

阿蘇中岳火山の二酸化硫黄および二酸化炭素ガス放出量の測定

齋藤, 政城
九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻 : 修士課程

松島, 健
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター : 助教授

松尾, 紉道
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター : 助手

清水, 洋
九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター : 教授

<https://doi.org/10.15017/6059>

出版情報 : 九州大学大学院理学研究院研究報告. 地球惑星科学. 22 (2), pp.51-62, 2007-02-15. 九州大学大学院理学研究院

バージョン :

権利関係 :



阿蘇中岳火山の二酸化硫黄および二酸化炭素ガス放出量の測定

齋藤政城*・松島 健*・松尾紉道*・清水 洋*

Observation of SO₂ and CO₂ fluxes in and around the active crater of Aso Nakadake Volcano

Masaki SAITO*, Takeshi MATSUSHIMA*, Norimichi MATSUWO*, and Hiroshi SHIMIZU*

Abstract

Volatiles of the magma such as H₂O, CO₂, SO₂, H₂S and HCl, which are the main components of volcanic explosions, discharge to the surface of the earth as volcanic gases, hot springs, and river waters. The discharge occurs not only in volcanic eruptions but also in non-erupting activities. In order to clarify the mass balance of volatiles, the hydrothermal structure and the volcanic activities, it is very important to characterize the chemical constituents and the amount of the volatiles discharged from volcanoes.

It is thought that the volcanic gases reflect immediately the changes of magmatic activity because the mobility of gases is the most abundant among the discharge forms of volatiles. The diffuse degassing from soil is one of the discharge forms paid attention in recent years. As CO₂ is hardly influenced by the groundwater due to low solubility in water, the direct information on volcanic activities can be obtained by observing the CO₂ flux and its changes.

Aso volcano is one of the most active volcanoes in Japan, and magmatic eruptions have occurred several times in historical times. However, the research on the amount of the CO₂ flux from the soil in and around the active craters had not been performed at Aso volcano. In this study, we estimated the CO₂ fluxes from the Nakadake crater and the circumference soil at Aso volcano and compared the results with the CO₂ fluxes at Kusatsu-Shirane volcano.

At Aso volcano, the amount of the total CO₂ flux from soil was estimated to be about 0.12 ton d⁻¹. While the amount of CO₂ flux from the Nakadake First crater was estimated to be 597 ± 95 ton d⁻¹, and thus the CO₂ flux from the crater was much larger than that from the soil at Aso volcano. On the contrary, the CO₂ flux from the soil was comparable to that from the craters (fumaroles) at Kusatsu-Shirane volcano.

Key words: Volcanic gas, SO₂, CO₂, Aso Nakadake volcano

1. はじめに

火山噴火の原動力である水蒸気, 二酸化炭素, 二酸化硫黄, 硫化水素, 塩化水素等のマグマ中の揮発性成分は非噴火時にも地表に放出されている。揮発性成分の大部分は山頂火口からの火山ガスや噴気ガス, 土壌からの拡散放出ガスに加えて温泉水, 河川水, 湖水などとしても地表に放出されており, 放出

形態は多岐にわたっている。揮発性成分ごとに見れば, 二酸化炭素や硫化水素は主に噴気ガスや土壌からの拡散放出ガスとして放出され, 二酸化硫黄や塩化水素は主にSO₄²⁻やCl⁻といった陰イオンの形をとり, 温泉水や河川水, 湖水に溶解して地表に放出される。

マグマ由来の揮発性成分の化学的特性や量を知るとは, 揮発性成分の物質収支, 地下の熱水系構造, 火山活動の変化や規模を解明する上で非常に重要である。

平成18年9月13日受付, 平成18年12月19日受理

*九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

揮発性成分の放出量の測定手段には、噴煙など大規模な噴気に対して行う紫外線相関スペクトロメータ (COSPEC) を用いた二酸化硫黄放出量測定 (例えば大喜多・下鶴, 1975) や, Plume rise法を用いた噴気による熱エネルギーと水蒸気の放出量測定 (例えば鍵山 1978) などがある。また, ピトー管・差圧計を用いた噴気孔からのガス放出量測定 (鈴木 2002), 湧出量測定及び化学組成分析による温泉水や河川水からの揮発性成分の放出量の測定 (水橋 2002, 2004), も草津白根山や九重山などを中心に行われている。

火山ガスは揮発性物質の放出形態の中でも最も移動性に富むため, マグマの状況をすぐに反映すると考えられている。土壌からの拡散放出ガスは近年注目されている放出形態の一つである。土壌からの拡散放出ガスに含まれる成分の中で, 二酸化炭素は水への溶解度が低いいため, 地下水の影響を受けにくい。このことから, 二酸化炭素の放出量やその変動等を観測する事により火山活動に関する様々な情報を得ることができる。2000年の有珠山の噴火の際には, 1998年9月から1999年9月にかけて二酸化炭素放出量が増加し, 噴火後の2000年6月には二酸化炭素放出量

の減少が確認され, 火山噴火の推移と連動した結果が報告された (Hernandez *et al.* 2001)。また, 薩摩硫黄島では土壌から放出される二酸化炭素量が, 山頂火口から放出される二酸化炭素量の20%に達し, 二酸化炭素放出量を見積もる上で土壌からの拡散放出ガスを無視することができないという報告がされている (Shimoike *et al.* 2002)。

阿蘇山は九州中央部に位置する活火山で, 東西約17km, 南北約25kmのカルデラ内に東西方向に中央火口丘群をもち, そのうちの一つである中岳北端に位置する第一火口が現在活動中である (Fig.1)。また, 中岳第一火口には火口湖である「湯溜まり」が存在し, 火山活動に対応して水位が変化している。活発な活動期には湯溜まりは干上がり, 湖底から直接ガスや噴煙が放出する。

阿蘇山ではこれまで二酸化炭素放出量に関する研究は行われていなかった。本研究では, 阿蘇山中岳火口及びその周辺土壌から放出される二酸化炭素量を見積もり, 草津白根山の結果と比較し, 両火山の地下構造に関して考察する。

