

市販のガス警報器を用いた SO₂/H₂S 比の観測

Observation of the SO₂/H₂S concentration ratio using portable gas monitors

関 香織¹, 岩本征大², 森 健彦¹, 西 正儀³, 井上秀穂³

Kaori SEKI¹, Yukihiko IWAMOTO², Takehiko MORI¹, Masanori NISHI³ and Hideho INOUE³

(Received March 12, 2025; Accepted October 1, 2025)

1 はじめに

火山ガスの化学組成は、マグマの化学組成や脱ガス条件によって変化することから、噴火前の前駆現象および活動推移の評価に用いられてきた。特に火山ガスに豊富に含まれる二酸化硫黄 (SO₂) と硫化水素 (H₂S) の濃度比 (以下、SO₂/H₂S 比) は、たとえ小規模な水蒸気噴火であっても変動が観測されることがある (例えば、Ossaka et al., 1980; Ohba et al., 2021)。

ある化学組成のマグマから脱ガスする SO₂/H₂S 比は、温度、圧力、酸素フガシィ等に依存する (例えば、Battaglia et al., 2019; Burgisser & Scaillet, 2007)。一般的に、脱ガス圧力の低下または温度の上昇により SO₂/H₂S 比は増加するため、火山活動が活発化すると SO₂/H₂S 比は増加する傾向にある。一方で、SO₂/H₂S 比の変動はマグマの脱ガス条件だけに限らない (例えば、篠原, 2019)。例えば、SO₂ + 3H₂ = H₂S + 2H₂O の反応は、温度が上昇すると反応が左方向に進み、SO₂/H₂S 比の変動の要因になりうる。また、地下水や熱水への SO₂ の吸収、自然硫黄の加水分解、SO₂ の不均化反応、噴気孔周辺における単体硫黄の析出など、硫黄化学種のあらゆる化学反応により、SO₂/H₂S 比は変化する。特に、地下に熱水系が発達した火山における SO₂/H₂S 比の変動要因の特定は難しく、他の観測データと組み合わせ、どのような火山活動に起因して SO₂/H₂S 比が変化したのか、慎重に行う必要がある。

SO₂/H₂S 比の観測において、実験室にサンプルを持ち帰ることなく、現地で濃度を測定するには、ガス検

知管を用いる方法 (菅原ほか, 2023) や多成分火山ガス観測システム (気象庁地震火山部火山課, 2022) などがある。この両者の手法にはそれぞれ課題があり、前者は、噴気を冷却し水蒸気を取り除いた火山ガスを検知管に導入し測定を行うため、凝縮した水に硫黄が析出し、正しい SO₂/H₂S 比は測定できない。また、SO₂ の測定範囲は 0.05~10.0 ppm, 目盛範囲は 0.2~5.0 ppm で、熱水系が発達した火山では SO₂ 濃度が低いため、検出が困難である場合が多く、分解能も高くない。後者は機器の取り扱いが煩雑で、メンテナンスや校正に高コストと長時間を要するという課題がある。

これまでの SO₂/H₂S 比観測の課題を解決するため、以下の 2 つの項目

- ① 安価で小型
- ② 校正および観測に専門技術を必要としない

の条件を満たす市販のガス警報器に着目した。ガス警報器は、現場作業員の安全を守るため、携帯しやすく、また防災・保安上の信頼性のため販売会社が定期点検を請け負っている場合がある。ガス警報器を用いた SO₂ および H₂S ガス濃度の測定は、本来の用途ではないため、精度のよいデータは望めないが、火山活動による SO₂/H₂S 比の時系列の変化を検出できれば、より多くの火山で SO₂/H₂S 比を用いた火山活動評価を行える可能性がある。

¹気象研究所火山研究部, Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

²福岡管区気象台気象防災部地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Disaster Mitigation Department, Fukuoka Regional Headquarters.

³福岡管区気象台気象防災部地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Disaster Mitigation Department, Fukuoka Regional Headquarters

そこで、本報文では、阿蘇山の現地調査時に職員が携帯した最大濃度値のみを保存するガス警報器のデータを整理し、そこから得られた $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比と火山活動とを比較検討し、ガス警報器による $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の観測が、火山活動の評価において有意となるか精査を行った。また、いくつかの火山において、一定の時間間隔で複数の化学種の濃度をデータロガーに記録できるガス警報器を用いて試験観測を行い、噴気地帯ごとの $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の算出を試みることで、市販のガス警報器を用いた観測の有用な使い方について検討を行った。

2 阿蘇山の火山活動とガス警報器による火山ガス成分比

2.1 中岳第1火口の火口縁における SO_2 および H_2S の濃度計測

福岡管区気象台では、阿蘇山の中岳第1火口の熱領域の拡がり、湯だまり量やその温度の変化について、中岳第1火口の火口縁にて1980年代より現地観測を行ってきた(図1および図2)。現地観測定点では、中岳第1火口から放出される高濃度の火山ガスが漂っているため、職員の安全対策として防毒マスクおよびガス警報器が携帯されている。2015年から使用しているガス警報器はイチネン製作所製のガスバスターライト(以下、ガス警報器Aと記す)であり、現地観測の際は二酸化硫黄(SO_2)と硫化水素(H_2S)が計測できる2機体を携帯している(図3)。ガス警報器Aは、 SO_2 および H_2S 共に0~100ppmの測定レンジを有し、分解能は1ppmである(表1)。ガス警報器Aは1年に1度イチネン製作所が校正・点検を行い、作業時は火山ガスが飛散していない地点で起動し、0ppmであることを確認している。このガス警報器Aには作業員が曝露したガスの最大濃度値を保存する機能が備わっており、機動観測報告には現地観測の際に記録された各濃度の最大値が記載されている。この報告に残っていた SO_2 および H_2S の最大濃度値を取り纏め、その最大濃度値を基に $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を算出した(Appendix A1)。なお、中岳第1火口周辺では、中岳第1火口南側火口壁、南西側火口壁の噴気孔群および中岳第1火口中央(湯だまり)を起源とする火山ガスが発生しているが、測定 성격上、最大濃度値を記録したガスの起源を辿ることは不可能である。そのため、 SO_2 および H_2S の最大値は、同時刻かつ同じガスの起源のもの

とは限らないが、観測作業を行った1時間程度で曝露した中岳第1火口全体の噴気の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比とみなして議論を行った。

