

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

Outline and Observation Data of the Multi-component Volcanic Gas Observation System Introduced by the Japan Meteorological Agency.

気象庁地震火山部火山課

Volcanological Division, Seismological and Volcanological Department, JMA

(Received September 30, 2020: Accepted June 6, 2022)

1 はじめに

気象庁では、2014年に発生した御嶽山の噴火災害を受けて火山噴火予知連絡会で取りまとめられた「御嶽山の噴火災害を踏まえた活火山の観測体制の強化に関する緊急提言」等を踏まえた火山観測体制の強化の一環として、監視強化の目的で御嶽山に、また、水蒸気噴火の前兆を捉えるための技術開発の

目的で吾妻山、草津白根山、九重山に多成分火山ガス観測システム(以下、「本システム」とする)を2015年から2016年にかけて噴気孔付近に設置し、観測を開始した(図1)(高木・他, 2016)。

気象庁で導入した本システムは、産業技術総合研究所で開発された小型、省電力かつ可搬型のガス濃度を測定する装置(Shinohara et al., 2011)とほぼ同

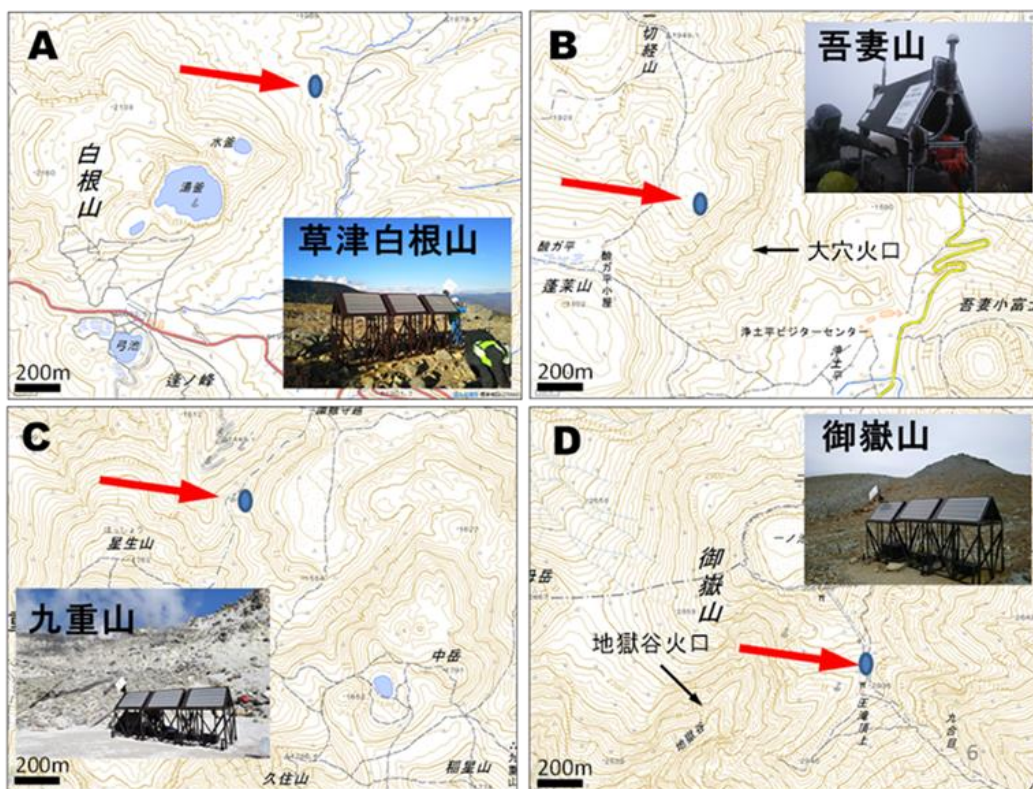


図1 多成分火山ガス観測システム設置地点図(矢印で示した○の位置に設置)(高木・他(2016)より引用). A: 草津白根山, B: 吾妻山, C: 九重山, D: 御嶽山.

様の構成で、固定点で連続観測できるように改良したものである。気象庁で過去に実施されていた検知管による火山ガス組成の観測（高木・他，2019）と異なり，観測者によらず一定の精度で連続して観測を行うことができる。

しかし，データが蓄積されるにしたがって，ノイズ処理や品質管理手法の問題，あるいは化学センサーの感度変化による濃度の見かけの変化など，適切なデータ品質管理を行わなければ，本システムによる観測の信頼性が担保できないことが明らかとなった。このため，信頼性の高い観測データを得るためのデータ品質管理手法について研究が進められ，例えばセンサーの感度変化を補正することで，本システムによる観測値と化学分析や検知管による測定値の比較で一致の程度が改善されたことが報告されている（Kitagawa et al., 2019; 北川・他，2022）。

本報告では，本システムの構成，火山ガスの観測方法，観測データとデータ処理・品質管理について述べ，その後これまでに蓄積された観測データの実例を紹介する。

2 多成分火山ガス観測システムの構成

本システムは，火山ガス計測部，電源部，制御・

通信部，及び筐体で構成される観測点部と，データ集積部からなる（図 2）。観測点部は各火山の噴気孔近くに設置されている。データ集積部は気象庁地震火山部（以下，「本庁」と呼ぶ）に設置され，観測データの集積を行っている。以下の節で各々の概要を示す。

本システムは，火山ガスを噴気孔から直接吸引して観測する機器ではなく，大気で希釈された火山ガスを含む観測点周辺の大気をポンプで吸引し，ガス流路に組み込んだ各センサーによって火山ガス成分ごとに濃度を測定する。この観測方法では，火山ガスが流れてくる場所であれば観測が可能であるが，高濃度の火山ガスを測定できる仕様にはなっていないため，噴気孔からの火山ガスが希釈され，各ガス成分がそれぞれ測定可能な範囲内（表 1）となる程度まで離れた場所が望ましい。筐体の占有面積は数 m² 程度であり，太陽光を用いた発電を行うこと，衛星電話回線を用いてデータ送信を行うことから開空している場所を選定した。また，冬季の積雪により埋没すると周辺の大気を吸引できなくなる等，観測に影響を与えるため，雪の吹き溜まりになるような場所は避けた。

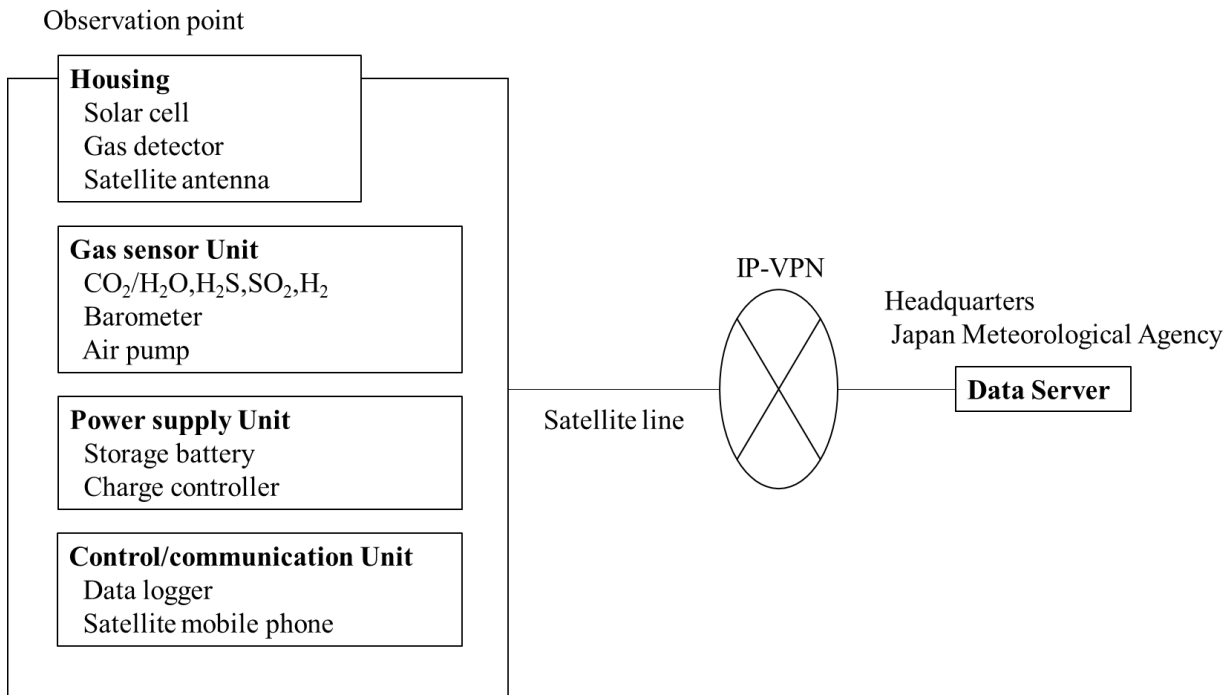


図 2 機器構成・データ伝送図。

表 1 各センサーの測定方式，測定範囲，精度一覧．

	CO ₂ LI-840 LI-COR, Inc.	H ₂ O LI-840 LI-COR, Inc.	SO ₂ KTS-512P Komyo Rikagaku Kogyo K.K.	H ₂ S KHS-5TA Komyo Rikagaku Kogyo K.K.	H ₂ Model GM-12s Sensor Tech
Method	Non-scattering infrared absorption	Non-scattering infrared absorption	Electrochemical	Electrochemical	Semiconductor
Range	0-20,000ppm	0-60,000ppm	0-160ppm	0-50ppm	0.5-50ppm
Accuracy	<1.5%	<1.5% or less	0-5ppm : ±0.5ppm 5.1ppm~ : ±10%	0-30ppm : ±1.5ppm 30.1ppm~ : ±10%	1ppm~ : 10%

