

口永良部島火山における COMPUSS を用いた二酸化硫黄放出率の測定 Measurement of sulfur dioxide emission rate using COMPUSS at Kuchinoerabu volcano

森 健彦 (産業技術総合研究所 地質情報研究部門)
T. Mori (Geological Survey of Japan, AIST)

1. はじめに

ここ数年、口永良部島火山においては、火山性微動の発生、火口浅部における地殻変動(膨張)の進行、噴気活動の活発化など火山活動度が徐々に上昇している傾向が観測されている。また、東京工業大学火山流体研究センターの現地調査では、2005年2月の調査時に新岳火口の西及び南の火山ガスに二酸化硫黄が含まれているのが確認され、2006年9月の調査では火口周辺から噴出する全ての火山ガスに二酸化硫黄が含まれていることが観測された。さらに、二酸化硫黄/硫化水素比も2003年以降増大し続けている。火山ガス中に二酸化硫黄ガスが増えてきたことは、同火山におけるマグマ活動の活発化を示唆している。

二酸化硫黄ガスの放出率を測ることは、火山におけるマグマ活動度の指標になることから、1970年代のCOSPECの開発以降、様々な火山によって行われている。近年、小型紫外分光計を用いることで、より小型化した計測装置が開発され、国内外の火山において観測に用いられている(Mori et al., 2007)。しかしながら、これまでの口永良部島においては二酸化硫黄放出率が計測された記録がない。この理由は、口永良部島火山の噴気活動がそれほど活発ではなく、噴気ガス中に含まれる二酸化硫黄の比率がそれほど高くなかったからである。

東京工業大学火山流体研究センターによる2006年9月の調査で新岳火口周辺の噴気ガスの全てに二酸化硫黄が含まれることが確認されたことから、Mori et al. (2007)によって開発されたCOMPUSSを火口近傍に持ち込むことで二酸化硫黄放出率の測定が可能ではないかとの議論が起こった。そこで、2006



Picture 1. Photographed at Kuchinoerabu ranch. This ranch is the about 3000m west of Shindake.

年12月21日から24日にかけて、口永良部島において、新岳火口から放出される二酸化硫黄放出率の計測を試みた。本報告では、今回の計測で得られた口永良部島における初の二酸化硫黄放出率値を記すと共に、今後の口永良部島における二酸化硫黄放出率計測の進め方について一考した。

2. 測定の概要

2-1. 観測日の気象状態

二酸化硫黄放出率の測定は2006年12月22日10:00~14:00と23日13:30~14:30に行った。20日と21日は風雨が強い天候状態であったが、観測日は両日ともに雲がほとんど発生していない晴天で、視程も良好な状態であった。当日の風向は弱い冬型の気圧配置によって北風が卓越しており、山麓部(標高150m)における温風速計(SCW-20)を用いた計測において約10m/secの最大風速が記録された。二酸化硫黄放出率の計測においては、噴煙の移動速度、つまり噴煙が流れている高度における風速値を得ることが必要とされる。しかしながら、今回の測定日においては、噴煙が噴気孔(新岳火口)から放出された後、すぐに透明になり、視認出来ず、映像記録による噴煙移動速度の計測も不可能であった。また、火口直上(標高800m前後)を通過する雲がほとんどなかったため、雲の移動を利用した風速の見積もりも不可能であった(Picture 1)。そのため、今回は口永良部島に最も近いアメダス計測点である屋久島の風

Table 1. Datas of wind velocity near Kuchinoerabu volcano

Yakushima Amedas Station	Wind Velocity (m/sec)
2006/12/22 10:00	9.5
11:00	11.4
12:00	11.6
13:00	10.9
14:00	11.8

2006/12/23 13:00	6.6
14:00	6.7
15:00	5.6

Table 2. Datas of upper wind velocity at Naze and Kagoshima

Height about 800m	Wind Velocity (m/sec)	Wind Velocity (m/sec)
	Kagoshima	Naze
2006/12/22 09:00	14.9	12.9
21:00	10.8	11.8
2006/12/23 09:00	9.7	8.7
21:00	9.7	8.7



Picture 2. Snapshot of car traverse measurement at Kuchinoerabu. The GPS antenna is placed on the roof and USB2000 is attached to the door. Both data is recorded on the same PC.