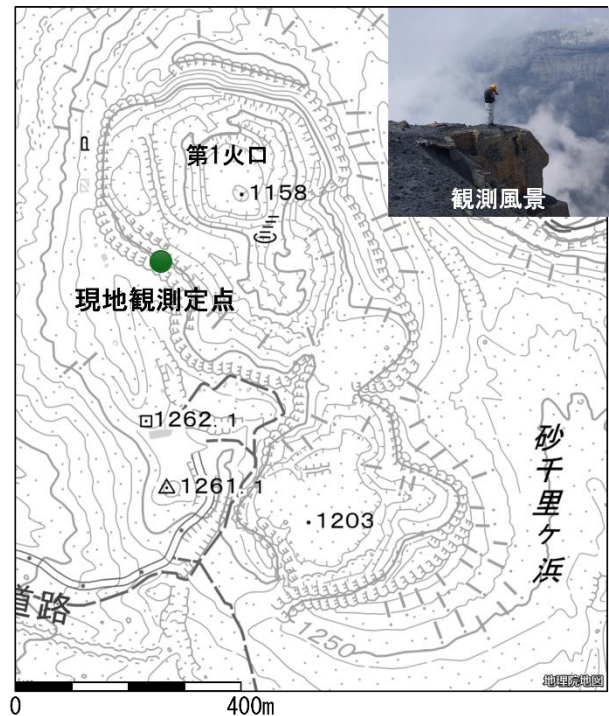


図1 中岳第1火口(阿蘇山)の火口縁の現地観測定点および観測風景。電子国土基本図(国土地理院)を加工して作成した。



図2 現地観測定点から撮影した中岳第1火口。南西側火口壁は写真手前に隠れている。



図3 使用したガス警報器Aの外観。

2.2 阿蘇山の火山活動とその推移

阿蘇山においては、1928年に京都大学火山研究施設が、1931年には熊本測候所支所阿蘇火山観測所が設置され、火山における近代観測が始まった。以降の観測によって、中岳の火山活動は、中岳第1火口内に湯がたまる静穏な活動状態から、火山活動の活発化に伴い湯量が減少し、湯と土砂が爆発的に噴出する土砂噴出を経て、マグマ本質物質、即ち火山灰や噴石などを飛散させる噴火形態へと移行する一連のサイクルで経過することが明らかになった（例えば、吉川・須藤，2004）。長期にわたる水準測量の結果からは、中岳火口より西方に3~4 km離れた草千里南部の深さ約6 km付近にマグマ溜りの存在が明らかにされ（須藤・他，2006）、広帯域地震計の観測からは、マグマ溜りと中岳火口列に沿う山体下に、long period tremors（LPTs：長周期微動）の振動源となるクラックの存在が示唆されている（Yamamoto et al., 1999）。また、孤立型微動

（hybrid tremors）と呼ばれる振動現象は、クラックと中岳第1火口底を結ぶ浅部火道での流動現象を要因としていることが短周期地震計の高密度観測によって明らかにされた（Mori et al., 2008）。このように、阿蘇山におけるマグマ供給系モデルは、近年の観測研究により解明が進んでいる。

2014年1月の火山灰噴出を伴った噴火が発生する

表 1 使用したガス警報器 A の仕様.

	SO ₂	H ₂ S
品名/型式	GBL-SD	GBL-HS
外形寸法	W50.5×H104.5×D30 mm	
質量	91 g	
電池電圧	電圧 3V CR2	
連続使用時間	8800 時間	
保証レンジ	0~100 ppm	0~100 ppm
分解能	1 ppm	1 ppm

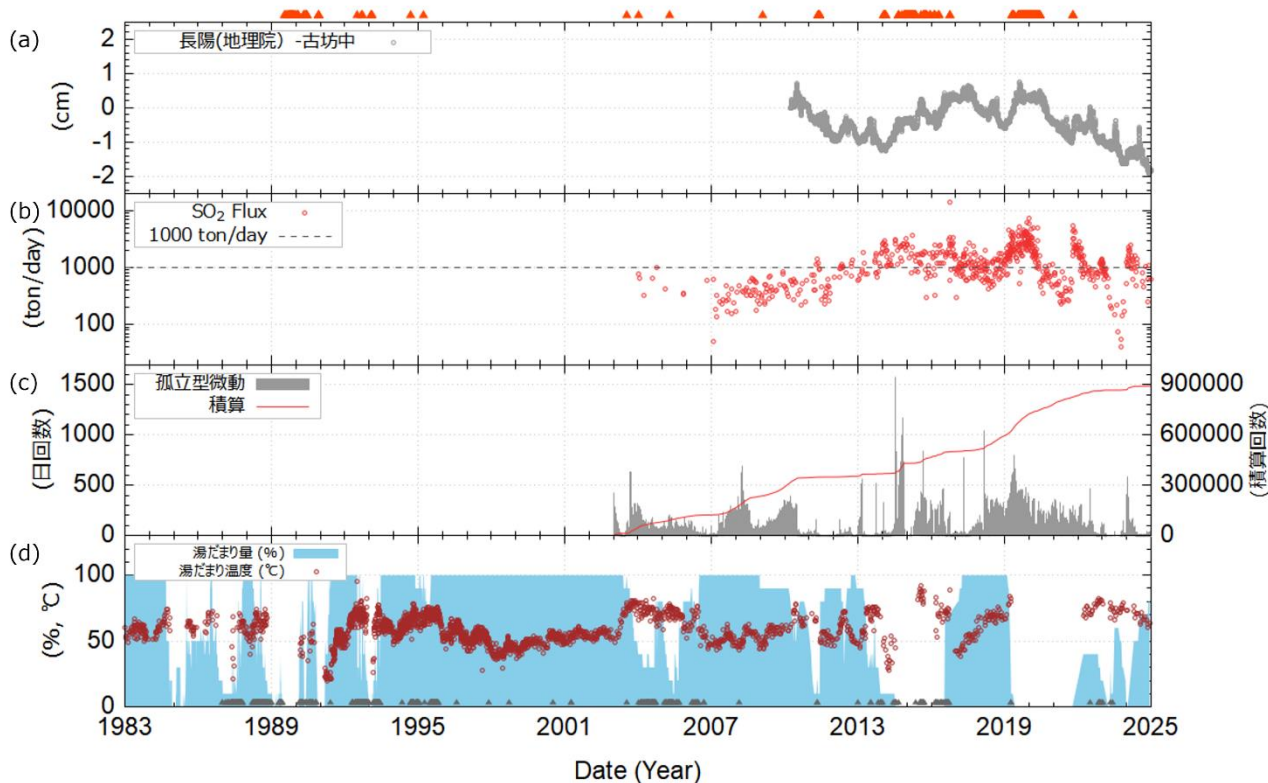


図 4 1983年から2024年までの阿蘇山の火山活動経過

(a) 赤色三角は噴火の発生日。灰色線は2010年から2024年までの長陽（国土地理院）および古坊中の中におけるGNSS連続観測による基線長変化。(b) 2003年から2024年までの二酸化硫黄放出率。(c) 2003年から2024年までの孤立型微動の日回数および積算回数。(d) 1983年から2024年までの湯だまりの割合および温度。灰色三角は土砂噴出の発生日。

以前、1988年から1995年にかけてのおよそ7年の噴火活動が、マグマ本質物質を噴出する活動期であった（池辺・他、2008）。この活動の後、中岳第1火口には湯だまりが形成され、中岳第1火口内に留まる極小規模な土砂噴出が発生したものの、静穏な火山活動の状態が2003年まで続いた。2003年以降、湯だまりの減少や火口底の赤熱、浅部火道の流動現象を発生要因とする孤立型微動の発生回数が増加傾向になるなど、徐々に火山活動の高まりが観測されるようになってきた（図4）。2014年1月の噴火発生後、草千里付近

のマグマだまりの膨張を示すと考えられるGNSS連続観測による基線長の伸びが明瞭になり、二酸化硫黄放出率も1,000 ton/dayを超えて推移するなど、マグマ活動の活発化が明瞭になってきた。2014年11月からの降灰を伴う噴火は2015年5月まで続き、その降灰量は約210万トンと見積もられている（Miyabuchi and Hara, 2019）。同年9月14日には、小規模な火砕流を伴う噴火が発生し、噴火警戒レベルが阿蘇山で初となる3へ引き上げられた。二酸化硫黄放出率は2017年中頃まで、1,000~3,000 ton/day程度で推移しており、