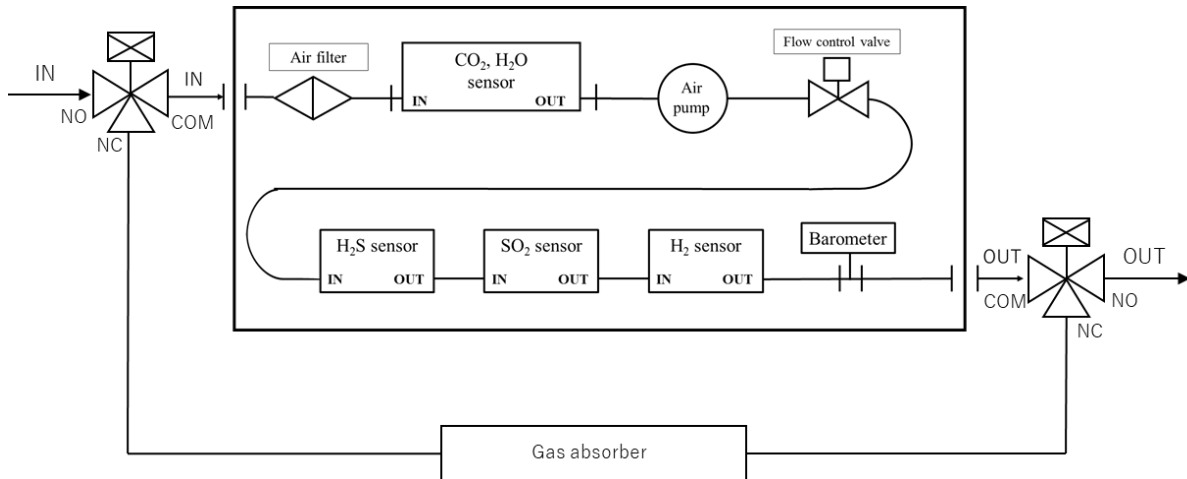


図 3 火山ガス計測部流路図．

2.1 観測点部

2.1.1 火山ガス計測部

測定対象の火山ガス成分は二酸化硫黄 (SO₂)，硫化水素 (H₂S)，二酸化炭素 (CO₂)，水 (H₂O)，水素 (H₂) の 5 種類である (表 1, 図 3)．CO₂・H₂O は 1 つのセンサーで，他の 3 成分はそれぞれ個別のセンサーで測定する．各センサーは直列に配管され，ポンプで火山ガスを含む周辺大気を吸引し，各火山ガス成分の濃度を測定する．火山ガス計測部にはガスセンサー以外に，外気を吸引するためのポンプや，測定した火山ガス濃度を標準気圧における濃度に換算するために必要な気圧を測定する気圧計も管路内に接続している．使用しているガスセンサーの種類，測定方式，測定範囲，精度を表 1 に示す．

各センサーは対応した火山ガス成分の分圧(濃度)に応じた電圧値を出力する．正確な観測を行うには，

各センサーに応じた標準ガスによる定期的な校正が必要となる．連続観測のために観測点ごとに二式の火山ガス計測部を確保し，年 2 回の定期点検時に予め校正したものと交換を行っている．

2.1.2 電源部

観測点部は火山の噴気孔近くに設置しているため，商用電力を利用できない．このため，太陽電池パネル (54W×3) と蓄電池 (34Ah×6)，充放電コントローラーで構成された電源部により，観測に必要な電力を供給している．

電源部の能力は，発電力については装備した蓄電池に対して標準日照で 7 日以内に 90%以上充電でき，蓄電池容量については無給電状態でも 1 日最大 4 回の観測に必要な電力を 10 日以上継続して供給可能なものとなっている．

2.1.3 制御・通信部

制御・通信部は、観測、データ収録、通信の制御及びデータ通信を行う。観測は毎日1回の定時観測（タイマー起動）と、ガス検出器によるガス濃度の高まりを検知した際の臨時観測（1日最大3回）があり、制御部のコントロールボックスで管理されている。観測時間中の毎秒の各火山ガスセンサーが出力した電圧値、気圧、バッテリー電圧、及びその観測時刻は、1回の観測時間ごとに1ファイルの csv 形式データとして現地でデータロガーに収録されるとともに、衛星電話回線を通して NTT docomo 社の提供するビジネス mopera アクセスプレミアム FOMA サービスによる IP-VPN 網を介して、本庁に設置されている火山ガスデータ集積部に専用回線にて送信される。

衛星電話回線は、観測開始時に電源が入り通信状態となる。通信障害等でデータファイルの一部または全部が送信できなかった場合は、次回の観測時に通信状態となった際に再度送信される。通信状態の時には、データ集積部からデータロガーにアクセスしてロガー内の状態を確認することができる。

天候不良などで無給電状態が続き観測の継続に必要な電力が不足した場合、動作を一時的に停止し、電力が回復した際に自動で再起動して観測を再開する。

2.1.4 筐体

筐体は、太陽電池パネル、火山ガス計測部、制御・通信部収納ボックス、及び蓄電池収納ボックスを設置するための架台で、地表面に設置し固定杭で固定している。衛星携帯電話のアンテナ、及び周辺ガス濃度の高まりを検出するためのガス検出器も筐体に

取り付けられている（図 4）。

2.2 データ集積部

データ集積部（火山ガスデータ集積装置）は本庁にのみ設置されている。4 火山に設置された観測点部からのデータを受信し、火山毎に観測年/月毎のフォルダを作成して受信した観測データを収録するとともに、火山ガス濃度へ換算した csv 形式のファイルを出力・収録している。専用のソフトウェアを搭載し、測定されたガス種の濃度や、その濃度比（散布図と回帰直線）を表示することができる。ただし、ノイズ除去等の機能は搭載されていないため、自動処理されたデータにはノイズの影響が残っていることに注意が必要である。

3 多成分火山ガス観測システムによる火山ガスの観測方法

観測は毎日定時（13 時）のタイマー起動、または制御・通信部に直結したガス検出器（図 4 左、Gas detector）によって観測点部周辺の火山ガス濃度が設定した閾値を超えたことを検知した際に臨時に行われる。臨時観測は1日3回までであり、定時観測と合わせると1日最大4回の観測を行う。

定時及び臨時の観測では、始めにガス吸収剤を通した火山ガス成分を含まない空気を循環させて各センサー・配管内部を洗浄する。次にガス流路を切り替えて、周辺大気で希釈された火山ガスを吸引して観測を行う。最後に再度ガス吸収剤を通した空気を循環させて洗浄を行う。1回の観測時間は約1時間、記録のサンプリング間隔は1秒である。

火山ガス計測部は事前に標準ガスを用いて校正作業を行い、得られたデータを用いて出力電圧に対する濃度換算式の係数を求めている。設置期間中はこ

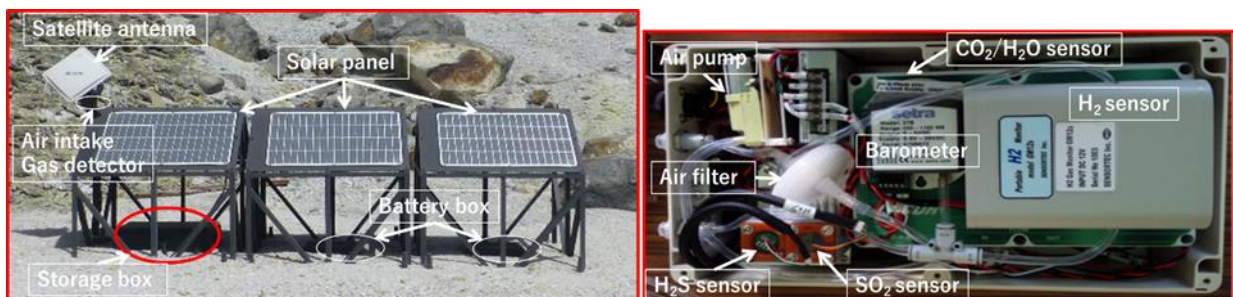


図 4 多成分火山ガス観測システム観測点部の外観（左）及び火山ガス計測部（右）。

の係数を用いてデータ集積部で濃度換算を行う。

SO₂やH₂Sといった大気中に微量なガス成分について検出される濃度変化は、人工的な排出源の影響を無視できる環境にあるため、火山ガスに由来すると考えられる。一方、CO₂やH₂Oは通常の大気中にも検出可能な濃度で含まれ、火山活動に由来しない変化も含めた濃度変化が観測される。複数成分を同時に測定できる本システムでは、大気にほとんど含まれない成分に着目し、その濃度変化に合わせて観測データを解析することで、火山活動の変化を把握するための指標となりうる火山ガス濃度比を算出する。