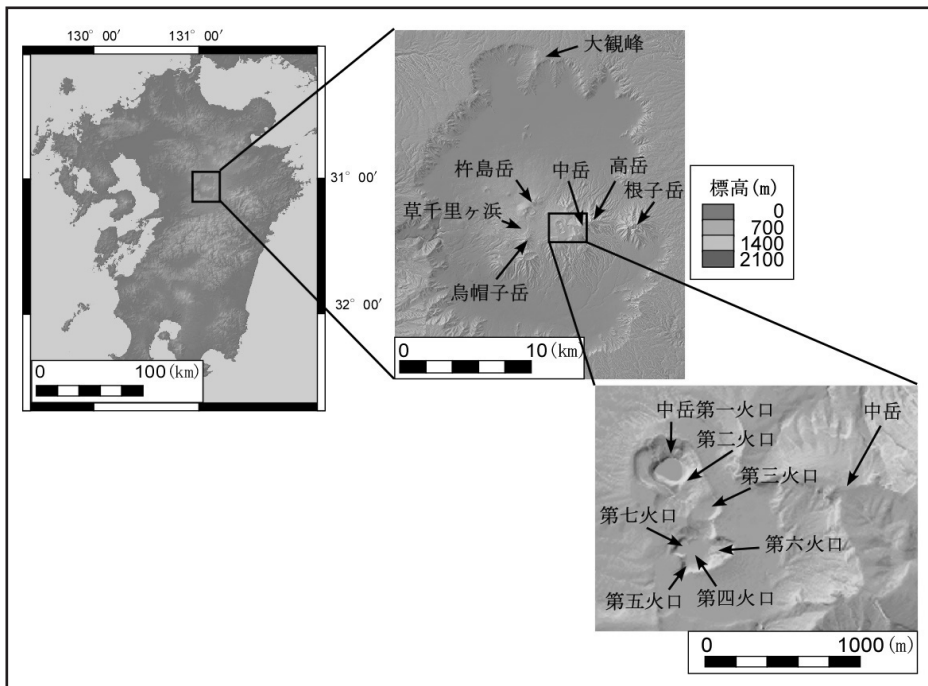


Fig. 1. Map of the craters of Aso Nakadake volcano, Kyushu Japan. Aso volcano is one of the most active volcanoes in Japan. Voluminous volcanic gas continuously emitted from the first crater.

2. 観 測

本研究では、火口及びその周辺から放出される二酸化炭素量を見積もるために、土壌から拡散放出される二酸化炭素量と火口から放出される二酸化炭素量とに分けて観測を行った。火口からの二酸化炭素放出量を直接見積もる観測手法はまだ開発されていないため、火口からの火山ガス中の CO_2/SO_2 比を求める観測と二酸化硫黄放出量を求める観測を行い、それらを掛け合わせて火口からの二酸化炭素放出量を見積もることとした。

2.1. 土壌からの二酸化炭素拡散放出量測定

土壌からの二酸化炭素拡散放出量測定にはAccumulation chamber法 (Chiodini 1998) を採用した。測定器として用いたイタリアWest Systems社製「Carbon dioxide flux meter」(Fig. 2) はお椀型の容器 (チャンバー) にたまった拡散放出ガス中の二酸化炭素濃度を非分散型赤外分光法 (NDIR) で解析するものである。この方法は、二酸化炭素が波長426nmの赤外線を選択的に吸収し二酸化炭素分子が高濃度で存在するほどより強く吸収する性質を利用し、二酸化炭素濃度を測定する。チャ

ンバー内のガス濃度に偏りができないように、チャンバー内にはモーターで回転するはねがついており、チャンバー内部のガスを十分に攪拌するようにしている。また、二本の管をそれぞれ吸気用と排気用を使用し、チャンバー内のガスを循環させることでチャンバー内の二酸化炭素濃度の上昇をできるだけ正確に測定できるようになっている。

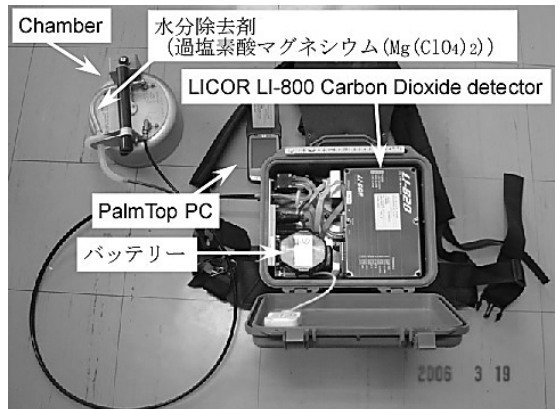


Fig. 2. A photo of the Carbon Dioxide Flux Meter which was used to estimate the CO_2 flux from soil around Aso Nakadake in this study.

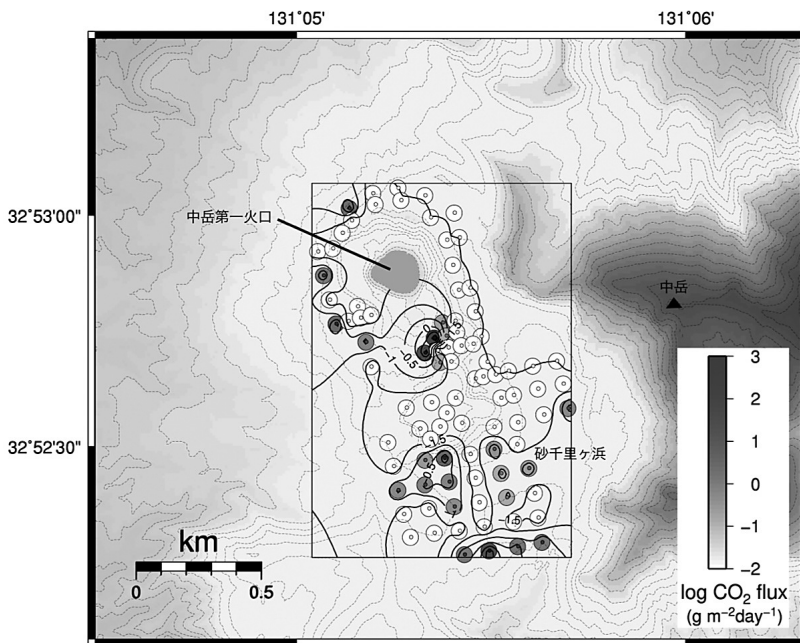


Fig. 3. Map of observation points and the results of CO_2 fluxes from the soil around Aso Nakadake.