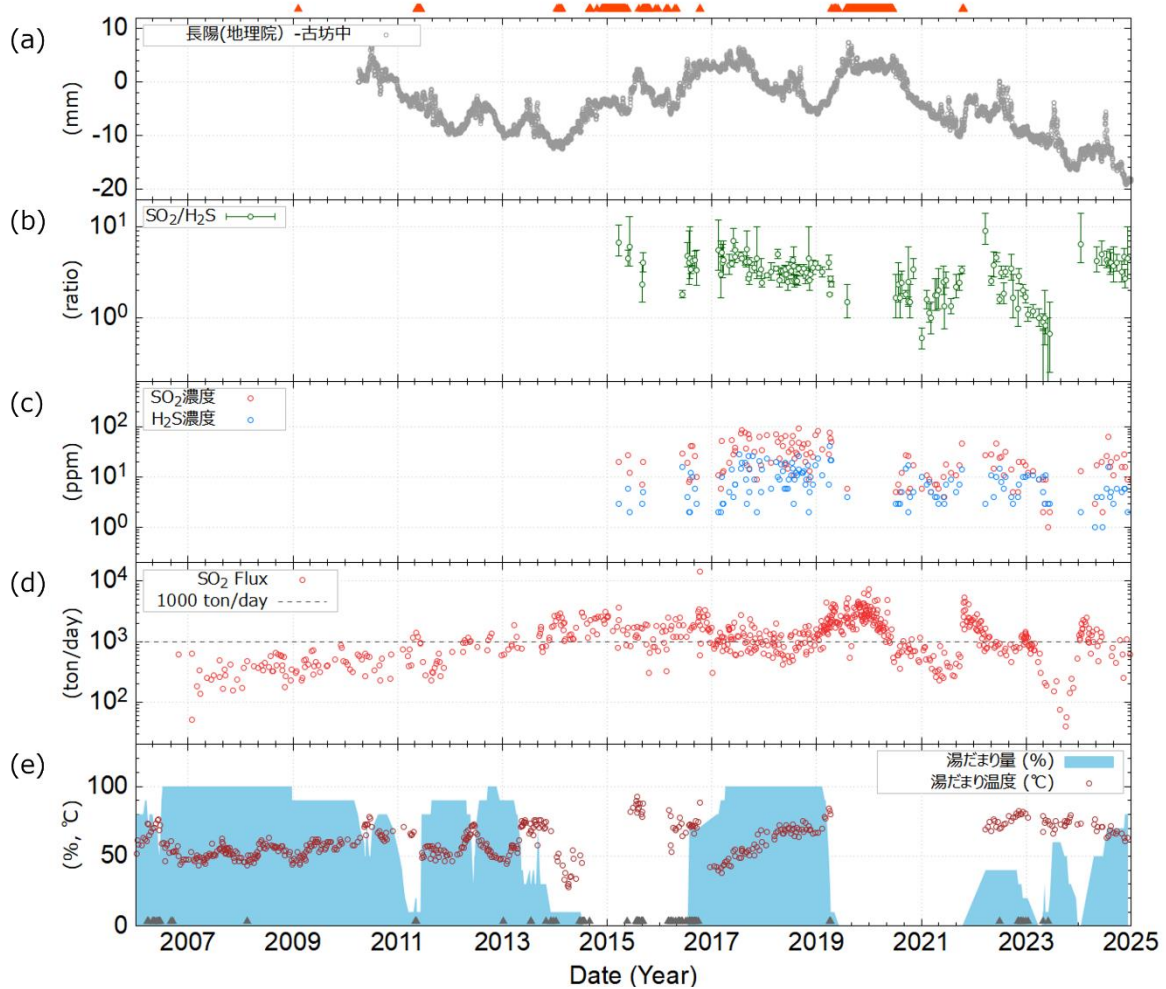


図5 2006年から2024年までの阿蘇山のSO₂/H₂S比と火山活動経過

(a) 赤色三角は噴火の発生日。灰色線は2010年から2024年までの長陽（国土地理院）および古坊中におけるGNSS連続観測による基線長変化。(b) 2015年から2024年までのSO₂/H₂S比。エラーバーはSO₂およびH₂Sそれぞれに分解能と同値である±1 ppmを与えたときのSO₂/H₂S比のとりうる範囲。(c) 2015年から2024年までのSO₂およびH₂Sの最大濃度。(d) 2007年から2024年までの二酸化硫黄放出率。(e) 2006年から2024年までの湯だまりの割合および温度。灰色三角は土砂噴出の発生日。

2016年10月8日の噴煙高度 11,000 m を観測した爆発的噴火の前日には 15,000 ton/day と観測以来最大の値を記録するなど、多い状態で推移している。同時期の GNSS 連続観測による基線長変化についても、伸びもしくは停滞となっており、マグマ溜りにおいて、脱ガスされたマグマ量と新たに供給されるマグマ量がほぼ一定もしくは供給過多になっている際に、二酸化硫黄放出率が増加することを示している(図 4)。その後、2019年4月から翌年5月まで続いた火山灰放出を主体とする噴火活動、2021年10月の小規模な火砕流を伴う噴火発生があり、それらの活動に伴って一時的な二酸化硫黄放出率の増加、新たなマグマ供給を示唆する基線長の伸びが観測されている。2021年以後、2024年末まで噴火は発生しておらず、2014年から始まった噴火活動は前回の活動と同様に、概ね7年で活動が終息したように見える。

2.3 SO₂ および H₂S の濃度変化と火山活動との関係

中岳第1火口の火口縁における現地調査は、安全確保の観点から実施できない日もあるものの、SO₂ および H₂S の最大濃度については2015年3月以降に記録が残っている。この期間は、阿蘇山の2014年から2021年までの噴火活動期における活動初期から終息までの期間を含んでおり、この活動期におけるマグマ活動の変化を、SO₂ および H₂S の濃度変化が捉えていると考えられる。

観測された SO₂ 濃度は 0~100 ppm、H₂S 濃度は 1~42 ppm の範囲であった。SO₂ 濃度が 1 ppm 以上の観測日における SO₂/H₂S 比の最小値は 0.33(SO₂ が 1 ppm、H₂S が 3 ppm)、最大値は 9.00(SO₂ が 27 ppm、H₂S が 3 ppm) であった。

SO₂/H₂S 比は 2017 年頃まで、比較的安定した高い値であったが、2019 年 4 月頃にかけてゆるやかに低下した。二酸化硫黄放出率は、2019 年 2 月頃からやや多い状態となり、加えて火山性微動の振幅が増大したことから、3 月 12 日に噴火警戒レベルは 2 に引き上げられた。その後、2019 年 4 月 16 日に中岳第 1 火口で噴火が発生したが、この噴火に先立つ顕著な SO₂/H₂S 比の変化は観測されていない。この期間における中岳第 1 火口底の湯だまりの割合は、2019 年 2 月から減少を始め、2 月に 9 割であったのが 4 月上旬に 1 割まで減少した(図 5)。2019 年 5 月 3 日から 5 日に噴出した火山灰からは、ごく少量の新鮮なガラス片が認められ、

新しいマグマの供給があったと推定された(宮縁ほか、2021)。Multi-GAS(例えば Shinohara, 2005)を用いて SO₂/H₂S 比を測定した結果では、2019 年 8 月から 11 月においても SO₂/H₂S 比は減少しており(産業技術総合研究所・京都大学火山研究センター、2020)、SO₂/H₂S 比の減少の傾向は続いていた。

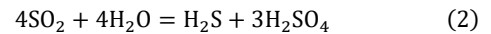
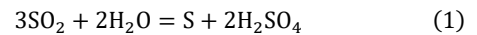
2020 年以後は、二酸化硫黄放出率の変化と連動した変化を示し、2019 年以前の安定した高い値とは異なり、時間変化が大きい。2020 年以後 GNSS 連続観測による基線長変化においても、2020 年以後は縮みが続き、マグマ供給の低下を示唆していたが、2021 年 10 月 13 日、火山性微動の振幅が増大したため、噴火警戒レベルは 2 に引き上げられ、翌 14 日と 15 日には 2020 年 6 月以来となる小規模な噴火が発生している。20 日の噴火では火砕流が 1km を超え、噴火警戒レベルは 3 に引き上げられた。この一連の噴火の直前、2021 年 9 月 29 日に行われた観測では、二酸化硫黄放出率は 600 ton/day と比較的低い値に留まっていた。SO₂/H₂S 比に関しては、2021 年の 6 月頃から僅かな増加傾向が見られる中で、10 月 7 日には 3.36 と 3 を超えた。これは、マグマの関与が高まりつつある可能性を示唆している。一方で、2019 年 5 月以降、湯だまりのない状態であったが、2021 年 8 月下旬から 10 月中旬にかけて湯だまりが形成されるなど、浅部熱水活動に変化がみられていた。10 月 14 日の噴火の火山灰に含まれていたガラス片は、大部分が熱水変質しており、2019~2020 年の噴火活動とは異なり、硫黄に富む流体が水蒸気噴火を引き起こしたと推定されている(宮縁ほか、2022)。

