

由布岳・鶴見岳の地球化学的研究

広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

岡田郁生・柴田知之

1. はじめに

沈み込み帯では海洋プレートがマントル内に沈み込んでおり、それによってマグマが生産されている場である。海洋地殻の沈み込みに伴って、含水鉱物の脱水反応によって海洋地殻内に含まれていた水が上部マントルに供給される。供給された水によって上部マントルを構成するマントルカンラン岩の部分溶融が起き、マグマが発生する (e.g., 巽, 1986; Shibata and Nakamura, 1993)。また、フィリピン海プレートのような、若く熱い海洋地殻では、沈み込みに伴って海洋地殻が部分溶融することでマグマが発生すると考えられている (e.g., Defant and Drummond 1990; Shibata et al., 2014)。海洋地殻の沈み込みに伴って発生したマグマは上部マントル内を上昇し、下部地殻での分化やまわりの地殻物質との同化などによって珪長質な組成へ変化しながらさらに地殻上部へ上昇して、マグマ溜まりを形成する。最終的にマグマ溜まりを形成したマグマは、マグマに溶け込んでいたガス成分の急激な発泡などによって地表に噴出する。従って、マグマの発生から噴火に至る過程を明らかにすることは、沈み込み帯のマグマ活動や火山活動を理解するために重要である。

沈み込み帯で見られる火山の多くは、安山岩およびデイサイトで構成されている (e.g., 太田ほか 1990; 伊藤 1990; Morris 1995; Kimura et al., 2005; Yanagi et al., 1991; 中川 1983)。安山岩およびデイサイトの成因については、様々なプロセスが提案されている。例えば、1) 玄武岩質マグマからの結晶分化作用 (Fujinawa 1988), 2) 珪長質マグマと苦鉄質マグマの混合 (Sakuyama 1978, 1979), 3) 同化分別結

晶作用 (assimilation and fractional crystallization : AFC ; Depaolo, 1985) , 4) 沈み込む海洋地殻の部分溶融 (アダカイト; Defant and Drummond 1990; Morris 1995; Kimura et al., 2005) などである. 特に, 苦鉄質マグマと珪長質マグマの混合は, 同一のマグマ中で平衡共存することができない石英とかんらん石やAnに乏しい斜長石とAnに富む斜長石などが同一薄片内で観察されることや主要元素・微量元素組成がSiO₂含有量の増加に対して直線的な傾向を示すことなどから, 多くの安山岩およびデイサイトで構成される火山で指摘されている (e.g., 太田・青木, 1991; Yanagi et al., 1991) . また, マグマ混合に関与したマグマの温度・化学組成などはマグマ供給系の進化過程や噴火過程に影響を与える. 従って, マグマ混合に関与したマグマの情報を具体的に知ることは火山学的に重要な課題であり, 沈み込み帯のマグマ活動や火山活動の理解への大きな貢献が期待できる. しかしながら, マグマ混合によって生成された安山岩およびデイサイトは混合した後のマグマの地球化学的特徴を示しており, 混合する前のそれぞれのマグマの地球化学的特徴とは異なる. そのため, 混合する前のそれぞれのマグマの起源・進化過程に関する情報を得ることが困難であり, そのため, 安山岩の成因については未だ不明な点が多く, 沈み込み帯のマグマの成因を解明する上で大きな課題となっている.

角閃石は火山岩の斑晶としてよく見られる鉱物であり, 角閃石の化学組成は, 角閃石と平衡なメルトの化学組成, 温度や圧力によって変化する (e.g., Erdmann et al. 2014; Putirka 2016; Ridolfi and Renzulli 2012). 近年, 高圧高温平衡実験の結果から角閃石の主要元素組成を用いた角閃石と平衡なメルトの温度, 圧力や化学組成を定量的に推定する経験式が提案された (e.g., Putirka, 2016; Ridolfi and Renzulli 2012) . これらの経験式を用いて角閃石と平衡なメルトの温度, 圧力や化学組成を推定することで, 角閃石が晶出したマグマ溜まりの温度, 深さや化学組成を定量的に考察したり, マグマ供給系の構造や噴火前のマグマの状態について議論することが可能となった (e.g.,

Erdmann 2014; Nagasaki et al., 2017; Ishibashi et al., 2018) . さらに, 角閃石と平衡なメルトの温度と圧力を推定する経験式の信頼性についても議論されている (e. g., Erdmann et al., 2014; Putirka 2016; Nagasaki et al., 2017) . Erdmann et al (2014)やPutirka (2016)は, 角閃石と平衡なメルトの温度と圧力を推定する経験式を高圧高温平衡実験で得られた角閃石の化学組成に適用し, その結果を高圧高温平衡実験で行った温度圧力条件と比較し, 角閃石と平衡なメルトの温度を推定する経験式の信頼性は高いが, 角閃石と平衡なメルトの圧力を推定する経験式の信頼性は低いと結論づけた. また, Putirka (2016)は集めた高圧高温平衡実験の結果から, 角閃石と平衡なメルトのSiO₂含有量を推定する経験式も提案した. Nagasaki et al. (2017)は, Ridolfi and Renzulli (2012) が提案した地質圧力計の信頼性と, 角閃石と平衡なメルトのSiO₂含有量との関係を調べた. その結果, Ridolfi and Renzulli (2012)の地質圧力計は, 角閃石と平衡なメルトのSiO₂含有量が > 60 wt.%で圧力が85・500MPaのとき誤差85MPaの範囲で信頼できることを明らかにした. さらに, Nagasaki et al. (2017)は角閃石の主要元素組成から角閃石と平衡なメルトの圧力を定量的に推定する方法を天然の安山岩中の角閃石に適用し, 推定した圧力の結果を地震学的データと比較することで角閃石の地質圧力計はマグマ溜まりの深さをおおまかに推定するためには有効なツールであると主張した. また, 角閃石と平衡なメルトの温度やSiO₂含有量も推定し, 安山岩を生成した2つの端成分マグマのSiO₂含有量や角閃石が晶出したときの圧力・温度を特定した (Nagasaki et al., 2017) . このことは, 角閃石が混合する前のそれぞれのマグマの情報を記録している可能性を強く示している. そこで, 本研究では, EPMAによる角閃石の主要元素組成の分析を行い, 角閃石と平衡なメルトの温度, 圧力やSiO₂含有量を定量的に推定するとともに, LA-ICP-MSによる角閃石の微量元素組成の分析も行い, その結果から角閃石—メルト間の分配係数を用いて角閃石と平衡なメルトの微量元素組成を定量的に推定することによって, 混合する前のそれぞれのマグマの起源・