二酸化炭素拡散放出量 ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) は、チャンバー内の二酸化炭素濃度の上昇速度 (ppm s^{-1}) に、測定現場の気温・気圧およびチャンバーの形状で決まる係数を乗ずる事によって得ることができる。

測定上の注意点として、サンプルガス中に含まれる水蒸気も二酸化炭素同様赤外線を吸収する性質を持ち、その吸収波長領域は二酸化炭素と重なっているため、その影響を除去するためにサンプルガスの除湿を行うことが必要である。除湿の際には二酸化炭素も吸着してしまうシリカゲル (SiO_2) を用いず、過塩素酸マグネシウム ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$) を用いる。また、凹凸のある土壌で測定を行う場合、地表とチャンバーの隙間から風が入ると、正確なデータが得られないため、チャンバーをしっかりと地表に被せ、周りの土壌で隙間を埋める事が必要である。

測定点の位置座標はAshtech社製DGPS「BR2G」を用いて測定した。このGPS受信機は海上保安庁が発信する衛星誤差情報を受信することによりGPS単独測位よりは3~4倍良い精度 (1~2mの誤差) で位置を決定できる。

測定は2004年11月19, 20, 22日, 2004年12月16, 17日に阿蘇山中岳火口周辺域において50~100m間隔で92点行った。観測点の分布図をFig.3に、観測風景をFig.4に示す。

土壌からの二酸化炭素拡散放出量は1~数m離れるだけで放出量が10~数十倍変化する場合がありますので、より正確な二酸化炭素拡散放出量を見積もるために、各測定点では1m四方の範囲内で3回測定を行い、平均値をその点の値とした (Table 1)。土壌からの二酸化炭素拡散放出量は測定範囲1.56 km^2 内で0~30.5 $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ と小さな値を示した (Fig. 3)。火口周辺や第一火口以外の火口内などでも目立った放出は見られなかった。測定範囲内での総放出量は約0.12 ton d^{-1} と見積もられた。



Fig. 4. A photo showing the proceeding of CO_2 flux measurements from the soil around Aso Nakadake.



Fig. 5. Map showing measurement area of CO_2 / SO_2 ratio in volcanic gas around the Aso Nakadake crater.

Table 1. Observed CO₂ Fluxes from soil around Aso Nakadake using the Carbon Dioxide Flux Meter.

番号	測定 点名	測定 月日 2004年	緯度・経度(WGS84) 北緯(度) 東経(度)		CO ₂ 拡散 放出量 (g m ⁻² d ⁻¹)	番号	測定 点名	測定 月日 2004年	緯度・経度(WGS84) 北緯(度) 東経(度)		CO ₂ 拡散 放出量 (g m ⁻² d ⁻¹)
1	E+14	12/17	32.88751	131.08427	0.00	47	N20	12/16	32.88146	131.09214	0.00
2	E+15	12/17	32.88770	131.08534	0.00	48	O14	11/20	32.87978	131.08570	0.00
3	F13	12/17	32.88697	131.08326	2.02	49	O15	11/20	32.87998	131.08677	0.00
4	F14	12/17	32.88711	131.08437	0.00	50	O16	11/20	32.88014	131.08781	0.00
5	F15	12/17	32.88726	131.08546	0.00	51	O17+	12/16	32.88014	131.08976	0.00
6	F16	12/17	32.88744	131.08650	0.00	52	O18	12/16	32.88023	131.09029	0.00
7	F+13	12/17	32.88654	131.08336	0.00	53	O19	12/16	32.88046	131.09132	0.00
8	G16	12/17	32.88664	131.08674	0.00	54	O20	12/16	32.88065	131.09242	0.00
9	G17	12/17	32.88681	131.08775	0.00	55	O+15+	11/20	32.87959	131.08743	0.00
10	G+13	11/22	32.88608	131.08296	0.00	56	P13	11/19	32.87853	131.08491	0.00
11	H12	11/22	32.88541	131.08191	0.00	57	P14	11/20	32.87902	131.08628	0.00
12	H12+	11/22	32.88552	131.08254	0.00	58	P15	11/20	32.87910	131.08713	0.00
13	H16+	12/17	32.88584	131.08743	0.00	59	P16	11/20	32.87923	131.08807	0.00
14	H17	12/17	32.88592	131.08797	0.00	60	P17	11/20	32.87909	131.08946	0.00
15	I12	11/22	32.88455	131.08215	1.24	61	P18	12/16	32.87925	131.09047	0.00
16	I17	12/17	32.88493	131.08769	0.00	62	P19	12/16	32.87953	131.09158	0.00
17	J12	11/22	32.88368	131.08240	0.00	63	P20	12/16	32.87976	131.09262	0.50
18	J17	12/17	32.88403	131.08793	0.00	64	P+14+	11/20	32.87865	131.08674	0.00
19	J17+	12/17	32.88411	131.08842	0.00	65	Q13	11/19	32.87767	131.08515	0.00
20	J+13	11/22	32.88343	131.08362	0.00	66	Q14	11/19	32.87789	131.08650	0.28
21	K12	11/22	32.88281	131.08268	2.61	67	Q15	11/19	32.87796	131.08733	3.35
22	K12+	11/22	32.88290	131.08322	0.00	68	Q16	11/20	32.87810	131.08842	0.00
23	K13	11/22	32.88303	131.08373	0.00	69	Q17	11/20	32.87828	131.08946	0.33
24	K13+	11/22	32.88312	131.08419	0.00	70	Q18	11/20	32.87846	131.09043	0.00
25	K17+	12/17	32.88325	131.08864	0.00	71	R13	11/19	32.87681	131.08534	0.55
26	L13	11/22	32.88215	131.08397	0.64	72	R14	11/19	32.87700	131.08650	0.73
27	L16	11/22	32.88285	131.08725	0.23	73	R15	11/19	32.87711	131.08753	0.69
28	L16+	11/22	32.88291	131.08779	0.00	74	R16	11/20	32.87725	131.08864	0.00
29	L17+	12/17	32.88235	131.08890	0.00	75	R17	11/20	32.87741	131.08976	0.14
30	L+15+	11/22	32.88230	131.08689	0.00	76	R18	11/20	32.87759	131.09095	0.23
31	L+16	11/22	32.88238	131.08741	0.14	77	S13	11/19	32.87594	131.08558	0.00
32	L+16+	11/22	32.88250	131.08787	0.00	78	S14	11/19	32.87614	131.08666	0.00
33	M13	11/22	32.88126	131.08419	0.00	79	S15	11/19	32.87621	131.08775	0.41
34	M15	11/22	32.88176	131.08650	30.50	80	S16	11/20	32.87636	131.08882	0.00
35	M15+	11/22	32.88184	131.08703	0.00	81	S17	11/20	32.87654	131.08999	0.14
36	M16	11/22	32.88195	131.08749	0.00	82	S18	11/20	32.87669	131.09119	0.00
37	M16+	11/22	32.88202	131.08805	0.00	83	T13	11/19	32.87510	131.08588	0.00
38	M17	11/22	32.88209	131.08856	0.00	84	T14	11/19	32.87526	131.08689	0.00
39	M17+	12/17	32.88144	131.08916	0.00	85	T15	11/19	32.87533	131.08797	0.00
40	M+15+	11/22	32.88141	131.08713	0.18	86	T16	11/19	32.87549	131.08904	0.00
41	M+16	11/22	32.88144	131.08761	0.00	87	T17	11/20	32.87566	131.09029	0.00
42	N16+	12/16	32.88083	131.08864	0.00	88	T18	11/20	32.87581	131.09134	0.00
43	N17	12/16	32.88090	131.08898	0.00	89	U15	11/19	32.87448	131.08819	1.01
44	N17+	12/16	32.88098	131.08952	0.00	90	U16	11/19	32.87462	131.08924	27.61
45	N18	12/16	32.88110	131.09007	0.00	91	U17	11/20	32.87477	131.09047	1.56
46	N19	12/16	32.88128	131.09111	0.00	92	U18	11/20	32.87493	131.09150	1.01