4 観測データとデータ処理・品質管理

得られた観測記録には周辺環境の影響等のノイズ等も含まれるため、ノイズを除去する等の適切なデータ処理と、品質管理を行う必要がある。以下、これまでに得られた観測データで実施しているデータ処理と観測データ品質管理、その課題について述べる。

4.1 濃度換算

各センサーから出力された電圧値は、観測点でデ

ータロガーに記録されるとともに、観測終了後に火山ガスデータ集積装置に伝送される。伝送された観測データは、データ集積部で成分ごとに濃度換算式(式1~5)を使って電圧値から濃度に換算され、電圧値とともにそれぞれcsv形式のファイルで所定のフォルダに格納される。

濃度換算式で用いる係数は、火山ガス計測部を観測点に設置する前の校正作業で求める。校正された同じ火山ガス計測部での観測期間中は、設置前の校正で得られた濃度換算係数を用いて各成分の濃度を求める。

$$CO_2[ppm] = V_m/1000 \times CO_{2_S} \quad (1)$$

$$H_2O[ppm] = V_m/1000 \times H_2O_S \quad (2)$$

$$SO_2[ppm] = \left(\frac{V_m}{1000} - 0.2\right) \times SO_{2_S} \times 1013/P[hPa] \quad (3)$$

$$H_2S[ppm] = \left(\frac{V_m}{1000} - 0.2\right) \times H_2S_S \times 1013/P[hPa] \quad (4)$$

$$H_2[ppm] = pow\left(10, C\left(\log_{10}(V_m) - \right.$$

$$\left. A \log_{10}\left(\frac{H_2O[ppm]}{1000}\right) - \log_{10}(D)\right)\right) \times 1013/P[hPa] \quad (5)$$

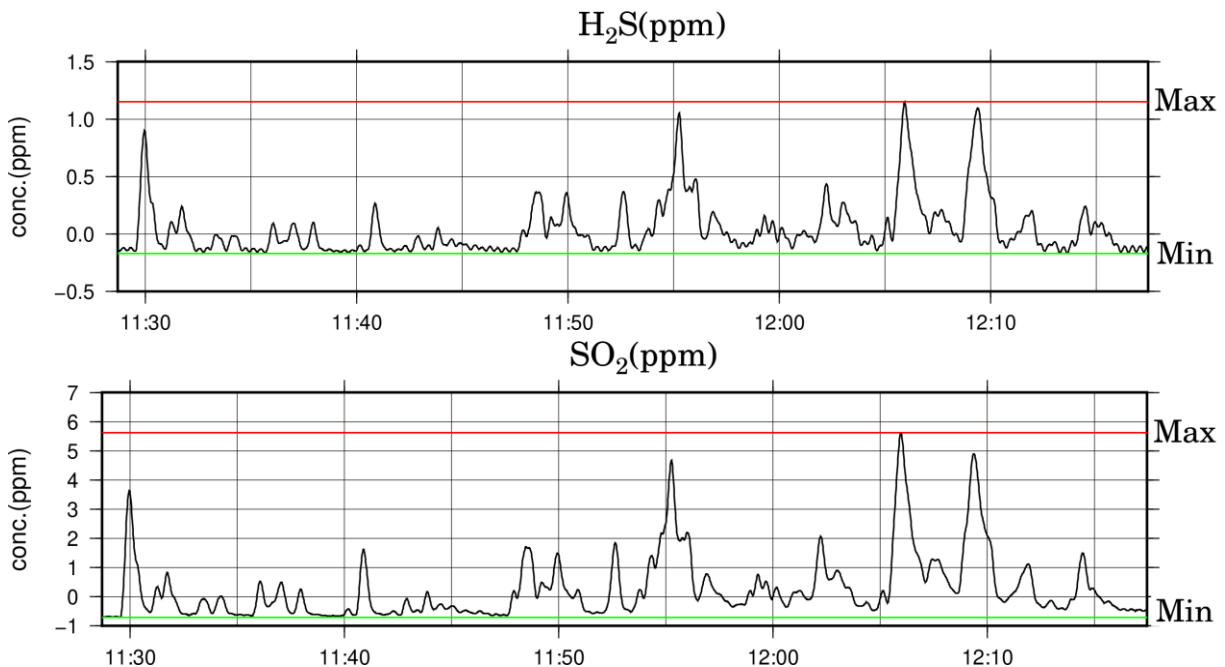


図5 吾妻山多成分火山ガス観測システムによるH₂S, SO₂観測データ(2018年10月24日11:28~12:17)。赤線:最大値, 緑線:最小値。センサーのゼロ点シフトの影響で最小値はマイナスになっている。

ここで、 CO_2_S : CO_2 換算係数, H_2O_S : H_2O 換算係数, SO_2_S : SO_2 換算係数, H_2S_S : H_2S 換算係数, V_m : センサー出力電圧値 (mV), P : 現地気圧, A : H_2O 濃度依存係数, C : H_2 濃度依存係数, D : $H_2O=1ppt$, $H_2=1ppm$ の時のセンサー出力 (mV), (ppm は parts per million (百万分率), ppt は parts per thousand (千分率) を表す). 式 (3), (4) の定数 0.2 は測定対象ガス濃度がゼロの時の電圧に対応している. また, 式 (3), (4), (5) の定数 1013 は標準大気圧 (hPa) である.

センサーの出力電圧値を 15 秒移動平均した値を用いて濃度算出を行っている.

観測データ品質管理のために, 交換し回収した火山ガス計測部についても校正を行って係数を求めている. 係数が設置前の値と比較して大きく変化している場合には, 必要に応じて観測データの補正を行う.

観測時間中, 噴気孔や観測点部周辺の大気状態(風向, 風速等)は常に変化しているため, 観測される大気に含まれる火山ガスの希釈割合も常に変化する(図 5). 火山ガスを含まない大気中の CO_2 , H_2O 等の濃度が観測時間中一定であると仮定し, 観測時間中の最小値がその濃度と考えると, 各観測値と最小値との差分は大気の影響やセンサーのゼロ点シフトの影響が取り除かれた火山ガス由来の濃度とみなすことができる. 得られた濃度の最大値と最小値の差分を観測濃度として, 4.3 で述べる観測データ品質管理に用いている.

4.2 濃度比の算出

ガス成分 a と b の濃度比 (a/b) は, 4.1 の濃度換算で得られた a と b の濃度変化を用いた相関解析によって求められる.

観測される火山ガスの濃度は大気による希釈割合等の影響を受けるため, 噴気孔から放出される火山ガス濃度が一定であっても観測される濃度は変化する. 観測中の大気組成, 放出された火山ガスの組成が一定であると仮定すると, a と b の濃度変化は相関解析で高い相関を示すことが期待される. 実際の観測データでは, 大気中に含まれない火山ガス由来の成分である SO_2 や H_2S 濃度の変動と, 大気中にも含まれる CO_2 濃度の変動を相関解析したところ, 高い相関があった(図 6(a),(b)). 散布図より得られる回帰直線の傾きから濃度比を求める(図 6(c)).

【手順】

- ①ガス成分 a 及び b の測定データで, 異常値を含んでいる場合には異常値を含む時間のデータを両成分ともに削除する.
- ②ガス成分 a の濃度を縦軸, b の濃度を横軸として散布図を作成する.
- ③散布図から近似直線(式 (6))及び決定係数 (R^2) を求める.

$$Conc_a = \alpha Conc_b + \beta \quad (6)$$

ここで, $Conc_a$: ガス成分 a の濃度, $Conc_b$: ガス成分 b の濃度, α : 傾き, β : 切片.

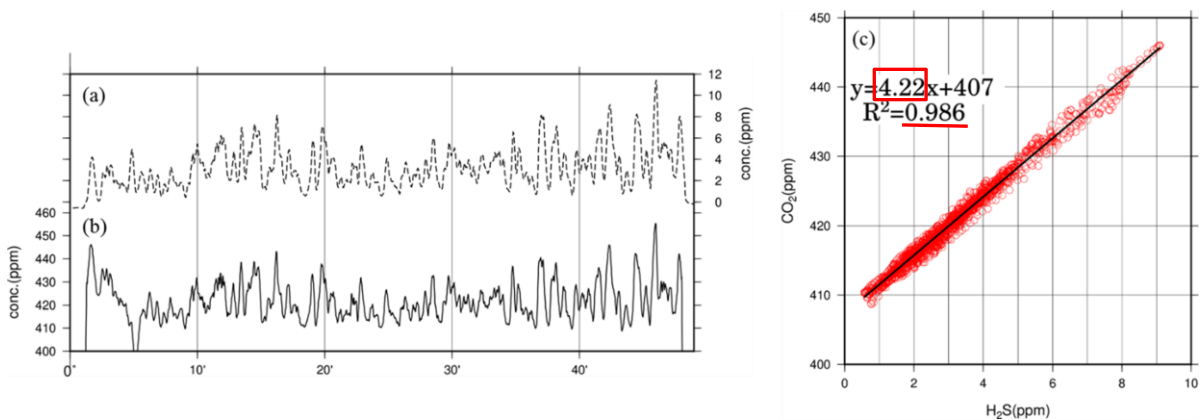


図 6 草津白根山多成分火山ガス観測システムデータ (2019 年 10 月 28 日 13:07~13:57) による H_2S 濃度(a), CO_2 濃度(b)と CO_2/H_2S 散布図(c)の例. 黒線: 回帰直線, 赤枠: CO_2/H_2S 比, 赤下線: 決定係数.

