

噴気の地球化学データから見た由布・鶴見火山と熱水系

京都大学 大沢信二 *1

1. はじめに

鶴見火山はこの1000年ほど顕著な噴火活動を行っていないことから、京都大学など研究機関による地震計等の地球物理学的火山観測機器が配備されているに過ぎない状況が長らく続いてきた。しかし、2009年6月に火山噴火予知連絡会が火山防災のための監視・観測体制の充実等の必要がある火山の一つに鶴見岳・伽藍岳が加えられたことことから、気象庁は噴火の前兆を捉えて噴火警報等を的確に発表するために、湯山、日ノ平、別府天間および別府鶴見の4箇所

に地震計、空振計、GNSS観測装置等の観測施設を整備し、関係機関からのデータ提供も受け、2016年4月より福岡管区気象台地域火山監視・警報センターにおいて24時間体制で火山活動の常時観測・監視を行なっている。

このように鶴見火山の地球物理学的観測体制が整備されてきている一方で、火山活動監視において重要な観測項目となっている噴気(火山ガス)の地球化学観測については、鶴見火山の地熱



図1 鶴見火山や由布火山の噴気の例。A: 鶴見岳「赤池噴気」、A-1(遠影)は2016年12月5日撮影、A-2(近影)は1992年11月16日撮影；B: 伽藍岳の熱水変質地帯に噴出する噴気 2017年3月22日撮影、泥火山の火口内にエメラルド色の温泉水が溜まっている；C: 由布岳南西山麓に存在する沸騰泉からの噴気 2021年12月22日撮影。

系や温泉の生成メカニズムの解明を主眼とした調査研究が行われてきたに過ぎない（例えば、大沢ほか、1998：大沢、2000：大沢ほか、2015）。筆者は、昨年、火山活動監視のための噴気観測体制の整備を念頭の一つに置いて、大分県温泉調査研究会の事業として由布岳ならびに鶴見火山の噴気の地球化学的情報の収集とガス成分の化学・同位体組成の地球化学解析を行ない、大分県温泉調査研究会報告 73号に論文として公表した（大沢、2022）。また、その後に追加した解析や考察を含めた研究成果を、2022年8月4日に亀の井ホテル（別府市）で開催された令和4年度大分県温泉調査研究会研究発表会において口頭発表した。ここでは、それらの内容をまとめ、さらに新たな考察を加えて報告する。

2. 由布・鶴見火山と噴火史の概要

鶴見火山は別府市と由布市の境界付近に位置している活火山で、別府-島原地溝の一部をなす由布-鶴見地溝の中にあり、西南日本弧における火山前線（volcanic front）を形成している。この火山は4万年以上も前から活動を開始し、最近2000年間にも噴火活動を行なっている（藤沢・小林、1999）。1800年前のブルカノ式噴火後の噴火様式は水蒸気噴火であり（藤沢ほか、2002）、古文書の記述に対比される1000年前と1200年前の噴火の他にも、最新の研究（筒井ほか、2019）では15～16世紀頃に塚原温泉周辺で少なくとも5回の噴火が発生しているとされている。鶴見火山の主峰である鶴見岳（1374.5m）や伽藍岳（1045.3m）の山頂付近や山腹には現在も多数の噴気活動が見られ、由布岳（由布火山）の山頂や山腹には噴気は認められないが南西麓では沸