Fig. 6. Photos showing the proceeding of CO_2/SO_2 ratio measurements in the volcanic gas on the rim of the First Crater of Aso Nakadake.

2.2. 火口から放出される火山ガス中の CO_2/SO_2 比測定

阿蘇山の場合、噴気孔のある火口底まで火口縁から200mほどあり、なおかつ急峻な地形であるため、噴気孔から直接火山ガスを採取して分析することが困難なので、現在開発中の携帯型マルチセンサーシステム (Shinohara 2005) を用いて観測を行った。二酸化硫黄濃度測定には定電位電解式の分析器 (光明理化学工業KP-2) を用いている。二酸化炭素の濃度測定には非分散型赤外分光法式の分析器 (LI-COR LI-860) を用いている。この方式は前述の土壌からの二酸化炭素拡散放出量測定と同じ方式である。

測定は、火口縁で火山ガスをポンプで吸引し分析器に送り込み、二酸化硫黄には定電位電解法を、二酸化炭素には非分散型赤外分光法を用いてそれぞれの濃度を求め、1秒ごとに測定値を電圧値としてデータロガーに収集する。また、データロガーの画面上で測定値の変化のグラフを見ることができる。火口縁で採取した火山ガスには大気が混入していると考えられるので、得られた二酸化硫黄濃度および二酸化炭素濃度の値から大気中の二酸化硫黄濃度および二酸化炭素濃度の値を引いた値から CO_2/SO_2 比 (モル比) を求める。大気中の二酸化硫黄濃度および二酸化炭素濃度は、データロガーでのガス濃度と目視での確認を行いながら、火山ガスから5~10m程離れた火山ガスの影響がないところで測定した。

Table 2. Result of CO_2/SO_2 ratio of volcanic gas from Aso Nakadake crater.

	CO_2/SO_2 比 (モル比)
2004/10/04	1.89
2005/04/25	1.24
2005/11/19	2.26

解析は、推定した噴煙中の二酸化硫黄濃度および二酸化炭素濃度の相関のよいピークの面積を比べることにより求める。測定は阿蘇中岳第一火口周辺縁 (Fig. 5) において2004年10月4日、2005年4月25日、2005年11月19日の3回測定を行った。観測風景をFig. 6に示す。火口から放出された火山ガス中の CO_2/SO_2 比測定の結果をTable 2に示す。

2.3. 火口からの二酸化硫黄放出量測定

2.3.1. 測定方法

二酸化硫黄放出量測定は、紫外線相関スペクトロメータCOSPEC (CORRELATION SPECTROMETER, カナダBarringer Research社製COSPEC-V型) を車に積み、噴煙下を横切って測定するトラバース法を用いて行った (Fig. 7)。COSPECの原理は自然光を光源として、二酸化硫黄が波長300~320nm付近の紫外線を吸収する性質を利用して光路上の二酸化硫黄カラム量をppm m単位で測定し、風速値をかけて放出量を見積もるものである。測定は1秒間隔で行い、時刻、緯度、経度、標高、見積もった二酸化硫黄カラム量を電圧値に変



Fig. 7. Photos showing the COSPEC and the data collector installed in a vehicle. A rectangular prism is used to observe SO_2 column density through the roof window.