この手順で求めた近似直線の傾き α が濃度比 a/b となる。1 回の観測時間中に複数の近似直線を引けるようなデータが得られる場合がある。この場合、ソフトウェア「Ratiocalc」(Tamburello, 2015) を用いることで近似直線の傾き α を詳細に解析することが可能である。

4.3 観測データ品質管理

観測データを解析するには、ノイズや見かけの変化の影響を極力取り除き、信頼性の高いデータを用いる必要がある。以下、これまでに実施してきたノイズの影響の除去、センサー感度変化の補正手法について述べる。

4.3.1 ノイズの影響と除去

これまでに以下に示すようなノイズが確認されている。

- ① 内部流路の切り替え直後の濃度変化、CO₂・H₂O センサー温度の安定化によるノイズ (図 7)
- ② 測定開始から 20 分間程度にわたる水素ガスセンサーの見かけ上の濃度変化 (図 8)
- ③ 電圧の変動によるノイズ (図 9)

①は特に CO₂、H₂O センサーで顕著にみられている。CO₂、H₂O センサーは、測定器内部を加熱していることもあり、20 分程度の暖機運転が必要であるとされていることから、その間の温度変化が観測値に現れていると考えられる。夏季においては観測開始から 20 分以降のデータにはほとんど影響を与えないことから、解析に使用するデータの始点を決めてしまうことでこのノイズの影響を機械的に除去することができる。冬季においては 20 分以降にも影響を与える場合があるため、データ処理時に採用するデータをチェックする必要がある。

図 7 において黒丸で囲った部分は、先に述べたセンサーの安定化に伴うと考えられるノイズである。図 7 で 15~25 分辺りに見られる濃度変化 (赤枠) は内部流路の切り替えに伴うものであり、この部分は観測データとして不適切なためデータ解析には使えない。濃度比等の算出には、これらのデータを含まない範囲を用いる。

②は前述の電源部の蓄電池からの H₂ 漏洩によるノイズと考えられる。3.3 で述べたように、装置停止中に蓄電池で発生した H₂ が配管内にも拡散混入し

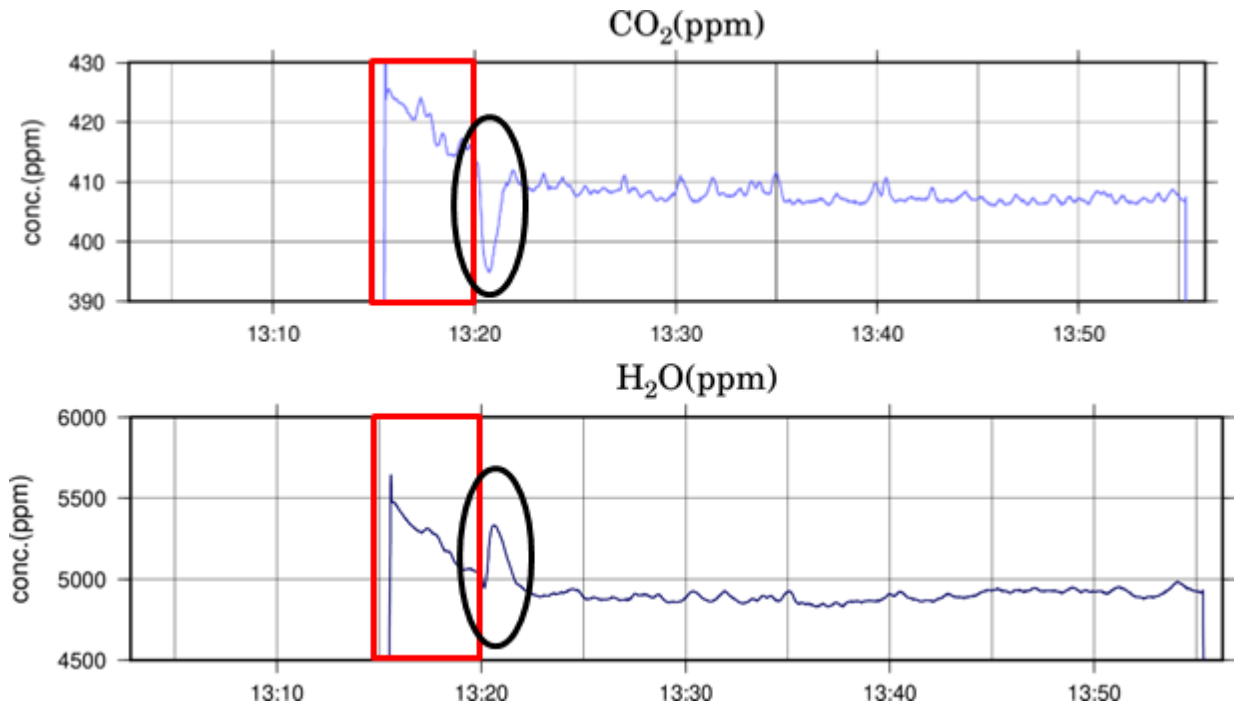


図 7 配管切り替え直後の濃度変化 (赤) とセンサー温度の安定化 (黒) によるノイズの例 (2017 年 1 月 1 日 草津白根山観測データ)。

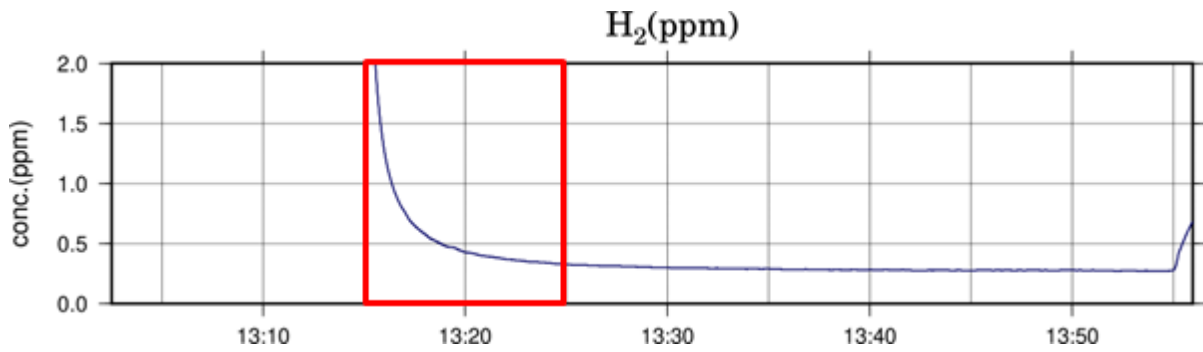


図 8 H₂センサーで現れる顕著な変化（赤枠内）. 2016 年 10 月 21 日, 九重山観測データ.

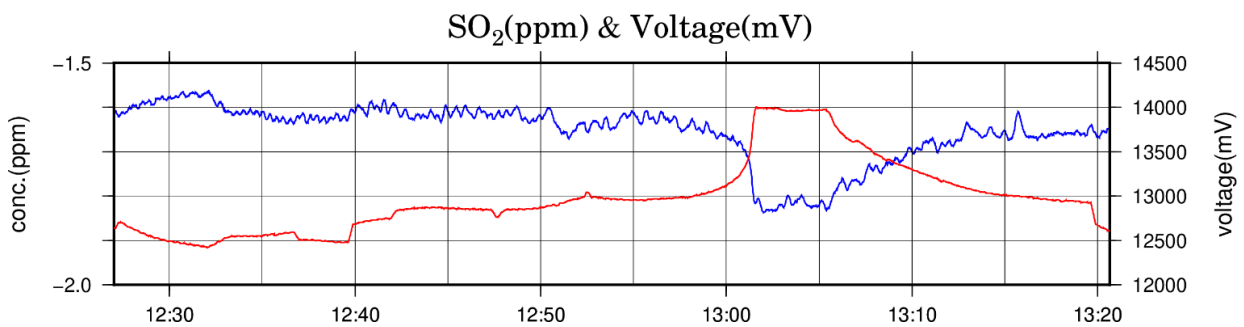


図 9 電圧の変動によるノイズの例. 2017 年 7 月 15 日 草津白根山観測データ. 赤: 電圧値, 青: SO₂ 濃度. 1000mV の電圧変動に対し, SO₂ が 0.2ppm 程度変化している.

ているため, 装置起動直後には数 ppm 以上の非常に高い H₂ 濃度を示すことがある. H₂ センサーの出力の減衰時間は大きいため, 低濃度の H₂ 測定のためにはこのノイズの減衰を待つ必要がある. H₂ 混入を避けるための装置の改善を図っているが, 完全に除去しきれていない. この影響が大きく残るため, データ処理の自動化における問題となっている. 現在のところ, 本システムを設置した火山で H₂ を定常的に検出している火山はない. このため, H₂ を含む解析の際には H₂ ガスを検出していると考えられる前後のデータを抜き出して解析を行っている.