進化過程を明らかにすることを試みた。

本研究で対象とする由布岳は九州北東部に位置する第四紀火山であり、フィリピン海プレートが沈み込む西南日本弧の火山フロント上にある。由布岳の東側には、同時期に活動を開始したと考えられる鶴見岳が存在しており、由布岳は鶴見岳とともに由布・鶴見火山群を構成する (e.g., 星住ほか, 1988; 太田ほか, 1990)。由布岳・鶴見岳の火山岩は角閃石を斑晶として含む安山岩およびデイサイトであり、その安山岩には非平衡な鉱物組み合わせや玄武岩質の暗色包有物が認められる (太田ほか, 1990)。全岩の地球化学的研究から、由布岳と鶴見岳のマグマの起源物質は、沈み込む海洋地殻起源の脱水流体が付加した上部マントル、さらに、海洋地殻の部分溶融物であると考えられている (Sugimoto et al., 2006)。また、全岩の岩石学的特徴、主要元・微量元素組成や Sr 同位体組成から由布岳・鶴見岳のマグマはマグマ混合が重要な役割を果たしている指摘した (太田・青木, 1991)。しかしながら、混合する前のそれぞれのマグマの初生的な情報に関する地球化学的データは得られておらず、混合する前のそれぞれのマグマの起源・進化過程の解明には至っていない。従って、角閃石の主要元素・微量元素組成から角閃石と平衡なメルトの起源・進化過程を明らかにしようとする本研究にとって、由布岳は非常に適した火山である。

2. 結果と考察

由布岳安山岩中の角閃石は主要元素組成から、角閃石と平衡なメルトが SiO_2 含有量 ($\text{SiO}_2^{\text{melt}}$) と FeO^*/MgO 比 ($\text{FeO}^*/\text{MgO}^{\text{melt}}$) がそれぞれ、51.5 - 64.5 wt.%, 2.10 - 4.00 のグループと 69.4 - 75.0 wt.%, 2.50 - 3.30 のグループに分けられた。以後、前者をグループ I、後者をグループ II とする。 $\text{SiO}_2^{\text{melt}}$ の組成範囲から、グループ I の角閃石は玄武岩質～デイサイト質マグマから、グループ II の角閃石は安山岩質～デイサイト質マグマから晶出し、マグマ混合によって共存したと考えることができる。グループ I の $\text{SiO}_2^{\text{melt}}$ は由布岳安山岩の全岩の SiO_2 含有量と類似するが、

FeO*/MgOmelt は由布岳安山岩の全岩の FeO*/MgO より高い。このことは、由布岳安山岩の全岩組成を説明するためには、グループ I の FeO*/MgOmelt より低い FeO*/MgO 比を持つ、玄武岩質マグマが必要であることを示唆する。以上のことから、由布岳安山岩は安山岩質～デイサイト質マグマ、玄武岩質～デイサイト質マグマ、玄武岩質マグマの三端成分マグマ混合によって生成されたと考えられる。由布岳安山岩中の角閃石から推定した温度および圧力は、グループ I は 937 - 998 °C, 356 - 654 MPa, グループ II は 781 - 865 MPa, 87 - 229 MPa であった。この結果から、グループ I の角閃石を晶出するマグマ溜まりは約 14 - 25 km, グループ II の角閃石を晶出するマグマ溜まりは約 3.3 - 9 km に存在したと考えることができる。

由布岳安山岩中の角閃石の微量元素組成を始源的マントルで規格化したパターンはグループ I と II で異なる微量元素パターンを示す。また、これらの微量元素組成を、角閃石-メルト間の分配係数 (Nandedkar et al., 2016) を用いて角閃石と平衡なメルトの微量元素組成を計算した。計算したグループ I の角閃石と平衡なメルトの始源的マントル規格化微量元素組成パターンは、Nb の負異常、Sr の正異常を示し、大山火山のアダカイト (Kimura et al., 2005) と類似する。また、Sr/Y 比と Y 濃度の関係において、グループ I と平衡なメルトは Sr/Y 比は 112 で Y 濃度は 9 ppm でアダカイト質マグマ (Defant and Drummond 1990) の特徴を示す。一方、グループ II の角閃石と平衡なメルトの始源マントル規格化パターンは Sr・Zr の負異常で特徴付けられる。また、Sr/Y 比と Y 濃度の関係は Sr/Y 比 < 13.6, Y 濃度 < 6.3 ppm を示し、姫島火山の流紋岩 (平山ほか, 未公表) と類似する。従って、グループ II の角閃石と平衡なメルトの成因は姫島流紋岩と類似すると考えられる。

大分県内の火山岩類の化学組成・Sr-Nd同位体比（4） 九重山

広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻

芳川雅子・藤原涼太郎
柴田知之

京都大学理学研究科附属地球熱学研究施設

柴田智郎

京都大学

竹村恵二

1. はじめに

大分県内には、鶴見岳・伽藍岳、由布岳、九重山の活火山がある。そのうち、鶴見岳・伽藍岳、由布岳の火山岩の化学組成・Sr-Nd同位体比を文献調査し、不足している微量元素組成・Sr-Nd同位体比を報告してきた。本研究では残る活火山である、九重山の試料について化学組成分析を行い、先行研究のデータと比較した。

2. 試料および分析方法

九重山は鶴見岳・伽藍岳、由布岳とともに火山フロント上に位置し、別府一島原地溝内に位置する（川辺ほか, 2015）。鎌田（1997）は、九重の火山岩類を宮城火砕流堆積物（約 130ka）より上位の火山岩類とした。川辺ほか（2015）もその定義に従っているが、その活動開始時期については宮城火砕流堆積物より古い（約 200ka）事を明らかにしている。さらに川辺ほか（2015）は、九重火山岩を第1から第4までの4つのステージに区分している。本研究では、これらの先行研究に従い、すべてのステージの試料を採取した。

本研究では火山岩試料とそれらに含まれる玄武岩質包有物の主要元素組成と微量元

素組成を広島大学理学研究科地球惑星システム専攻の理学蛍光 X 線装置 Rigaku zsx-101e を用い、Kanazawa et al. (2001) に従って測定した。

3. 結果

本研究で得られた主要元素組成 (○) は、先行研究の報告による九重山火山岩 (●) の組成域内にはほぼプロットされる (図 1)。先行研究のデータは川辺ほか (2015), Kita et al. (2001), Miyoshi et al. (2008), Nakata & Kamata (1991), 小野 (1963), 山崎ほか (2016) に示されているものを使用した。また、芳川ほか (2015) で報告された由布岳火山岩 (■) と鶴見岳火山岩 (□) の領域ともほぼ一致している。

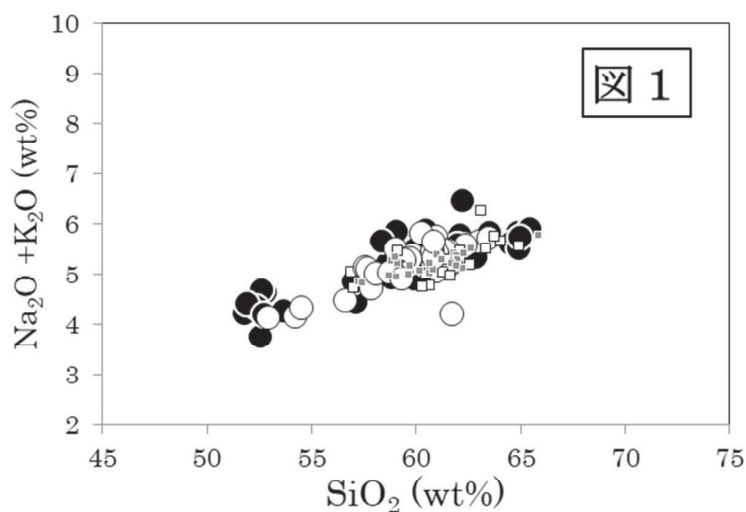


図 1. 火山岩と玄武岩質包有物の SiO_2 - $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 図

