岳火口の両者の火山ガスの影響を受けるため、二つの火口の噴煙を分離して測定するのは難しい状態であった。

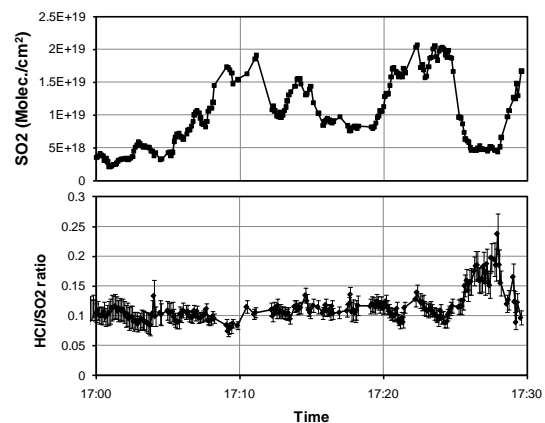


Fig. 2. Temporal variations of SO₂ column amount (upper) and HCl/SO₂ ratio (lower) between 17:00 and 17:30 observed by the remote FT-IR measurements on Mar. 17, 2010

SO₂カラム量とHCl/SO₂比の時間変化プロットを図2に示す。これまで、SO₂のカラム量にはppmmという単位を用いてきたが、図2ではMolecule/cm²の単位を用いている。1×10¹⁸ Molecules/cm²は、1気圧20°Cの条件で約400 ppmmに対応する。17:10、17:22と17:30を中心としたSO₂カラム量の上昇(図2上)は昭和火口の噴煙による。HCl/SO₂比は、太陽が山体に沈む直前の17:25~17:30以外はほぼ0.1の値を示し、SO₂カラム量が高い値を示す時間帯も比の値は0.1であることを考えると、この日の昭和火口のガスは

HCl/SO₂が0.1であったと考えられる。太陽が沈む直前の17:25~17:30は、SO₂カラム量が減っており、この時間帯は昭和火口からの噴煙の寄与が少なくなり、南岳火口の噴煙の影響を受けていると考えられる。HCl/SO₂比のプロットをみると、この時間帯だけ比の値が上昇しており、これは南岳火口の噴煙に対応するものと考えられることから、南岳火口のガスのHCl/SO₂比は0.2以上の値を持っていたと推定される。

4.2. 2010年10月26日と12月22日の観測

10月26日の観測は、昭和火口の東北東約4.5kmの地点（北緯31.59135° 東経130.70820°）で16:10~から観測を実施した。観測位置から見た太陽は、南岳の南側斜面上部、昭和火口のすぐ左あたりに向かって沈んで行った。観測時間帯は、北からの風が強かったため、二つの火口からの噴煙は、火口リムの高さで、観測点から見て左方向へ流れていた。この日は、山頂高度に雲も多く、雲の切れ目の時間帯だけしかスペクトル測定ができず、16:29~16:33の時間帯に観測ができた。この時間帯の太陽高度では南岳火口からの噴煙の寄与が大きく、昭和火口の影響はわずかであったと考えられる。上記時間帯の前半に、南岳からの噴煙が大きく寄与していたが、この間のHCl/SO₂比は約0.1であった。その後、南岳火口からの噴煙の寄与が弱まるにつれ、比の値は0.15へと上昇して行ったことを考えると、昭和火口からの火山ガスのHCl/SO₂比は0.15強であったと推定される。

