

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

The Measurement Method and Effectiveness of Volcanic Gas Component Observation Using a Gas Detector Tube

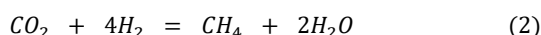
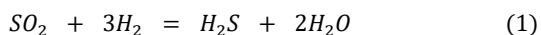
菅原道智¹, 松本 享², 川村 安³, 森 健彦⁴, 平松秀行⁵
火山ガス成分観測グループ⁶

SUGAHARA Michitomo¹, MATSUMOTO Kyo², KAWAMURA Yasushi³, MORI Takehiko⁴, HIRAMATSU Hideyuki⁵ and Group of Volcano Gas Component Observation⁶

(Received September 15, 2022; Accepted February 13, 2023)

1 はじめに

火山ガスはマグマもしくは熱水系を起源としており、地下マグマから直接脱ガスしたマグマ起源成分としては二酸化炭素 (CO₂) と二酸化硫黄 (SO₂) が代表的である。地下熱水系が発達している火山においては、マグマ起源成分の上昇過程で熱水等と接触すると、



の反応式に従って、硫化水素 (H₂S) やメタン (CH₄) など熱水系由来成分が生成される。その中で二酸化硫黄は最も反応性の大きい成分であり、熱水内でそのほとんどが反応して硫化水素となる。一方、地下熱水系の影響を受けず、マグマ起源の高温な火山ガスが地表付近までそのまま上昇してくると、二酸化硫黄に富んだ火山ガスとなる。

現在、火山活動の監視のため行われている火山化学の観測手法として、大きく二種類が挙げられる。一つは火山ガス中に含まれる二酸化硫黄の放出量観測である。これは、吸光分析法 (Differential Optical Absorption Spectroscopy; DOAS) に基づき、二酸化硫黄の紫外線波長領域における吸収特性を利用した手法

である (Mori et al., 2005)。もう一つは火山ガス中に含まれる成分を観測するものであり、湿式分析法に基づき、地下熱水系が発達している火山の噴気地帯を対象として、噴気孔から直接採取したガスの組成を主に実験室で測定する手法である (風早・森, 2016; 篠原, 2019)。前者は、気象庁で運用している噴火警戒レベル判定基準に具体的数値として導入されるなど、火山活動の評価項目の一つとして実用化されている。対照的に後者は、熟練した技術及び実験設備が必要とされ、また高頻度を実施できないことから、火山活動の評価項目の観測手法として気象庁で業務化されるまでには至っていない。

気象庁が常時監視及び観測している火山の多くは地下熱水系を有しており、地表部には噴気地帯が見られる。熱水系が浅部にまで広がる火山では、マグマからの揮発性成分である高温の火山ガスと熱水が接触することによって水蒸気噴火が生じやすく、最近では、2014年の御嶽山や2018年の硫黄山 (霧島山) の噴火が熱水系の関与した水蒸気噴火と考えられている。このような水蒸気噴火では、マグマの蓄積や移動を伴う噴火 (例えば、2011, 2017 及び 2018 年の新燃岳 (霧島山)) と比べて、噴火前の地下の体積変動量が小さいため、地震観測や地殻変動観測などの現状の観測技

¹ 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters
現所属: 熊本地方気象台, Kumamoto Local Meteorological Office

² 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters
現所属: 地震火山部地震火山技術・調査課, Earthquake and Volcanic Engineering Affairs Division, Seismology and Volcanology Department

³ 福岡管区気象台地域火山監視・警報センター, Regional Volcanic Observation and Warning Center, Fukuoka Regional Headquarters

⁴ 気象研究所火山研究部, Department of Volcanology Research, Meteorological Research Institute

⁵ 大分地方気象台, Oita Local Meteorological Office

現所属: 福岡管区気象台地震火山課, Seismology and Volcanology Division, Fukuoka Regional Headquarters

⁶ 気象研究所火山研究部, Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute; 福岡管区気象台, Fukuoka Regional Headquarters; 大分地方気象台, Oita Local Meteorological Office; 長崎地方気象台, Nagasaki Local Meteorological Office; 熊本地方気象台, Oita Local Meteorological Office; 宮崎地方気象台, Miyazaki Local Meteorological Office; 鹿児島地方気象台, Kagoshima Local Meteorological Office

術では、前兆現象が捉えにくい（例えば、Takagi and Onizawa (2016)）。一方で、火山ガス中におけるマグマの揮発性成分の変化は、マグマ活動あるいは地下熱水系の変化を反映する場合があります、水蒸気噴火の前兆現象となる可能性が高い。このような火山ガス成分の変化を気象庁職員による機動観測で検出し、活動の監視項目とするためには、この観測に伴う作業及び後処理を簡略化する手法を持たねばならない。これを可能にする測定方法として、ガス検知管（以下、検知管と記す）とガス採取器（以下、採取器と記す）を用いた火山ガス成分の測定法が挙げられる。この手法では、噴気ガスを採取する噴気地帯において、目的としている火山ガスの成分濃度を迅速に検出することが可能である。火山ガスの化学組成は火山活動の盛衰に対応して変化することが知られており、熱水系由来成分である硫化水素に対するマグマ起源成分である二酸化炭素の比率 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$) の時間変化を見ることで、地下熱水系の活動状況を把握することが可能になる。

実際に火山ガス成分の濃度を高頻度で取得し、熱水活動の推移を把握できた事例として、箱根山における水蒸気噴火に至った火山活動がある（代田, 2013; 代田・他, 2017）。箱根山では、2001 年以降、数年おきに群発地震と山体膨脹を示す地殻変動が繰り返し起こり、2015 年 6 月末にはごく小規模な水蒸気噴火が発生している。この一連の活動過程で、群発地震や山体膨脹に対応する $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の変動が観測された。このことは、地下熱水系の発達した火山において、火山ガス

成分の変化を地震や地殻変動観測データと同じ時系列で評価することで、火山活動評価の高精度化に繋がることを示唆している。

そもそも検知管を用いた火山ガス成分観測は、気象庁では 1950 年代から一部の火山で開始され、2001 年にかけて当時 20 の常時観測火山を対象として定期的実施されていた。観測手法として、検知管を連結させる方法（連結式検知管法）が導入され（沢田, 1970a; 沢田, 1970b）、当手法を火山観測業務に導入してからは観測手順が徹底されることとなり、より適切な観測データが取得できるようになった。更に 1990 年代からは、真空法を応用して採取器を使用することで観測作業は効率化した（気象庁, 1994）。約 50 年にも及ぶ火山ガス成分観測により、例えば雲仙岳においては噴火活動が始まる 1990 年の数年前から $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$ の明瞭な低下が観測されるなど、いくつかの火山において噴火活動に伴う火山ガス成分比の変動が現われていたことが確認されている（高木・他, 2019）。しかしながら、当手法では、噴気孔における大気の混合を除去することが難しいこと、火山活動評価に用いることへの解釈の難しさ等の理由によって、2001 年度の火山観測業務の整理で廃止された。2014 年の御嶽山の噴火を受け、2016 年に気象庁において火山観測及び研究体制の強化が進められ、火山ガス（噴気）の成分観測及び研究が進められることとなった。

今後、気象庁の機動観測として、簡略化された測定手法で、且つ過去の手法よりも精度を高めた火山ガス成分観測を実施するためには、我々が試みる観測の実効性とデータの有用性を検証しておく必要がある。測定手法が簡略されたとはいえ、噴気孔における大気の混合を極力除去して火山ガスを十分に捕捉できるガス採取管の差し込み方法、火山ガス中の水蒸気をガラス管内に凝結させてガス採取袋（以下、採取袋と記す）内に凝結させずに採取する手法及び検知管測定器の取り扱いなど、専門的技術を必要とする手順を含んでおり、気象庁職員によって測定を実施することが可能かどうかを見極めねばならない。また、精度が保証されたデータを蓄積するためには、測定されるデータの意味を理解せねばならず、ある程度の地球化学的な知見も必要である。そこで、福岡管区気象台とその管内の地方官署（大分、長崎、熊本、宮崎、鹿児島）の各地方気象台）では、気象研究所との地方共同研究を実施するなどして、気象研究所の専門家から技術的指導や

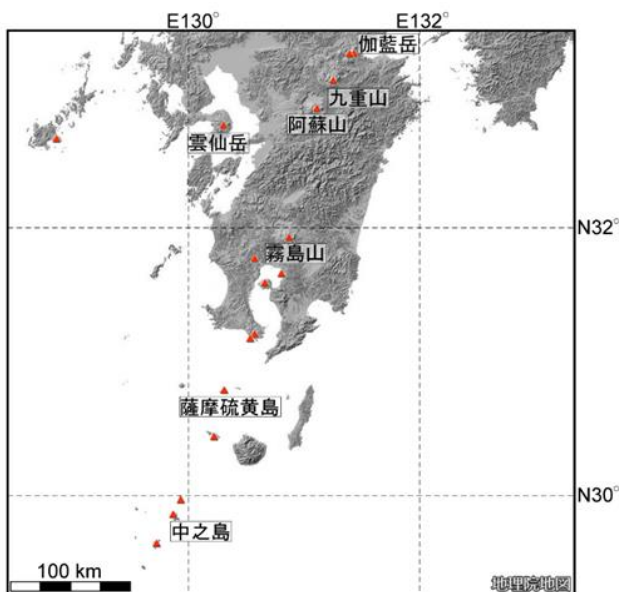


図 1 火山ガス成分観測を実施した火山

助言を定期的を受け、機動観測項目への導入に向けた事前準備を進めることとした。調査対象のフィールドは福岡管内で地下熱水系が存在する火山の噴気地帯とし、活発な噴火活発が断続的に継続している桜島や諏訪之瀬島などのマグマが直接的に活動に関与している火山は対象としない（図1）。

本稿では、検知管を使用して簡略化された火山ガス成分観測に必要な観測器具や、測定の詳細な手順及び得られた観測結果を示す。また、観測を実施した福岡管内の火山における結果から、この観測を実施するに適した火山の条件を検討し、測定結果を検討する上での注意点についての考察を行う。

2 ガス検知管を用いた火山ガス成分観測

2-1 火山ガス成分観測の概要

火山ガス成分観測とは、地下熱水系が存在する火山の噴気地帯において、噴気孔から直接採取した火山ガスに含まれるガス組成を化学分析に基づいて知る手法であり、マグマや熱水系から放出される物質そのものを分析の対象としている（写真1）。一般的にはOzawa(1968)の方法が用いられており、採取現場で二口注射器などを用いて、火山ガスをアルカリ溶液に吸収させたり、ヨウ素溶液と反応させたりした後、実験室において湿式分析する方法である。この手法により火山ガスに含まれる成分の種類や成分ごとの量（火山ガスの化学組成）を正確に測定できるが、分析のための実験室及び分析者の熟練した技術が必要となる。このままの手法では、火山監視業務の一環として機動観測に用いることは困難である。そこで、我々は検知管を利用した観測手法を用いることとした。検知管は小型軽量のため、噴気地帯の近傍で火山ガスを採取した後、それに含まれる成分濃度を比較的容易に知ることが可能である（代田・板寺，2010）。