速値 (Table 1) 及び鹿児島と名瀬における高層風速値 (Table 2) を勘案して、解析に用いる風速値を決定した。尚、アメダスの記録は気象庁ホームページ (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) から、高層風測値は Wyoming 大学大気科学部門のサイト (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) から入手した。屋久島にはウインドプロファイラが設置されているが、本報告書の執筆現在、データが入手できていない。口永良部島においての観測では、屋久島のウインドプロファイラデータを利用することが最も良い方策であろう。

2-2. 計測方法

本観測計測の計画段階においては、火口周辺での Walking Traverse 法 (例えば, Mori et al., 2006 による樽前火山での計測) による計測を立案した。これは、口永良部火山から放出されている火山ガスの全量がそれほど多くなく、二酸化硫黄の放出率も低いと想定していたため、二酸化硫黄ガスは火口の直近でな

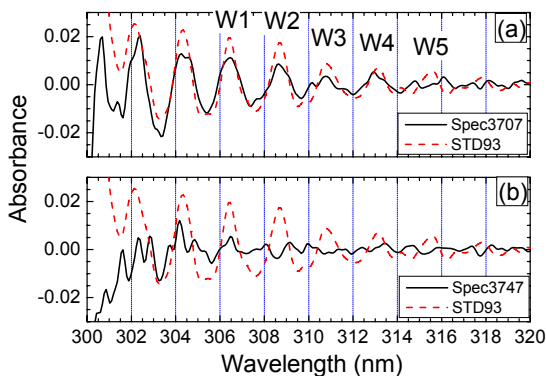


Figure 1. Plume spectra (black continuous line) and standard spectra (red dotted line). Column concentrations of Spec3707 and Spec3747 calculated using W1 band are 60ppmm and 20ppmm, respectively.

いと検知することが出来ないと考えていたからである。しかし、2006年10月以降に起こった地盤変動の急激な変化や火山性微動・地震の頻発化から、火口へ近づくことが危険であると判断され、火口周辺での Walking Traverse 法に代えて、一周林道を利用した Car Traverse 法で計測を実施した (Picture 2)。

3. 計測結果

今回の計測では、火口上空で強い風が流れていたこともあり、最大コラム濃度で約 50ppmm の二酸化硫黄ガスを一周林道の上空に検出することが出来た。しかしながら、DOAS 法を利用した計測システムである COMPUSS にとって 50ppmm 程度のコラム濃度は低濃度の測定限界に近い数値である。例えば、紫外散乱の影響を最も受けにくいとされる W5 と呼ばれる波長帯域 (約 315nm 付近) などは、濃度分解能の関係から低濃度の検出は期待できない。そのため、解析に用いる波長帯域は吸収スペクトルを検討してから決定した。

3-1. 測定データ

理論的及び実証的な研究は未だなされていないが、コラム濃度が低い時には二酸化硫黄の吸収スペクトルが何らかのノイズ源の影響を強く受け、データ精度が極めて低下することが経験的に知られている。これは、12月23日の計測で最もコラム濃度が高いと見積もられた吸収スペクトル (Spec3707) にも明瞭に現れており、W3 や W5 の波長帯域のスペクトル形状は、ノイズによって乱れている (Figure 1-a)。そのため、両帯域の Absorbance 値から計算されるコラム濃度の信頼性はほとんど無い。当然のことながら、Spec3707 よりコラム濃度が低いと見積もられた吸収スペクトル (Spec3747) ではスペクトル形状がさらに悪くなっている (Figure 1-b)。低コラム濃度の二酸化硫黄ガスしか検知されなかった今回の計測では、測定データの吸収スペクトルを考慮して、W1 帯域の吸光度から得られる二酸化硫黄コラム濃度を放出率の計算へ採用することとした。

本計測において、二酸化硫黄コラム濃度は一周林道の南側で

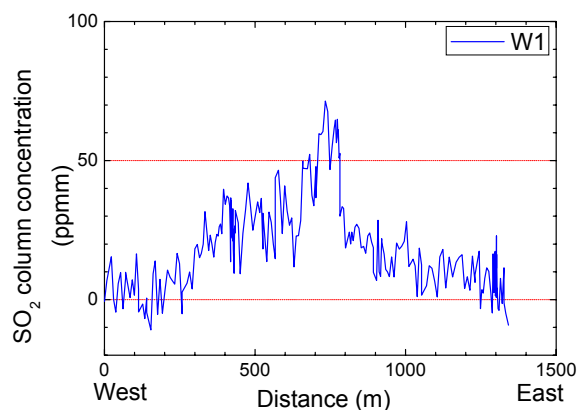


Figure 2. Example of measurement data recorded by car traverse. Blue line is SO₂ column concentration calculated by W1 band.