12月22日の観測は、昭和火口の北東約4.0kmの地点（北緯31.59925° 東経130.69722°）で15:45~16:10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、昭和火口のすぐ左あたりに向かって沈んで行った。観測時間帯は北からの風が吹いていて、昭和火口と南岳火口の噴煙は火口リムから数百mほど上昇した後、観測地点から見て左方向へゆっくりと流れていた。基本的に、二つの火口の噴煙は観測地点からみて重なるように流れていた。SO₂カラム量とHCl/SO₂比の時間変化プロットを図3に示す。HCl/SO₂比は0.1~0.2で変動している。ビデオ映像を確認すると、観測の最初の方は南岳火口の寄与が大きい。その後、昭和火口のガスが卓越するが、観測の終盤は噴煙の下端部にあたり、再び南岳のガスの寄与が大きくなっているように見える。以上を考慮すると、南岳火口の火山ガスの方が、低いHCl/SO₂比の0.1程度を持ち、昭和火口の火山ガスが0.15以上の値を持っているように見える。15:54付近と16:03付近の時間帯に、HCl/SO₂比が0.2まで上昇しているが、これに対応するような噴煙の変化は、ビデオ映像からは確認できなかった。

10月26日と12月22日の観測では、これまでとは逆

に、昭和火口の火山ガスのHCl/SO₂比が南岳火口の比の値よりも大きくなっており、昭和火口は0.15~0.2、南岳火口は0.1~0.15の値を持っていたと推定される。12月22日の場合、南岳火口と昭和火口の噴煙が重なっていることもあり、噴煙の様子がビデオ映像でもわかりにくい状態であった。この日の観測結果については、ビデオ映像、カラム量時間変化、HCl/SO₂比時間変化を再度詳細に比較することが必要である。

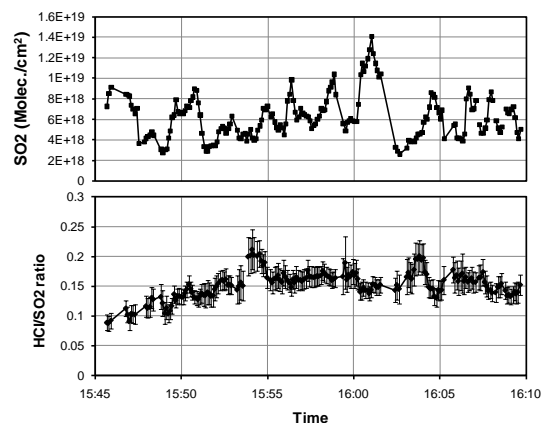


Fig. 3. Temporal variations of SO₂ column amount (upper) and HCl/SO₂ ratio (lower) between 17:00 and 17:30 observed by the remote FT-IR measurements on Dec. 22, 2010.

4.3. 2011年2月3日と2月24日の観測

2月3日の観測は、昭和火口の東北東約4.3kmの地点（北緯31.59795° 東経130.70248°）で、16:25~16:50に観測を実施した。観測位置から見た太陽は、南岳火口の中央部、昭和火口の右わきに沈んで行った。上空は北からの風がゆっくりと吹いており、観測点から見ると、南岳火口の噴煙の高度は南岳山頂から約500 mで左の方へ流れていた。昭和火口の噴煙は、灰を含んでいて、ほぼ昭和火口の幅を保ったまま500m以上上昇していた。昭和火口の噴煙中心部は赤外光が通っていなかった。このため、太陽が昭和火口の噴煙を抜けて、南岳火口に沈むまでの時間帯が観測時間帯に対応する。このため上記観測時間帯は、常に南岳火口の火山ガスを測定しており、手前側に入る昭和火口の噴煙が拡散したガスも同時に測っていた。SO₂カラム量とHCl/SO₂比の時間変化プロットを図4に示す。16:46から太陽が山頂に沈む直前までは、昭和火口の噴煙はほとんど広がりず垂直に立ち上っていたため、南岳の噴煙が測定した火山ガスのほとんどを占めていたと考えられる。また、太陽が沈む直前には昭和火口の噴煙が手前に入ってきている。以上を考えると、昭和火口のHCl/SO₂比は、南岳火口のHCl/SO₂比よりも低く0.1以下であると思