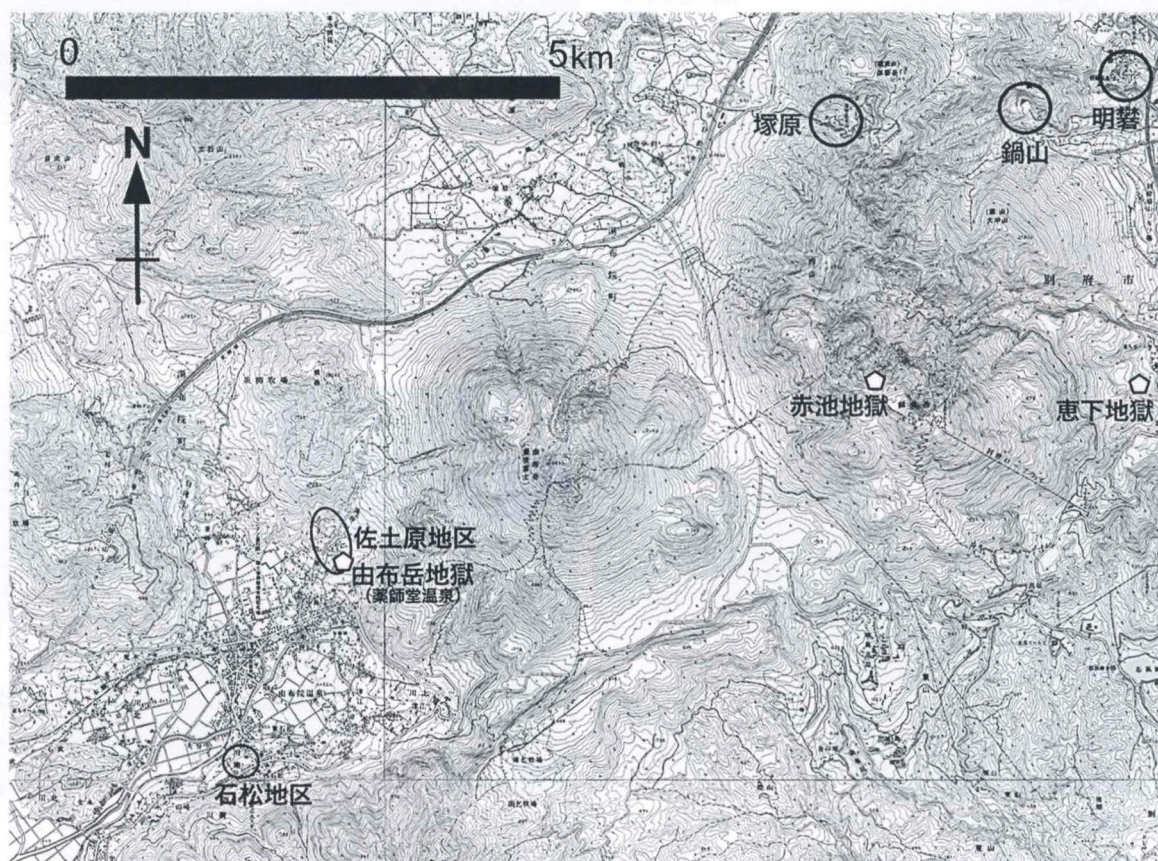


図2 鶴見火山、由布火山の噴気存在位置（大沢、2022より転載）。
由布岳山麓・由布院盆地に存在する噴気は沸騰泉に付随する噴気

騰泉からの噴気を見ることができる(図1, 図2)。鶴見火山は複数の火山体から構成される複成火山であり, 鶴見岳と伽藍岳をまとめて鶴見火山として扱うことが多いが(本論文でも原則「鶴見火山」という表現を使う), 伽藍岳を独立した活火山とする根強い考えもある。一方, 由布岳は山頂や山腹に噴気が見られないことから活動的な火山であると認識されていないようであるが, 独立した火山(由布火山)であると見なされることが一般的である。その噴火史についてはまだよく分っていないが, 2200年前には火砕流の発生をともなうマグマ噴火が起っている(例えば, 齋藤ほか, 2000; 藤沢ほか, 2001)。

3. 噴気ガス組成の地球化学解析からの知見

ガス成分の起源

鶴見火山, 由布火山に存在する噴気(図2)から得られた地球化学データ(ガス組成やガス成分の同位体組成)を用い, 筆者がよく用いている地球化学解析方法(例えば, 大沢, 2000; 大沢ほか, 2015)によって噴気中のヘリウム(He)と二酸化炭素(CO_2)の起源を推定した(大沢, 2022)。図3の左図は「ヘリウム同位体ダイアグラム」($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比^{補注(1)}対 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 比の関係図)で, 鶴見火山と由布火山の噴気はいずれもマントル-大気混合線上にプロットされ, 噴気に含まれる微量のHeには相当な割合でマントルに由来するHeが含まれ, 活火山から放出されるHeであることから, その実態はマグマ起源のHeであると考えられる。他方, CO_2 の炭素安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)^{補注(2)}対 $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 比による CO_2 の起源判定図(図3の右図)にプロットされたデータは, 鶴見火山, 由布火山の噴気 CO_2 が, どちらも, 海洋プレートの沈み込み運動によりマントル内に持ち込まれた海成炭酸塩(CaCO_3)に由来し, マグマ発生を経て火山性地熱活動を通して地表に噴出している(再循環性炭素である)ことを示している。