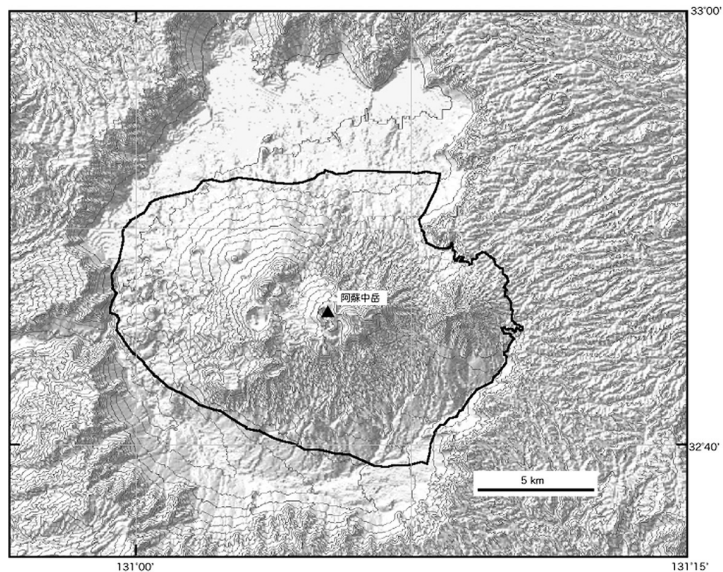


Fig. 8. Route map of the SO_2 traverse observation around Aso volcano.

換したデータをデータロガー（白山工業株式会社製 LS-5020VT）に収集した。

測定は、1ヶ月に1回程度、Fig. 8で示す阿蘇山周辺の火口からおよそ5~9km離れた国道で行った。その際、観測時の風向により測定ルートに適宜調節した。1測線に対し前後2回標準濃度セルを用いたデータ較正（Calibration）を行い、合計5往復、計10回程度行った。

2.3.2. 標準濃度セルの経年変化補正

本研究では、標準濃度セルのカラム量の経年変化による減少を補正するため、2006年2月2日に標準濃度セルの検定を行った。その結果、気圧1,020hPa、気温17℃の条件下で、高濃度セルのカラム量が281 ppm m、低濃度セルのカラム量が68ppm mとなった。前回の検定は1989年12月7日に行い、気圧1,013hPa、気温10℃の条件下で高濃度セルのカラム量が325ppm m、低濃度セルのカラム量が76ppm mであった。これは、今回

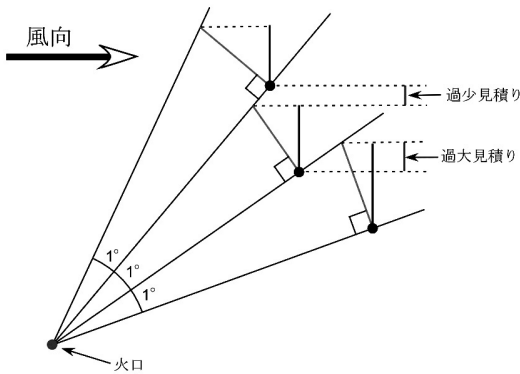


Fig. 9. Schematic sketch showing cause of SO_2 estimation errors estimated in the previous analysis method.

の検定下の条件では、それぞれ331ppm mと77ppm mに相当する。約16年間の間に高濃度セルのカラム量は331ppm mから281ppm mまで50ppm m減少、低濃度セルは77ppm mから68ppm mまで9ppm m減少したと見積もられた。本研究では、標準濃度セルのカラム量の減少が観測期間内で一次線形的に進んだものと仮定し、その時間変化を定式化し、標準濃度セルのカラム量の減衰の補正を行った。

2.3.3. 解析方法および結果

トラバース法を用いて測定されたデータの解析は、これまで地震火山観測研究センターで用いてきた解析方法（解析方法1）と、解析方法1で起こる二酸化硫黄放出量の過大、過小見積もりを改善した方法（解析方法2）の2通りの方法で行った。

解析方法1では、火口を中心に北から東回りに1度ごとの範囲内の測定点の火口からの距離を平均し、その距離を半径とした正360面体の一辺の長さから、その風向に対して直交する距離を求め、二酸化硫黄放出量を算出している。しかし、求めた風向に対して直交する距離が、実際に噴煙下を風向に対して直交に横切った距離と一致せず、二酸化硫黄放出量の過大、過小見積もりを引き起こしていた（Fig.9）。そこで、データ解析方法2では、1秒ごとに得た測定値から風向に対して直交する距離を求めることとした。以下に具体的な解析方法を記す。

(1) まず始めに、1つの測定に対して前後に2回行ったCalibration用データ測定のそれぞれの結果から、電圧値と二酸化硫黄カラム量の一次方程式を1測線ごとに求める。測定の光源として太陽散乱光を用いるた

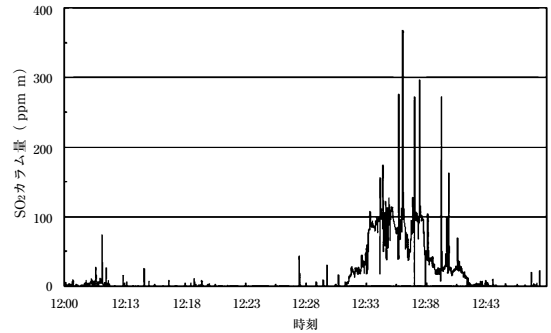


Fig. 10. Time variation of SO_2 column observed using COSPEC on a vehicle.