③は全てのセンサーに影響が出るが, 特に低濃度時の SO₂, H₂S センサーへの影響が大きい. 高濃度の場合には S/N 比が大きいため電圧変化によるシグナルもノイズとして処理できるが, 濃度が低い場合, S/N 比が小さいため影響が大きい. このため, 観測濃度に閾値を設けることでノイズの影響が大きいと推定されるデータは除去する.

実際の観測では, センサー精度(メーカー公称値)未達の観測値も多数あり, 中には濃度変化をとらえられていると推定されるデータが含まれている. メーカー公称値を閾値とした場合, 得られるデータ数が少なくなるため, 得られた観測データの S/N 比を勘案し, 観測濃度が SO₂ で 0.5ppm (吾妻山: メーカー公称値下限), H₂S で 1ppm (草津白根山, 九重山: メーカー公称値未満) 以上のデータを解析に用いている. 御嶽山では, 観測される濃度が低下したため H₂S で 0.5ppm 以上 (メーカー公称値未満) のデータを用いている.

火山ガスは, 配管に連結された各センサーによってほぼ同時に測定され, また火山ガスに由来する濃度変化はガス成分によらず同時に起こると考えられるが, センサーごとに応答速度は異なる. このため, 相関解析において成分 a に対して成分 b の時刻を -45 ~ +45 秒の範囲でずらし, 決定係数 (R²) が最大となる回帰直線の傾きを濃度比とすることで, センサ

一応答速度の影響を除去している。

濃度比の解析値の品質は、ガス濃度による閾値に加え、回帰直線の R² 値に閾値 (>0.6) を設けることで管理している。

4.3.2 センサー感度変化の補正手法

草津白根山、九重山では、H₂S センサーの設置前校正時の濃度換算係数と回収後校正時の濃度換算係数に大きな差が生じていることがあった。草津白根山の例では最大で 1.93 倍の変化があった (表 2)。

センサーの感度変化は濃度や濃度比の見かけの変化を与えることから、観測データを利用するためには感度補正が必要となる。センサーの感度補正を行った本システムの観測データと採取による分析値、検知管による測定値との比較により、観測データに対して行った感度補正の妥当性が検証されている (北川・他, 2022)。

本項では、北川・他 (2022) による感度補正手法とその結果について簡単に述べる。

観測期間中、センサーの感度変化は時間の関数として線形近似できるものと仮定し、設置前と回収後の校正データを基に補正式を求める (式(7))。

$$y = \{(C_b - C_a)/a\} \times x + C_a \quad (7)$$

ここで、 x : 観測前校正日から経過した日数 (day),
 y : 経過日数 x における補正後の濃度換算係数 (ppm/V),
 C_a : 観測前校正での濃度換算係数 (ppm/V),
 C_b : 観測後校正での濃度換算係数 (ppm/V),
 a : 校正間隔 (day)

草津白根山と九重山の感度補正前の時系列データでは、火山ガス計測部の交換前後で CO₂/H₂S 比に段差が生じている (図 10a,b) が、感度補正後の時系列データでは段差が解消された。両火山のデータに、(7)式の補正を行った結果と、現地で採取された火山ガスの湿式分析結果や検知管による観測結果とは良い一致を示した (図 10a,b,c,d 青丸との比較) (Ohba et al., 2019; 福岡管区気象台・他, 私信)。

4.4 観測及びデータ品質管理の課題

データ品質管理手法の研究が進み、解析に不適当なデータを排除し、センサー感度変化を補正することで信頼性の高いデータを得られることが分かってきた (北川・他, 2022)。

しかし、感度補正で式 (7) を用いるためには、火山ガス計測部を回収した後のセンサー校正が必要となる。観測データから火山活動の解釈を行うにはセンサーの電圧感度変化について考慮する必要があるが、設置期間中はデータに対する補正はできない。このことは火山監視には大きな制約となる。このため、設置期間中でも適用可能な補正手法について研究を進めている (Kitagawa et al., 2019)。

また、SO₂ センサーも H₂S センサーと同じ定電位電解式化学センサーであるため感度変化を生じる可能性があるが、これまでに得られた吾妻山のデータでは明瞭な感度変化を生じた事例は確認できていない (表 3)。引き続きデータの蓄積・検討が必要である。

表 2 設置前・回収後校正における濃度換算係数の変化 (草津白根山)。

Date of pre-installation calibration	Date of post-withdrawal calibration	days	H ₂ S calibration value			CO ₂ calibration value		
			before instllation	after withdrawal	ratio	before instllation	after withdrawal	ratio
2016/10/7	2017/8/4	301	57.23	110.63	1.93	400	409.4	1.02
2017/6/13	2017/11/6	146	57.57	93.60	1.63	400	407.0	1.02
2017/10/18	2018/10/18	365	63.93	118.19	1.85	400	412.4	1.03
2018/4/18	2019/7/25	463	65.00	111.22	1.71	400	399.5	1.00
2019/6/11	2019/11/5	147	64.26	71.44	1.11	1000	1011.0	1.01
2019/10/7	2020/7/21	288	62.92	72.33	1.15	1000	1011.8	1.01
2020/4/17	2020/11/13	210	63.99	73.44	1.15	1000	1011.0	1.01

H₂ センサーは毎回の観測開始時に平常時よりも高い濃度を示し、その後徐々に低下する。原因は電源部で発生する H₂ と考えられ、電源ケーブルの配管を閉塞することで影響は小さくなったが完全には解消できていない。引き続き装置の改善を行い、最適な状態を見つける必要がある。また、H₂O センサー

では、周辺大気の湿度によっては火山ガス由来の変動が埋もれてしまう場合がある。吸入した火山ガスを含む大気が結露することなく H₂O センサーに導入されるように、外気吸入部のヒーターを強化する等の対処法を検討する必要がある。

CO₂/H₂S ratio

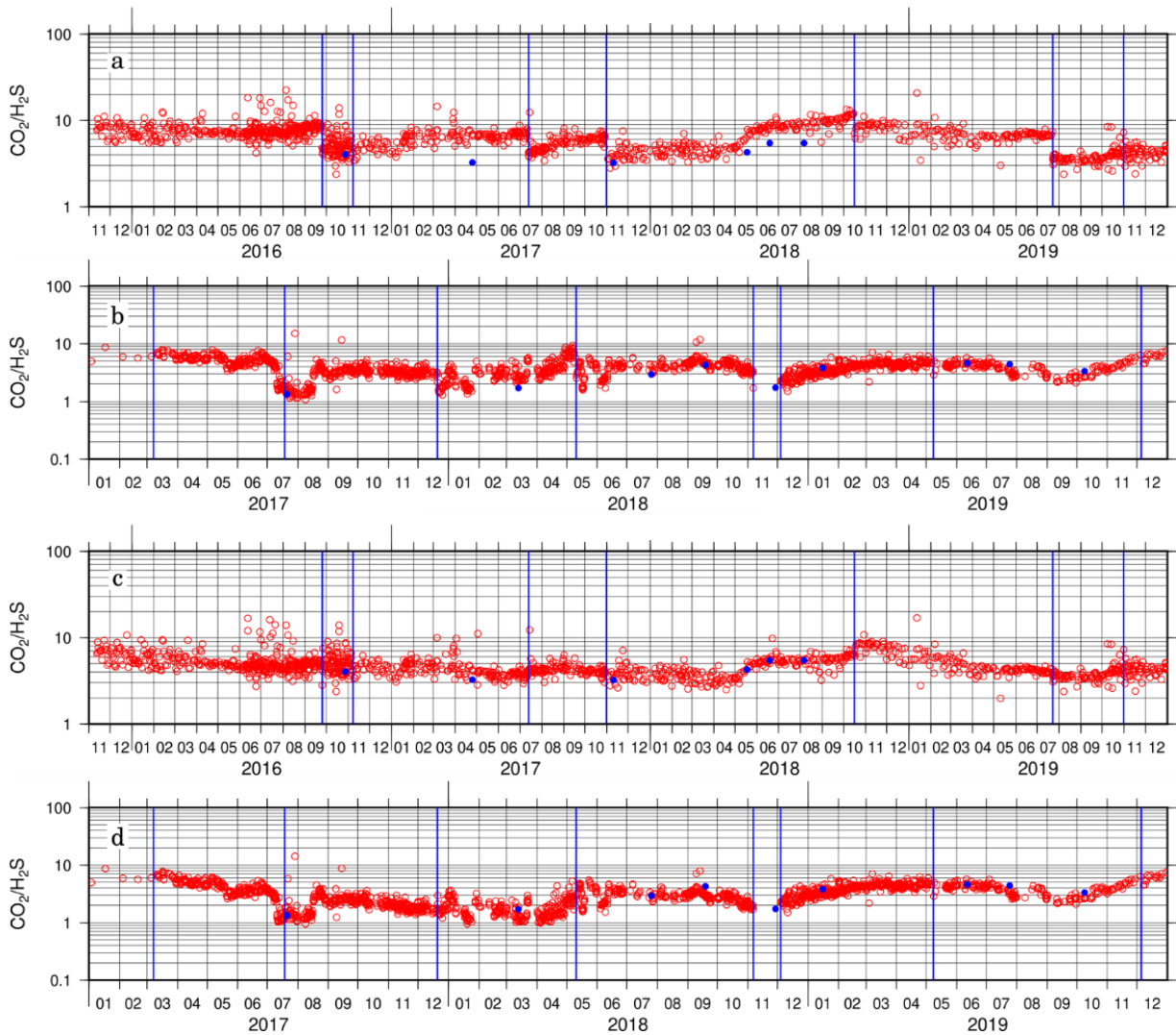


図 10 感度補正式 (7) による補正前 a, b と補正後 c, d の CO₂/H₂S 比の時系列データ (北川・他 2022 の Fig. 3, 5 より)。

2016 年 11 月 6 日～2019 年 12 月 31 日まで 草津白根山観測データ a, c.