微量元素組成について、他の九州の火山岩、由布岳 (■) と鶴見岳 (□) および姫島 (■) 両子山 (▲) 阿蘇山 (△), と比較するため Sr/Y 比- SiO_2 図にプロットした (図 2)。データは柴田 (2013) で示されたものを使用した。

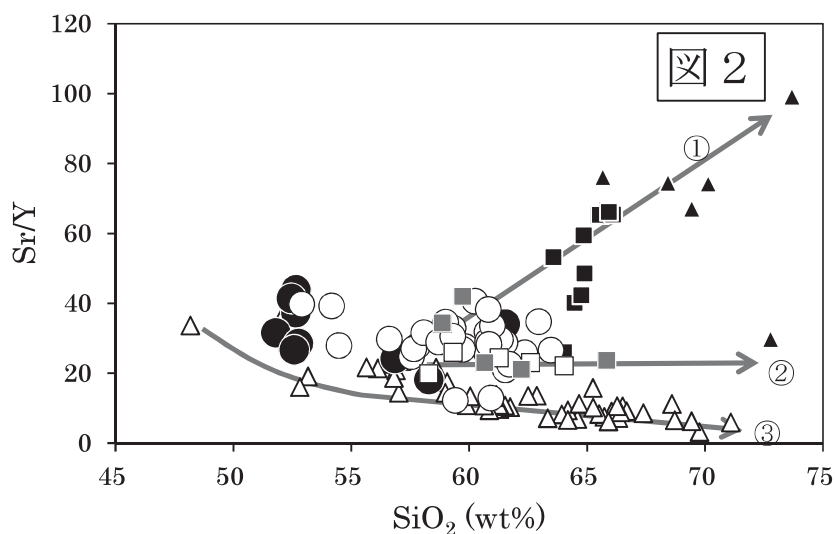


図 2. 火山岩と玄武岩質包有物の SiO₂-Sr/Y 図

4. 考察

図 1 上で九重山火山岩が示すトレンドは、鶴見岳・由布岳の火山岩が形成するトレンドと非常に類似している。また図 2 においては、Shibata et al. (2014)で示されたアダカイトトレンド①、鶴見岳火山岩が示すトレンド②、および阿蘇山火山岩が示すトレンド③と比較すると九重山火山岩はトレンド①と②の間にほとんどがプロットされる。それぞれのトレンドは玄武岩質マグマと珪長質マグマの混合や玄武岩質マグマへの溶融地殻の混入と結晶分化作用によると推測されている (Hunter, 1998; Shibata et al., 2014)。トレンド①と②の間に位置する試料は複数の珪長質マグマや溶融地殻と玄武岩質マグマの混合を考えれば説明可能である。Kita et al. (2001) は九重山の第 4 ステージ火山岩のみのデータを報告しており、それらが Nb/Y が 0.2 付近の IA タイプと 0.4~0.5 付近の WP-IA タイプに分類されること、WP タイプと IA タイプの共存は地溝内の火山の特徴であることを指摘している。また、これらの火山活動開始時期が背弧から火山フロント

方向に若くなることと沖縄トラフのリフティング時期と一致することから、背弧海盆のリフティングと火山活動が関係していると解釈している。本研究で分析した試料のほとんどは $Nb/Y \geq 0.4$ を示しており、WP-IA タイプに分類される。一方、九重山とその北部の火山フロントに位置する九州の第四紀火山では、若くて熱い海洋スラブが部分融解して生じたとされるアダカイトの存在が報告されている (Shibata et al., 2014)。スラブ由来メルトも高 Nb/Y 比を示す (Kepzhinskis et al., 1996) ことから、沖縄トラフのリフティングに関連した熱いアセノスフェリックマントルの上昇によって沈み込んだスラブの溶融が促進された可能性があるかもしれない。それぞれの成分とそれらの起源をより明確にするため、より総合的な微量元素組成・Sr-Nd 同位体比分析を今後行いたい。

5. まとめ

九重山火山岩の $SiO_2 - Na_2O + K_2O$ と Sr/Y 比および SiO_2 量の関係は、由布岳・鶴見岳火山岩の示す傾向と類似する事がわかった。また、比較的高い Sr/Y 比・Nb/Y 比を示す試料は、スラブ溶融メルト成分を含むと考えられる。

謝辞

試料採取は、阿蘇くじゅう国立公園管理官事務所の澤邦之上席国立公園管理官に便宜を図っていただいた。火山岩の化学組成分析は、広島大学理学研究科早坂康隆博士・木村光佑博士にお世話になった。記して感謝申し上げます。

参考文献

- Hunter, A.G. (1998) Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *J. Petrol.*, 39, 1255–1284.
- 鎌田浩毅 (1997) 宮原地域の地質, 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査

- 所, 127p.
- Kanazawa, T., Sager, W.W., Escutia, C., Araki, E., Arney, J.E., Carlson, R.L., Downey, W.S., Einaudi, F., Haggas, S.L., Hayasaka, Y., Hirata, K., Horner-Johnson, B.C., Mandernack, K.W., McCarthy, F.M.G., Moberly, R., Mochizuki, M., Pedersen, R.Ø., Salimullah, A.R.M., Shinohara, M., Werner, C-D. (2001) Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Report 191, Chapter 2. Explanatory notes. 49p.
- 川辺禎久・星住英夫・伊藤順一・山崎誠子 (2015) 九重火山地質図. 火山地質図, 19, 産総研地質調査総合センター
- Kepezhinskas, P., McDermott, F., Defant, M. J., Hochstaedter, Al., Drummond, M. S. (1996) Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 577–600.
- Kita, I., Yamamoto, M., Asakawa, Y., Nakagawa, .M, Taguchi, S., Hasegawa, H. (2001) Contemporaneous ascent of within-plate type and island-arc type magmas in the Beppu–Shimabara graben system, Kyushu island, Japan. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 111, 99–109.
- Miyoshi, M., Fukuoka, T., Sano, T., Hasenaka, T. (2008) Subduction influence of Philippine Sea plate on the mantle beneath northern Kyushu, SW Japan: An examination of boron contents in basaltic rocks. *J. Volcano. Geotherm. Res.*, 171, 73–87.
- Nakada, S., Kamata, H. (1991) Temporal change in chemistry of magma source under Central Kyushu, Southwest Japan: progressive contamination of mantle wedge. *Bull. Volcanol.* 53, 182–194.
- 小野晃司 (1963) 5万分の1地質図福「久住」および同説明書, 地質調査所, 124p.
- 山崎誠子, 星住英夫, 松本哲一 (2016) 九重火山群中西部の発達史 —感度法 K–Ar 年代に基づく再検討—, *火山*, 61, 519–531.
- 柴田知之 (2013) 九重火山の地球科学的研究, 大分県温泉調査研究会報告, 64, 1–3.
- Shibata, T., Yoshikawa, M., Itoh, J., Ujike O., Miyoshi, M., Takemura, K. (2014) Along-Arc Geochemical Variations in Quaternary Magmas of Northern Kyushu Island, Japan. In Gómez-Tuena, A., Straub, S.M., Zellmer, G.F. (Eds.), *Orogenic Andesite and Crustal Growth*. Geological Society of London, Special Publication. Geological Society, Special Publications, London, 385, pp. 15-29.
- 芳川雅子・柴田知之・公門駿・杉本健・竹村恵二 (2015) 大分県内の火山岩類の化学・Sr–Nd 同位体組成 (その1) 鶴見岳・由布岳, 大分県温泉調査研究会報告, 67, 35-39.