検知管において測定対象としているのは硫化水素（ H_2S ）や二酸化炭素（ CO_2 ）、二酸化硫黄（ SO_2 ）など火山ガス中に含まれる微量成分である。それらの成分を正確かつ効率的に分析するには、噴気孔から直接採取した火山ガスからその主成分である水蒸気を除去して抽出する必要がある。実際の観測では、①常時噴出している噴気孔から火山ガスを直接採取してそれを冷却する。②その主成分である水蒸気を凝縮させ、乾燥空気を抽出する。③抽出した乾燥空気に含まれる



写真1 噴気地帯における火山ガス成分観測の様子（新湯温泉（霧島山））



写真2 検知管法による火山ガス成分観測
 (a) 噴気孔にチタン管を挿入する場面。
 (b) 噴気孔から火山ガスを直接採取するためガス採取管とゴムチューブ、及び冷却管の接続例。
 (c) 火山ガスを冷却し乾燥空気を抽出する場面。
 (d) 検知管と採取器を使用した乾燥空気中の微量成分（ CO_2 や H_2S など）濃度の測定場面。

CO₂や H₂S など分析対象となる微小成分の濃度を検知管で測定する、という手順で行われる (写真 2)。

2-2 主な使用機材

火山ガス成分観測で使用する主な器具は、火山ガスを直接採取するのに使用するチタン製の管 (チタン管)、乾燥空気を抽出・採取する各種ガラス器具と採取袋及びこれらを接合するゴム管、濃度を測定するのに使用する採取器及び検知管である。

・ガス採取管 (チタン管)

チタン管は耐食性及び耐久性が高く、噴気孔から噴出する高温の火山ガスを直接採取するのに適した素材である (写真 3)。我々はセミシームレスの材質で、持ち運びが便利のように分割できるチタン管をガス採取管 (以下、チタン管と記す) として採用した。

・ガラス器具類

ガス吸引器と冷却管、及びこれらをゴム管で繋ぐために使用する口径変更用の三種類のガラス管を用いている (写真 4-a, b, c)。観測の事前準備として、これらガラス器具の破損の有無を確認する他、吸引器に関してはピストンが固着していないかを確認し、操作の際に摩擦が大きい場合には潤滑剤として押し込み棒にワセリンを少量添加しておく。また、冷却管に関しては、火山ガスを十分に冷却する必要があるため、移動時の破損に備えて 2 本用意することが望ましい。

・ガス採取袋 (テドラーバッグ・コック付袋)

採取袋は、火山ガスの主成分である水 (H₂O) を取り除いた後の微小成分が含まれる乾燥空気を採取するために使用し、各種の無機ガスや有機溶剤に優れた耐性を示すポリフッ化ビニル樹脂製である (写真 5)。

観測前は破損の有無や、コックの開閉動作の確認をする。観測後は吸引器とゴム管を利用した吸引・排出を数回繰り返して空気洗浄し、その後に袋内の空気を完全に抜いてコックを閉じておく。この作業により再利用が可能となる。



写真 3 ガス採取管 (チタン管 : 四分割)

・ゴムチューブ

各種器具との接続には天然ゴムであるゴムチューブを用いる。使用器具の経口に合ったサイズ (太・細) を選び、観測の際に適切となるように長さは調整しておく (写真 6)。



写真 4-a 吸引器 (二口ガラス吸引器) 100mL
ピストン操作時に破損を防止するため、使用時には吸引器内部 (ピストン先端部) にはゴム管を短く切断した衝撃防止用ゴムを入れておく。



写真 4-b 冷却管 (二口ガラス冷却管)
一般的には入口 (注入) 側には長い方を、出口 (排出) 側には短い方のガラス管を適用する。



写真 4-c 径変更用ガラス管
既製品を加工利用 : Φ12 から Φ5 に変形



写真 5 ガス採取袋 (製品名 : テドラーバッグ)
(a) コック開口時 (b) コック閉口時



写真 6 ゴムチューブ (製品名 : アメゴム管)
太ゴム管加工例 (径変更用ガラス管 (写真 4-c) と繋げた状態)。



写真7 ガス採取器（収納時の状態）
上：ガステック製（製品名：検知管気体採取器）
下：光明理化学工業製（製品名：真空法ガス採取器）

・ガス採取器

採取袋に採取した乾燥空気に含まれる微量成分の濃度を測定するため、検知管と共に使用する（写真7）。採取器は内部にシリンダを有し、先端部に検知管の差込口、後端部にガス吸引レバーが附属している。採取袋と検知管、及び採取器を直列状につなぎ、規定量（50mLまたは100mL）に合わせてレバーを引き、シリンダ内部を減圧させることで採取袋内の火山ガス（乾燥空気）を吸引する。

・ガス検知管

検知管は内径2~4mm、長さ80~120mmのガラス管の中に検知剤を充填させて両端を溶封したものである。観測には三種類（硫化水素、二酸化炭素、二酸化硫黄）の検知管を用いており、濃度タイプは各火山に応じて準備した（写真8）。また、検知範囲を超える濃度を検出した場合や吸引の失敗による再測定も想定して、予備を多めに準備しておくことが望ましい。

・温度計

噴気孔内の温度を測定するため、長めの温度センサーを備えた温度計が望ましい。熱電対が金属棒ではない温度計を使用する場合は、火傷防止に差棒等を利用し、直接噴気に触れないようにしてセンサー部を噴気孔内へ挿入する（写真9）。

・火山ガス冷却用備品

噴気ガス中の主要成分の濃度を得るため、火山ガスの主成分である水を冷却して分離する必要がある。冷却のため、冷却用容器及び水と氷が必要であり、冷却用容器には冷却管と氷冷ボトル（500mL ペットボトル）が各2本程度入る広さと冷却管の大半が浸かる高さが必要である。我々は2L ペットボトルを切断加工した



写真8 ガス検知管（本研究で使用した三種類）
左：硫化水素（H₂S）
規定量100mL（50mL 吸引時は値を2倍する）
中：二酸化炭素（CO₂）
規定量200mL（100mL 吸引時は値を2倍する）
右：二酸化硫黄（SO₂）
規定量50mL（100mL 吸引時は値を1/2倍する）



写真9 温度計
破線円：温度測定時に補助的に使用する差棒

ものを容器として使用している（写真10）。氷冷ボトルは、測定時の気温や噴気孔温度の状態にもよるが、官署にて凍結させたものを1観測点で数本準備した方がよい。また、冷却水を現地周辺で確保することが難しいとわかっている場合には、官署を出る前に準備が必要となる。

・採取容器（サンプル瓶）

火山ガスを冷却して得られた凝縮水の保管用として採取容器を使用する（写真11）。採取された凝縮水は、後日、実験室での同位体比分析が可能となる検体であることから、後の分析に備え、内容物、日時、採取場所、気温、噴気温度などを記載したラベルを添付しておく。



写真10 冷却容器 写真11 採水容器（ラベリング後）

・安全装備及びその他準備品

火山ガス成分観測を実施する際に最も注意すべきことは、火山ガス中に含まれる毒性成分を吸引することで生じる事故である(平林, 2003)。また、噴気地帯での踏み抜きや、高温噴気に曝されたチタン管に触れることによるやけど事故もある。これらの事故防止の観点で、幾つかの用品が必要となる(表 1)。その他、測定する際に必要な準備品も示す(表 2)。

2-3 事前準備

観測に用いる機材を運搬するため、緩衝材が付属しているケースを用いている(写真 12)。これは、ガラス器具を運搬時に破損させる可能性を軽減させる為である。火山ガスの冷却に使用する氷冷ボトルや冷却

表 1 安全装備一覧

品名	材質・用途など
革手袋	耐熱性のある革製が望ましい
ゴーグル	噴気孔からの飛沫を防護
防毒マスク	高濃度の火山ガスによる中毒防止
ガス警報器	中毒性の火山ガス濃度を検知
ヘルメット	登山途上での転倒・落石防止のため
登山靴もしくは長靴	噴気地帯を安全に歩行するため

表 2 その他準備品一覧

品名	用途など
観測野帳	観測データ記入用
ハンドヘルドGPS測定器	地点情報および経路確認用
ウェス(古布など)	噴気漏れ防止用(2-4参照) 各種観測器具の清掃用
スコップ(移植ごて)	噴気漏れ防止用(2-4参照)



写真 12 火山ガス成分観測の機材収納例

用水はクーラーボックスなどの保冷ケースに収納して現地へ運搬する。

2-4 火山ガスの採取

2-4-1 噴気孔における温度測定及びチタン管の設置

火山ガスを採取する噴気孔を選ぶ際、測定対象となる H₂S や SO₂ の毒性が高いため、安全性の観点から地形的に火山ガスが滞留しにくい場所であることが望ましい。また、観測データの連続性の観点から、対象とする噴気孔で継続的に採取できるよう、観測開始時には常時噴気を放出している噴気孔を選ぶ。その際、GPS 等で位置座標を計測し、次の観測の際の目印となるような窪地や岩の位置も観測野帳などに記録しておくことが望ましい。

対象とする噴気孔を選定したら、気象計で噴気地帯周辺の気象状況を測定すると共に、温度計で噴気温度



写真 13 噴気孔の位置及び温度の測定場面

- ・噴気孔の位置は GPS 測定器を近くに置いて測定する(a)。
- ・噴気温度を測定するには差棒等を利用し直接噴気に触れないようにする(b)(c)。



写真 14 噴気孔へのチタン管の設置

チタン管を適切に設置した場合は径変更用ガラス管(白線円)の先端部に噴気が付着する。



写真 15 吸引器を利用した噴気孔の吸引の様子
※吸引器を扱う場合はピストン（押込棒）の落下を防ぐため大きく下方へ傾けない。

を測定する（写真 13）。これは、100℃を超える噴気ガスだとマグマ起源成分の組成が増し、100℃を下回ると熱水系由来成分の組成が増すことから、噴気温度の測定が火山ガスの化学組成、強いては火山活動の盛衰を示唆する情報になるからである（Iwasaki et al., 1966）。

噴気温度を測定後、チタン管を噴気孔内に差し込む。噴気ガスの漏れや、チタン管内へ外部空気が混入するのを防ぐため、チタン管が差し込まれた噴気孔の隙間を周辺の土や濡らしたウエスなどで塞ぐ。続いて、チタン管の上部と径変更用ガラス管をゴム管で繋ぐ（写真 14）。噴気孔にチタン管が適切に差し込まれていれば径変更用ガラス管の先端部から噴気が放出され、そこ