2.4 議論

阿蘇山における SO₂/H₂S 比は、2020 年以前におけるマグマ活動が高い期間(マグマ活動期と呼ぶ)は、時間変動が小さく、高い値を保持しているのに対し、マグマ供給が低下した 2020 年以降の期間(熱水系卓越期と呼ぶ)では、SO₂/H₂S 比が大きく変動するのが特徴である。

マグマ活動期においては、緩やかに SO₂/H₂S 比が低下していたが、これはマグマ活動の収束にむかって、火山ガスの SO₂/H₂S 比そのものが低くなった可能性がある。

一方で、基線長の縮みが観測され、マグマ供給が低下した熱水卓越期における $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の大きな時間変化は、地下に発達した熱水系と火山ガスの相互作用が大きくなり、その結果もたらされた $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変化を火口縁で観測している可能性がある。この期間の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変動は、 H_2S 濃度の変化に対し、 SO_2 濃度の変化が大きいため、 SO_2 濃度はマグマ活発期よりも低い値が観測されている。例えば、 SO_2 は水に吸収されやすく、また水との間には、以下の不均化反応が起きる。



この反応により、火山ガス中の SO_2 は消費される。先に述べたように、この期間中に発生した 2021 年 10 月 14 日の噴火は、熱水変質鉱物が噴出し、噴火には熱水の関与が示唆されている。マグマの供給が低下したこの期間は、上昇してきた火山ガスと熱水系の接触が多いため、脱ガスした際の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が保持されず、時間変動が大きくなったと考えられる。

マグマ活動期から熱水系卓越期への変化に伴う $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の特徴を明確にするため、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を対数変換し、それぞれの期間でグループ分けを行い、箱ひげ図を作成した (図 6 および表 2)。中央値を比較すると、マグマ活動期では $\log_{10}(\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比) が 0.55 であり、熱水系卓越期の 0.32 に比べて高い。また、分散に関しては、マグマ活動期が 0.13 であるのに対し、熱水系卓越期では 0.28 と大きく、後者は $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比のパラつきが顕著である。両期間の最大値に大きな差は見られないことから、熱水系卓越期において火山活動が活発化した際には、マグマ活動期と同程度の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を示すことが確認された。

以上より、ガス警報器 A で得られた曝露した各成分の最大濃度値のみのデータであっても、火山活動が反映された $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変動を、阿蘇山では捉えられている可能性が示唆された。

3 マルチガス検知器による観測

3.1 マルチガス検知器について

中岳第 1 火口の火口縁では、ガス警報器 A による曝露した各成分の最大濃度値のみでも火山活動を反映

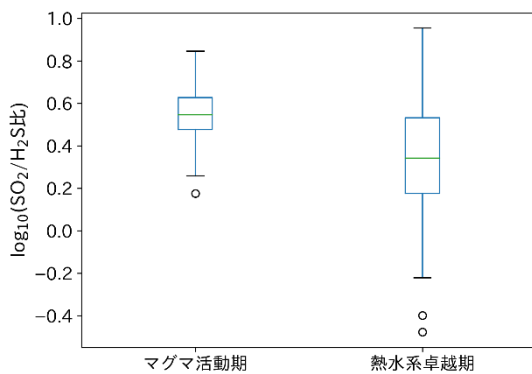


図 6 マグマ活動期 (2020 年以前) と熱水系卓越期 (2020 年以降) に中岳第 1 火口で観測された $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の箱ひげ図。ボックスの中央線は中央値、ボックスは四分位範囲を示し、ひげは外れ値 (丸印) を除いた最小・最大の範囲を表す。

表 2 マグマ活動期 (2020 年以前) と熱水系卓越期 (2020 年以降) に中岳第 1 火口で観測された $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の箱ひげ図の結果。表中の値は $\log_{10}(\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比) で示されている。

	マグマ活動期	熱水系卓越期
データ数	76	61
中央値	0.55	0.32
分散	0.13	0.28
最小値	0.18	-0.48
25%	0.48	0.18
50%	0.54	0.34
75%	0.63	0.53
最大値	0.84	0.95

表 3 使用したマルチガス検知器の仕様。

	SO_2	H_2S
検知方式	ポンプ吸引式 (0.45 L/min)	
外形寸法	W70×H201×D54 mm	
質量	500 g	
電池電圧	専用リチウム電池ユニット	
連続使用時間	約 14 時間	
保証レンジ	0~99.90 ppm	0~30 ppm
分解能	0.05 ppm	0.1 ppm

した $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変動が捉えられていた。しかし、ガス警報器 A では最大濃度値を記録したガスの起源を辿ることは不可能であるという課題がある。この結果を踏まえ、単機で複数成分の測定を、一定の時間間隔で記録可能である理研計器社製のポータブルマルチガスモニターGX-6000（以下、ガス警報器 B）を用いて、様々な $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が期待される複数の火山において試験観測を実施した。使用したガス警報器 B は、最大 5 秒ごとの間隔で複数の化学種の濃度をデータロガーに記録でき、観測終了後に時系列データから $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を算出することができる。これにより、ガス警報器 A では困難であった同時刻かつ同じガスでの $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の計測が実現される。ガス警報器 B の外観および仕様を図 7 および表 3 に示す。ガス警報器 B は、阿蘇山で使用したガス警報器 A と比較すると分解能も高い。

3.2 採取地点および取得データ

マルチガス検知器を用いた噴気の試験観測は、九重山（大分県玖珠郡九重町）、地獄温泉（熊本県阿蘇郡南阿蘇村）、弥陀ヶ原（富山県中新川郡立山町）の 3 地点で行った（図 8 および表 4）。ガス警報器 B を噴気孔そばに静置または手に持ち噴気孔に近づけたり遠ざけたりを繰り返した（図 9）。解析に使用したデータ数は観測地点によってばらつき、66 個から 298 個である。測定間隔が 5 秒であるので、325 秒から 1485 秒間の観測データを解析に使用した。