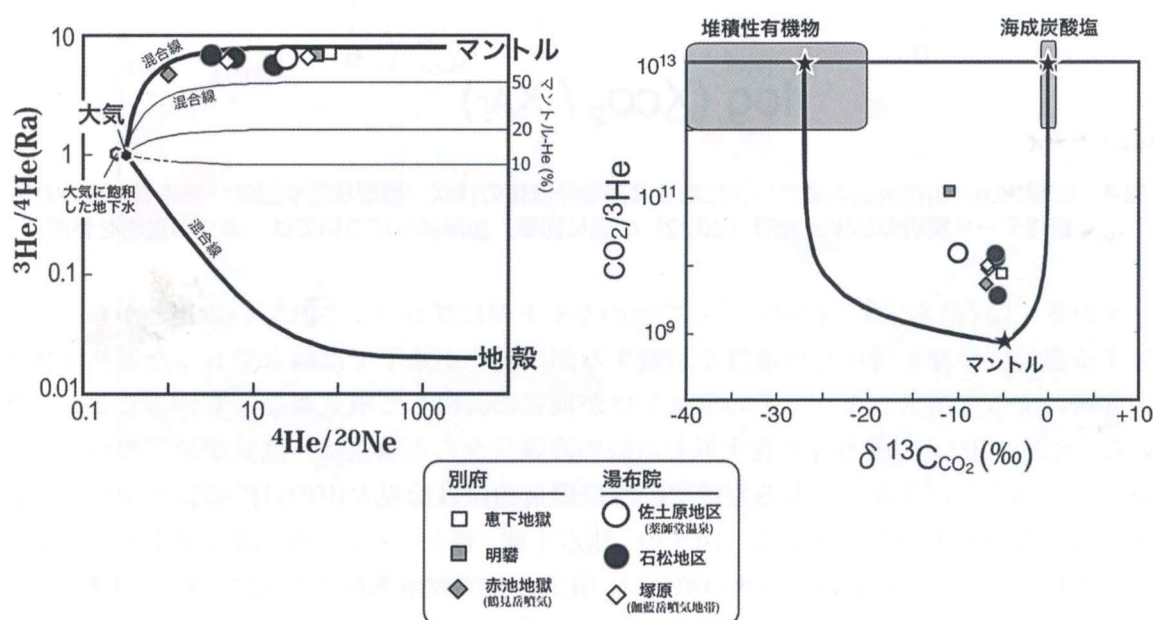


図3 由布・鶴見火山の噴気ガス成分の起源を知るためのガス組成・同位体比のデータ解析結果(大沢, 2022より転載)。左:ヘリウムの起源を知るための $^3\text{He}/^4\text{He}$ 対 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 関係図(ヘリウム同位体ダイアグラム), 右:二酸化炭素(CO_2)の起源を知るための CO_2 の $\delta^{13}\text{C}$ 対 $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 比の関係図("Sano and Marty 図")。

噴気のある深部地熱流体の性状

図4は、噴気ガス成分の CO_2 、水素 (H_2) およびアルゴン (Ar) の濃度を使った H_2/Ar 比と CO_2/Ar 比の関係から地下に潜在する地熱流体の性状を推定するためのダイアグラムである。このダイアグラムは、地表に噴出する噴気が熱水から沸騰によって分離してきた蒸気であるか(熱水平衡)、もともと蒸気として存在していたものか(蒸気平衡)、あるいは熱水と蒸気が共存する気液二相状態にあったのかといった地下における物理状態を推測したり、地下での温度の推定や化学平衡の不完全性を評価するために考案された解析法である。図にプロットされた噴気