検出された。また、強風によって噴煙柱は拡散せずに流れていたため、二酸化硫黄ガスが検知された範囲は約 1000m 程度の幅になった (Figure 2)。カラム濃度の最高値は新岳火口のほぼ真南で検知された (Figure 3)。

3-2. 二酸化硫黄放出率の見積もり

口永良部島における Car Traverse は 12 月 22 日で 17 回、23 日で 9 回行った。放出率の計算に用いた噴煙移動速度は屋久島の風速及び名瀬と鹿児島島の高層風速を参考として、12 月 22 日を 12m/sec、23 日を 9m/sec に仮定した。この噴煙移動速度値は計測当時の口永良部新岳火口上空で想定される最も低い風速値と考えられる。今後、屋久島におけるウインドプロファイラのデータを利用することで、放出率の結果が若干増える可能性がある。

解析の結果、若干の時間変動があったものの、口永良部島火山からの二酸化硫黄放出率値は 10~70ton/day の範囲内であった (Figure 4, Table 3)。

4. 考察

今回、口永良部島火山からの二酸化硫黄放出率が初めて得られ、現在の口永良部島火山 (主に新岳火口) から放出されている二酸化硫黄は約 40ton/day であった。噴気ガス中の二酸化硫黄濃度が 2005 年から増加してきたことを考えると、二酸化硫黄放出レベルはこの一年程度で増加してきたものと考えられる (Figure 5)。二酸化硫黄放出率 40ton/day (0.46kg/sec) というレベルは、樽前火山とほぼ同等であり、阿蘇・桜島・薩摩硫黄・諏訪之瀬火山の 10 分の 1 程度である。

新岳火口においては、2006 年 9 月 26 日に東京工業大学によ

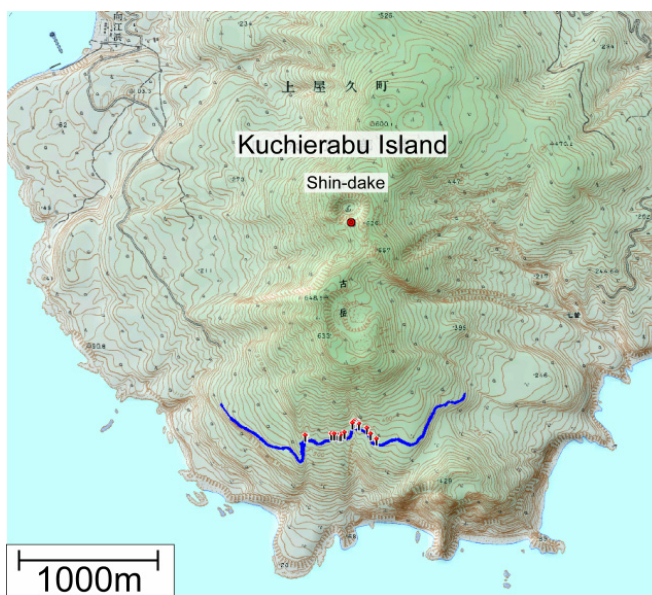


Figure 3. Map of Kuchinoerabu. Blue lines show the road the car ran for measurements and red pins show the point where the highest column concentration was detected on 22 December, 2006.

って噴気ガスの組成が調査されている。本計測時のガス組成が当時の組成と同じとは限らないが、この組成データを参考にすれば、口永良部島火山から放出されている火山ガスの総量は日量約 3,200ton (36.6kg/sec) と推定される。また、マグマ中に含まれる二酸化硫黄濃度を 2000ppm と仮定するとこの活動に関与しているマグマは日量 $7.5 \times 10^3 \text{m}^3$ であり、マグマの脱ガスによって二酸化硫黄ガスが生じていると考えた場合、想定される

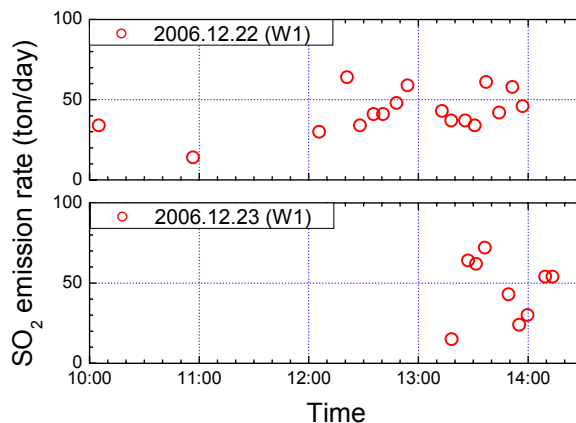


Figure 4. SO₂ emission rates from Kuchinoerabu volcano measured on 22 and 23 December, 2006.