め、特に早朝や夕方など、太陽光量の変化が大きいときには、測定量に大きな誤差が生じる。このため、標準濃度セルを用いたCalibrationは頻繁に行う必要がある。

(2) ロガーに毎秒記録された電圧値について、Calibrationで求めた方程式を用いてそれぞれの地点での二酸化硫黄カラムに変換する（Fig. 10）。

(3) (2) で得られた各測定点におけるカラム量のグラフから噴煙のピークと思われる測定点を選び出し、測定時の風向きを火口からその測定点に向かって吹いているものと仮定し、その測定点の位置座標と火口の位置座標から、測定点から見た火口の北から東回りの角度を求める。

(4) 緯度、経度のデータから前後2測定点間の移動距離を北および東を正の値とし、北への移動距離と東への移動距離をそれぞれ求め、その値を用いて前後2測定点間の直線距離を求める。さらに前後2測定点間の北への移動距離と東への移動距離の値および(3)で求めた測定点から見た火口の北から東回りの角度から、風向に直交する方向への移動距離を、風向に対する直交方向の一方への移動距離を正の値、逆方向への移動距離を負の値として求める。これにより、測定路線がS字型に屈曲している場合の過大見積りの可能性を解消する。

(5) (2) で得られた各測定点におけるカラム量のグラフから噴煙の下を横切っていると思われる範囲を決め、その範囲内の全測定点において、(4)で求めた2測定点間の風向に直交する方向への移動距離に、(2)で求めた各測定点におけるカラム量を乗じ、その結果を範囲内で合計し、噴煙断面のカラム量C

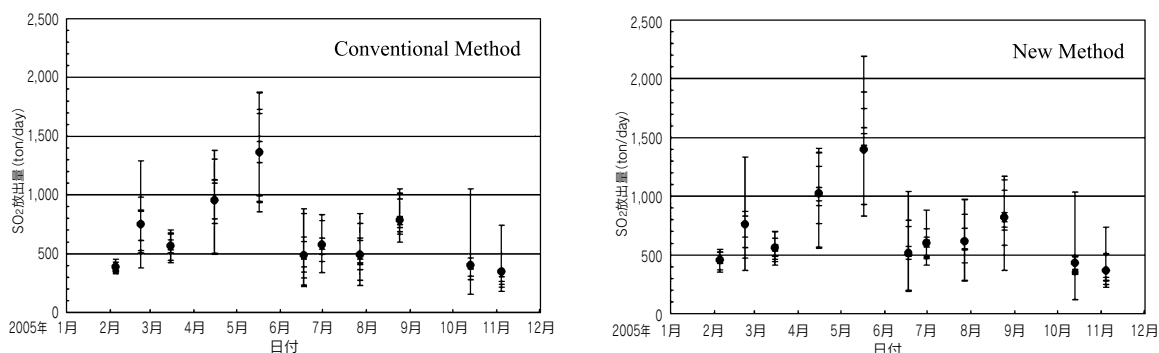
Fig. 11. Comparison of SO₂ flux variation between the old and new analytical methods.

Table 3. Summary of the observation results in this study.

阿蘇山	測定結果	測定年月
火口から放出される火山ガスの CO ₂ /SO ₂ 比	1.89	2004 年 10 月 4 日
火口から放出される SO ₂ 量	460±73 ton d ⁻¹	2005 年 2 月 4 日
火口から放出される CO ₂ 量	597±95 ton d ⁻¹	
火口周辺の土壌から拡散放出される CO ₂ 量	約 0.12 ton d ⁻¹	2004 年 11-12 月

(ppm m²) を求める。

(6) 気象庁熊本県阿蘇山測候所（標高1142m）の地上気象観測による毎時の風速データより、毎時の風速データ間を線形補完し、測定開始時刻と終了時刻の風速を求め、それらの平均値を測定中の風速 W (m s⁻¹) とする。

(7) (5) で求めた噴煙断面のカラム量 C に (6) で求めた風速 W 、標準濃度セル内の二酸化硫黄の密度 D_2 (=2.71kg m⁻³) をかけて二酸化硫黄放出量 (ton d⁻¹) を求める。

(8) 1測線ごとの測定に対して (1) ~ (7) の計算を行い、全測線の平均値を測定日の二酸化硫黄放出量とする。

解析方法1, 2による火口からの二酸化硫黄放出量測定の結果をそれぞれFig. 11に示す。解析方法1, 2を用いて求めた二酸化硫黄放出量は、4月14日の小規模噴火以降増加する傾向など、同様の推移が認められた。しかし、両者による測定値の差は-1~+26%あり、解析方法1の場合、最大で20%以上の推定誤差を生じることがわかった。本研究の考察には解析方法2

の結果を採用する。

2.4. 火口からの二酸化炭素放出量

阿蘇中岳火口から放出される火山ガス中のCO₂/SO₂比と火口からの二酸化硫黄放出量、土壌からの二酸化炭素拡散放出量を用いて、阿蘇中岳第一火口から放出される二酸化炭素量を見積もった。本来なら3つの測定を同時に行って放出される二酸化炭素量を計算するべきであるが、残念ながら技術的な問題により、別々の日に行った測定結果を用いざるを得なかった。この時期阿蘇火山は、火山活動度レベル2（やや活発な火山活動）が2004年5月以来継続している状態で大きな火山活動状態の変化はなく、火山ガスの変化も少なかったと考えられる。

火山ガス中のCO₂/SO₂比測定の結果は、2004年10月4日に行った結果（1.89）を、火口からの二酸化硫黄放出量測定の結果には、2005年2月4日に行った測定値に対して本研究で改善した解析方法（解析方法2）を用いて求めた結果（460±73ton d⁻¹）を用いた。その結果阿蘇中岳第一火口から放出される二酸化炭素量は597±95 ton d⁻¹と見積もられ、土壌から放出される二酸化炭素量の約5000倍となった（Table 3）。

Table 4. Comparison of activity between Aso and Kusatsu-Shirane volcano.

火山	火口からの CO ₂ 放出量 (ton d ⁻¹)	CO ₂ 拡散 放出量 (ton d ⁻¹)	面積 (km ²)	CO ₂ 拡散放出 量/面積 (ton d ⁻¹ km ⁻²)	測定年	文献
阿蘇中岳火口周辺	597	0.12	1.56	0.1	2004	本研究
草津白根山	3.1	1.4	0.051	27.5	2003	齊藤 2004
薩摩硫黄島	100	20	-	-	1999,2000	Shimoike et al. (2002)
有珠山		39	2	19.5	2000	Hernandez et al. (2001)
〃		340	2.65	128.3	1999	Hernandez et al. (2001)
〃		120	2.65	45.3	1998	Hernandez et al. (2001)
伊豆大島		3	5	0.6	1997	下池, 1999
三宅島		4300	41.44	103.8	1998(Sept.)	Hernandez et al. (1998b)
〃		3200	33.4	95.8	1998(May)	Hernandez et al. (1998b)
Teide		380	0.53	717.0	1997	Hernandez et al. (1998a)
Vulcano		206	0.42	490.5	1995(Jul.)	Chiodini et al. (1996)
〃		200	0.65	307.7	1995(Apr.)	Chiodini et al. (1996)
Mammoth		130	0.145	896.6	1997	Gerlach et al. (1998)
〃		350	0.145	2413.8	1995	Gerlach et al. (1998)
Solfatara of Pozzuori		133	0.09	1477.8	1994	Chiodini et al. (1998)
Nea Kameni Santorini		15.4	0.037	416.2	1994	Chiodini et al. (1998)
Yangbajain		138	3.2	43.1	1994	Chiodini et al. (1998)

Table 5. Result of CO₂ Flux of various volcanoes in the world including that of this study.