2017 年 1 月 1 日～2019 年 12 月 31 日まで 九重山観測データ b, d.

青線：火山ガス計測部交換，青丸：採取ガスの分析値から求めた CO₂/H₂S 比 (草津白根山は Ohba et al. (2019) より引用，九重山は福岡管区気象台・他 (私信) のデータを使用)。

感度補正前 a, b では時間経過とともに採取ガスの分析値との差が大きくなっているが，感度補正後 c, d では差は小さくなっている。

表3 設置前・回収後校正における濃度換算係数の変化（吾妻山）.

Date of pre-installation calibration	Date of post-withdrawal calibration	days	H ₂ S calibration value			SO ₂ calibration value		
			before instllation	after withdrawal	ratio	before instllation	after withdrawal	ratio
2016/10/12	2017/7/27	288	57.23	66.58	1.16	209.35	211.68	1.01
2017/6/2	2017/11/9	160	59.23	68.94	1.16	203.08	209.11	1.03
2017/10/17	2018/6/12	238	61.11	62.76	1.03	221.62	263.77	1.19
2018/4/19	2019/9/5	504	65.08	79.55	1.22	198.13	187.39	0.95
2019/6/7	2019/11/1	147	58.92	62.58	1.06	201.25	204.70	1.02
2019/9/9	2020/6/26	291	63.47	67.88	1.07	200.40	193.99	0.97
2020/4/22	2020/10/23	184	62.90	62.06	0.99	199.15	200.00	1.00

5 多成分火山ガス観測システムによる観測データの実例

本章では、本システムによる時系列データを紹介する。データ処理、品質管理、感度補正は本稿で述べた手法による。H₂データは検出された際に必要に応じて解析を行うため、時系列データには含まない。

5.1 吾妻山

吾妻山では2015年11月22日より観測を開始した(図11)。他の火山と異なり、SO₂が定常的に観測されていること、土壌ガス由来と考えられるCO₂濃度が高くCO₂-SO₂、CO₂-H₂S 散布図データで回帰直線のR²値が小さい場合が多い。ガス濃度比の時系列データはSO₂/H₂S比で示すことが有効である。SO₂/H₂S比は観測開始から2018年半ばまでゆっくりと低下傾向にあった(図11a)。

2018年7月の火山性微動発生(仙台管区気象台, 2018)とほぼ同時期から、SO₂、H₂S濃度の急増とSO₂/H₂S比の上昇が観測された。傾斜計や地磁気のデータでも、ほぼ同時期に活動の活発化を示すと考えられる変化を捉えていることが分かった(仙台管区気象台, 2019, 関・他, 2021)。また、2019年1月以降、2前後と10前後の異なるSO₂/H₂S比が観測されるようになった(図11a)。このことから、装置周辺で異なるSO₂/H₂S比の火山ガス成分を放出する新たな噴気孔が生じた可能性がある。また、観測濃度の増加は長期間にわたり継続していたことから、季節変動等周辺環境の影響ではなく、噴気量の増加、

あるいは噴気中濃度の増加(脱ガス量の増加)を反映していた可能性が高い。

5.2 草津白根山

草津白根山では2015年11月6日より観測を開始した(図12)。SO₂は検出されないため、ガス濃度比の時系列データはCO₂/H₂S比で示している。

CO₂/H₂S比は観測開始から2018年4月頃まで、多少の増減はあるもののゆっくりと低下傾向にあったが、2018年4月及び9月の火山性地震が多発した時期に、CO₂/H₂S比の上昇が観測された(図12a)。傾斜計や地磁気のデータでも同じ時期に膨張や熱消磁と考えられる変化が観測されていた(気象庁, 2019b)。これらの変化とCO₂/H₂S比の変化が同期して捉えられていることから、観測されたCO₂/H₂S比の変化は火山活動を反映したものと考えられる(風早・他, 2019)。

5.3 御嶽山

御嶽山では2016年9月16日より観測を開始した(図13)。SO₂は検出されないため、ガス濃度比の時系列データはCO₂/H₂S比で示している。他の火山と異なり、濃度比のばらつきが大きく、1回の観測で得られたデータの散布図で回帰直線が二本引けるデータが頻繁にみられるという、特徴のある観測データが得られていた。このことから、CO₂/H₂S比の異なる複数の噴気を観測している可能性が示唆された。観測データの妥当性を検証するために気象研究所による現地調査が行われ、本システムの観測点部近傍で濃度比の異なる噴気孔が確認された(高木・他

2018). この結果から、1 回の観測中に濃度比が異なるガスが含まれていた場合、相関解析で複数の回帰直線を求めることにより、複数の組成をそれぞれ推定できることが確認された。これはのちに吾妻山で類似のデータが得られた際の解釈に役立った。

2018 年中頃からは、本システムによる観測データでは、CO₂/H₂S 比の高い噴気は観測される頻度が徐々に低下し、主に比の低い噴気が観測されている (図 13a)。同時期に、火口カメラで確認される噴気量の減少、熱カメラによって観測された温度低下等で CO₂/H₂S 比の高いほうの噴気の衰退が確認されている (気象庁, 2019a)。このことから、CO₂/H₂S 比の変化は噴気の衰退の状況を反映しているものと考えられる。

5.4 九重山

九重山では 2016 年 10 月 21 日より観測を開始した (図 14)。SO₂ は検出されないため、ガス濃度比の時系列データは CO₂/H₂S 比で示している。

本システムを設置した他の 3 火山に先駆けて、2017 年 7 月から 8 月にかけて CO₂/H₂S 比の明瞭な低下と、H₂S 及び CO₂ 濃度の急増が観測された (図 14a,c 及び d)。観測データに変化がみられた時期に前後して B 型地震が発生しており (福岡管区気象台, 2017)、地磁気では同時期に熱消磁の傾向がみられていた (福岡管区気象台, 2018)。地磁気の変化はその後にも継続しているが、CO₂/H₂S 比の変化は 2017 年 10 月には変化前の値まで戻り、その後は低下/上昇を繰り返している。他の火山とは異なり、短期間で濃度比の変化が繰り返し観測されているが、地磁気・火山ガス濃度比以外の観測データで目立った変化はみられていない。地磁気は熱消磁の傾向が続いていることから、ガス濃度比の変化は地下浅部の高温化を示唆している可能性がある。

6 まとめ

本システムによって連続した火山ガスデータが得られるようになった。複数回の火山ガス計測部交換を経て、H₂S センサーで感度変化を生じる場合があることが判明した。データ品質管理手法の開発・検討を経て、センサーの感度変化の影響は感度補正を行うことで解消され、化学分析や検知管による観測データとも一致する観測結果を得られることが確認

された。

データ品質管理を行った吾妻山や草津白根山の時系列データでは、地震・傾斜計・地磁気の観測データで火山活動の活発化を示すデータが得られた事例において、本システムによる観測データでもほぼ同時期に濃度比 (草津白根山では CO₂/H₂S 比、吾妻山では SO₂/H₂S 比) の変化を捉えていたことが判明した。

以上から、本システムで得られた観測データに適切な品質管理を行うことで、火山ガスの化学分析や検知管による現地観測と同程度の精度で連続観測データを得られる可能性が示された。しかし、火山ガス計測部を回収した後に校正を行わなければ、観測データに対し電圧感度補正が行えないことから、本システムによる観測データを火山活動監視・評価に活用していくためには、校正データを用いない感度補正手法の研究を進める等、データ品質管理の研究をさらに進めること、また、地球物理的観測データと合わせた解析事例を蓄積し、多項目の観測データを活用して理解を深めることが必要である。

謝辞

産業技術総合研究所招聘研究員篠原宏志氏には、本システムの改善やデータ解析方法等、多岐にわたってご助言・ご支援を頂きました。九重山の比較観測データは、気象研究所・福岡管区気象台・大分地方気象台の地方共同研究で得られたデータを使用させて頂きました。ここに記して感謝します。

文献

- 風早竜之介・北川隆洋・大場武・谷口無我・寺田暁彦・神田径 (2019): 草津白根山(湯釜)の火山活動に対応した火山ガス組成変化, 日本火山学会予稿集, B2-09, doi:10.18940/vsj.2019.0_75.
- 気象庁 (2019a): 第 143 回火山噴火予知連絡会資料, その 4 の 3-2, 115-124, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryoy/143/143_04-3-2.pdf, (参照 2021-02-08).
- 気象庁 (2019b): 第 144 回火山噴火予知連絡会資料, その 1-1, 38-96, https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/CCPVE/shiryoy/144/144_01-1.pdf, (参