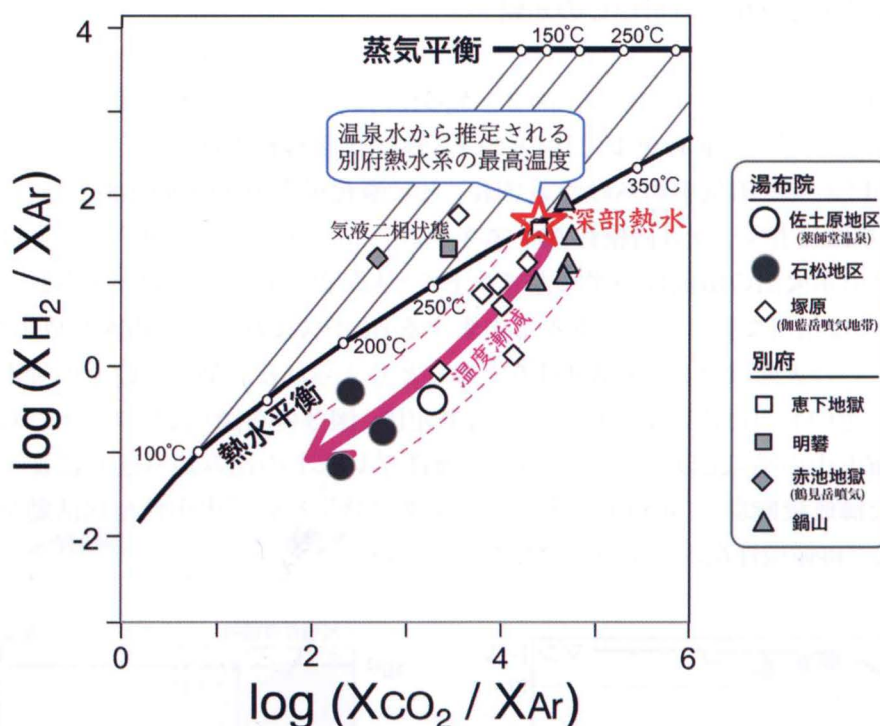


図4 鶴見火山、由布火山の噴気のある深部地熱流体の性状(物理状態や温度)を知るためのガス組成データ解析の結果。大沢(2022)の図に加筆。加筆部分については、本文の説明を参照。

データの多くは「熱水平衡」の線に沿ってそのやや下側にプロットされていることから、地表に上昇する過程で冷却を受けた可能性を示唆するが、多くが地下では熱水であった地熱流体の一部が沸騰によって蒸気となり、その蒸気だけが地表に流出して噴気になっていることが示されている(大沢, 2022)。由布院の佐土原と石松の沸騰泉からの噴気は、蒸気が地下の熱水と一緒に噴出しているという違いがあるだけで、生成機構的には鶴見火山の自然噴気と同じであるということがこの解析図から分かる。図4の「熱水平衡」線と「蒸気平衡」線に挟まれた範囲にプロットされている例外的ないくつかの噴気は、噴気として放出される直前に気液二相状態にあった可能性を示唆しており、これがそのまま地表に噴出すれば湿り気の多い噴気(沸騰泉は物理的には極端に湿り度の大きい噴気とみなすことができる)となりうるが、断熱膨張によって液相は蒸発して元の蒸気と一緒に地表に噴出しているとして説明できる。

Allis and Yusa (1989) は、別府の温泉水のエンタルピーと塩化物イオン (Cl^-) 濃度との関係

から、別府温泉の地下深部に潜在する深部熱水の温度を $250 \sim 300^{\circ}\text{C}$ と推定した。図4には、その推定最高温度 300°C の熱水を赤い星印で示したが、このような唯一の熱水が別府温泉の全ての温泉の元にあるという現在最も支持される考えを念頭において、その 300°C 熱水を基点にして気液二相状態にある噴気を除く全ての噴気データの配置を眺めると、 H_2/Ar 温度の低下だけでなくそれに同調した CO_2/Ar 温度の低下もあるというふうに見ることができる。この温度低下傾向を「温度漸減」と添えた矢印線で表したが、その線の低温側に由布院の噴気のデータが位置しており (CO_2/Ar 温度: $250 \sim 200^{\circ}\text{C}$; H_2/Ar 温度: $150 \sim 100^{\circ}\text{C}$)、別府温泉の形成に関わっている深部熱水の一部が温度を低下させながら由布院方面へ流出していることを示唆しているように考えられる。このような別府温泉の起源熱水の一部が由布院の温泉水として流出しているという考えは、Sturchio et al. (1996) によって提案されており、後で再び取り上げる。

4. 既存資料との対比による考察

図5は、広帯域 MT 観測による別府地熱地帯(鶴見火山地域)の地下の電気比抵抗構造の推定結果である(山本ほか, 2021)。左図の左半分は、右図の波線 A-A' (伽藍岳から南西方向に伸びる低比抵抗体) に沿った鉛直断面図であり、伽藍岳地下に現れている低比抵抗体は流体が多く存在する高温熱源部に相当すると解釈され、この低比抵抗領域の存在は宇津木ほか(2010)による同様の電磁気学的探査でも認められている。この図5に示された伽藍岳直下海拔-2.5km から-5km の間に存在する極めて低い抵抗値 ($1 \Omega\cdot\text{m}$ 程度) の領域を、由佐ほか(1996)が描いた別府温泉地域の深部に至る地熱構造の概念モデル(図6)に照らし合わせると、海面下 2500m 付近に存在するとされている 300°C の地熱流体(深部熱水)とその下位の海面下 4000m より深部に存在するより低比抵抗値を示す高温流体(「マグマ性流体?」と記されている)の存在に目が