に水蒸気が付着するようになる。ここで、水蒸気が付着しない場合は、噴気がチタン管内を通過していない、もしくは噴出が弱いことを示唆しており火山ガスを採取できていないと考えられる。噴出が弱い場合は、湿らせたウエスなどで噴気孔を塞いだ後、口径変更用ガラス管と吸引器をゴム管で繋ぎ、ピストン操作により自噴を促す方法もある（写真 15）。もし、観測対象とした噴気孔の自噴状態に変化が見られない場合、浅部熱水系が同様であると考えられる範囲内で、可能な限り近い場所にある噴気孔へ観測対象を変更する。

これらの作業において、チタン管は高温の噴気で熱せられているため、作業には革手袋等を利用し、やけど防止に留意すべきである。

2-4-2 器具の接続・設置

チタン管を噴気孔に設置し、自噴を確認した後、次の手順で各器具への接続を行う。

- 1) 安定した場所に冷却容器を設置し、予め用意しておいた氷（氷冷ペットボトル）と冷却用水を容器内に入れて一定の水量で満たす。
- 2) 冷却管と、先端内部に破損・衝撃防止用ゴムを入れた吸引器を用意し、冷却管（送出側：短いガラス管）と吸引器（送入側：先端部の吸引口のうちの片方）とを細ゴム管で繋ぐ。

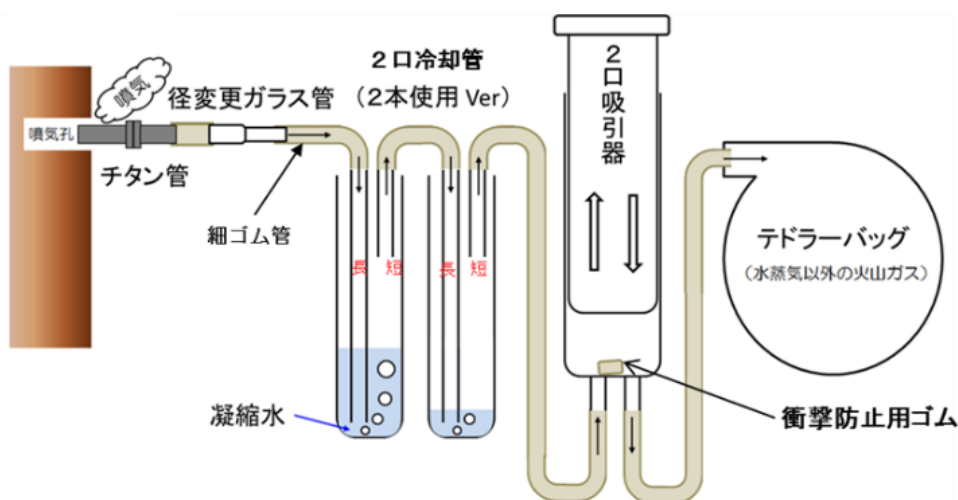


図 2 火山ガス「冷却装置」概念図

- ・ はじめにガス採取袋（テドラーバッグ）を除く各器具を図のように接続する。
- ・ その後、（2口）吸引器で数回ほど吸引と排出の操作を繰り返す。
吸引と排出は吸引器のピストンの押し引きと、吸引器に接続された 2 本の（細）ゴム管を指で押さえる、または離すことで、ゴム管を交互に閉塞・開放しながら行う（詳細は 2-4-3 を参照）。
- ・ 最後にガス採取袋を接続する（※初めのガス（数回分）は回収しない）。

- 3) 冷却容器に冷却管を、管内に水が入らないよう注意深く入れ、冷却管（送入側：長いガラス管）に径変更用ガラス管（チタン管と連結）を細ゴム管で繋ぐ。
- 4) 吸引・排出操作を数回繰返し、噴気ガスによる共洗いを実施する。当操作で冷却管内に溜まった凝縮水は廃棄する。
- 5) 採取袋のコック部分と吸引器のもう片方の吸引口（送出側）を細ゴム管で繋ぐ。

これにより、火山ガスの主成分である水蒸気を凝縮水として冷却管内へ、その他微量成分を採取袋へ分離する「冷却装置」が完成する（図 2）。

2-4-3 噴気ガスの吸引・排出操作

火山ガスを採取するため、採取袋のコックを開口し、吸引（冷却管への噴気ガスの送入）と排出（採取袋への乾燥空気の送入）の操作を繰り返す。冷却管は複数繋いだ方が効果的に火山ガスを冷却できるため、以後、冷却管は 2 本使用で述べる。また、当操作における留意事項として、

- ・ピストンが固着した場合は作業を中断し、帰署後、超音波洗浄機にかけるか、木槌等を使用して軽く振動を与えるなどして、可能な限り修復を試みる。

- ・吸引器は、大きく下方に傾斜させるとピストンが落下して破損するおそれがあるため、なるべく水平にした状態での操作を心がける。

2-4-3-1 吸引

噴気ガスの吸引は、吸引器の先端部にある二つの吸引口のうち、

- 1) 送入側（冷却管側）のゴム管を開放した状態で、
- 2) 送出側（採取袋側）のゴム管を折り曲げ、ゴム管を指で押さえることで閉塞させ、
- 3) ピストンを引く

という手順で行われる。その際、一度に引き込む噴気ガスの吸引量は吸引器に付された目盛の範囲内とする。噴気ガスを目盛の最大値以上に引き込むと、器具内の急減圧によりチタン管先端部の砂泥が吸い込まれ、チタン管やゴム管に目詰まりが起こる恐れがある。

噴気ガスの勢いや温度等の条件で異なるために定量的な説明は難しいが、この吸引操作に関して、ピストンは意識的にゆっくりと引くことが重要である。引き方が速いと冷却管内を通過する火山ガスの冷却が不十分となり、冷却管出口部のガラス管が高温ガスの影響で熱くなるため、ガラス管内に水滴が付着するようになる。この状態で排出動作に移ると、本来乾燥空

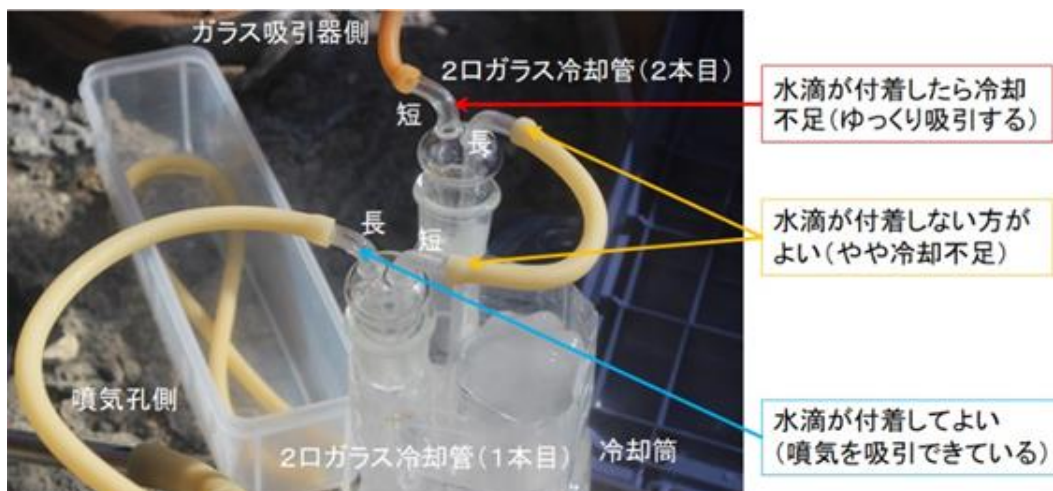


写真 16 火山ガス成分観測における吸引時の状況

吸引時は以下の項目に注意を払い続ける必要がある。

- ・冷却管出口部における噴気の付着の有無
冷却管内で凝縮過程が完了した時に冷却管出口部の細ガラス管内に噴気が付着していないか確認する。
※冷却管入口部は火山ガスを送入しているので熱い状態でも構わない。
- ・冷却容器内の温度
常に低温に保つ（写真では冷却容器内に氷冷ペットボトルから取り出した氷を入れている）。

気のみを送るはずの採取袋に水蒸気が入り込むことになり、測定対象の微量成分 ($H_2S \cdot SO_2$) が水蒸気と反応・溶解して成分量が変化して厳密な測定ができなくなる。加えて、装置内の急減圧によって、砂泥等を吸い込み、チタン管先端部で目詰まりが起る可能性もある。噴気ガス吸引時には、冷却管（送出側）のガラス管に水滴が付かないよう十分に注意を払い、ピストンを一定量引き終えたら、冷却管に引込まれた水蒸気の凝縮が完了するまで動作を停止させる。その際、冷却管出口部のガラス管が熱くならず（触れる程度で）、かつガラス管内に水滴が付着していないことを確認する（写真 16）。

冷却作業において、もう一点注意したいのが冷却容器内の水温である。取り扱う噴気が高温であるが故に、ゆっくり吸引しても火山ガスの凝縮過程で冷却容器内の水温が上昇し、結果として火山ガスの冷却が不十分となり、冷却管出口部のガラス管に水滴が付着する事態も起るためである。この容器内の水温上昇を抑える手段として、容器を時々揺すりながら攪拌することや、氷冷ペットボトルから氷を取り出してより効果的に冷却を促進させる方法がある。

2-4-3-2 排出

噴気ガスが十分に冷却され、冷却管内に溜まる凝縮水量に変化が見られなくなれば、水蒸気の凝縮過程が

完了したことを意味する。その状態になったら、水蒸気が除去された火山ガス（乾燥空気）を採取袋へ排出する操作を行う。

排出時は、吸引器の送入側（冷却管側）のゴム管を折り曲げて（ゴム管を指で押さえて）閉塞させ、これまで塞いでいた送出側（採取袋側）のゴム管を開き（これまで抑えていたゴム管から指を離して）、ピストンを押しながら火山ガスを採取袋へ送り出す。この吸引と排出の操作を繰り返し、凝縮水が冷却管の 1/4 から 1/3 の高さまで溜まった段階で当操作を終え、採取袋のcock部を閉める。

2-4-4 採取後の乾燥空気及び凝縮水の取扱い

採取袋に採取する乾燥空気とした火山ガスの容量は袋内が少し膨らむ程度で十分である（写真 17）。採取を終えたら、採取袋のcockを閉めて冷却管を取り外す。片方（入口側：元冷却管側）は何も繋がらない状態で、もう片方（出口側）は採取袋を繋いだ状態のままにしておく。冷却管内の凝縮水は実験室での分析試料となるため、凝縮水で共洗った採水容器に移し、官署に持ち帰って必要な情報をラベリングしておく。