図 7 使用したガス警報器 B の外観。

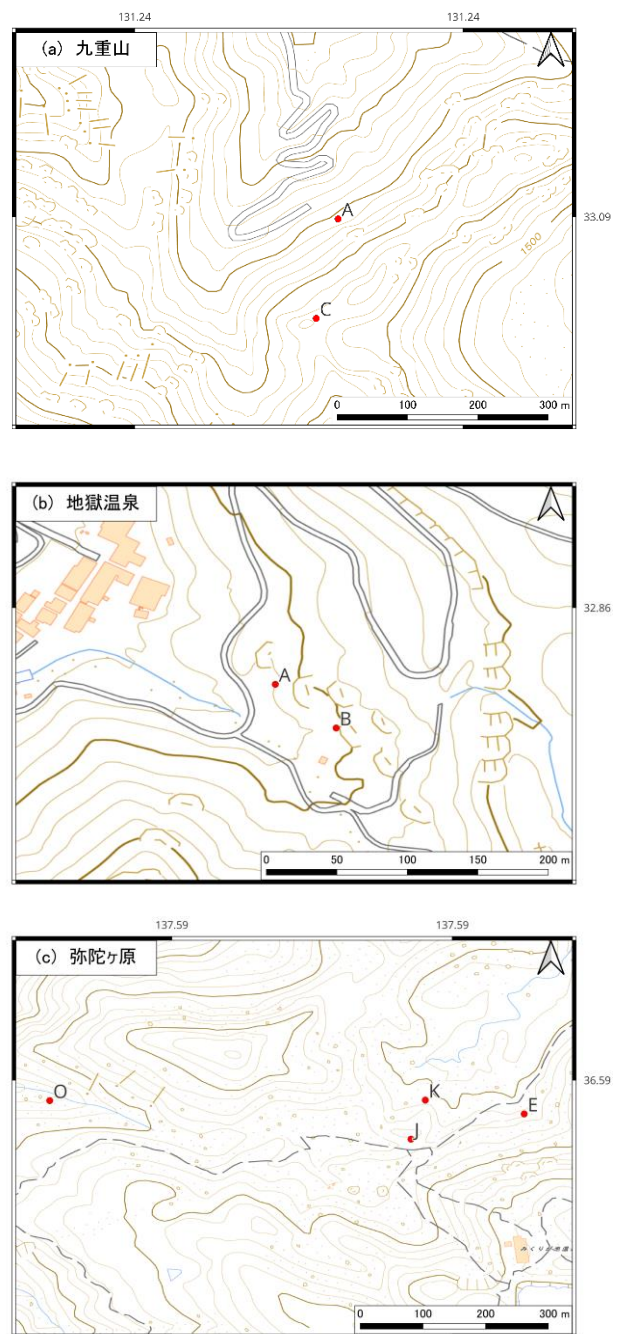


図 8 ガス警報器 B を用いた試験観測の位置図。電子国土基本図（国土地理院）を加工して作成した。

九重山では 2024 年 6 月 12 日に噴気 A および C で観測を実施し（図 8a）、噴気 A の時系列データを例として図 10a に示した。噴気の温度は水の沸点程度であった（表 4）。 H_2S と SO_2 の時系列変化を比べると、 H_2S の方が濃度ピークが明瞭であった。噴気 C では、硫化水素が常に検知された。これは周囲に多くの噴気孔が存在し、火山ガスが常に漂っていたことに起因す



図 9 ガス警報器 B による観測. 観測地点は九重山噴気 A の様子.

る.

地獄温泉では 2024 年 6 月 13 日に噴気 A および B で観測を実施し (図 8b), 噴気 B の時系列データを例として図 10b に示した. 地獄温泉は測定時間が長く (表 4), 多くのピークを捉えることができた. 噴気中の SO_2 濃度が低いため, SO_2 が検出されるデータは H_2S の濃度が測定範囲の 30 ppm を超えてしまい, 両者のピークを同時に捉えることが困難であった.

弥陀ヶ原では, 雷鳥荘そばの斜面から噴出する閻魔地獄 (E), 硫黄のチムニーから噴出する鍛冶屋地獄 (J), 紺屋地獄のそばに存在する噴気 (K), ソーメン滝方面に存在する大安地獄 (O) の 4 点で観測を行い (図 8c), 噴気 O の時系列データとして図 10c に示した. E の観測地点は, 複数の噴気孔から多量の噴気が噴出し, SO_2 濃度は最大で 14.2 ppm であった (表 4). O の噴気の

勢いは弱かったが, SO_2 濃度は最大で 2.25 ppm であった. 中岳第 1 火口の観測で使用したガス警報器 A と同機種を用いて, O の噴気で SO_2 濃度の観測を行ったところ, 3 ppm とガス警報器 B と同程度の値となった. 弥陀ヶ原はいずれの噴気においても, 観測時間が短いためデータ数が少なく, 捉えたピークの数は少ない.

3.3 ガス警報器 B を用いた $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の算出方法および結果

得られた時系列データについて, 2 つの課題が明らかとなった.

- ① H_2S の検出濃度の最大値 30ppm を頻繁に超える.
- ② SO_2 のピークは H_2S に比べ遅れるため, ピークの位置や数がずれる.

この課題を解決するため, ①の欠損値を補間したのち, 平滑化処理を行うこととした. 欠損値の区間には, 必ず検出範囲を超えた H_2S 濃度のピーク (30 ppm 以上) が存在していることから, 線形補間ではなく多項式による補間が適切と考え, 区間ごとに異なる曲線で補間することができる 3 次のスプライン補間を利用した. さらに, ②にあげた SO_2 と H_2S のピークを一致させるため, 欠損値を補間した時系列データに対し平滑化処理を行った. 平滑化処理には, Savitzky-Golay 法 (Savitzky and Golay, 1964) を利用した. Savitzky-Golay 法は重み付き移動平均の一種で, ピーク情報を保持し

表 4 ガス警報器 B による観測データ. 解析に使用したデータにおける SO_2 および H_2S の最大濃度を示した. n.m. は測定していないことを示す.

場所	噴気	日付	温度 (°C)	データ数 (個)	H_2S (ppm)	SO_2 (ppm)
九重山	A	2024/6/12	94.3	247	> 30.0	0.30
	C	2024/6/12	95.6	188	> 30.0	0.25
地獄温泉	A	2024/6/13	95.1	298	> 30.0	0.25
	B	2024/6/13	95.7	287	> 30.0	0.35
弥陀ヶ原	E	2024/10/10	n.m.	99	> 30.0	14.2
	J	2024/10/10	117.7	66	> 30.0	1.45
	K	2024/10/10	93	196	> 30.0	0.35
	O	2024/10/10	n.m.	79	> 30.0	2.25

やすいという特徴があげられる．一方で，適切な窓枠をあらかじめ指定する必要がある．そこでいくつかの窓枠について試行した．

欠損値を補間し，平滑化された時系列データから， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の算出は以下のように行った．

- ① 補間した時刻のデータおよび SO_2 濃度が 0 ppm の時刻のデータは棄却する．
- ② 縦軸を SO_2 濃度，横軸を H_2S の濃度とし，散布図を作成する．散布図から最小二乗法を用いて近似曲線および決定係数を求める．近似曲線は， SO_2 濃度を C_{SO_2} ， H_2S 濃度を $C_{\text{H}_2\text{S}}$ ，傾きを α ，切片を β としたとき，以下のように書くことができる．

$$C_{\text{SO}_2} = \alpha C_{\text{H}_2\text{S}} + \beta \quad (3)$$

この近似曲線における傾き α をある窓枠で平滑化処理した $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比とする．

- ③ 決定係数を参考に，適切な窓枠を選び，最終的な $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比とする．

以上の手法で，各火山で観測された SO_2 と H_2S の濃度値を用いて， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の算出を行った．

九重山では，窓枠を 25 とし，噴気 A の決定係数は 0.580， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 0.011，噴気 C の決定係数は 0.777， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 0.011 となった．菅原ほか (2023) でのガス検知管による $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は，2020 年 3 月 17 日の噴気 A は 0.0001 であった．今回得られた結果は，ガス検知管よりも $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が大きい．

地獄温泉の噴気 A については，いずれの窓枠を選んでも，決定係数が 0.1 以下となり， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を得ることができなかった．一方，噴気 B については窓枠数を 35 としたとき，決定係数が 0.432， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が 0.007 となったが，決定係数が 0.5 以下のため信頼性は低い．

弥陀ヶ原では，全ての観測地点において窓枠を 5 とした．噴気 E では決定係数が 0.677， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 0.169 であった．2016 年から 2019 年における閻魔地獄の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 0.25~0.52 (Seki et al., 2019; Seki, 2019) であり，近い値が得られた．噴気 J では，決定係数が 0.700， $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が 0.037 であった．同じ噴気孔における 2016 年から 2019 年の $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比は 0.05 から 0.06 であるため (Seki et al., 2019; Seki, 2019)，決定係数も高く良好な結果を得た．噴気 K では，決定係数が 0.374，