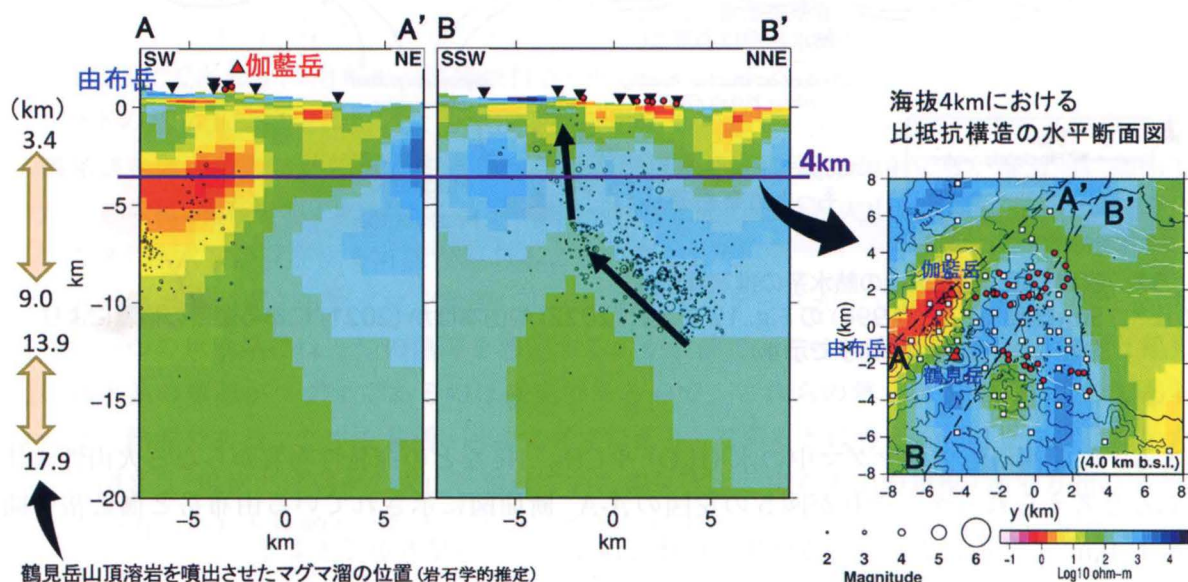


図5 由布・鶴見火山の地下の比抵抗構造。

山本ほか(2021)の図2と図3を転載・加筆した(加筆は青字の部分)。また、鶴見岳山頂溶岩に地質温度圧力計を適用して推定されたマグマだまりの深度(Nagasaki et al., 2017)を左図の左端に併記した。

図6 やや定量的な別府温泉地域
(鶴見火山)の深部に至る
地熱構造の概念モデル (由
佐ほか, 1996)

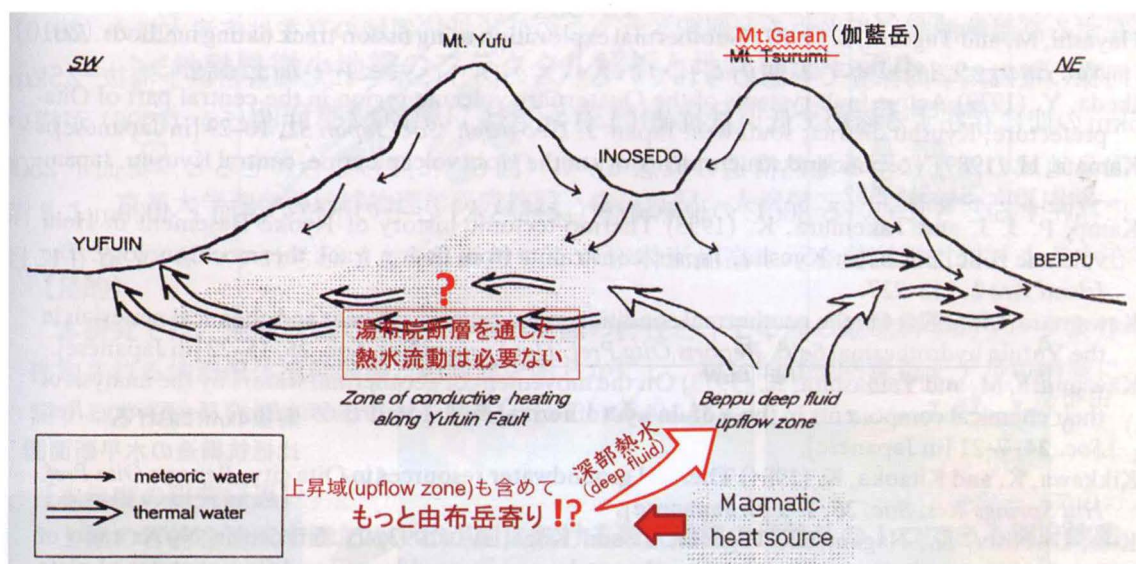
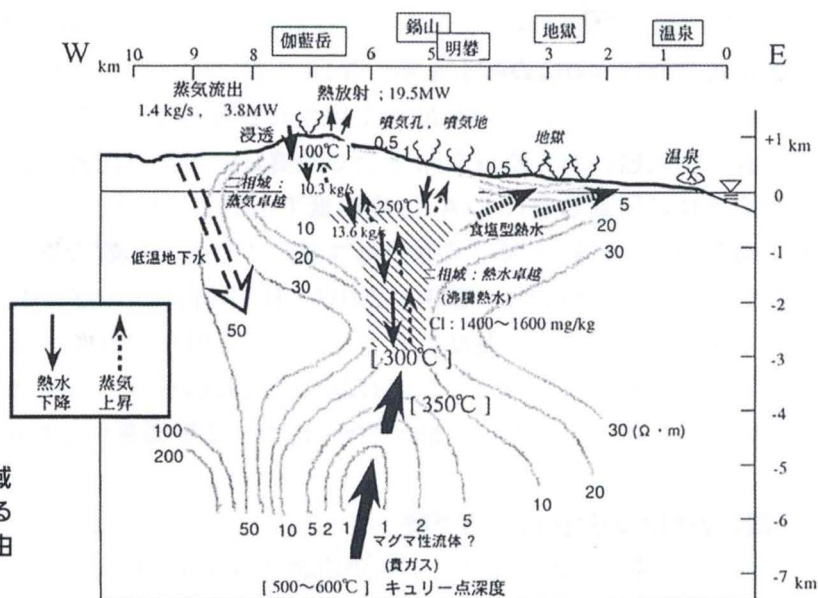