Table 3. SO₂ emission rates from Kuchinoerabu volcano.

Date	Time	SO ₂ emission rate (ton/day)	
		W1 band	W4 band
2006/12/22	10:05:03	34	44
	10:56:41	14	31
	12:05:39	30	35
	12:20:54	64	76
	12:27:59	34	46
	12:35:28	41	53
	12:40:41	41	56
	12:48:01	48	56
	12:54:00	59	68
	13:12:51	43	38
	13:17:59	37	35
	13:25:36	37	24
	13:30:49	34	24
	13:37:08	61	42
	13:44:11	42	28
	13:51:24	58	24
	13:57:02	46	17
2006/12/23	Average	43	41
	13:18:11	15	22
	13:27:11	64	53
	13:31:33	62	49
	13:36:19	72	56
	13:49:20	43	21
	13:55:10	24	12
	13:59:40	30	21
	14:09:21	54	31
	14:13:24	54	36
	Average	46	33
	Total Average	44	38

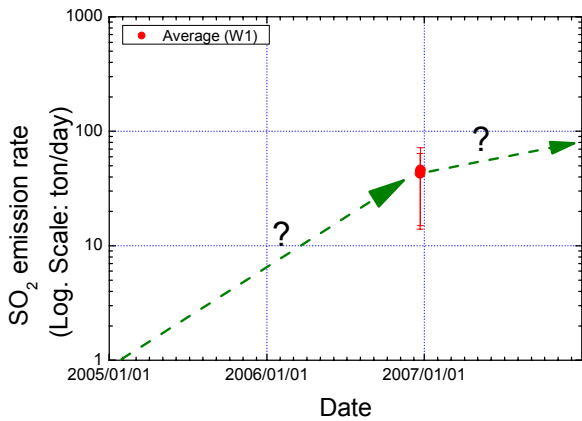


Figure 5. SO₂ emission rates from Kuchinoerabu volcano.

マグマの消費体積量は $10^2\sim 10^3\text{m}^3/\text{day}$ 程度になる。最近の地殻変動で収縮の変化が観測されていないので、口永良部火山における現在のマグマ活動は、脱ガスによって消費されるマグマ量とほぼ同量のマグマが深部から供給されている状態であると推定できる。しかし、マグマの物性に関する係数は全て仮定であることから、最近の口永良部島火山においてマグマがどれほどの深部から上昇して、噴気活動に関与しているのかを検討することは推測の域でしかない。

5. 今後の計測に当たっての注意点

今回、口永良部島からの二酸化硫黄放出率を初めて計測することができたのは、計測時の風向及び風速の条件が良かった結果だと考えている。口永良部島新岳から放出されている二酸化硫黄ガスはそれほど多くなく、より精度の高い放出率値を求めらば、火口近傍での Walking Traverse 法が最良の手段であ

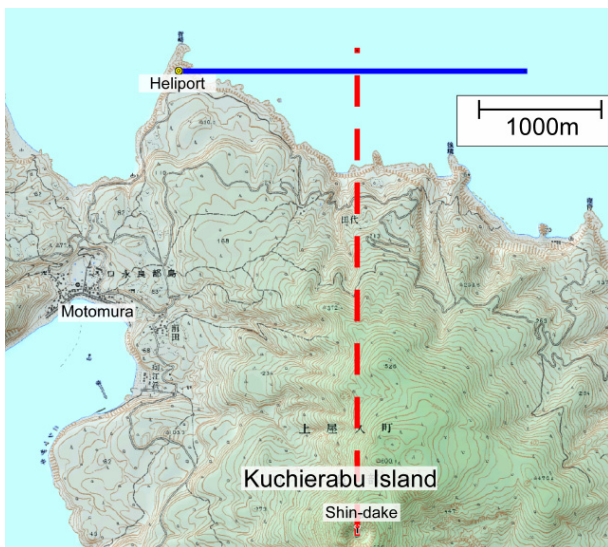


Figure 6. The measurement model in the case of using panning method. A blue line is a direction of COMPUSS mirror. A red dotted line is a direction through which volcanic plume will flow.