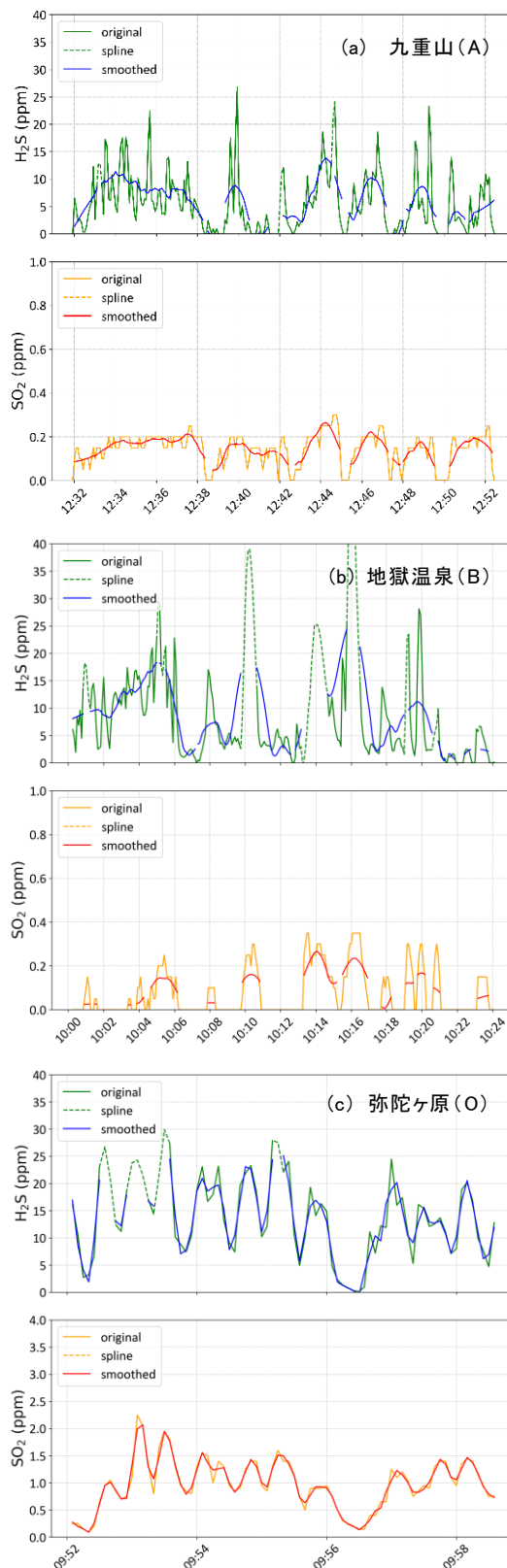


図 10 ガス警報器 B により観測された H_2S (上段) および SO_2 (下段) の時系列データ．観測されたデータは original，スプライン補完したデータは spline，平滑化したデータは smoothed．

SO₂/H₂S 比が 0.010 であった。同じ噴気孔で測定された 2018 年および 2019 年の SO₂/H₂S 比は 0.01 および 0.06 であり (Seki, 2019), 決定係数が低く相関は小さいものの, 先行研究と概ね一致した結果を得た。噴気

O については, 決定係数は 0.542, SO₂/H₂S 比は 0.047 であった。同じ噴気孔で 2018 年および 2019 年で測定された値では 0.10 であり (Seki, 2019), 先行研究と比

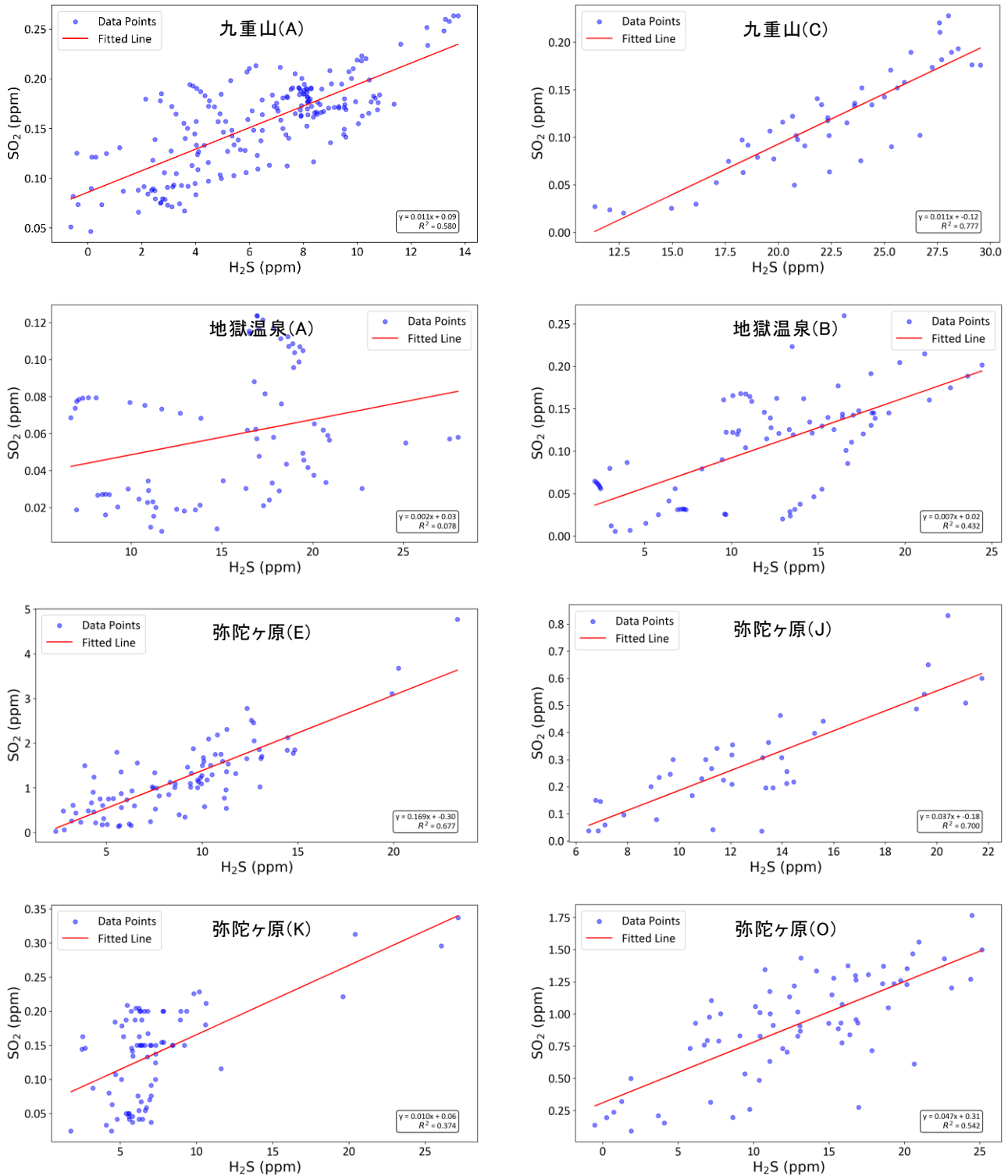


図 11 ガス警報器 B で観測されたデータの解析結果.

べやや低い値となったが、先行研究時に比べ噴気の勢いは弱く、見た目の噴気活動は明らかに低下していた。

3.4 議論

噴気中の SO₂ 濃度が低い場合は、観測時間を多くとっても SO₂ 濃度が 0 ppm を超えず、また H₂S 濃度が測定範囲の 30 ppm を超える量の噴気を吸引する必要があるため、解析できるデータ数が少なくなった。九重山および地獄温泉では、ガス警報器 B と同時にガス検知管を用いたが、九重山の噴気 C、地獄温泉の噴気 A および B ともに SO₂ は検出されなかった。ガス検知管による SO₂/H₂S 比の測定は、直接サンプリングし化学成分を測定した場合でも乖離が大きい。それは、先に述べたように、噴気を冷却し水蒸気をトラップしているため、凝縮した水に硫黄が析出し、正しい SO₂/H₂S 比が測定できないためである。弥陀ヶ原の結果に着目すると、先行研究の SO₂/H₂S 比の大小関係は E>O>J>K で、本研究でも同様の結果であり、直接サンプリングし化学成分を測定した先行研究の結果と比較すると大きな差は見られない。九重山や地獄温泉における検知管の結果とガス警報器 B の SO₂/H₂S 比の差は、ガス警報器 B の問題だけでなく、検知管の測定の不正確さによるもの大きいと考えられる。