われる。また、南岳火口の比の値は、0.15以上であると推定される。

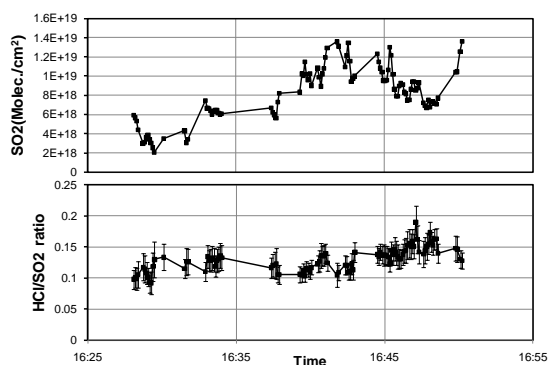


Fig. 4. Temporal variations of SO₂ column amount (upper) and HCl/SO₂ ratio (lower) between 17:00 and 17:30 observed by the remote FT-IR measurements on Feb. 3, 2011.

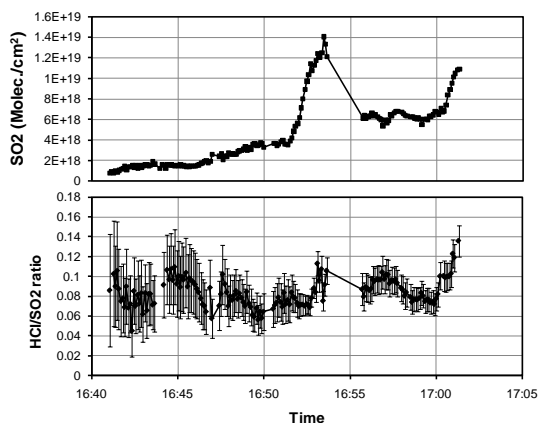


Fig. 5. Temporal variations of SO₂ column amount (upper) and HCl/SO₂ ratio (lower) between 17:00 and 17:30 observed by the remote FT-IR measurements on Feb. 24, 2011.

2月24日の観測は、昭和火口の東北東約4.5kmの地点(北緯31.59269° 東経130.70850°)で、16:40~17:02に観測を実施した。観測位置から見た太陽は、南岳火口の南端、昭和火口の直上に沈んで行った。上空

は南からの風がゆっくりと吹いており、観測点から見ると、噴煙高度は火口リムから500 m弱で右の方へ流れていた。観測時間帯の前半から中盤は、上昇して拡散した昭和火口の噴煙の寄与がほとんどである。17:00以降は、昭和火口の噴煙が右側に移動したため、南岳の噴煙の影響が大きくなったと考えられる。SO₂カラム量とHCl/SO₂比の時間変化プロットを図5に示す。昭和火口の噴煙に対応する17:00までの時間帯のHCl/SO₂比は0.07~0.1で、南岳火口の影響が大きくなったと思われる17:02ではHCl/SO₂比は0.14まで上昇している。

2月3日と2月24日の観測結果をみると、昭和火口のHCl/SO₂比は南岳火口の比の値より再び低くなり、0.1以下になった。また、南岳火口の比の値は0.15以上であると推定される。

5. 昭和火口と南岳火口のHCl/SO₂比の推移

図6にこれまでの遠隔FTIR観測の結果を示す。昭和火口の火山ガスのHCl/SO₂比は、2009年11月から2010年3月までは、約0.1で推移していたが、2010年10月と12月の観測時には、0.15-0.2に上昇していた。その後2011年2月までには、再び減少し、0.1以下まで下がっていた。一方、南岳火口の火山ガスのHCl/SO₂比は観測開始当初は0.2以上の値を示していたが、2010年10月と12月の測定時には0.1-0.15にさがっていたが、2011年2月には0.15以上の値に上昇していた。2009年11月から2010年3月までは、昭和火口の火山ガスのHCl/SO₂が南岳の比の値に比べ低い値を示していたが、2010年10月と12月の観測時には、この比の関係が逆転していた。しかし、2011年2月の測定時には、この比の関係は元の状態に戻っていた。二つの火口のHCl/SO₂比は、比の値の大小に逆転がみられたが、観測を開始した2009年末に比べると、両者の値が近い値を示すようになってきている。