図7 鶴見火山・由布火山の熱水系の推定概念図。

Sturchio et al. (1996) の Fig.12 を大沢 (2022) や山本ほか (2021) にある最新の情報により修正した (修正点は赤字で示す)。

とまる。この高温流体はマグマ中の水 (H_2O) や CO_2 , He などの揮発性物質からなる火山性流体であると考えられるが, それが図5の左図の A-A' 断面図に示されている由布岳と伽藍岳の間の地下 4km ~ 5km に表れている低比抵抗体ではないかとの見方ができよう。

図7の原図 (赤字以外の部分) は, Sturchio et al. (1996) が別府温泉の起源熱水の一部が由布院温泉へ流出しているという考えを模式的に示した図である。鶴見岳 (Mt. Tsurumi) の地下に潜在するマグマを熱源 (magmatic heat source) とする深部熱水 (deep fluid) が別府温泉 (BEPPU) に流れ出して温泉水系を形成していると同時に, 由布院温泉 (YUFUIN) 方面にも流動・流出し

ているという様子が表されている。図7には本章の前半で行った考察によって導き出された情報を赤字で示してあるが、その一つは鶴見岳を伽藍岳 (Mt. Garan) に変更したこと、もう一つはmagmatic heat source (マグマ性の熱源) が深部熱水 (deep fluid) の上昇域 (upflow zone) も含めて由布岳寄りにあると修正されていることである。どこまで由布岳に寄るかは図5のA-A'断面図をさらに南西側に延長して見てみないとはっきりしないが、現状の図5右の水平断面図の中に表された地形図から読み取ってみると、由布岳山頂から見て北東の方向、由布岳と鶴見火山の間の鞍部(「エコーライン」と呼ばれる道路が通る)の直下辺りではないかと予想される。深部熱水の上昇流の一つが由布院温泉まで伸びている可能性、言い換えると、別府温泉と由布院温泉が同一熱水系に由来するか否かを知るために、地下電気比抵抗構造が由布岳南西側まで明らかにされることを期待したい。なお、今回想定した位置に別府温泉と由布院温泉に共通の熱水系が存在するのならば、Sturchio et al. (1996) の考えた由布院断層を通しての熱水流動は空間配置的には考える必要はなくなることになるが、由布院断層沿いの地下に熱水流動があるか否かを直接検証する観測 (SP観測や土壌CO₂フラックス測定など) を別途行ってみたい。

5. まとめ (おわりに)

大沢 (2022) からの一連の研究をまとめると以下のようなになる。

- 1) 鶴見火山、由布火山では複数の噴気が見られる。鶴見岳や伽藍岳の山頂付近や山腹には自然の噴気地が存在するが、由布岳の山頂や山腹にはそのような噴気は確認されず、山麓で沸騰泉からの噴気を見ることができる。
- 2) 由布岳山麓の沸騰泉からの噴気も含めて、噴気中のCO₂ (二酸化炭素) とHe (ヘリウム) はマグマ由来である。鶴見岳と伽藍岳の自然噴気は、地下に潜在する熱水の沸騰により分離した蒸気に由来し、熱水と蒸気と一緒に地表に流出する沸騰泉とは、温度や存在深度が異なるくらいで、本質的には変わらない。鶴見岳と伽藍岳の噴気の元に存在する熱水の最高温度は300℃ほどであるが、由布岳の沸騰泉付きの噴気の元にある熱水の温度は高々250℃である。
- 3) 地下の熱水温度推定に用いた地球化学解析用ダイアグラム上の噴気データの分布傾向から、鶴見岳・伽藍岳の自然噴気と由布岳山麓の沸騰泉からの噴気の成り立ちが統一的に説明できた。さらに、既存資料との対比による考察から、鶴見火山と由布火山の噴気の元には共通の(巨大な?) 熱水系が存在する可能性のあることが導かれた。