由布・鶴見火山群地下の磁化構造推定

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター
宇津木 充

要 旨

由布岳、鶴見岳、伽藍岳において、磁気インバージョンを行い、地下の3次元的な磁化を推定することを試みた。

1. はじめに

本研究では、由布・鶴見火山群について山体地下の磁化構造解析を行った。一般に地下の岩石は微弱な磁化を持つので、その周辺にローカルな磁場分布（磁気異常）を作る。この磁気異常の観測値から、逆解析（インバージョン）によって地下岩石の磁化強度の分布を求めることが出来る。こうして得られる磁化強度の分布から、地下岩石の変質の度合いや地下の温度状態などについての情報が得られる。本研究では、別府・鶴見火山群について、磁化構造推定のため3次元インバージョンを行った。2017年度は、由布・鶴見火山群から別府湾の一部を含む30km x 30kmの比較的広い領域について磁化構造を求めたが、2018年度は由布・鶴見火山群周辺の8km x 8kmの領域について同様の解析を行い、火山体地下のより詳細な構造を求める事を試みた。尚、今年度において伽藍岳火口原などいくつかの領域で地上観測による磁気探査を実施したが、有意な地下構造を得るための広範囲な領域でのデータ取得が出来なかったことから、今年度はインバージョンの入力データとして国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターから発行されている「日本空中磁気データベース」(Nakatsuka and Okuma, 2005)を用いた。

2. 入力データ

図1aに由布岳、鶴見岳、伽藍岳を含む東西、南北8kmの範囲の地形図を示す。標高は、国土地理院の10m数値標高モデルデータを用いた。ここに図1及びその他の図ではUTM(Universal Transverse Mercator)系における座標(単位はkm)を用いている。図1bには、国立研究開発法人産業技術総合研究所地質調査総合センターから発行されている「日本空中磁気データベース」(Nakatsuka and Okuma, 2005)の磁気異常データについて、図1aの領域における磁気異常を示した。観測点高度は、由布・鶴見岳付近で地形に沿って対地200~300m上空の滑らかな曲面となっている。この結果から、由布・鶴見、伽藍岳周辺で北で全磁力減少、南で増加のアノマリーが見られる。これは火山体が現在の地球磁場方向に帯磁している場合の典型的なパターンであり、こうしたことから由布、鶴見、伽藍の火山群の山体

が正帯磁していることが示唆される。

このデータについて、以下に述べる地形補正、及び傾向面解析を施した。

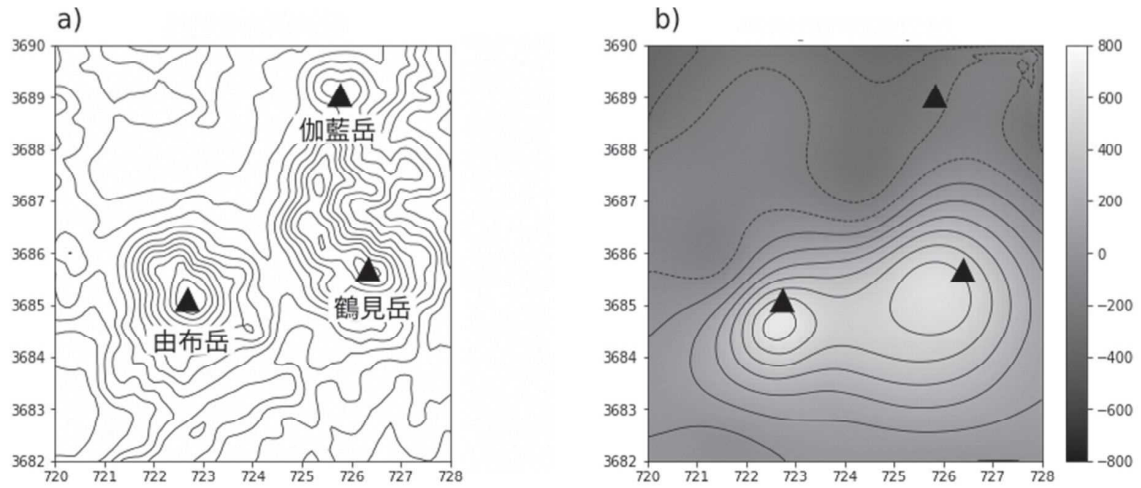


図 1. (a) 地形図及び(b)磁気異常分布 (日本空中磁気データベースより)

次章で磁気インバージョンを行い地下の磁化分布を求めるが、この際、図 1b の磁気異常から地下の平均的な磁化 J_0 (> 0) が作る磁気異常を除いた残差についてインバージョンを行う。これにより、得ら

れる磁化モデルは、地下の磁化の、平均磁化からの偏差となる。現実的な問題として、この操作によりインバージョンにおいて負 ($-J_0$ まで) の磁化が許されるので、入力となる磁気異常の再現性、解の収束性、安定性が向上する。こうして得られた磁化の偏差のモデルに J_0 を加える事で、最終的に地下の磁化分布のモデルが得られる。こうした目的で、まず地下の平均磁化を求めた。この際、地殻を、深さ方向に無限に伸びる角柱に分割し、それらが一様磁化 J_0 を持つと仮定する。さらに磁化方向も一様 (現在の地球磁場の方向、偏角 -7.3° 、伏角 48.2° に一致する) と仮定する。図 2 には、地下が単位の磁化で一様に磁化していると

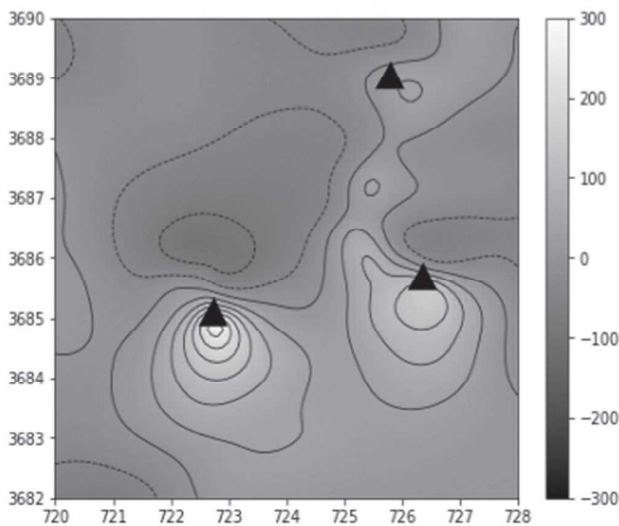


図 2 地下が単位磁化していると仮定した場合の磁気異常
(カラーバーの単位は nT)