二つの火口の火山ガスHCl/SO₂比の大小関係が逆

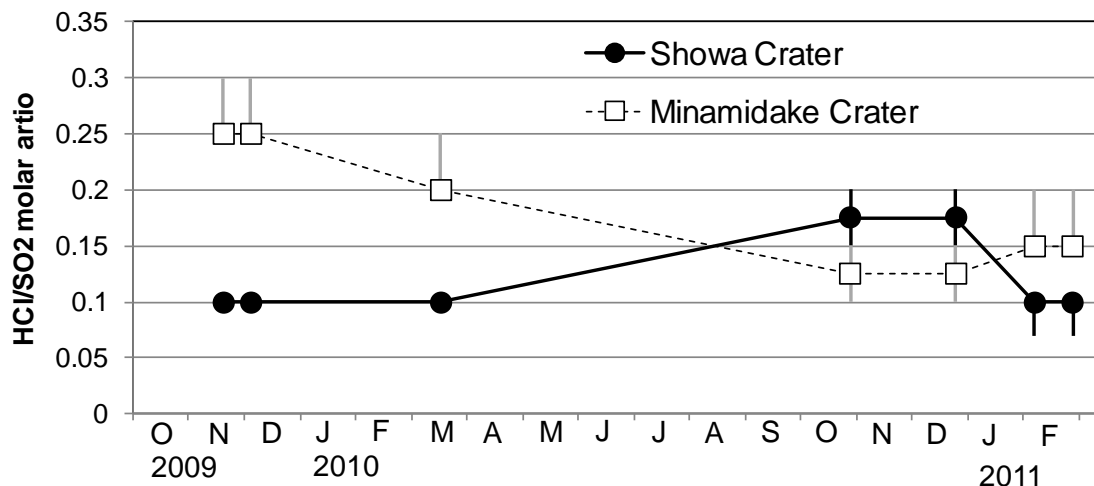


Fig.6. Temporal variation of HCl/SO₂ ratios of Showa and Minamidake craters.

転した、2010年3月から10月の観測の間には、これまで増大を続けてきた有村観測坑道の傾斜変化が2010年7月以降減少に転じた(京都大学防災研究所, 2011). 傾斜変化は10月から11月には極小になりその後12月に上昇し、3月以降再び緩やかな減少を示している(京都大学防災研究所, 2011). 2010年度に観測された火山ガスの比の変化は、こうした減少に関連していると考えられるが、直接的な関連を示すようなデータは得られていない。

6. おわりに

2009年11月後半から、遠隔FT-IR測定による昭和火口と南岳火口の火山ガスのHCl/SO₂比の測定を開始した。2010年3月の測定までは、昭和火口のHCl/SO₂比が、南岳の比より低い値を示していたが、この関係は2010年10月から12月の測定時には逆転していた。しかし、この状況は長く続かず、2011年2月の測定時には、比の関係は元の状態に戻っていた。こうした、HCl/SO₂比に見られた変化の要因については明らかになっておらず、今後の検討課題である。これまでの観測により、桜島火山の今後の活動変化に伴いHCl/SO₂比が変化した場合には、現在の観測手法で十分に変動を検出できることが示された。

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

京都大学防災研究所 (2011) : 第120回 火山噴火予知連絡会資料 (<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/~kazan/yochiren/120yochi.pdf>より)

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.

森 俊哉 (2010) : 遠隔FT-IR測定による昭和火口と南岳火口の火山ガスHCl/SO₂比, 桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究 平成21年度報告書, 87-92.

Burton, M. (2011), FTIR_FIT: Software for analysis of FTIR absorption spectra for volcanological applications, J. Volcanol. Geotherm. Res., submitted.

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. Geochim. 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.

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. Remote FT-IR measurements have been carried out for monitoring chemical composition of volcanic gas (HCl/SO₂ ratios) from the two craters since November 2009. In the observation between November 2009 and March 2010, HCl/SO₂ ratio of Showa crater was higher than that of Minamidake crater. The relation of the ratios was opposite in October and December, 2010 observations, however it went back to the original relation by Feb. 2011

Keywords: Sakurajima volcano, volcanic gas, remote measurements