共通の熱水系が異なるマグマを熱源にしているとするケースが全く無いとは言い切れないが、普通は一つの熱水系には一つの熱源を想定するのが自然であろう。由布岳 (由布火山) と鶴見火山の熱水系の熱源がマグマであるのは確実であるので、これらの熱水系が共通のものであるとすれば、熱源であるマグマも共通 (同じマグマだまり) であるとは考えるのは妥当ではないだろうか。図8は、現状では別々の火山とされている鶴見火山と由布火山の規模 (水平方向の広がり) を桜島火山のそれと比較してみたものである。桜島火山のマグマだまりは錦江湾北部の海域の深さ10kmにあると考えられているが (例えば、井口・中道, 2019), 噴火に直結するマグマだまりはその深部マグマだまりに連なる桜島直下の海拔-4km ~ -6kmに存在する副次的なマグマだまりであるとされている (例えば, Araya et al., 2019)。単一のマグマだまりからのマグマの噴出 (噴火) で形成される火山体の規模を桜島が例示しているとすれば、鶴見火山と由布火山を一つの火山「由布・鶴見火山」として括って見るという考えと矛盾しないように思える。共通の

マグマだまりにつながる複数存在するマグマの噴出口が鶴見岳，伽藍岳，由布岳であるとしてそれぞれの山体における噴火史（噴火の記録）を見直してみることは，火山防災的観点からも有用であろう。

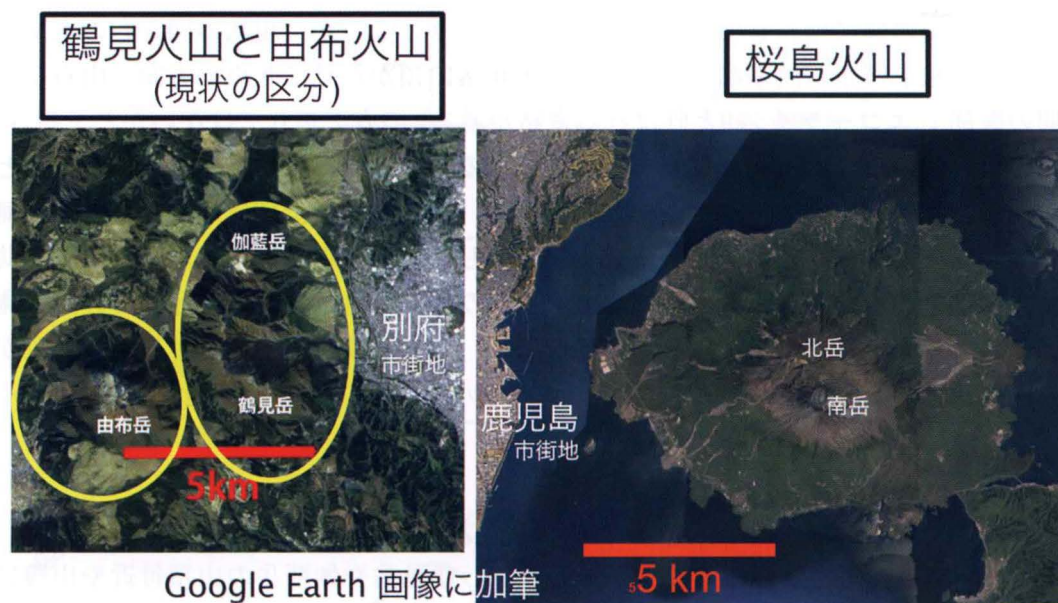


図8 鶴見岳，伽藍岳，由布岳を一つの火山と考える根拠。
桜島火山の規模と比較した鶴見火山（鶴見岳・伽藍岳）と由布火山（由布岳）の広がり大きさに注目。

【補注】

- (1) ヘリウム (He) には質量数が3と4の核種が存在する (^3He と ^4He)。大気中のHeの同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$) は世界中で一定の値を示すので (1.4×10^{-6})，分析試料の同位体比をこれで規格化して表すこともある (Ra)。
- (2) 炭素には安定な同位体として質量数12と13のものが存在する (それぞれ ^{12}C ， ^{13}C)。試料の炭素同位体比 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) は国際的な標準物質である V-PDB (Peedee層のベレムナイト化石) の $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比 (1.12372×10^{-2}) を基準にして，その値からのずれを千分偏差で表す ($\delta^{13}\text{C}$ 値；単位は‰)。