	阿蘇山	草津白根山
有史以降の噴火活動	マグマ水蒸気爆発 ～マグマ噴火	水蒸気爆発
火口（噴気孔）CO ₂ 量＋土壌CO ₂ 量	597±95 ton d ⁻¹	4.5 ton d ⁻¹
火口（噴気孔）から放出されるCO ₂ 量	597±95 ton d ⁻¹	3.1 ton d ⁻¹ （齊藤 2004）
火口周辺の土壌から拡散放出されるCO ₂ 量	約 0.12 ton d ⁻¹	1.4 ton d ⁻¹ （齊藤 2004）
火口（噴気孔）：土壌	5000 : 1	2 : 1

3. 考 察

本研究の測定結果より阿蘇中岳火口周辺では火口から放出される二酸化炭素量が土壌から放出される二酸化炭素量の約5000倍となり、阿蘇中岳火口周辺ではほとんどの火山ガスが火口から放出されていることが明らかとなった。

また二酸化炭素の拡散放出量は中岳第二火口と第三火口の境界部が最も多く、その他には第一火口の西側縁や砂千里ヶ浜の南部などで少量の拡散放出がみられる。第二・第三火口境界部の拡散域はTakagi et al. (2006) で指摘されている短周期微動の震源域と一致している。意外なことに第三火口～第七火口の火口底部分からはほとんど二酸化炭素が拡散放出され

ていない。

これまで様々な火山で行われた二酸化炭素放出量の測定結果をTable 4に示す。これを見ると、阿蘇火山の二酸化炭素放出量合計は三宅島の次に多いが、火口周辺の土壌から拡散放出される二酸化炭素量は総放出量も単位面積あたりの放出量も他の火山に比べ圧倒的に少ないことがわかる。これは、阿蘇山ではマグマから脱ガスした二酸化炭素のほとんどが火口からブルームとして放出しているからと考えられる。

3.1. 草津白根山との比較

これまで、齊藤 (2004) により草津白根山では噴気孔から 3.1 ton d^{-1} 、土壌から 1.4 ton d^{-1} の二酸化炭素が放出されていることが分かっている (Table 5)。二酸化炭素総放出量が草津白根山では 4.5 ton d^{-1} であったのに対し、阿蘇山では $597 \pm 95 \text{ ton d}^{-1}$ であり、草津白根山に比べ2桁も多い。このことは、現在の阿蘇山と草津白根山のマグマ供給量の違いを示唆しており、草津白根山の有史以降の噴火活動がすべて水蒸気爆発であるのに対し、阿蘇山が有史以降活発なマグマ噴火活動を繰り返していることと調和的である。

火山性微動の研究結果による阿蘇山の浅部構造によれば、深さ $1 \sim 1.5 \text{ km}$ に熱水だまりがあると推定されている (Kaneshima *et al.* 1996)。さらにここから地表の火口に向かって伸びるクラック状の構造 (火道) があることが明らかにされ (Yamamoto *et al.* 1999)、地下の物質輸送システムの実体を明らかになりつつある。

また、電気比抵抗構造の研究による阿蘇山浅部構造の推定によっても、地表下 200 m および 1 km 近辺に $10 \Omega \text{ m}$ 以下の低比抵抗層が検出され、帯水層の存在が推定されている (Hase *et al.* 2005)。しかし、中岳火口周辺では地表は活発な火山活動による厚い碎屑物に覆われ、第一火口周辺以外には地熱異常が見られない (たとえば、鷗川ほか 1998)。このため地下からのガスのほとんどが、地下の熱水だまりから現在活発な活動をしている中岳第一火口を通して効率良く地表に放出されているものと考えられる。

一方電気比抵抗構造の研究では、草津白根山でも火口湖である湯釜周辺の山体に低比抵抗領域が広がっており、同様に熱水系が発達していると推測されている (桂ほか 1996) が、湯釜は常時満水の状態で、周囲の火口壁からのガス放出も少なく、阿蘇第一火口の湯溜まりとは活動度に大きな差がある。また、近年の火山活動は水蒸気爆発が主体となっているこ

とから、山頂部領域の碎屑物層は薄く、地下の熱水活動が地表に現れやすい。実際に湯釜の北方や北東麓には近年の噴火活動で生じたと考えられている地熱異常域や硫化変質域が広がっており、地中から拡散放出される二酸化炭素量もこの地熱異常域や変質域を中心に多くなっている (齊藤 2004)。

このことから、草津白根山では地下の熱水域から湯釜火口への火山ガス放出の効率が良くないうえに、火口周囲の地表への火山ガスの流路が多岐にわたり確保されているため、火口や噴気孔から放出される二酸化炭素量より土壌を通して地表に拡散放出される二酸化炭素の割合が多くなっていると推定される。

4. まとめ

阿蘇中岳火口から放出される火山ガス中の CO_2/SO_2 比と火口からの二酸化硫黄放出量、および火口周辺土壌からの二酸化炭素拡散放出量を測定し、阿蘇中岳全体から放出される二酸化炭素量を見積もった。

2004~2005年の冬季において阿蘇中岳火口から放出されている二酸化硫黄は $460 \pm 73 \text{ ton d}^{-1}$ であり、火山ガス中の CO_2/SO_2 比は 1.89 であった。また、火口周辺の土壌から拡散放出されている二酸化炭素量は 0.12 ton d^{-1} と測定された。