仮定した場合の磁気異常を示した。従って地下の磁化が J_0 である場合には、図 2 の磁気異常を J_0 倍し

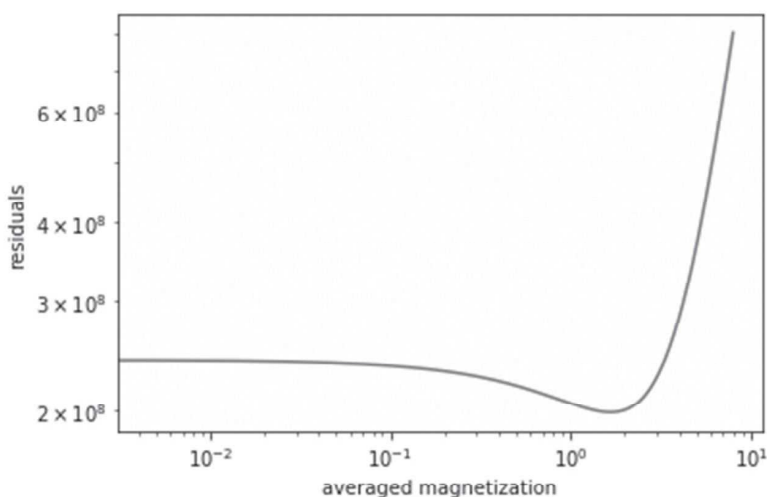


図3 J_0 の値(横軸)を変えながら、図1bのデータとの残差(縦軸)を求めた結果。 $J_0=1.75$ 付近で残差が最小となった。

たものが期待される地形効果となる。ここで最適な J_0 の値を求めるため、 J_0 の値を変えながら、観測データ(図1b)との差を計算し、両者の残差が最小となった J_0 を平均磁化として採用した。この結果を図3に示す。この結果から、図1bとの残差の意味で最適な J_0 は 1.75A/m と求められた。

次に、地下深部に起因する波長の長い磁気異常成分の影響を除くため1次の傾向面解

析(Borcard et al., 1992)を施した。この方法では、地形効果を補正した磁気異常の長波長成分が

$$t = a \cdot x + b \cdot y + c$$

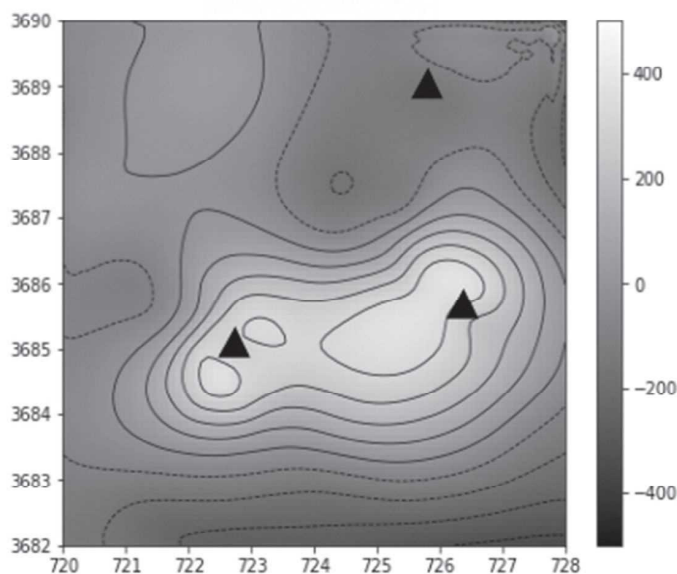


図4 地形効果補正、一時傾向面補正を施したのちの磁気異常

という線形な式で表されると仮定する。ここに x , y は各データポイントにおけるUTMの南北、東西座標、 a , b , c は元のデータから求められる係数(傾向面のパラメータ)である。これは波長が非常に長い磁気異常分布が、限られた解析範囲で見ると線形な勾配をもつように見える、即ち1次の傾向面で表されると仮定するものである。該当地域における空中磁気データから、係数 a , b , c を最小二乗的に求めた上で、上式で再計算される t を元のデータから除いた。

以上の処理を施したのちの最終的な磁気異常分布を図4に示す。これを入力として磁気インバージョンを行った。

3. 解析結果

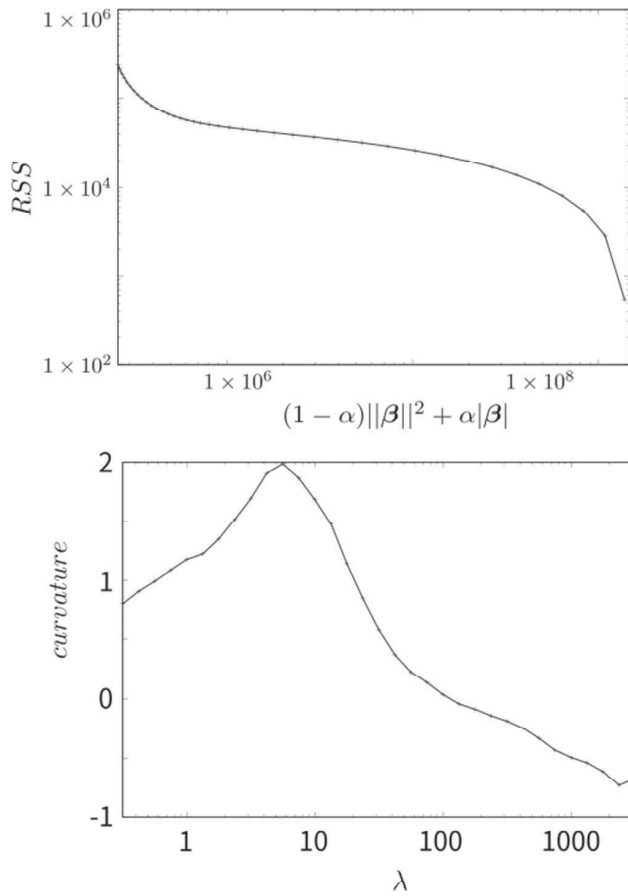


図5 L-curve(上段)とその曲率(下段)

図4に示した磁気異常分布を入力として、由布、鶴見及び伽藍岳地下の磁化分布をインバージョンにより求めた。この為、対象領域の地下を 80m x 80m x 80m の小ブロックに分割し、各ブロック内では磁化が一樣であると仮定した。また磁化方向については現在の地磁気方向と一致すると仮定した。こうすることで、解くべき方程式は

$$\mathbf{f} = \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta}$$

となる。ここに \mathbf{f} は観測値 (図4の磁気異常)、伝達行列 \mathbf{X} は、その第 j 番目の列ベクトルに、 j 番目の小ブロックが各観測点に作る磁気異常を格納したものである。 $\boldsymbol{\beta}$ は各ブロックの磁化を縦に並べた列ベクトルであり、これが未知ベクトルとなる。インバージョンで $\boldsymbol{\beta}$ を求める際、最小化すべき目的関数として、通常インバージョンに用いられる観測値と理論値との残差自乗に加え、本報告で