また、SO₂/H₂S 比の高い順に、観測された SO₂ の最大濃度が大きくなった。九重山および地獄温泉で観測された SO₂ 濃度の最大値は、いずれの噴気孔でも同程度 (0.25~0.35 ppm) だが、九重山は決定係数が 0.5 を超え、一方で地獄温泉の決定係数は低くなった。今回使用したガス警報器 B は、噴気中に SO₂ をほとんど含まず SO₂/H₂S 比が 0.01 以下の場合の信頼性は低くなった。一方で弥陀ヶ原の噴気 E のように SO₂ を 10 ppm 以上含んだ噴気は、観測時間が短くデータ数が少なくても、決定係数が大きくなった。

以上より、ガス警報器 B による、時系列データの分析から SO₂/H₂S 比の計算を行ったところ、決定係数が 0.5 以上の SO₂/H₂S 比の範囲は、0.010~0.169 であり、17 倍程度の差を検知することができ、先行研究と概ね一致する結果を得た。また、阿蘇山で使用したガス警報器 A と異なり、同時刻のそれぞれの濃度を用いて計算を行っているため、より正確な SO₂/H₂S 比を推定することができた。

表 5 ガス警報器 B による SO₂/H₂S 比の結果。n.d.は SO₂ が検出されず SO₂/H₂S 比が計算できない場合または先行研究例がない場合を示す。※1 は菅原ほか (2023)、※2 は Seki et al. (2019)、※3 は Seki (2019) からそれぞれ引用した。

位置	噴気	決定係数	SO ₂ /H ₂ S 比	先行研究
九重山	A	0.580	0.011	0.0001 ^{※1}
窓枠：25	C	0.777	0.011	n.d.
地獄温泉	A	0.078	0.002	n.d.
窓枠：35	B	0.432	0.007	n.d.
弥陀ヶ原	E	0.677	0.169	0.25~0.52 ^{※2, 3}
	J	0.700	0.037	0.05~0.06 ^{※2, 3}
窓枠：5	K	0.374	0.010	0.01~0.06 ^{※3}
	O	0.542	0.047	0.10 ^{※3}

4 まとめ

中岳第 1 火口 (阿蘇山) において、市販されているガス警報器 A で測定されていた曝露した SO₂ および H₂S の最大濃度値をもとに、SO₂/H₂S 比をまとめた結果、火山活動の変化に起因した変動がみられた。そこで、5 秒ごとの記録が残り、ガス警報器 A よりも分解能が高い市販されているガス警報器 B で SO₂/H₂S 比の観測を行ったところ、九重山、地獄温泉、弥陀ヶ原において、有意な SO₂/H₂S 比を観測することができた。

噴火前に観測される SO₂/H₂S 比の変化は、例えば 2018 年 4 月 19 日の霧島硫黄山の水蒸気噴火では、2018 年 1 月 26 日では 0.02、噴火前の 2018 年 3 月 28 日では 0.97 で、噴火前後で約 50 倍程度増加した (Ohba et al., 2021)。アルゼンチンとチリの国境に位置するペテロア火山でも、熱水系卓越期間と噴火後のマグマ卓越期間での SO₂/H₂S 比は 100 倍程変動している (Agusut et al., 2023)。この変動範囲は、本研究で検出した SO₂/H₂S の変動範囲を超えていることから、市販されているガス警報器を利用しても、火山活動の変化を十分に捉えられるのではないかと考える。

今後の課題は、ガス警報器 B における適切なガスの吸引方法や統計処理について検討し、今回の試験観測を行った火山では観測されなかった SO₂/H₂S 比が 1 を超えるような噴気についても、同様の結果が得られるのかを確認する必要がある。また、ガス警報器 B の精度評価のために、多成分火山観測システムと同時に測

定し、得られた $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の値の妥当性について検討を進める。ただし、同じような手順で繰り返し測定を行えば、 $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が不正確であっても、中岳第1火口での観測のように長期的にデータが蓄積されれば、火山活動に起因すると考えられる $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の変動を検出することができるため、モニタリングとして有効であると考えられる。時間的な変化を捉えるためには、高頻度で $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比を観測することがまずは重要である。

謝辞

中岳第1火口における火山ガス成分の観測データは、福岡管区気象台の職員の皆様によって残されてきたデータを利用させて頂きました。マルチガス検知器による現地調査では、福岡管区気象台の諏訪祥士氏・塚本果織氏、富山地方気象台の齋藤直子氏・犬飼俊氏・下小瀬勇人氏、気象庁地震火山部の手操佳子氏・関晋氏・弘田瑛士氏にご協力を頂きました。地獄温泉の現地調査では、地獄温泉青風荘より立ち入りの許可を頂きました。本文中の地図の作成においては、国土地理院の電子国土基本図を利用させて頂きました。熊本地方気象台の篠原英一郎氏と議論の機会を頂き、本稿は改善されました。匿名査読者および編集委員の中村政道氏からのご意見により、本稿は改善されました。ここに記して感謝します。

文献

池辺伸一郎・渡辺一徳・宮縁育夫 (2008): 阿蘇火山中岳 1988~1995 年活動期における噴火様式の変化, 火山, **53**:1, 15-33.
気象庁地震火山部火山課 (2022): 気象庁が導入した多成分火山ガス観測システムの概要と観測データ, 験震時報, **86**:1.
産業技術総合研究所・京都大学火山研究センター (2020): 火山噴火予知連絡会資料, その2の3, 40, https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/ccpve/shiryo/146/146_2-3.pdf
篠原宏志 (2019): 火山ガス観測から推定される火山活動推移過程, 火山, **64**:2, 121-129.
菅原道智・松本享・川村安・森健彦・平松秀行・火山ガス成分観測グループ (2023): ガス検知管を用いた火山ガス成分観測の測定手法とその有用性について, 験震時報, **86**:5.
須藤靖明・筒井智樹・中坊真・吉川美由紀・吉川慎・井上

寛之 (2006): 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり: 長期間の変動と圧力源の位置, 火山, **51**:5, 291-309.
宮縁育夫・飯塚義之・遠入楓大・大倉敬宏 (2021): 阿蘇火山中岳第1火口における2019~2020年マグマ噴火の先駆活動—2019年5月3日~5日噴火を含む火山活動の特徴—, 火山, **66**:3, 157-169.
宮縁育夫・飯塚義之・大倉敬宏 (2022): 阿蘇火山中岳第1火口における2021年10月14日噴火, 火山, **67**:4, 441-452.
吉川慎・須藤靖明 (2004): 阿蘇火山中岳第1火口の温度変化と火山活動, 京都大学防災研究所年報, **47**:B.
Agusto, M., M. Clara Lamberti, F. Tassi, F. Carbajal, J. Llano, V. Nogués, N. Núñez, H. Sánchez, A. Rizzo, S. García, J. Yirie, M. Laura Vélez, A. Massenzio, G. Velasquez, C. Bucarey, M. Gómez, P. Euillades, V. Ramos (2023): Eleven-Year Survey of the Magmatic-Hydrothermal Fluids From Peteroa Volcano: Identifying Precursory Signals of the 2018–2019 Eruption, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **24**:11.
Battaglia, A., J. M. de Moor, A. Aiuppa, G. Avard, H. Bakkar, M. Bitetto, M. M. M. Fernández, P. Kelly, G. Giudice, D. D. Donne, H. Villalobos (2019): Insights into the mechanisms of phreatic eruptions from continuous high frequency volcanic gas monitoring: Rincón de la Vieja Volcano, Costa Rica, *Frontiers in Earth Science*, **6**:247.
Burgisser, A. and B. Scaillet. (2007): Redox evolution of a degassing magma rising to the surface, *Nature*, **445**:7124, 194-197.
Miyabuchi, Y. and C. Hara. (2019): Temporal variations in discharge rate and component characteristics of tephra-fall deposits during the 2014–2015 eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan, *Earth Planets Space*, **71**, 1-13.
Mori, T., Y. Sudo, T. Tsutsui, S. Yoshikawa (2008): Characteristics of isolated hybrid tremor (HBT) during a calm activity period at Aso Volcano, *Bulletin of Volcanology*, **70**, 1031-1042.
Ossaka, J., T. Ozawa, T. Nomura, T. Ossaka, J. Hirabayashi, A. Takaesu, T. Hayashi (1980): Variation of chemical compositions in volcanic gases and waters at Kusatsu-Shirane volcano and its activity in 1976, *Bull Volcanol*, **43**, 207–216.
Ohba, T., M. Yaguchi, U. Tsunogai, M. Ito, R. Shingubara (2021): Behavior of magmatic components in fumarolic gases related to the 2018 phreatic eruption at Ebinokogen Ioyama volcano, Kirishima Volcanic Group, Kyushu, Japan, *Earth*

Planets Space, **73**:81.