- 照 2021-02-08).
- 北川隆洋・風早竜之介・谷口無我・篠原宏志・福岡管区
気象台・大分地方気象台 (2022): Multi-GAS 連続観
測における硫化水素センサーの感度変化の影響と
その補正, 火山, **67**, 113-123.
- 関晋・丹原裕・山村卓也・佐々木康気・松浦茂郎・越谷
英樹・近江克也・近澤心・若生勝・岡田純・碓井勇二
(2021): 2018 年から 2019 年にかけての吾妻山の火山
活動, 験震時報, **85**: 4.
- 仙台管区気象台 (2018): 吾妻山火山活動解説資料 2018
年 7 月, [https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/
STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/18m07/
213_18m07.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/18m07/213_18m07.pdf), (参照 2021-02-08).
- 仙台管区気象台 (2019): 吾妻山火山活動解説資料 2019
年 1 月, [https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/
STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/19m01/
213_19m01.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/sendai/19m01/213_19m01.pdf), (参照 2021-02-08).
- 高木朗充・鳥巢啓多・篠原宏志 (2016): 気象庁の多成分
火山ガス連続観測装置の整備, 日本地球惑星科学連合
大会予稿集, SVC47-P44.
- 高木朗充・谷口無我・北川隆洋 (2018): 御嶽山の 2014 年
噴火口と 1979 年噴火口のガス成分比, 日本地球惑星
科学連合大会予稿集, SVC42-P02.
- 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.
- 福岡管区気象台 (2017): 九重山火山活動解説資料 2017
年 7 月, [https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/
STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/17m07/502_
17m07.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/17m07/502_17m07.pdf), (参照 2021-02-08).
- 福岡管区気象台 (2018): 九重山火山活動解説資料 2018
年 6 月, [https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/
STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/18m06/502_
18m06.pdf](https://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/monthly_v-act_doc/fukuoka/18m06/502_18m06.pdf), (参照 2021-02-08).
- Kitagawa, T., Kazahaya, R., Yaguchi, M., Horiguchi, K.,
Kanno, T., and Shinohara, H. (2019): Continuous Multi-
GAS observations at volcanoes in Japan: Data quality
control and examination for correction of sensor sensitivity
changes, AGU Fall Meeting 2019, V31H-0096.
- Ohba, T., Yaguchi, M., Nishino, K., Numanami, N., Tsunogai,
U., Ito, M. and Shingubara, R. (2019a) Time variation in
the chemical and isotopic composition of fumarolic gasses
at Kusatsu-Shirane volcano, Japan, *Frontiers in Earth
Science*, **7**:249, doi:10.3389/feart.2019.00249.
- Shinohara, H., Matsushima, N., Kazahaya, K., and Ohwada,
M. (2011): Magma-hydrothermal system interaction
inferred from volcanic gas measurements obtained
during 2003-2008 at Meakandake volcano, Hokkaido,
Japan. *Bull. Volcanol.*, **73**, 409–421,
doi:10.1007/s00445-011-0463-2.
- Tamburello, G. (2015): Ratiocalc: Software for processing
data from multicomponent volcanic gas analyzers,
Computers & Geosciences, **82**, 63-67, doi.org/10.1016/
j.cageo.2015.05.004.

(編集担当 山里 平)

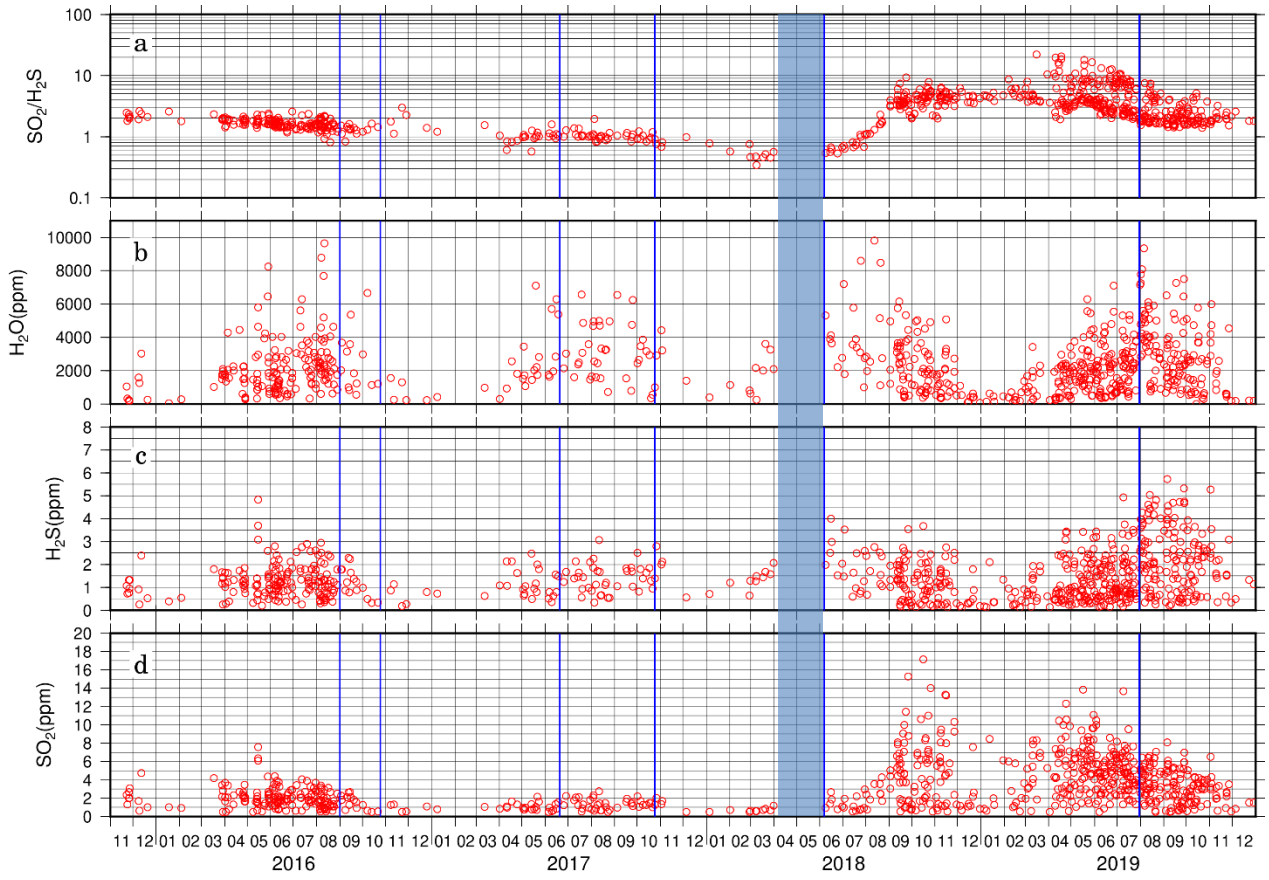


図 11 吾妻山観測データ． a: $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比， b: H_2O 濃度， c: H_2S 濃度， d: SO_2 濃度． 塗りつぶし部分は欠測を示す．