はL2 ノルム及びL1 ノルムペナルティを付加した以下のものを用いた(Utsugi, 2019)。

$$L(\boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{f} - \mathbf{X} \cdot \boldsymbol{\beta}\|^2 + (1-\alpha)\lambda \|\boldsymbol{\beta}\|^2 + \alpha |\boldsymbol{\beta}|$$

ここに α は L1-L2 ノルムペナルティの混合率を表すハイパーパラメータ、 λ はペナルティ項の強度をコントロールする正則化パラメータである。Utsugi (2019)に従って、 α は 0.9 で固定、 λ については最適値を L-curve 法(Hansen, 2001)に基づいて求めた。図4を入力として行ったインバージョンにより得られた L-curve を図5に示す。この結果から最適な λ は 5.6 と求められた。図6に、この λ を用いたインバージョン結果のスライス (深さ 200m, 400m, 600m 及び 800m) を示した。由布岳、鶴見岳、伽藍岳の浅部では、磁化は見積もられた平均磁化(1.7A/m)より高く、概ね 2.5A/m 以上の値を示している。これらの火山の表面には第四期更新世、完新世の安山岩・玄武岩質安山岩溶岩が分布しており (産業照合研究所・シームレス地質図、<https://gbank.gsj.jp/seamless/>)、磁化が比較的強く見積もられるこ

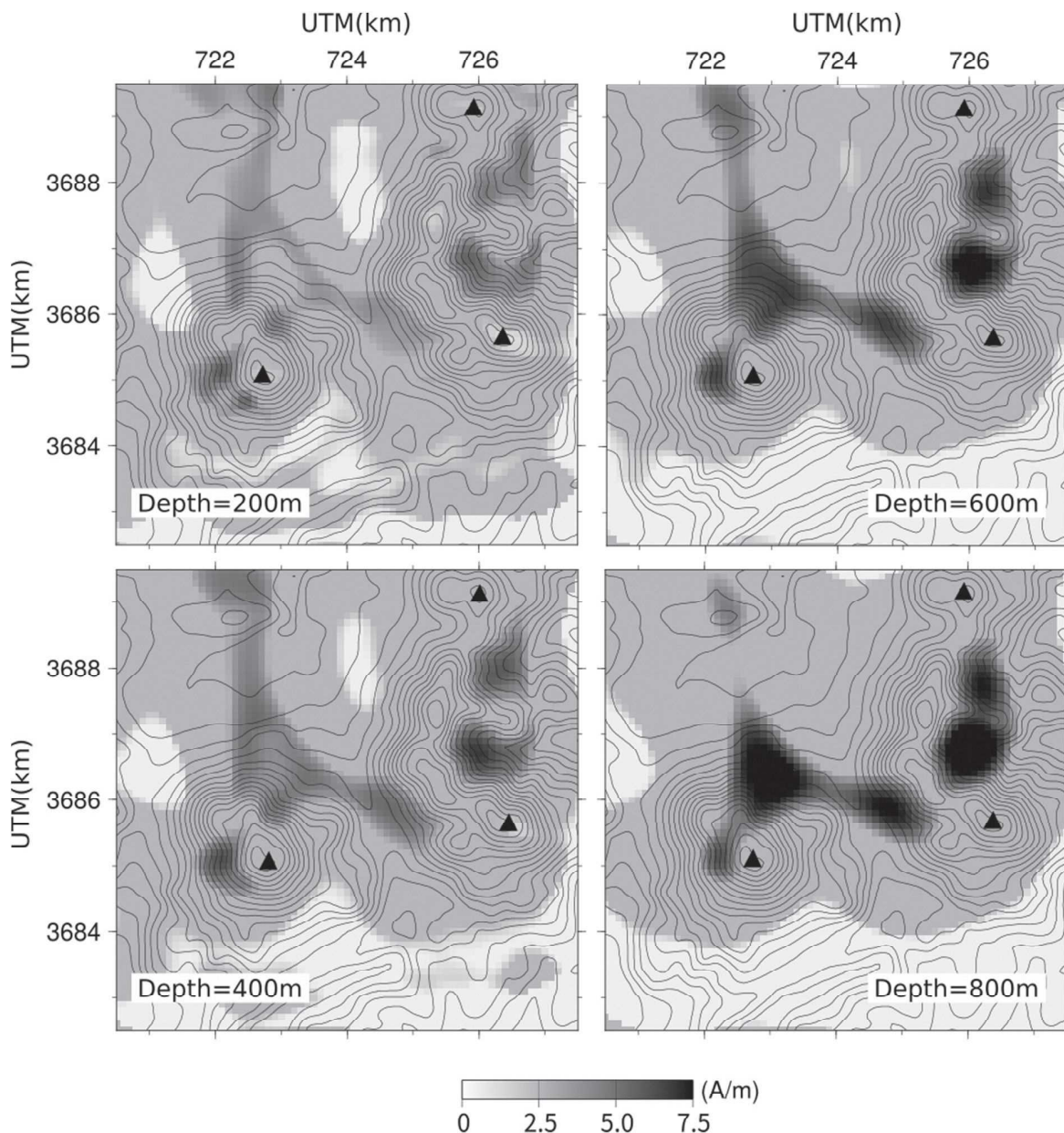


図6 インバージョンによって求められた由布、鶴見、伽藍岳地下の磁化構造

とは調和的であると考えられる。また特に、由布岳の北側、鶴見岳の北側・伽藍岳南側に磁化が高い領域が見られ、これらは深部にかけて連続しているように見える。これらはかつての火山活動により地下から供給されたマグマの残滓であるという解釈も可能かもしれない。

4. まとめ

地磁気データベースに収録されているデータは、比較的高高度で観測された空中磁気観測結果を、さ

らに上方接続(Nakatsuka and Okuma, 2006)で上空の平滑化面上に投影したものとなっている。この為、浅部磁化分布の情報を持つ短波長成分が除かれている。図 6 の結果でも浅部で磁化が弱くなっているのはこの影響が考えられる。空中磁気データベースに加え、地上磁気探査などにより得られるデータを相補的に用いれば、インバージョンの精度を向上することが出来ると考えられる。今年度は地上観測データを解析に用いることが出来なかったが、今後主要な火山周辺の磁気探査を継続し、より高精度な磁化モデル構築に取り組んでゆきたい。

参考文献

- Borcard, D., Legendre, P., and Drapeau, P., 1992, Partialling out the spatial component of ecological variation: *Ecology*, 73, 1045-1055.
- Hansen, P. C., 2001, The L-curve and its use in the numerical treatment of inverse problems, invited chapter in *Computational Inverse Problems in Electrocardiology*, P. Johnston, ed., WIT Press, Southampton, 119-142.
- Nakatsuka, T., and Okuma, S., 2005, Aeromagnetic Anomalies Database of Japan: Digital Geoscience Map P-6, Geological Survey of Japan.
- Nakatsuka, T., and Okuma, S., 2006, Reduction of magnetic anomaly observations from helicopter surveys at varying elevations, *Exploration Geophysics*, 37, 121-128.
- Utsugi, M., 2019, 3-D inversion of magnetic data based on the L1-L2 norm regularization, EPS(accepted).