【参考文献】

- 1) 藤沢康弘・小林哲夫 (1999) 由布・鶴見火山，「高橋正樹・小林哲夫編「フィールドガイド 日本の火山⑤九州の火山，第1章」，p.17-p.38，築地書館，東京。
- 2) 藤沢 康弘，奥野 充，中村 俊夫，小林 哲夫 (2002) 九州北東部，鶴見火山の最近3万年間の噴火活動。地質学雑誌，108，48-58。
- 3) 筒井正明・奥野 充・藤沢康弘・小林哲夫 (2019) 九州北東部，伽藍岳における最近約2200年間の水蒸気噴火。福岡大学理学集報，49，89-97。
- 4) 齋藤武士，鎌田浩毅，石川尚人 (2000) 由布-鶴見火山群の池代火砕流堆積物と地代北部火砕物の岩相と残留磁化。火山，45，217-224。

- 5) 藤沢康弘, 上野宏共, 小林哲夫 (2001) 火砕堆積物の堆積温度からみた由布火山の 2.2 ka 噴火. 火山, 46, 187-203.
- 6) 大沢信二, 大上和敏, 由佐悠紀 (1998) 伽藍岳の地熱調査 (3) 噴気ガスの地球化学. 大分県温泉調査研究会報告, 49, 5-10.
- 7) 大沢信二 (2000) 噴気ガスの化学・同位体組成からみた別府温泉の地熱流体の起源及び性状. 大分県温泉調査研究会報告, 51, 19-28.
- 8) 大沢信二, 三島壮智, 酒井拓哉 (2015) 別府・恵下地獄の地球科学的調査. 大分県温泉調査研究会報告, 66, 17-27.
- 9) 大沢信二 (2022) 由布院の噴気地球化学調査. 大分県温泉調査研究会報告, 73, 47-52.
- 10) Allis, R.G., Yusa, Y. (1989) Fluid flow processes in the Beppu geothermal system, Japan. Geothermics, 18, 743-759, 1989.
- 11) 山本有人, 相澤広記, 村松弾, 安仁屋智, 田辺暖柊, 若林翌馬, 藤田詩織, 志藤あずさ, 小山崇夫 (2021) 別府地熱地帯の比抵抗構造から推定する流体の移動経路. Conductivity Anomaly 研究会論文集, 36-37.
- 12) Nagasaki, S., Ishibashi, H., Suwa, Y., Yasuda, A., Hokanishi, N., Ohkura, T., Takemura, K. (2017) Magma reservoir conditions beneath Tsurumi volcano, SW Japan: Evidence from amphibole thermobarometry and seismicity. Lithos, 278-281, 153-165.
- 13) 宇津木充, 鍵山恒臣, 小森省吾 (2010) MT法を用いた鶴見・伽藍火山周辺域における地下比抵抗構造調査. 大分県温泉調査研究会報告, 61, 29-34.
- 14) 由佐悠紀, 大沢信二, 北岡豪一, 福田洋一 (1996) 伽藍岳の地熱調査 (2) -伽藍岳を中心とする地熱構造モデル-. 大分県温泉調査研究会報告, 47, 7-11.
- 15) Sturchio, N.C., Ohsawa, S., Sano, Y., Arehart, G., Kitaoka, K., Yusa, Y. (1996) Outflow Plume of the Beppu Hydrothermal System at Yufuin, Japan. Geothermics, 25, 215-230.
- 16) 井口正人, 中道治久 (2019) 桜島の大規模噴火を考える. 自然災害科学, 38, 279-345.
- 17) Araya, N., Nakamura, M., Yasuda, A., Okumura, S., Sato, T., Iguchi, M., Miki, D., Nobuo Geshi, N. (2019) Shallow magma pre-charge during repeated Plinian eruptions at Sakurajima volcano. Scientific Reports, 9, Article number: 1979, 10.1038/s41598-019-38494-x

【所属】

- * 1 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設, 教授, 博士 (理学)
大分大学減災・復興デザイン教育研究センター, 客員教授

大分大学減災・復興デザイン教育研究センター
2021年度年次報告

Center for Education and Research of
Disaster Risk Reduction and Redesign

CERD ANNUAL REPORT 2021



OITA UNIVERSITY