凝縮水は元々火山ガス中の水蒸気であり、本来ならば透明であるが、

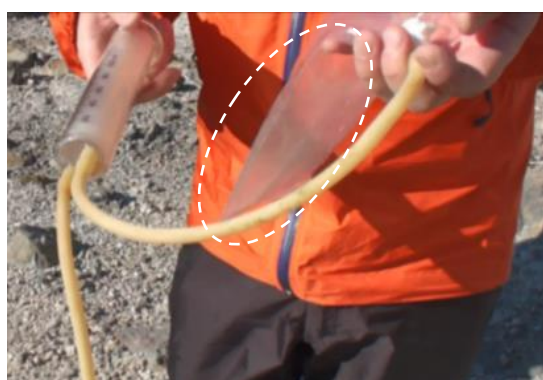
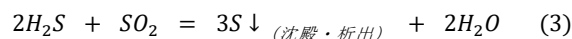


写真 17 火山ガス採取後のガス採取袋

- 採取する火山ガス（乾燥空気）は袋が少し膨らむ程度でよい（破線円）。
- 火山ガスの採取を終えたら採取袋のcockを閉めて冷却管を取り外す。
- 片方（入口側：元冷却管側）は何も繋がらない状態で、もう片方（出口側）は採取袋を繋いだ状態のままにしておく。



写真 18 火山ガス採取後の凝縮水と取扱い

左：硫黄の析出により白濁した凝縮水

中：凝縮水の採取の様子

- 冷却管が 2 本の場合には一つの容器にまとめる。
- 採水容器は凝縮水で共洗いを施す。
- 冷却管壁面に付着した水滴もなるべく採取する。
- 凝縮水が少ない場合は採取袋を外した後に数回吸引して追加採取する。

右：凝縮水の撮影の様子

変色が見えるように撮影する（背面は黒が良い）。

の反応式に従うと、噴気に含まれる二酸化硫黄 (SO_2) が多い場合、硫化水素 (H_2S) と反応して析出した硫黄 (S) が凝縮水中でコロイドを形成し白濁する。白濁が認められた場合、採取袋に採取された H_2S 濃度は減少しており、検知管で得られる濃度は過小評価の可能性がある。一方で、凝縮水の白濁度はマグマ起源ガス成分の SO_2 の含有量に関係しており、浅部熱水系の状態を推定できる資料となる。そのため、凝縮水の様相を写真等で記録しておくことが望ましい (写真 18)。

2-5 ガス検知管による火山ガス成分濃度の測定

2-5-1 測定前準備

採取袋に採取した火山ガス中の微量成分濃度を測定するため、採取器と検知管を用いる。

1) ガス採取器

採取袋を繋いだ検知管を採取器に挿入するとレバーに加わる負荷が大きくなるため、採取器に何も接続していない状態での力加減をあらかじめ確認しておく。その際、各検知管で規定されている吸引量 (50mL または 100mL) を採取器に設定しておく。

2) ガス採取袋

検知管内部の充填剤を素早く反応させるためには採取袋と検知管を繋ぐゴム管は短いほうがよい。また、コック部に繋げているゴム管を取り換える際は必ずコックを閉めてから行う (写真 5 (b))。

3) ガス検知管

最後に、検知管両側の先端部を採取器に付属しているカッター (検知管の先端部が入る小さな穴) に片方ずつ差し込んで折る。その後、検知管の気体送入側 (G▶) を採取袋のコック部に繋げた細ゴム管へ速やかに繋ぐと共に、検知管の気体送出側 (▶) を採取器先端部の固定ホルダーへ挿入する (写真 19)。

2-5-2 火山ガス成分濃度の測定

採取袋と検知管、採取器を連結させたら濃度の測定を行う (写真 20)。測定時は採取袋のコックを開き、採取器のレバーをあらかじめ設定していた規定量 (50mL または 100mL) まで一気に引き、検知管内へ火山ガスを送入する。これで、検知管内の充填剤が検出対象となる微量成分と化学反応し、送入側から次第に着色変化していく。検知管の仕様による規定時間 (30 秒~1 分程度) が経過、もしくは着色に変化が見

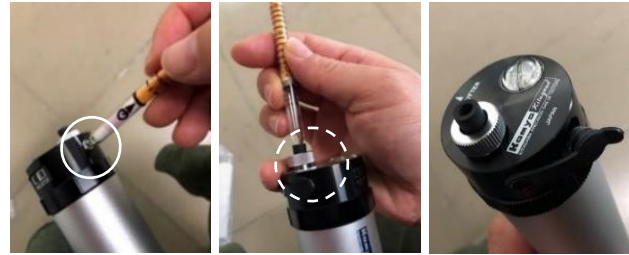


写真 19 検知管による濃度測定前の事前準備
採取器：(株) 光明理化学工業の製品を使用
左：検知管両端の切断場面
採取器先端部の側面に付属のカッター (実線円) で検知管両端の先端部を挿入して折る。
中：採取器への検知管の差し込み場面
先端部の固定ホルダー (破線円) に挿入する。
右：採取器先端部の拡大



写真 20 検知管法による火山ガス濃度測定場面
・測定に使用する各器具は直線状に配置する。
・測定前は採取袋のコックを開く。測定終了後は速やかに閉じる。
・採取器のレバー及び本体に付された赤印の位置を揃える (実線枠)。
・吸引量 (50mL または 100mL) を確認後、採取器のレバーを一気に引いて規定時間待つ (破線枠)。

られなくなった時点で 1 回の吸引が終了したとする。対象とする微量成分の濃度は、着色した長さを検知管に付されている目盛から読み取る (検知管により単位は異なり、ppm もしくは%)。各微量成分を測定する順序は特に問わないが、熱水系の活動状況を推定するために、硫化水素 (H_2S) と二酸化炭素 (CO_2) の濃度を測定することは必須である。加えて、凝縮水の白濁が認められる場合には二酸化硫黄 (SO_2) の濃度を測定することが望ましい。

各微量成分の濃度を測定した後は、速やかに採取袋のコックを閉めて検知管を採取器及び採取袋から取

り外す。濃度測定後の検知管内の充填剤は、時間が経過すると空気との反応等により着色域に変化が生じるため、測定後は速やかに検知管の着色状況を近接撮影するか、マジックで着色域が分かるように線を書くことで情報を保存しておく。

2-5-3 火山ガスの希釈

検知管が検出濃度の上限を超えた場合、火山ガスを希釈して微量成分の濃度を低下させ、各成分濃度を測定する手法を用いることがある。これは、火山ガス成分観測で最終的に得たい情報が火山ガス成分比＝定性的指標（C/S：CO₂/H₂S）であることから、成り立つ手法である。

希釈は、二本のゴム管が繋がった吸引器を利用し、片方のみのゴム管にコックを締めた採取袋を繋げた後、噴気ガスを含まない大気を吸入・排出のピストン操作で採取袋へ送入する手法で行う（写真 21）。観測で希釈を行った際には、各噴気地帯における火山ガスの吸引量（吸引した回数）と希釈量（希釈した回数）を記録する。これにより、次気地帯における火山ガスの吸引量（吸引した回数）と次回以降の観測が効率的に行えるようになる。

2-6 観測終了後の後片付け

1) 測定器具

チタン管やガラス製器具及びゴム管は洗剤、柄付スポンジやブラシ等を使用して洗浄する。その際、チタン管やゴム管内部に詰りがないうかが確認する。洗浄後



写真 21 火山ガスの希釈場面

採取袋に周囲の大気を注入後、採取袋内に採取されている火山ガス（乾燥空気）と十分攪拌する（採取袋を軽く揉んだ後、数分程度待つ）。

は水気をふき取り、乾燥させた後にケースへ収納する。

2) ガス採取袋

火山ガスの影響を受けない環境下で、吸引器とゴム管で繋いでピストン操作を繰り返し実施し、袋内を周囲の空気で洗浄して保管する。

3) 採水容器

採水容器に採取日時、噴気温度、火山ガス成分比（CO₂/H₂S）及び採水場所等を記載したラベルを張り付ける。キャップ（採水瓶の口）はしっかり締め、ビニールテープまたはパラフィルムで覆うことで、漏水を防止する。分析を実施する機関との協議で、採取した凝縮水に同位体分析等の精密分析を要すると判断した場合、サンプル時の情報を付加した上で送付する。

4) ガス検知管

検知管は使い捨てのため使用後は破棄し、次回の観測までに補充しておく。

3 観測結果

福岡管区气象台と大分地方气象台では気象研究所の協力を得て、2017年から火山ガス成分観測を伽藍岳と硫黄山（九重山）で開始した。2018年4月から2020年3月までは、福岡管区气象台、大分地方气象台、宮崎地方气象台及び鹿児島地方气象台が共同で実施した、気象研究所との地方共同研究『機動観測項目における火山ガス成分観測の実効性調査』において、管内の火山における火山ガス成分観測を進めた。ここでは、各火山における2020年3月までの測定結果を示す。

3-1 伽藍岳

伽藍岳では、2017年より比較的高頻度（1回/月程度）で測定を実施している（図3、写真22）。伽藍岳は、南側斜面と1995年に出現した泥火山周辺が主な噴気地帯である。南側斜面のA群噴気地帯では、継続的な測定が実施できているが、泥火山の噴気孔は2019年3月の観測時に枯渇し、代替の噴気孔も周囲に無かったため、観測が中断している（写真22下）。

噴気の温度は、両地点共に測定地点の標高における水の沸点に近い値（約97℃）を示している。火山ガス成分比（CO₂/H₂S）は、安定した状態（5.0～7.0）で経過しており、二酸化硫黄（SO₂）はほぼ検出されていない（表3）。

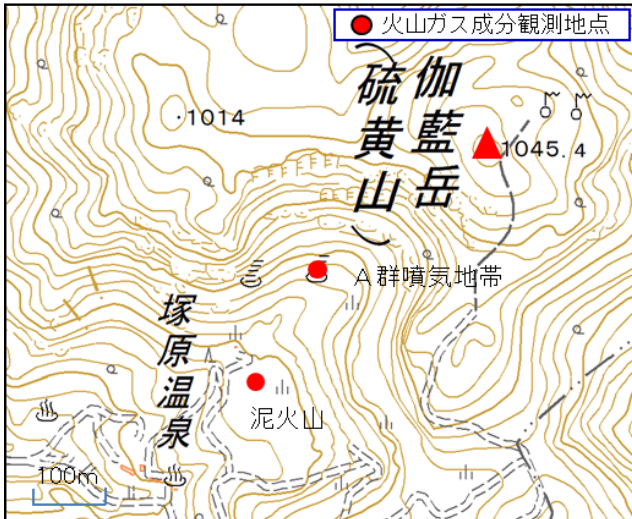


図 3 伽藍岳で測定した噴気地帯の位置
伽藍岳南西側に位置し、常時活発な噴気活動が見られる A 群噴気地帯と泥火山（2019 年 3 月の観測時に枯渇）で火山ガス成分観測を実施した。