市民参加型温泉モニタリング体制の構築を通じた温泉地の 市民科学のあり方の探求

龍谷大学 経済学部

山田 誠

温泉マイスター協会

幸 準一郎

総合地球環境学研究所

増原 直樹

要旨

別府市内で行っている市民参加型温泉科学データモニタリングの参加者を対象に、市民が温泉の科学的調査に参加する際の意識調査を行った。その結果、温泉の科学データが温泉を好む人々の興味の対象の一つになりうること、観測を通じて参加者自身の温泉に対する見方が変化していること、自身が観測したデータに対して信頼が置けるかどうかの不安があり、研究者からの事前のデータの扱い方についての伝達がうまくできていなかったことなどが明らかとなり、モニタリング体制の修正点や、温泉科学が市民科学として定着するために必要なものは何かを知る上で参考となる基礎的な情報を収集することが出来た。

1. はじめに

近年の Web 技術の発展により、一般市民が科学研究活動に関わるための敷居が以前と比べ格段に下がったことで、研究に参加する機会が様々な分野で飛躍的に増加し、科学データの集積の仕組みが大きく変化している。昨今、「オープンサイエンス」に関する議論が進んでおり（内閣府，2015）、科学研究の「オープンサイエンス」化が推奨されるようになりつつある。一般市民が参加するいわゆる市民科学もオープンサイエンスの文脈で捉えられており（船守，2017）、旧来からある市民科学の新しい展開も期待されている（林，2015）。しかし、温泉科学の分野においてはそもそも市民科学的なアプローチはあまり見られず、一般市民の温泉への関心は非常に高いにもかかわらず、市民科学としての温泉科学は定着していないといっても過言ではない。一方で、別府市などの多くの温泉地では、温泉資源利用のあり方について、様々な問題を抱えており、温泉資源の適正な利用と開発の方法が求められている。このような問題に対処するためには、その地域のステークホルダー（SH）間の合意形成が必要不可欠であるが、その際、SH は否応なしに科学的判断を求められることになる。SH への温泉に関する科学リテラシーの涵養は、温泉資源に係わる諸問題の解決にとって非常に重要である。温泉科学が市民科学として定着することは、一つの科学リテラシーの涵養の形であると考えられるであろう。そこで本研究では、市民が温泉の科学的調査に参加することに対する意識の有り様、言い換えると、温泉科学が市民科学として定着するために必要なものは何かを明らかにするための基礎的な情報を収集する目的で、別府市内で行

っている市民参加型温泉科学データモニタリングの参加者を対象にアンケートを行った。本報では、別府市で行っている市民参加型温泉科学データモニタリングの詳細とアンケート結果について報告する。

2. 市民参加型温泉科学データモニタリングについて

筆者らは、2016年から年1回、市民参加型の温泉調査「せーので測ろう！別府市全域温泉一斉調査」（以下、「一斉調査」と呼ぶ）を行っている。一斉調査では、研究者・行政・NPO法人・一般市民と一緒に温泉を調査し、その際得られたデータはWeb上に公開している（後述の参考文献のURLを参照）。一斉調査の目的は、「研究者・行政・一般市民などのSHが一堂に会して温泉の科学データに触れ、共有する資源である温泉をSH自身が主体となって利用・管理していくために、その土台となる科学データ自体もSHの手で採取し、科学データを「採る」「見る」「考える」という資源管理に必要な科学的解釈をするための一連のプロセスをSH自身に行ってもらおう」というものである。一斉調査の詳細については、由佐・山田（2017）や山田・王（2018）を参照されたい。市民参加型温泉科学データモニタリング（以下、「温泉モニタリング」と呼ぶ）は、この一斉調査に関連する調査として、2017年の一斉調査後から開始している。その方法は、一斉調査の参加者の中から有志を募り、研究者から観測用の測器を提供し、決められた温泉で定期的に測定をお願いするというものである。温泉モニタリングの目的は、年に一度の一斉調査で得られるデータを解釈するための補完的なデータを得るという意味もあるが、一般市民に温泉研究に積極的に参加してもらおうという意味合いが強い。

温泉モニタリングは、本稿執筆現在、別府市内6ヶ所で行っており（図1）、これまでモニタリングへの参加を申し出た人は8名であった。そのうち、現在も継続して参加いただいている人（測定を継続していただいている）は7名（うち2名はペアで観測してもらっている）である。なお、現在も継続して参加いただいている方々の多くは、温泉マイスターの資格を所有しており、温泉に対する造詣が深い方々である。モニタ

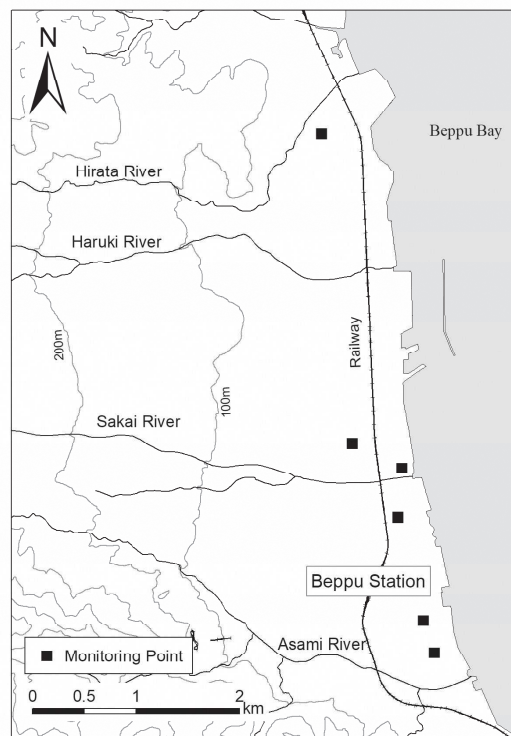


図1 温泉モニタリング地点

リング対象地点については、現時点で、新たに4ヶ所増える予定になっており、今後も観測地点および参加者を増やしていく予定である。観測のペースは、最低3ヶ月に一度程度の頻度で温泉のデータを採取してもらうことにしているが、源泉が居住地近辺にある参加者には、それより多い頻度（1週間に一度など）でデータの採取を行ってもらっている。採取

するデータは、水温と電気伝導度である（当初pHの測定も行っていたが、測器の不良により観測を中止）。観測したデータは、スマートフォンやパソコンなどを用いて、Web ページから観測者自らデータ登録してもらうことになっており、データベースに随時蓄積されるようになっている。図2はデータ登録用のWeb ページである。現在、観測者はデータを自由に閲覧できるようになっているが（図3）、一般に向けてのデータ公開はまだ準備中で、その仕組みを整えているところである。