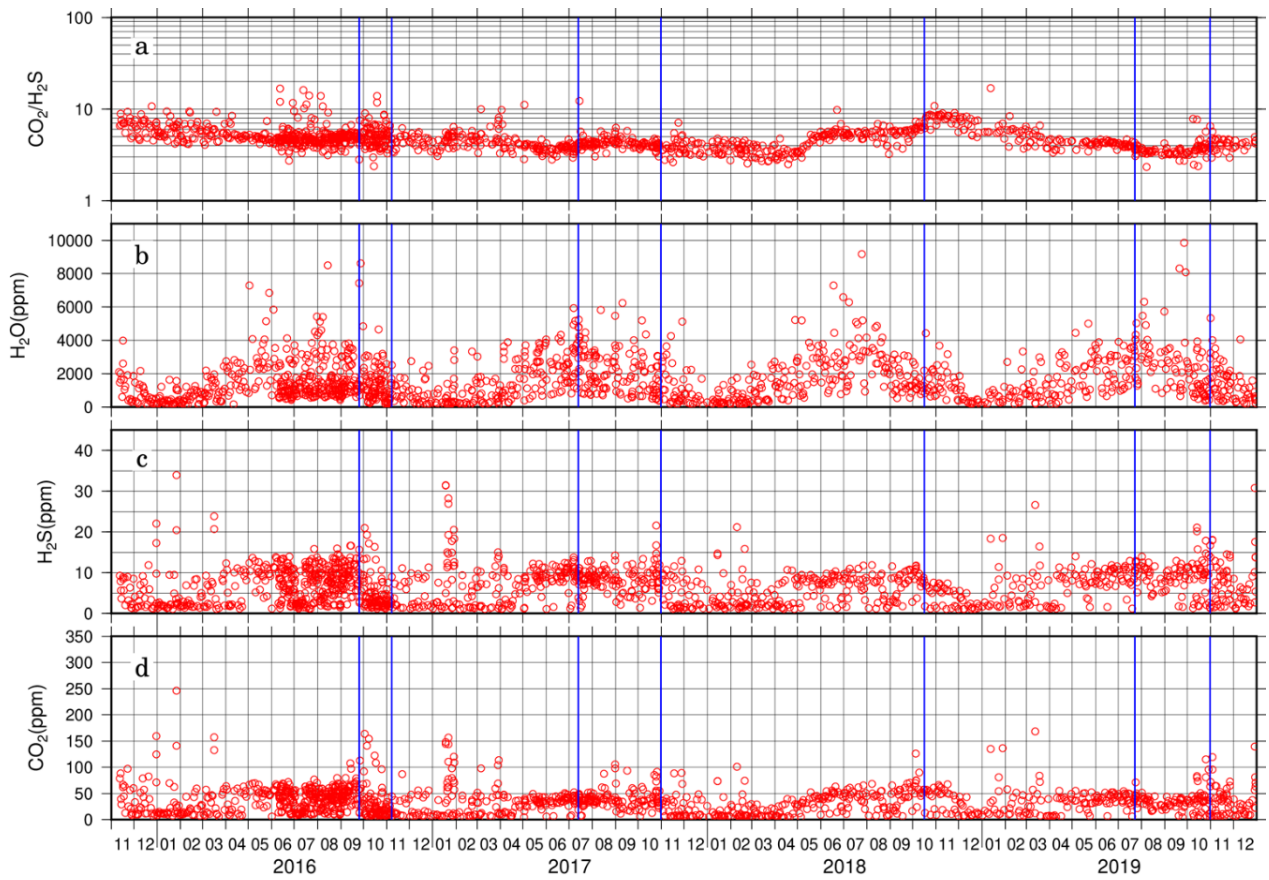


図 12 草津白根山観測データ. a: CO₂/H₂S 比, b: H₂O 濃度, c: H₂S 濃度, d: CO₂ 濃度.

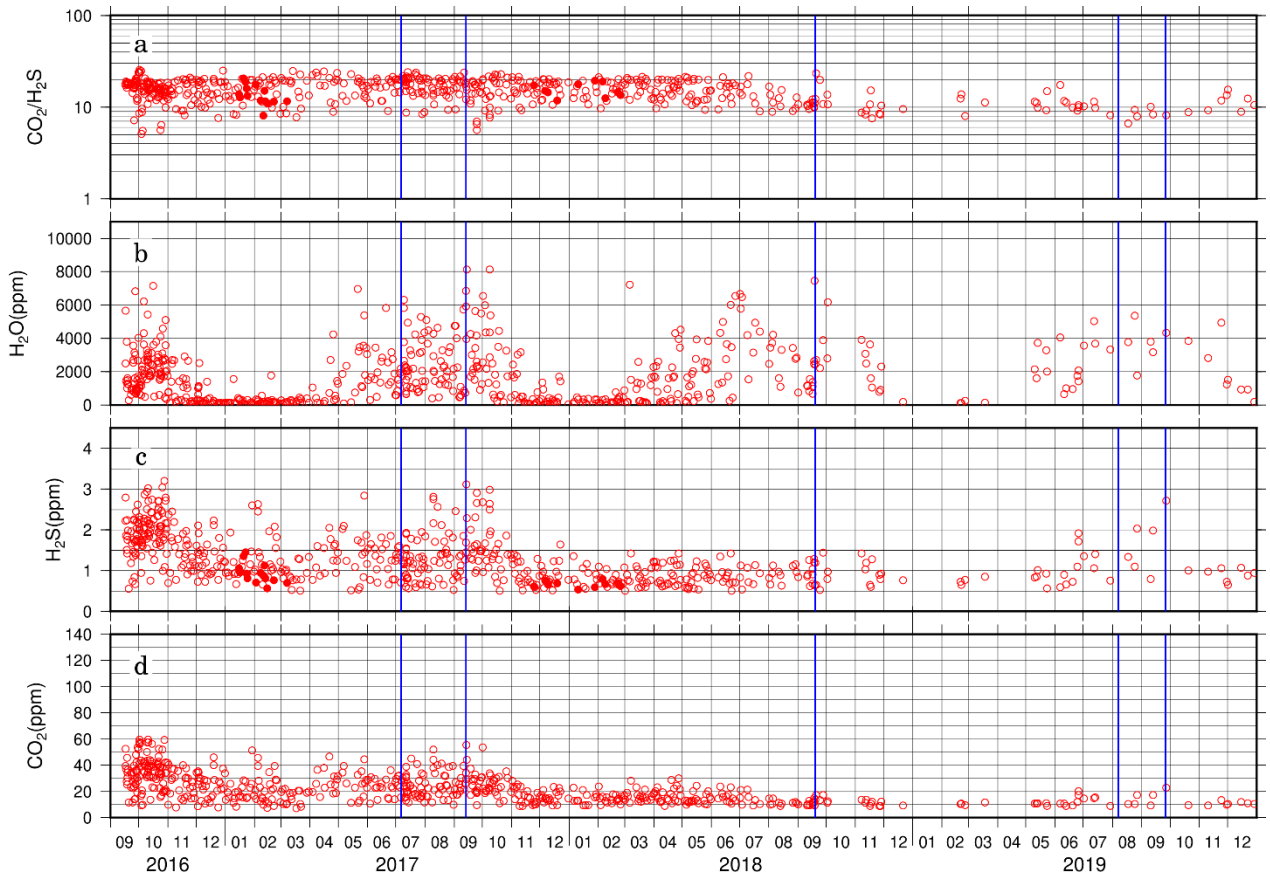


図 13 御嶽山観測データ. a: $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比, b: H_2O 濃度, c: H_2S 濃度, d: CO_2 濃度.

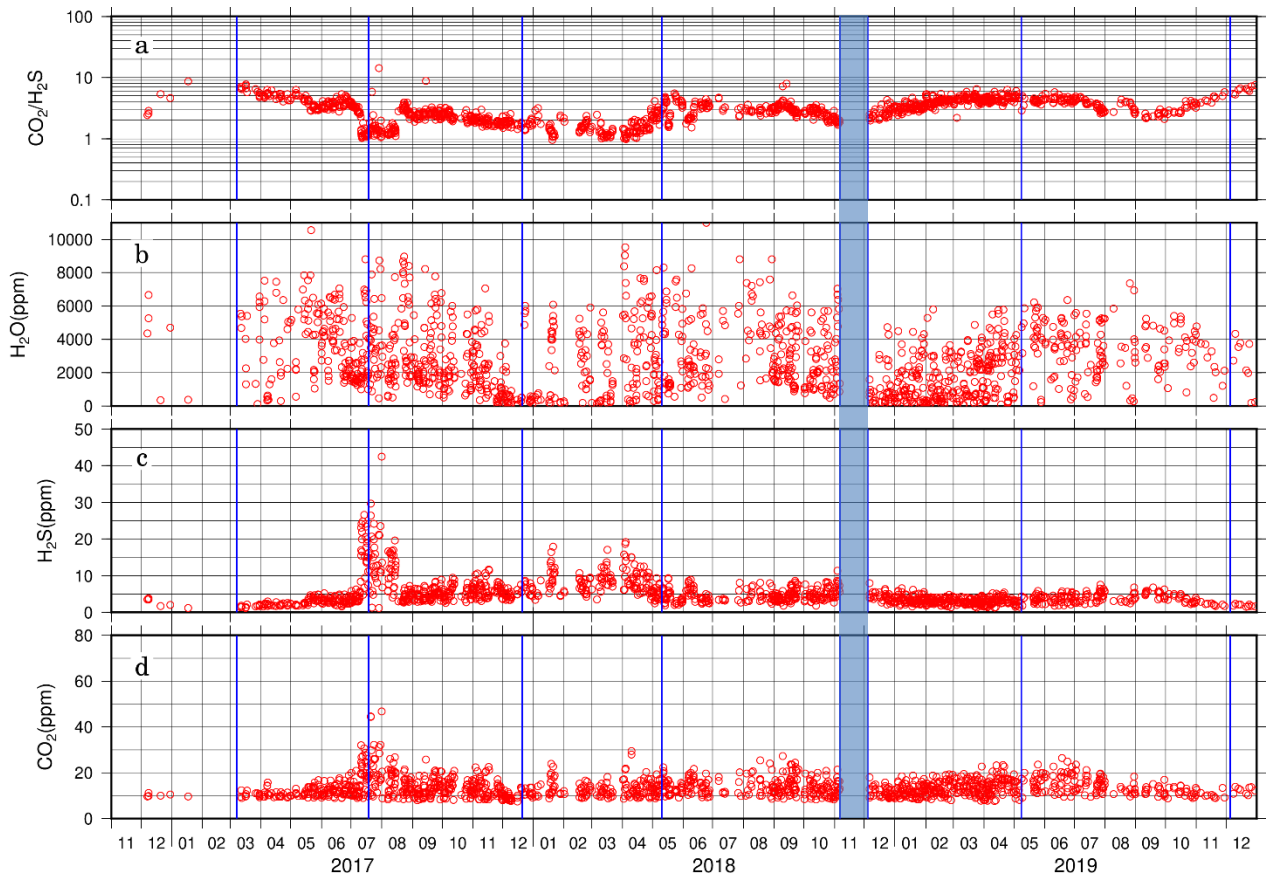


図 14 九重山観測データ. a: $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比, b: H_2O 濃度, c: H_2S 濃度, d: CO_2 濃度. 塗りつぶし部分は欠測を示す.