写真 22 伽藍岳の噴気地帯
上：A 群噴気地帯
下：泥火山（2019 年 3 月の観測時に枯渇）

表 3 伽藍岳における火山ガス成分観測結果

日付	A群噴気地帯						泥火山					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2017/3/17	—	—	—	—	—	—	2.8	16.0	—	5.71	—	—
2017/5/16	4.0	26.0	N.D.	6.50	—	あり	2.2	20.0	N.D.	9.09	—	なし
2017/6/19	3.3	20.0	N.D.	6.06	—	あり（薄い）	—	—	—	—	—	—
2017/8/16	3.2	21.0	N.D.	6.56	—	あり	3.5	22.0	—	6.29	—	なし
2017/9/26	3.3	28.5	N.D.	8.64	97.0	あり（薄い）	3.4	20.0	—	5.88	97.1	なし
2017/11/6	2.8	17.0	N.D.	6.07	97.2	あり（薄い）	3.2	19.0	—	5.94	97.3	なし
2017/11/21	2.9	17.0	0.3	5.86	96.9	あり（明瞭）	4.0	24.0	—	6.00	97.5	なし
2017/12/22	3.6	22.0	N.D.	6.11	98.0	あり（薄い）	4.0	22.0	—	5.50	98.7	なし
2018/6/25	2.0	12.0	N.D.	6.00	96.9	あり（薄い）	0.6	2.5	—	4.17	97.0	なし
2018/8/30	3.2	19.0	—	5.94	97.0	なし	2.2	11.0	—	5.00	97.1	なし
2018/11/20	2.4	12.5	—	5.21	99.0	あり（薄い）	1.2	6.0	—	4.88	99.2	なし
2019/3/27	3.6	19.0	—	5.28	97.0	なし	—	—	—	—	—	—
2019/5/27	3.4	18.0	—	5.36	96.6	あり（薄い）	—	—	—	—	—	—
2019/9/13	3.2	17.5	N.D.	5.47	96.1	あり（薄い）	—	—	—	—	—	—

—：観測実績無し，または観測データ無し N.D.：検出限界未満

3-2 硫黄山（九重山）

九重山では、硫黄山付近に噴気地帯が点在している（図 4）。1995 年の噴火活動では、D 領域で火口が形成されたが、現在では、B 領域及び D 領域での噴気は見られず、A 領域及び C 領域でのみ噴気活動が続いている。測定は、これら 2 領域を対象として実施している（写真 23）。噴気活動は、A 領域に比べて C 領域の方

が活発である。

噴気温度は、両領域共に測定地点の標高における水の沸点に近い値（約 94℃）を示している。火山ガス成分比（CO₂/H₂S）は、両領域共に緩やかな上昇傾向が見られる中で、A 領域においては 2018 年 11 月と 2020 年 3 月の観測時に大きな上昇が見られた。二酸化硫黄（SO₂）は時々検知されており、凝縮水の白濁も度々見

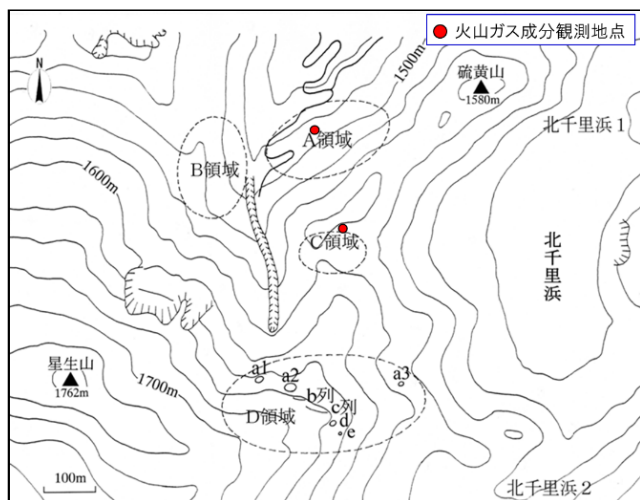


図4 硫黄山（九重山）で測定した噴気地帯の位置
硫黄山付近に複数ある噴気地点のうち、常時噴気活動の見られる A 領域と C 領域で火山ガス成分観測を実施した。



写真 23 硫黄山（九重山）噴気地帯
上：A 領域 下：C 領域

表 4 硫黄山（九重山）における火山ガス成分観測結果

日付	A領域						C領域					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2017/7/21	3.2	13.0	—	4.1	—	—	15.0	20.0	—	1.3	—	—
2018/3/13	—	—	—	—	—	—	3.5	6.0	—	1.7	95.7	あり（薄い）
2018/7/26	2.6	2.3	—	0.9	95.0	あり（薄い）	1.7	5.0	N.D.	2.9	94.8	あり（薄い）
2018/9/19	1.2	3.0	—	2.5	94.5	あり	3.5	15.0	—	4.3	93.7	あり（薄い）
2018/11/29	0.2	2.0	2.8	11.1	94.2	あり（濃い）	2.9	5.0	—	1.7	94.9	あり（薄い）
2019/1/16	1.8	9.8	0.7	5.4	94.3	あり（濃い）	1.1	4.0	N.D.	3.8	95.9	あり（薄い）
2019/3/13	1.8	4.0	0.2	2.2	94.6	あり	0.2	1.5	—	7.5	92.4	あり（薄い）
2019/3/28	2.8	15.0	N.D.	5.4	94.9	あり	—	—	—	—	—	—
2019/5/13	3.3	13.5	4.0	4.1	95.1	あり（薄い）	—	—	—	—	—	—
2019/6/12	3.3	9.0	1.9	2.7	94.7	あり	2.4	11.0	N.D.	4.6	—	あり（薄い）
2019/7/25	3.8	17.0	4.9	4.5	95.9	あり（薄い）	2.3	10.3	—	4.4	95.0	あり（薄い）
2019/8/22	3.6	5.0	N.D.	1.4	95.9	あり（薄い）	—	—	—	—	—	—
2019/10/9	2.8	17.5	8.6	6.3	95.9	あり（濃い）	3.8	12.5	10.0	3.3	94.7	あり（濃い）
2020/1/28	2.4	11.5	1.1	4.7	94.3	あり（薄い）	1.2	7.5	1.1	6.3	93.0	あり（薄い）
2020/3/3	1.4	20.0	N.D.	14.3	93.1	あり（薄い）	—	—	—	—	—	—
2020/3/17	3.4	38.5	3.1	11.2	95.4	あり（薄い）	0.7	3.3	—	4.7	95.2	あり（薄い）

—：観測実績無し，または観測データ無し N.D.：検出限界未満

られる（表 4）. 九重山では、1995 年の噴火後など、過去に二酸化硫黄が定量されており、火山活動の変化によっては火山ガス中に SO₂が含まれると考えた方がよい（例えば、九州大学理学部、1995）.

3-3 吉岡噴気地帯（阿蘇山）

吉岡噴気地帯は阿蘇中岳火口の西南西約 5km に位

置し、2006 年に新たな噴気孔が出現して以来、噴気活動が活発となっている（寺田他、2007）. 噴気地帯は 4 つ（A, B, C, D）の領域に大別され、測定は B 領域を対象として実施している（図 5、写真 24）.

噴気温度は測定地点の標高における水の沸点に近い値（約 97℃）を示し、時間的な変化はほぼみられない. 火山ガス成分比（CO₂/H₂S）は高い値を示しており、

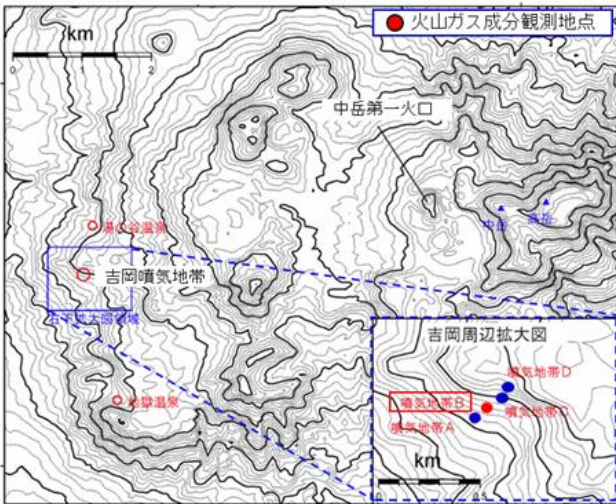


図 5 吉岡噴気地帯で測定した各領域の位置
 吉岡噴気地帯は、阿蘇山中岳第一火口から西南西へ約 5km 離れた場所に位置し、複数ある噴気地帯のうち B 領域で火山ガス成分観測を実施した。

写真 24 吉岡噴気地帯 (B 領域)

表 5 吉岡噴気地帯における火山ガス成分観測結果

日付	吉岡噴気地帯B領域					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2018/7/26	0.0	5.0	—	104.2	—	なし
2019/3/20	0.0	5.0	—	104.2	96.8	なし
2020/2/21	0.2	30.0	N.D.	150.0	97.8	なし
2020/3/16	0.1	31.8	N.D.	227.1	97.3	あり

—：観測実績無し，
 または観測データ無し
 N.D.：検出限界未満

2020 年 3 月の観測では更に大きくなった。また、2020 年 3 月の観測では凝縮水の白濁が見られたが、二酸化硫黄 (SO₂) は検出されていない (表 5)。

3-4 雲仙温泉 (雲仙岳)

雲仙普賢岳の南西約 4km 付近にある雲仙温泉では、温泉の湧出と共に噴気地帯が広がっており、熱水活動の活発な領域である (図 6)。測定は、噴気活動が穏やかな旧八幡地獄とやや活発な邪見地獄の 2 カ所を対象として実施している (写真 25)。

噴気温度は測定地点の標高における水の沸点に近い値 (約 96℃) を示している。邪見地獄では、測定していた噴気孔が枯渇したため、2020 年に近くの噴気孔へ測定点を移した。その影響からか、噴気温度に大きな低下が見られている。旧八幡地獄では、2020 年の測定で火山ガス成分比 (CO₂/H₂S) が大きく低下したが、この測定時の噴気に勢いがなく、自噴している火山ガ

スを採用できていなかった可能性がある。この時の値を除けば、火山ガス成分比 (CO₂/H₂S) に大きな変化は見られない。二酸化硫黄 (SO₂) は検知管で検出されていないことから、火山ガス中の二酸化硫黄濃度は極めて低いと考えられる (表 6)。

3-5 硫黄山 (霧島山)

硫黄山 (霧島山) では、硫黄山南西側の噴気地帯 (C 点) で測定を実施している (図 7, 写真 26)。但し、2018 年 4 月の噴火前後における火山活動の活発化のため、2018 年 2 月から 2019 年 5 月までの約 1 年間は測定を中断している。