Savitzky, A., JE G. Marcel (1964): Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical chemistry*, **36**(8), 1627-1639.

Seki, K. (2019): Characteristics of hydrothermal system causing phreatic eruptions inferred from resistivity and geochemical structures, Tokyo Institute of Technology, Ph.D. thesis

Seki, K., T. Ohba, S. Aoyama, Y. Ueno, H. Sumino, W. Kanda, M. Yaguchi, T. Tanbo (2019): Variations in thermal state revealed by the geochemistry of fumarolic gases and hot-spring waters of the Tateyama volcanic hydrothermal system, Japan, *Bulletin of Volcanology*, **81**:8

Shinohara, H. (2005): A new technique to estimate volcanic gas composition: plume measurements with a portable multi-sensor system, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **143**:4, 319-333.

Yamamoto, M., H. Kawakatsu, S. Kaneshima, T. Mori, T. Tsutsui, Y. Sudo, Y. Morita (1999): Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano Japan, *Geophysical research letters*, **26**:24, 3677-3680.

(編集担当 中村政道)

Appendix

A1 中岳第 1 火口の火口縁での機動観測時に携行したガス警報器で測定した SO₂ および H₂S の最大濃度と算出された SO₂/H₂S 比.

日付 (yyyy/mm/dd)	SO ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	SO ₂ /H ₂ S 比
2015/3/25	20	3	6.67
2015/5/26	27	6	4.50
2015/6/4	12	2	6.00
2015/9/4	7	3	2.33
2015/9/11	20	5	4.00
2016/6/10	29	16	1.81
2016/7/15	19	4	4.75
2016/7/27	8	2	4.00
2016/8/1	9	2	4.50
2016/8/4	41	12	3.42
2016/8/19	42	10	4.20
2016/9/6	26	6	4.33
2016/9/15	10	3	3.33
2017/2/15	11	2	5.50
2017/3/3	6	2	3.00
2017/3/10	52	10	5.20
2017/3/16	12	3	4.00
2017/3/22	13	3	4.33
2017/5/1	19	5	3.80
2017/5/17	55	14	3.93
2017/5/30	28	4	7.00
2017/6/9	39	7	5.57
2017/6/13	33	7	4.71
2017/7/13	>100	28	-
2017/7/21	73	15	4.87
2017/7/26	85	19	4.47
2017/8/18	77	19	4.05
2017/8/24	37	9	4.11
2017/9/1	17	3	5.67
2017/9/13	70	26	2.69
2017/9/19	58	14	4.14
2017/9/20	15	5	3.00
2017/10/11	>100	26	-
2017/10/25	32	9	3.56
2017/11/10	9	2	4.50
2017/11/27	64	21	3.05
2017/12/7	17	5	3.40
2017/12/15	34	14	2.43
2018/1/19	67	23	2.91
2018/2/20	19	6	3.17
2018/3/26	70	20	3.50
2018/4/3	50	10	5.00
2018/4/16	23	9	2.56
2018/4/26	59	18	3.28
2018/5/10	42	13	3.23
2018/5/24	18	6	3.00
2018/5/30	65	19	3.42
2018/6/4	18	6	3.00
2018/6/13	15	6	2.50
2018/6/22	32	9	3.56
2018/7/10	36	11	3.27
2018/7/11	48	19	2.53
2018/7/18	65	15	4.33
2018/7/26	11	3	3.67
2018/8/2	23	9	2.56
2018/8/14	31	12	2.58
2018/8/20	28	11	2.55
2018/8/27	92	26	3.54
2018/8/29	49	14	3.50
2018/9/19	38	12	3.17
2018/9/25	-	12	-
2018/10/3	45	13	3.46
2018/10/16	20	7	2.86
2018/10/22	28	9	3.11
2018/11/2	47	17	2.76
2018/11/7	9	2	4.50
2018/11/15	13	5	2.60
2018/11/21	30	10	3.00
2018/12/5	25	7	3.57
2018/12/25	67	17	3.94
2019/1/11	82	23	3.57
2019/2/8	35	11	3.18
2019/3/27	28	7	4.00
2019/4/4	76	42	1.81
2019/4/9	59	22	2.68
2019/4/13	51	22	2.32
2019/7/31	6	4	1.50

日付 (yyyy/mm/dd)	SO ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	SO ₂ /H ₂ S 比	日付 (yyyy/mm/dd)	SO ₂ (ppm)	H ₂ S (ppm)	SO ₂ /H ₂ S 比
2020/7/8	5	3	1.67	2023/4/30	9	10	0.90
2020/7/22	7	3	2.33	2023/5/9	3	3	1.00
2020/8/5	5	3	1.67	2023/5/16	9	11	0.82
2020/8/17	12	5	2.40	2023/6/5	1	3	0.33
2020/9/15	27	15	1.80	2023/6/15	2	3	0.67
2020/9/29	5	2	2.50	2024/1/16	13	2	6.50
2020/10/1	26	17	1.53	2024/04/17	0	0	-
2020/10/14	6	4	1.50	2024/04/25	3	1	3.00
2020/11/4	17	5	3.40	2024/05/09	17	4	4.25
2021/1/4	6	10	0.60	2024/05/09	21	5	4.20
2021/2/9	11	7	1.57	2024/05/15	0	0	-
2021/2/24	9	8	1.13	2024/06/11	20	4	5.00
2021/3/10	5	5	1.00	2024/06/19	2	1	2.00
2021/4/8	7	4	1.75	2024/07/17	26	6	4.33
2021/4/20	7	4	1.75	2024/07/29	64	16	4.00
2021/4/27	6	3	2.00	2024/08/06	16	4	4.00
2021/6/1	10	4	2.50	2024/08/13	20	5	4.00
2021/6/9	4	3	1.33	2024/08/20	0	0	-
2021/6/21	18	7	2.57	2024/09/03	11	3	3.67
2021/7/27	12	9	1.33	2024/09/18	0	0	-
2021/8/31	11	5	2.20	2024/09/26	24	6	4.00
2021/9/22	17	7	2.43	2024/10/30	16	5	3.20
2021/10/7	47	14	3.36	2024/11/13	28	6	4.67
2022/3/24	27	3	9.00	2024/11/20	16	6	2.67
2022/5/2	28	11	2.55				
2022/5/18	15	4	3.75				
2022/6/9	46	10	4.60				
2022/6/28	24	15	1.60				
2022/7/13	25	8	3.13				
2022/7/27	11	6	1.83				
2022/8/10	32	10	3.20				
2022/9/21	14	4	3.50				
2022/9/30	5	3	1.67				
2022/11/7	5	4	1.25				
2022/11/10	20	7	2.86				
2022/12/8	20	10	2.00				
2022/12/27	17	10	1.70				
2023/1/11	12	11	1.09				
2023/2/16	13	11	1.18				
2023/3/28	9	9	1.00				
2023/4/27	2	5	0.40				