る。しかし、火山活動が活発になってきた現状では、火山活動レベルの変化・計測日の天候条件に併せた様々な計測手法をシミュレートしておかねばならない。そこで、現状で考えられるいくつかの条件下での計測手法を以下に記した。なお、風向は北及び南の風の場合のみを検討している。これは、屋久島のアメダスデータにおいて、東及び西の風が卓越している日が少なかったからである。

～火山活動レベル2（現状）、北の風～

この条件では、今回の計測と同じく、一周林道の南側における Car Traverse 法が有効である。しかしながら、風速が弱い場合は噴煙柱が拡散するおそれがあり、二酸化硫黄ガスの検知レベル以下になる可能性がある。雨天の翌日は強風になる可能性が高く、そのような気象条件を狙って渡島することが望ましい。

～火山活動レベル2（現状）、南の風～

この条件では、噴煙柱が北側に流れる。しかしながら、一周林道の北側は周囲が木々で覆われており、上空の視界が悪く、Car Traverse 法が行えない。しかし、ヘリポートにおける Panning 法によってデータを取得できる可能性がある (Figure 6)。Panning 法を行う場合には紫外吸収の距離減衰 (Mori et al., 2006) に留意しなければいけないが、南風の場合には計測点から噴煙柱まで 1000m 程度になると考えられるので、計測が不可能にはなる距離ではない。

～火山活動レベル3（立ち入り規制の強化）、南の風～

立ち入り規制が強化されても、南風の場合はレベル2の場合と同様にヘリポートにおける Panning 法で計測できるであろう。

～火山活動レベル3（立ち入り規制の強化）、北の風～

立ち入り規制が強化されると、南側の一周林道への侵入が不可能になる。この条件下での計測が最も難しい。まず、島内での Panning 法であるが、適した場所がない。南風におけるヘリポートでの Panning 法では、海上に向けてミラーを向けている



Picture 3. Snapshot of panning measurement at Kuchinoerabu on 23 December, 2006.

ので、少々風が東や西に振ったところで計測には問題が生じないが、北風の場合、Panning 法を行える計測点ではかならず新岳—古岳の延長線上にある稜線にミラーを向けざるを得ない。今回の計測においても、一周林道の規制区域外の地点（新岳火口から東南東へ約 2000m）で Panning 法を試してみた (Picture 3)。しかしながら、風向が若干東よりだったため（北北東の風）、噴煙柱が稜線の西側に流れており、二酸化硫黄ガスを検出することが出来なかった。さらに、噴煙柱までの距離が 2000m を超えており、紫外散乱による減衰の問題も大きく寄与してくる。この条件では Panning 法を行わない方が賢明である。残る手段としては船舶等を利用する Ship Traverse 法、航空機等を利用する Air plane Traverse 法が考えられるが、一日の計測回数が僅かな数にしかならないことが問題点になる。

以上のことから、火山活動レベル 2 の場合には強い北の風が吹く日を狙った一周林道における Car Traverse 法が望ましく、火山活動レベルが 3 に上がった場合には強い南の風が吹く日を狙ったヘリポートにおける Panning 法が望ましい。

謝辞

本計測を行うに当たって、京都大学防災研究所附属火山活動研究センターの井口正人氏、高山鐵郎氏、為栗健氏及び産業技術総合研究所の篠原宏志氏、風早康平氏、大和田道子氏、下司信夫氏に多大なるご協力を頂いた。また、東京工業大学火山流体研究センターの平林順一氏、野上健治氏には口永良部島の火山ガスに関する様々な情報をレクチャーしていただいた。記してお礼申し上げます。

参考文献

- Mori, T., Mori, T., Kazahaya, K., Ohwada, M., Hirabayashi, J. and Yoshikawa, S., Effect of UV scattering on SO₂ emission rate measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33, No. 17, L17315, DOI: 10.1029/2006GL026285.
- Mori, T., Kazahaya, K., Oppenheimer, C., McGonigle, A. J. W., Tsanev, V., Olmos, R., Ohwada, M. and Shuto, T., Sulfur dioxide fluxes from the volcanoes of Hokkaido, Japan., *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2006, 158, 235-243.
- Mori, T., Hirabayashi, J., Kazahaya, K., Mori, T., Ohwada, M., Miyashita, M., Iino H. and Nakahori, Y., A COMPact Ultraviolet Spectrometer System (COMPASS) for Monitoring Volcanic SO₂ Emission: Validation and Preliminary Observation., *Bull. Volcano. Japan.*, 2007 (in press).