これらの観測結果から中岳第一火口から放出されている二酸化炭素量は $597 \pm 95 \text{ ton d}^{-1}$ と見積もられ、阿蘇山では火口からの二酸化炭素放出が、周辺土壌からの拡散放出より圧倒的に卓越していることが明らかとなった。一方、草津白根山では土壌から拡散放出される二酸化炭素量は、火口 (噴気孔) から放出される二酸化炭素量に匹敵している。これは地下深部からの中央火口へのガス放出効率、火口周辺部土壌からの火山ガス流路の発達に関係しているものと推測され、現在の阿蘇山と草津白根山のマグマ供給量の違いを示唆していると言える。

謝 辞

本研究を行うにあたり、産業技術総合研究所地質調査総合センターの篠原宏志博士には火口から放出される火山ガスの成分分析観測に同行してデータを使用させていただくとともに、数多くの有益なご助言をいただいた。同所地質情報研究部門の森 健彦博士、京都

大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センターの須藤靖明助教授，吉川 慎氏には観測の実施にあたってご協力いただいた。「Carbon dioxide flux meter」は京都大学大学院理学研究地球熱学研究施設から借用した。また京都大学防災研究所の神田 径博士との議論は有意義であった。九州大学大学院理学研究院の金嶋 聰教授には原稿査読の際に有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝する。

なお，共著者の1名である松尾紉道氏は2006年9月2日に逝去された。同氏は20年あまりにわたりCOSPECを用いた二酸化硫黄の測定を日本各地の火山で実施しており，同氏の観測サポートなくして本研究をまとめあげることではできなかった。ここに哀悼の意を捧げる。

引用文献

- Chiodini, G., Frondini, F. and Raco, B. (1996) Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy). *Bull. Volcanol.*, **58**, 41-50.
- Chiodini, G. (1998) Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, **13**, 543-552.
- Gerlach, T. M., Doukas, M. P., McGee, K. A. and Kessler, R. (1998) Three-year decline of magmatic CO₂ emissions from soils of a Mammoth Mountain tree kill: Horseshoe Lake, CA, 1995-1997. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1947-1950.
- Hase, H., T. Hashimoto, S. Sakanakac, W. Kanda, and Y. Tanaka. (2005) Hydrothermal system beneath Aso volcano as inferred from self-potential mapping and resistivity structure. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **143**, 259-277.
- Hernandez, P. A., Perez, N. M., Salazar, J. M., Nakai, S., Notsu, K. and Wakita, H. (1998a) Diffuse emission of carbon dioxide, methane, and helium-3 from Teide volcano, Tenerife, Canary Islands. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3311-3314.
- Hernandez, P. A., Shimoike, Y., Mori, T. and Notsu, K. (1998b) Diffuse emission of CO₂ from Miyake-jima volcano, Japan. 日本火山学会1998年度秋季大会講演予稿集, 121.
- Hernandez, P. A., Notsu, K., Salazar, J. M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shimoike, Y., Sato, M. and Perez, N. M. (2001) Carbon Dioxide Degassing by Advective Flow from Usu Volcano, Japan. *SCIENCE*, **292**, 83-86.
- 鍵山恒臣 (1978) 火山からの噴気による熱エネルギーとH₂Oの放出量 - Plume riseからの推定. 火山, **23**, 183-197.
- Kaneshima, S., Kawakatsu, H., Matsubayashi, H., Sudo, Y., Tsutsui, T., Ohminato, T., Ito, H., Uhira, K., Yamasato, H., Oikawa, J., Takeo, M. and Iidaka, T. (1996) Mechanism of Phreatic Eruptions at Aso Volcano Inferred from Near-Field Broadband Seismic Observations. *SCIENCE*, **273**, 642-645.
- 桂 郁雄・川東慶子・Djedi S. Widarto・西村 進・茂木透・下泉政志・西田潤一・楠健一郎・鈴木浩一・藤光康宏・城森 明・山本哲也・山崎 明・田口陽介 (1996) 草津白根山でのCSMTでのTDEM探査. 第3回草津白根山の集中総合観測報告書, 61-72.
- 水橋正英 (2002) 草津白根山周辺に分布する温泉水の湧出機構. 東京工業大学卒業論文.
- 水橋正英 (2004) 揮発性物質放出量から推定される草津白根山の熱水系. 東京工業大学修士論文.
- 大喜多敏一・下鶴多輔 (1975) 火山ガスのリモートセンシング - 火山から放出されるSO₂の測定. 火山, **19**, 151-157.
- 齊藤政城 (2004) 草津白根山山頂域における土壌からの二酸化炭素拡散放出量. 東京工業大学卒業論文.
- 下池洋一 (1999) 伊豆大島火山の火山性流体の挙動. 月刊海洋/号外, **19**, 88-94.
- Shimoike, Y., Kazahaya, K. and Shinohara, H. (2002) Soil gas emission of volcanic CO₂ at Satsuma-Iwojima volcano, Japan. *Earth Planets Space*, **54**, 239-247.
- Shinohara, H. (2005) A new technique to estimate volcanic gas composition: plume measurements with a portable multi-sensor system. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **143**, 319-333.
- 鈴木 隆 (2002) 火山ガス放出量と放出圧力振動メカニズム. 東京工業大学修士論文.
- Takagi, N., Kaneshima, S., Kawakatsu, K., Yamamoto, M., Sudo, Y., Ohkura, T., Yoshikawa, S., and Mori, T. (2006) Apparent migration of tremor source synchronized with the change in the tremor amplitude observed at Aso Volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **154**, 181-200.
- 鶴川元雄・矢崎 忍・宮坂 聡 (1998) 火山専用空中赤外映像装置 (VAM-90A) による北海道駒ヶ岳・九重山・阿蘇山の山体表面温度観測. 防災科学研究所研究報告, **58**, 77-104.
- Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Kaneshima, S., Mori, T., Tsutsui, T., Sudo, Y., and Morita, Y. (1999) Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3677-3680.