噴気温度は測定地点の標高における水の沸点に近い値 (約 96℃) で経過していたが、全体的に見てやや低下傾向にある。逆に火山ガス成分比 (CO₂/H₂S) には上昇傾向が見られている。なお、二酸化硫黄 (SO₂) は測定を実施していない (表 7)。



図6 雲仙温泉で測定した噴気地帯の位置

雲仙温泉の中で最も活発な噴気活動が見られる大
 叫喚地獄付近にある邪見地獄と、その西側 600m 付近
 にある静穏な旧八幡地獄の噴気孔で火山ガス成分観
 測を実施した。



写真 25 雲仙温泉で測定した噴気地帯
 上：旧八幡地獄 下：邪見地獄

表 6 雲仙温泉における火山ガス成分観測結果

日付	旧八幡地獄						邪見地獄					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2018/1/17	—	—	—	39.4	96.9	—	—	—	—	37.6	95.8	—
2018/10/19	0.4	13.5	—	34.6	95.8	あり	0.6	24.0	—	39.3	97.1	あり
2020/1/29	1.0	10.0	—	10.2	95.5	なし	1.3	35.5	—	28.4	91.4	なし

—：観測実績無し、または観測データ無し



図7 硫黄山（霧島山）における噴気地帯

硫黄山付近にある複数の噴気地帯のうち、硫黄山
 火口から約 300m 離れた地点にある C 点で火山ガス
 成分観測を実施した。



写真 26 硫黄山（霧島山）の南西側噴気地帯

表 7 硫黄山（霧島山）における火山ガス成分観測結果

日付	硫黄山南西側（C点）					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2017/12/23	3.0	19.5	—	6.5	96.1	あり
2018/2/22	3.6	10.0	—	2.8	97.0	—
2019/5/12	3.4	28.0	—	8.2	94.9	あり
2019/7/24	0.4	3.0	—	7.5	93.4	あり
2019/10/7	1.6	14.5	—	8.8	92.3	あり
2020/1/28	1.4	17.7	—	13.0	90.5	あり
2020/2/14	1.8	37.5	—	20.5	93.5	あり
2020/3/17	0.7	16.0	—	22.9	92.9	—

—：観測実績無し，
または観測データ無し

3-6 新湯温泉（霧島山）

新燃岳（霧島山）は、2017 及び 2018 年に噴火活動が活発となった。2018 年 3 月にはマグマが地表付近まで達し、火口からの溶岩流出が観測されている。その新燃岳火口の西南西約 2km に位置する新湯温泉には噴気地帯が存在しており、新燃岳のマグマ活動との関係性を考え、測定を実施している（図 8、写真 27）。

噴気温度は測定地点の標高における水の沸点（約 96℃）で安定して経過し、火山ガス成分比（CO₂/H₂S）も概ね安定した値が続いている。なお、二酸化硫黄（SO₂）は測定を実施していない（表 8）。

3-7 薩摩硫黄島

薩摩硫黄島では、2018 年の 5 月に硫黄岳火口南西縁の噴気孔で測定を実施している（図 9、写真 28）。

噴気温度は、測定地点の標高における水の沸点に近い値（約 98℃）であるが、火山ガス成分比（CO₂/H₂S）は高い値となった（表 9）。二酸化硫黄（SO₂）は測定を実施していないが、薩摩硫黄島では概ね 1,000 ton/day の二酸化硫黄が定量されていることや凝縮水に強い白濁が生じることから、火山ガス中の二酸化硫黄濃度が高いと考えられる。

3-8 中之島

活発な噴火活動を続ける諏訪之瀬島の北東約 30km

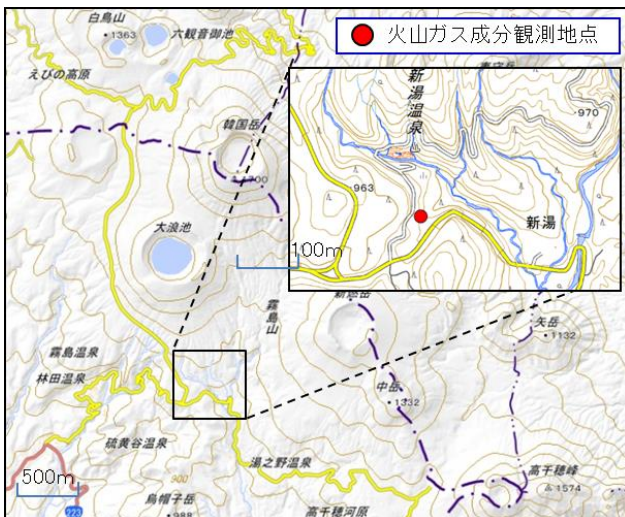


図 8 新湯温泉（霧島山）で測定した噴気地帯の位置
新燃岳から西南西へ約 3km 離れた新湯温泉の南側に存在する噴気地帯で火山ガス成分観測を実施した。



写真 27 新湯温泉（霧島山）の噴気地帯

表 8 新湯温泉（霧島山）における火山ガス成分観測結果

日付	新湯温泉					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2018/2/26	3.7	12.0	—	3.2	98.6	あり
2018/7/25	3.5	15.0	—	4.3	97.7	あり
2018/9/5	3.0	11.5	—	3.8	96.3	あり
2018/10/13	3.6	16.0	—	4.4	98.9	あり
2019/1/25	2.7	9.5	—	3.5	97.2	あり
2019/3/20	2.7	10.0	—	3.7	—	あり
2019/5/13	3.8	10.0	—	2.6	96.3	あり
2019/7/24	3.2	15.0	—	4.6	96.1	あり
2019/10/7	3.9	17.0	—	4.4	96.3	あり
2020/1/28	2.3	7.3	—	3.2	95.7	あり
2020/2/13	3.6	12.0	—	3.3	96.5	あり
2020/2/14	3.0	11.5	—	3.9	96.6	あり
2020/3/17	3.2	12.0	—	3.8	96.1	あり

—：観測実績無し，
または観測データ無し



図 9 薩摩硫黄島で測定した噴気地帯の位置
硫黄岳山頂火口から南西へ約 200m 離れた火口縁
にある噴気地帯で火山ガス成分観測を実施した。



写真 28 薩摩硫黄島（硫黄岳火口南西縁）

表 9 薩摩硫黄島における火山ガス成分観測結果

日付	硫黄岳火口縁南西側					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2018/5/25	0.6	27.0	>10.0	49.1	97.8	あり(濃い)

に位置する中之島は、御岳山頂火口内に噴気地帯が存在しており、過去には硫黄採掘が行われていた(図 10)。その山頂火口内の噴気孔において、2018 年に測定を実施した(写真 29)。

噴気温度は測定地点の標高における水の沸点に近い値(約 97℃)であるが、火山ガス成分比(CO₂/H₂S)は非常に高い値となった(表 10)。二酸化硫黄(SO₂)は測定を実施していないが、中之島では概ね 20 ton/day

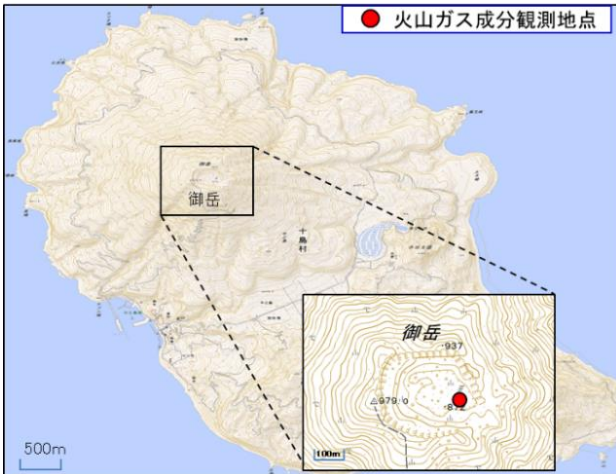


図 10 中之島で測定した噴気地帯の位置
御岳山頂火口内にある噴気地帯の南東側に位置する噴気孔で火山ガス成分観測を実施した。



写真 29 中之島の噴気地帯（御岳火口内）

表 10 中之島の噴気地帯における火山ガス成分観測結果

日付	御岳火口内					
	H ₂ S(%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	CO ₂ /H ₂ S	噴気温度	凝縮水白濁
2018/1/23	0.4	30.5	>10.0	76.3	96.8	あり（濃い）

程度の二酸化硫黄が定量されていること、凝縮水に濃い白濁が生じたことから、火山ガス中の二酸化硫黄濃度は高いと考えられる。

学成分変化の要因となる火山活動等の状態変化を把握するなど、注意が求められる。

4 火山活動評価に用いる際の注意

2017 年より、福岡管内の火山の噴気地帯において、検知管を用いた火山ガス成分の観測を行ってきた。観測された火山ガスの成分比、CO₂/H₂S の値はそれぞれの火山、噴気地帯によって固有の特徴を持っており、吉岡噴気地帯（阿蘇山）、雲仙温泉（雲仙岳）、薩摩硫黄島及び中之島のように 10 を超えて大きな値を示す地点、伽藍岳や新湯温泉（霧島山）のように時間的な変化がほぼない地点、硫黄山（九重山）や硫黄山（霧島山）のように時間的な変化が大きい地点などバラエティに富んでいる（図 11）。火山ガス成分比のこれらの特徴の違いは、各火山における火山ガスの特性及び浅部熱水構造の違い、あるいは試料採取時の活動状況に呼応した化学変化によって生じた結果である。そのため、CO₂/H₂S の数値を基準化して火山活動評価に用いることは難しい。また、それぞれの火山での CO₂/H₂S 値の時間変化を用いての火山活動評価においても、化

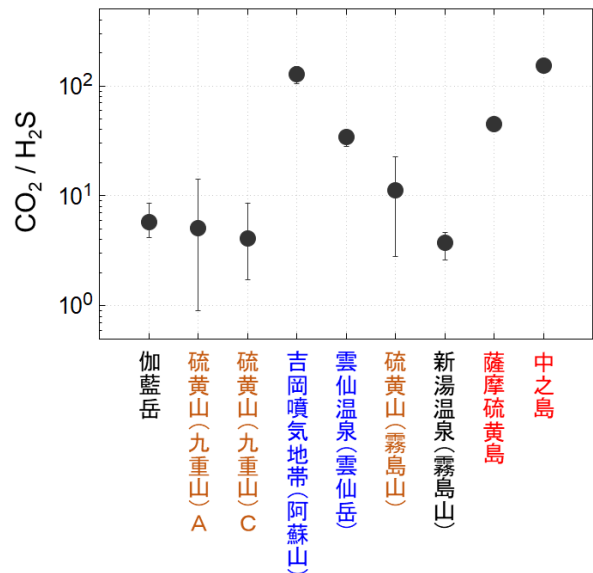


図 11 観測を実施した各火山における CO₂/H₂S
●は平均値を示し、それぞれのバーは最小値と最大値の幅を示す。
縦棒：CO₂/H₂S の観測値の範囲

4-1 活動評価に用いることが不向きな火山

火山ガス成分比 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$) を火山活動評価に用いることが最も不向きなのは、火山ガス中に二酸化硫黄が多く含まれる火山、COMPUSS によって二酸化硫黄放出量が定量可能な火山である。これらの火山では、マグマ活動度の高まりにより地下での温度が上昇し、化学平衡式である (1) 式の反応が左側に進み、 H_2S ではなく SO_2 がマグマ活動度を反映する値となる。本稿においては、薩摩硫黄島と中之島がこれに該当し、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は 10 を大きく超えた値で測定されている (図 11)。一方で、両火山とも常態的に二酸化硫黄放出量が観測されており、前者が概ね 1,000 ton/day、後者が概ね 20 ton/day である (気象庁, 2021a, 気象庁, 2021b 気象庁)。

二酸化硫黄放出量は、マグマ活動度によって変化することから、火山活動評価のために、2022 年現在の福岡管内では上記 2 火山の他に、阿蘇山、桜島、口永良部島及び諏訪之瀬島において高頻度の観測を行っている。例えば、口永良部島では 2018 年 10 月及び 2020 年 1 月の噴火に先行して二酸化硫黄放出量が増加するなど、マグマ活動度を反映した変化が観測されている (篠原・他, 2022)。このように、マグマ活動度が高くて二酸化硫黄放出量の定量が可能な火山では、火口に近接することが必要となる火山ガス成分比の観測よりも、二酸化硫黄放出量の観測によって火山活動の変化を評価に利用する方が望ましい。

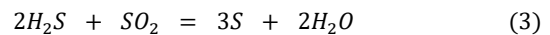
4-2 活動評価に用いる際に注意を要する火山

二酸化硫黄が火山ガス中に定量できるほど含まれず、火山ガス成分比 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$) を火山活動評価へ用いることが期待される場合でも、その値の変化を解釈する際に十分な注意を要する火山がある。これらは、噴気孔の場や噴気活動の状態により、二つのタイプに分けることができる。

一つは、観測する噴気孔の周辺に多量の温泉水の湧出などが見られるなど、ごく浅部に熱水系が強く発達している噴気地帯であり、本稿では吉岡噴気地帯 (阿蘇山) と雲仙温泉 (雲仙岳) がこれに該当する。浅部に地下水や熱水が豊富に存在した場合、水への溶解度の差から H_2S は CO_2 より多く水に溶解込み、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は大きな値として測定される。火山ガス中に二酸化硫黄がほぼ見られず、また、火山ガスへの高温マグマの

関与は低いにもかかわらず、吉岡噴気地帯と雲仙温泉の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ は 10 を超え、薩摩硫黄島や中之島に匹敵した値となっている (図 11)。このことは、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の数値を基準としたマグマ活動度の一般的指標を策定できないことを示唆している。また、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ が浅部の地下水や熱水の状態によって変化することから、観測時には噴気孔周辺の状態を観察し、写真などの資料や熱水の温度計測など、後々に考察できる資料を残すことが肝要である。

もう一つのタイプは、二酸化硫黄放出量観測では定量できないまでも、火山ガス中に二酸化硫黄が含まれていて、噴気活動の状態によって H_2S の濃度に影響が出る火山である。本稿では、硫黄山 (九重山) と硫黄山 (霧島山) が該当する。両火山とも $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の平均値は 10 以下であるが、値は安定せず、他の火山よりも変化率が大きいことがわかる (図 11)。また、例えば硫黄山 (霧島山) では、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の増加が 2018 年の噴火後の活動が低下している過程で起こっているなど、火山活動の活発化を示唆する観測データと $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の増加に関係性は見られない (表 7)。これは、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の増加が火山ガスの高温化によって生じた変化ではないことを示唆している。他の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ が増加する理由として、マグマの活動度としては真逆になるが、火山ガスの低温下によって促進される反応式



で説明が可能である。この反応式下において、硫化水素は二酸化硫黄の 2 倍消費されることとなり、噴気孔出口部では $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ が高くなってしまふ。硫黄山 (九重山) や硫黄山 (霧島山) などの、火山ガス中に僅かでも二酸化硫黄が含まれる活動をしている火山では、火山ガスの低温化で $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の増加が生じてしまう (図 12)。火山ガス中に二酸化硫黄が低濃度で含まれる、または噴気孔出口部に硫黄の析出が見られる火山の噴気地帯では、火山活動の活発化によらない $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の増加が起こり得ることに注意が必要である。

4-3 活動評価に適している火山

火山ガス成分比 ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$) を火山活動評価に用いることが最も適しているのは、火山ガス中に二酸化硫黄がほとんど含まれない噴気を伴う火山であり、今回、

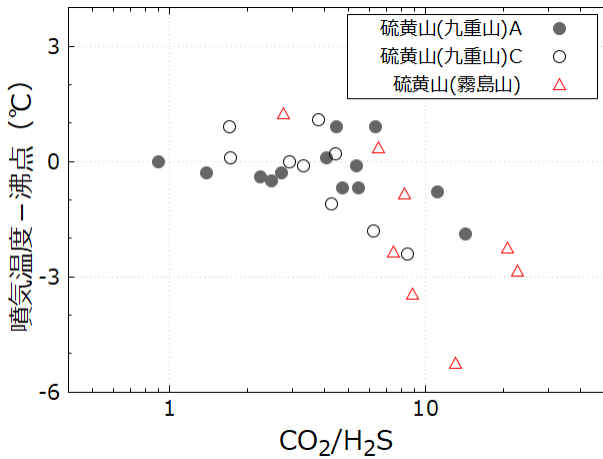


図 12 噴気温度と沸点の差と、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ との関係
 縦軸（噴気温度－沸点）は、サーミスタ温度計で計測された噴気温度と、観測した噴気孔の標高から求められる沸点との差を示す。
 ●：硫黄山（九重山）A 領域
 ○：硫黄山（九重山）C 領域
 △：硫黄山（霧島山）

期間を通して数値に変化が見られなかった伽藍岳と新湯温泉（霧島山）が該当する。実験室での分析ではあるが、伽藍岳は大沢・他（1998）で報告された値、約 5～7 とほぼ同じであることから、長年にわたり

浅部熱水系の活動に変化が起こっていないことがわかる。

これら火山の噴気地帯に変化が生じた場合には、浅部熱水系の活動や状態に変化が生じてきたと推定することが可能であり、火山活動の変化を示唆するものになる。

4-4 火山活動と火山ガス成分の変化

これらの特徴を踏まえた上で、硫黄山（九重山）と硫黄山（霧島山）の $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 及び噴気温度の変化と地震活動、GNSS 基線長の変化を比較してみる（図 13）。

硫黄山（九重山）では、地震活動は低調に推移しているが、GNSS 基線長に緩やかな伸びの傾向が見られているなど、火山活動が緩やかに活発化している傾向が見られる。その中での $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の短期的な変動、例えば 2020 年初頭の噴気温度の低下による $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の上昇などは、測定時の噴気活動の状態による、短期的な揺らぎと考えられる。しかしながら、GNSS 基線長に見られる緩やかな伸びの傾向と同様に、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ にも緩やかな上昇が見えることから、火山活動の緩やかな変化を反映している可能性もある。

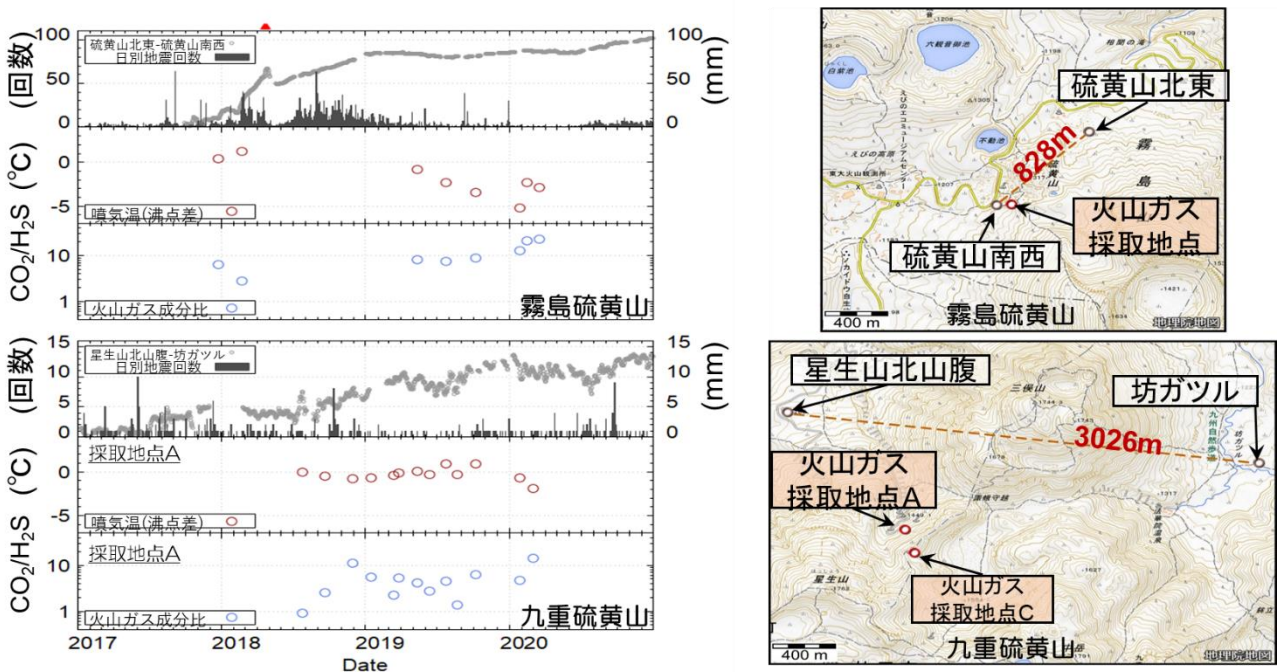


図 13 硫黄山（九重山）及び硫黄山（霧島山）の活動経過と観測点位置
 それぞれ、下段は $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 、中段は噴気温度と沸点との差、上段は日別地震回数と GNSS 基線長の変化。
 硫黄山（九重山）は地点 A のデータを示す。硫黄山（霧島山）の最上段の▲は噴火を示す。

一方、硫黄山（霧島山）では、2018年の噴火の約2ヶ月前の観測において、噴気温度が高いながらも、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の低い値が得られた。この頃は、GNSS基線長が急激に伸び始め、浅部での地震活動が活発化し始めた時期とほぼ一致する。火山ガスの流路が何らかの状態変化によって阻害を受け、マグマ起源の火山ガスである二酸化硫黄放出量が減少すると共に、浅部の地震活動が活発化した事例が、口永良部島の2019年1月噴火前に観測されている（篠原・他、2022）。同様なことが硫黄山（霧島山）で起こっていたとすれば、火山ガスの流動が阻害され、見かけ上 CO_2 の濃度が落ちていた可能性も考えられる。また、硫黄山（霧島山）周辺の複数箇所での噴気ガスの化学組成を調査した結果、2018年4月前後における $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{O}$ の挙動が調査地点ごとに異なっていることが報告されている（東海大・他、2018）。このことは、賦存する熱水系の発達が不安定なために生じる、熱水系の不均質な拮抗りに起因していることが考えられ、熱水系の局所的な状態変化が $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ に影響を与えた可能性もある（Ohba et al., 2019）。

このように、火山ガスの成分はマグマ活動の変化のみに依存するものでなく、浅部熱水系の場合や噴気活動の状態によっても変化することがあることに留意が必要である。その上で、他の観測データと比較することで、その火山におけるマグマの活動がどのようなステージにあるのか、もしくは向かっているのかを解釈し、火山活動を評価することが必要であろう。

5 まとめ

火山ガス成分観測は、火山の噴気地帯において直接採取した火山ガスの組成を化学分析に基づいて知る手法である。火山ガスを構成する微量成分のうち二酸化炭素（ CO_2 ）と二酸化硫黄（ SO_2 ）、硫化水素（ H_2S ）は検知管を使用することで簡略的に濃度を測定でき、熱水系由来成分に対するマグマ起源成分の比率として求めた火山ガス成分比（ $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ）の変動から地下のマグマ活動及び熱水系の変化を把握できる可能性がある。本稿では検知管を用いた火山ガス成分観測の実効性を担保し、高精度・高頻度を実施することを目的に、使用する必要機材や準備品について示し、観測に適した噴気孔の選定、採取した噴気ガスから微量成分（乾燥空気）を抽出するための機器の接続及び設置

の仕方、実際にガス吸引器で吸引・排出操作を繰り返して噴気ガスを冷却して乾燥空気を取り出す方法、検知管を使用して微量成分の濃度を測定する方法等を示した。

検知管を用いた火山ガス成分観測は、九州の各火山にある噴気地帯を対象とし、一部の火山では2017年から、その他の火山でも2018年から開始した。高濃度の二酸化硫黄が検出された薩摩硫黄島や中之島での観測は1回のみであったが、吉岡噴気地帯（阿蘇山）と雲仙温泉（雲仙岳）では年に1・2回程度、伽藍岳や硫黄山（九重山）、硫黄山及び霧島新湯（霧島山）では1・2ヵ月に1回程度の割合で観測を行った。観測の際には各微量成分の濃度測定に加え、噴気中に含まれる二酸化硫黄の有無を示す凝縮水の白濁度を記録に残すことで火山ガスに関わる多くのデータを収集した。これらの測定データを整理し、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ はそれぞれの火山、噴気地帯によって特徴的な値あるいは変化を示し、噴気温度や噴気中の SO_2 濃度、地下熱水系の構造など、噴気地帯の特徴に応じて違いが生じることが明らかになった。

火山ガス成分比 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ の変動から地下のマグマ活動度が推定でき、火山活動評価に最も適しているのは、二酸化硫黄がほぼ検出されず、安定した噴気活動を行っている噴気地帯を持つ火山であることが分かった。火山ガス成分はマグマ活動の変化のみに依存するものでなく、浅部熱水系の構造や表面上の噴気活動の状態によっても変化する。浅部熱水系が大きく発達した噴気地帯や僅かながら二酸化硫黄が検出される噴気地帯を持つ火山においては、噴気地帯表面上での噴気・熱水活動の状態を考慮した上で火山ガス成分比データを解釈せねばならない。また、火山ガス成分の観測データを地震活動や地殻変動などの観測データと比較する際、その火山のマグマ活動がどのようなステージにあるのか、もしくは向かっているのかを解釈し、その状態が生み出す火山ガスの様態を考慮した上で、火山活動評価を行う必要があると考える。

謝辞

本研究を実施するにあたり、気象研究所火山研究部の谷口無我氏には検知管の使用法からデータ解釈に至るまで、幅広くご指導いただきました。また、気象庁地震火山部の菅野智之氏、盛岡地方気象台の藤原健

治氏には研究計画の策定，実行にあたり助言・協力をいただきました。匿名の査読者の方には本稿を構成する上で大変有意義なご指摘をいただきました。

本稿を纏めるにあたり，福岡管区気象台の篠原英一郎氏，池田啓二氏，雑山浩秀氏，古田仁康氏，満永大輔氏，宮崎地方気象台の植村英明氏，鹿児島地方気象台の手繰佳子氏（所属は観測実施当時）には多大なご協力を頂いた。

ここに記して感謝いたします。

文献

- 大沢信二・大上和敏・由佐悠紀 (1998): 伽藍岳の地熱調査(4) -噴気ガスの地球化学-, 大分県温泉調査研究会, **49**, 5-10.
- 風早竜之介・森俊哉 (2016): 火山ガス観測研究から見る地下のマグマ挙動及び噴火現象の解釈, 火山, **61**, 155-170.
- 気象研究所・気象庁 (2016): 2014 年御嶽山噴火前後の傾斜変動と浅部圧力源, 火山噴火予知連絡会会報, **119**, 72-75.
- 気象庁 (1994): 化学分析機器, 火山観測指針 (観測編), 194-198.
- 気象庁 (2021): 第 149 回火山噴火予知連絡会資料その 2 の 6 薩摩硫黄島, 3-9.
- 気象庁 (2021): 第 149 回火山噴火予知連絡会資料その 4 の 1 中之島, 86-87.
- 九州大学理学部 (1995): 九重火山からの二酸化イオウ放出量 (1995 年 10 月), 火山噴火予知連絡会会報, **63**, 58-59.
- 国土地理院 (2013): 霧島山周辺の地殻変動, 火山噴火予知連絡会会報, **110**, 174-187.
- 沢田可洋 (1970a): ガス検知管法による火山ガス分析(第 1 報), 験震時報, **83**, 1-13.
- 沢田可洋 (1970b): ガス検知管法による火山ガス分析(第 2 報), 験震時報, **85**, 15-24.
- 篠原英一郎・菅井明・森健彦・中村政道 (2022): 2018 年～2019 年口永良部島新岳の噴火活動, 験震時報, **85**:8.
- 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**, 121-129.
- 代田寧 (2013): 箱根火山において 2013 年 1 月から発生した群発地震活動に伴う噴気ガス組成の時間変化, 神奈川県温泉地学研究所報告, **45**, 29-34.
- 代田寧・板寺一洋 (2010): 2001 年以後に箱根火山大涌谷北側斜面に現れた噴気中のガス組成等の時間変化, 神奈川県温泉地学研究所報告, **42**, 49-56.
- 代田寧・大場武・谷口無我 (2017): 箱根火山における活動活発化に連動した噴気組成 (C/S 比) の変化, 神奈川県温泉地学研究所報告, **49**, 29-38.
- 高木朗充・谷口正実・太田健治・上田義浩・松末伸一・小窪則夫 (2019): 1950 年代から 2001 年までの気象庁の検知管法による火山ガス成分観測データの調査と解析, 験震時報, **83**:2.
- 寺田暁彦・須藤靖明・吉川慎・井上寛之 (2007): 阿蘇火山吉岡温泉で 2006 年に起きた地熱活動の定量的評価, 火山, **52**, 335-340.
- 東海大学・気象研究所・東京大学・名古屋大学 (2018): 火山噴火予知連絡会会報, **132**, 317-323.
- 平林順一 (2003): 火山ガスと防災, J. Mass Spectrom. Soc. Jpn., **51**, 119-124.
- Iwasaki, I., T. Ozawa and M. Yoshida (1966): Differentiation of volcanic emanation around the boiling point of water in geothermal regions in Japan, Bull. Volcanologique, **29**, 517-527.
- Mori, T., J. Hirabayashi, K. Kazahaya, T. Mori, M. Ohwada, M. Miyashita, H. Iino and Y. Nakahori (2005): A Compact Ultraviolet Spectrometer System (COMPUSS) for Monitoring Volcanic SO₂ Emission: Validation and Preliminary Observation, Bull. Volcanol. Soc. Japan, **52**, 105-112.
- Ohba, T., M. Yaguchi, K. Nishino, N. Nimanami, Y. Daita, C. Sukigara, M. Ito and U. Tsunogai (2019): Time variations in the chemical and isotopic composition of fumarolic gases at Hakone volcano, Honshu Island, Japan, over the earthquake swarm and eruption in 2015, interpreted by magma sealing model, Earth Planets and Space, **71**, 48.
- Ozawa, T. (1968): Chemical analysis of volcanic gases: I. Chemical analysis of volcanic gases containing water vapor, hydrogen chloride, sulfur dioxide, hydrogen sulfide, carbon dioxide, etc, Geochem. Int., **5**, 939-947.
- Takagi, A., S. Onizawa, 2016: Shallow pressure sources associated with the 2007 and 2014 phreatic eruptions of Mt. Ontake, Japan. Earth, Planets and Space, **68**:135.

(編集担当 鳥巢 啓多)

訂正： 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 第86巻 (2023) 5号

Correction of sentence : “The Measurement Method and Effectiveness of Volcanic Gas Component Observation Using a Gas Detector Tube “ Vol 86, 5, 2023

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

Michitomo SUGAHARA, Kyo MATSUMOTO, Yasushi KAWAMURA, Takehiko MORI,
Hideyuki HIRAMATSU and Group of Volcano Gas Component Observation

(Received July 10, 2024: Accepted July 10, 2024)

文章訂正：験震時報 5 頁右段上、写真 8 の説明に誤りがありましたので、次のとおり訂正します。

訂正前

写真 8 ガス検知管 (本研究で使用した三種類)

左：硫化水素 (H₂S)

規定量 100mL (50mL 吸引時は値を 2 倍する)

中：二酸化炭素 (CO₂)

規定量 200mL (100mL 吸引時は値を 2 倍する)

右：二酸化硫黄 (SO₂)

規定量 50mL (100mL 吸引時は値を 1/2 倍する)

訂正後

写真 8 ガス検知管 (本研究で使用した三種類)

左：硫化水素 (H₂S)

規定量 100mL (50mL 吸引時は値を 2 倍する)

中：二酸化炭素 (CO₂)

規定量 50mL (100mL 吸引時は値を 1/2 倍する)

右：二酸化硫黄 (SO₂)

規定量 200mL (100mL 吸引時は値を 2 倍する)

(編集担当 後藤 進)