図2 データ入力用 Web ページ

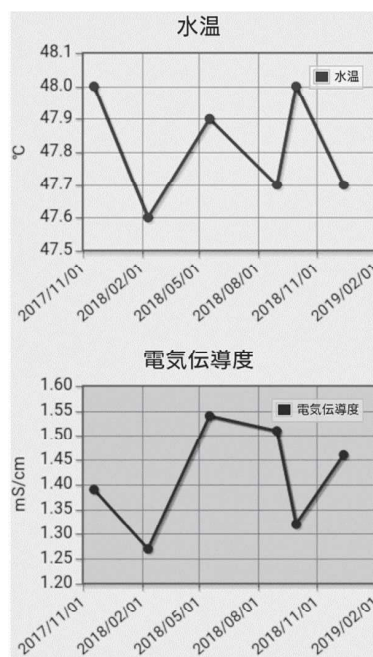


図3 モニタリング結果の表示例

3. アンケート結果について

アンケートは前述の8名に対して行い、そのうち6名から回答を得た。アンケートの内容は図4に示したとおりである。モニタリングに参加した理由(問2)を複数回答可として聞いたところ、回答者全員が「温泉の科学データに興味があったから」を選んだ。また、担当

している泉源のデータ以外のデータを見たことがあるかとの問(7)に対しては、回答者全員が見たことがあると回答し、どのような観点で他のデータを見ているかの問(8)に対しては、「自分が担当している泉源のデータとは関係なく、個々の泉源に興味がある」を6人中5人が選択した。この結果は、参加者が個別のデータよりも温泉全般の科学データに強い関心があることを示唆している。前述の通り、参加者の大半が温泉マイスターの資格を所有している、いわゆる温泉好きの方々であるので、温泉に対する知見を増やしたいという思いが反映された結果だとも言えるが、この結果は、温泉の科学データが、単に研究者が研究に利用するだけのリソースというだけではなく、温泉を好む人々の興味の対象の一つになりうることを示しているものと考えられる。

モニタリングを始める前と後で、「モニタリング対象としている温泉」についての感じ方について聞いた問(3)では、6人中4人が変化はなかったと回答したが、変化があったと回答した2名は、その理由についてそれぞれ、「他の対象施設より身近に感じるようになった」、「温泉の泉質などを見るようになった」と回答している。前者は、モニタリング対象泉源をより身近な物に感じて、他の泉源との差異化が生じている可能性がうかがえ、後者は、温泉自体に対する接し方の変化がうかがえる。一方で、モニタリングを始める前と後で、「別府の温泉」や「温泉そのもの」についての感じ方・考え方について変化があったかどうかの問(5)に対しては、変化の有無はちょうど半々に意見が分かれた。変化があった人に対して、どのような変化があったかを聞いたところ、「温泉を資源としての観点で見えるようになった」「温泉の成り立ちなどに興味をもつようになった」「温泉の湯けむりや色で、泉質がわか

別府温泉モニタリングについてのアンケート

いつも温泉モニタリングにご協力いただき、ありがとうございます。温泉モニタリングをさらに充実させるため、お手教をかけますが、アンケート調査にご協力をお願いします。

1. あなたがモニタリングしている温泉の名称を教えてください。(複数ご担当いただいている方はすべて記載ください)
2. モニタリングに参加していただいた理由を教えてください。(複数回答可)
当てはまるものをすべて選択してください。
 温泉の科学データに興味があったから 温泉の観測に興味があったから
 対象泉源の泉質の変化に興味があったから 誘われたから その他
3. モニタリングを始める前と後(現在)とで、「モニタリング対象としている温泉」についての感じ方について変化はありましたか?
1つだけマークしてください。
 変化があった 変化はない わからない
4. 前問で、変化があったとお答えの方にお聞きします。どのように変わったかについて具体的に教えてください。
5. モニタリングを始める前と後(現在)とで、「別府の温泉」や「温泉そのもの」についての感じ方・考え方について変化はありましたか?
1つだけマークしてください。
 変化があった 変化はない わからない
6. 前問で、変化があったとお答えの方にお聞きします。どのように変わったかについて具体的に教えてください。
7. 担当されている泉源のデータ以外のデータ(一斉調査のデータも含む)を見たことはありますか?
1つだけマークしてください。
 よく見る たまに見る 見たことはある 見たことはない
8. 前問で、「よく見る・たまに見る・見たことはある」とお答えの方にお聞きします。どのような観点で他のデータを見えていますか?最も当てはまるものを選んでください
1つだけマークしてください。
 自分が担当している泉源のデータとの比較
 自分が担当している泉源のデータとは関係なく、個々の泉源に興味がある
 別府全体の温泉の泉質の変化について興味がある その他
9. モニタリングを行う際に、難しいと感じること(測定技術的なことやデータの見方など)はありますか?
1つだけマークしてください。
 よくある(たくさんある) ある たまにある(すこしある) ほとんどない
10. 前問で、難しいと感じることがあった方にお聞きします。具体的に、どのような点で難しいと感じましたか?また、それを解決するためには、研究者からのどのようなサポートや工夫が必要と感じますか?
11. モニタリングの測定に行った際に、利用者や管理者から何か言われたことはありますか?(質問や苦情等々なんでも)
12. モニタリングや一斉調査に参加してくれる人を増やすために、参加してよかったと思えるような仕組みについて、何かアイデアがありましたら教えてください。
13. その他、モニタリングを行うにあたって、感じていること、改良すべき点、感想など、何でも結構です。何かありましたらお書きください。

図4 アンケート内容

アンケートは Google フォーム を用いて作成し Web 上で回答していただいた

た」「温泉の成り立ちなどに興味をもつようになった」「温泉の湯けむりや色で、泉質がわか

るようになった」という回答を得た。このことは、モニタリングをすることで、これまでと違った温泉の見方が生じていることを示していると思われる。以上のモニタリング前後の変化に関する質問からは、モニタリングの本来の目的である時系列の変化についての関心を読み取ることは出来なかった。この結果は、モニタリングが、本来の目的である時系列の変化に参加者の関心を向けさせているというよりも、観測をすることを通じて、参加者自身の温泉に対する見方を変化させることに影響を与えている可能性を示している。

モニタリングを行う際に何かしら難しいと感じる点があるかどうかの問いに対しては、6人中5人が「たまにある・ある・よくある」のいずれかと回答し、その具体的な理由として、「泉温測定で貯湯タンクからしか採湯できない」、「電気伝導度の測定値にばらつきが生じてしまう」という回答を得た。前者は、モニタリングに際して、出来るだけ泉源に近い場所で泉温測定を行ってもらおうよう指示を出していることで、貯湯タンクからの温泉水の測定データで良いのかどうかの判断を自身で行うのが困難であることに起因すると推察できる。また後者も、電気伝導度計の示すデータが、同じ水を測定しても完全に同じ値を示すわけではなく、ある程度の振れ幅を持つてしまうことに対して、データの信頼性について疑問をもってしまうことに起因すると推察できる。前者も後者も、自身が観測したデータに対して、信頼が置けるかどうかの不安を表しているものと推察でき、研究者側からの事前のデータの扱い方（採り方やデータの精度等）についての伝達がうまくできていなかったことの現れであると考えられる。

上述した以外に、自由回答形式でいくつかの質問にも答えていただいた。以下に、それらに対する回答を箇条書きで記述する。

【問】モニタリングの測定に行った際に、利用者や管理者から何か言われたことはありますか？（質問や苦情等々なんでも）

- 最近、メンテナンスしたら濃くなったと聞いたが、数値は変わらなかった。
- 利用者からモニタリングのことを聞かれ、目的を伝えると「ご苦労様」と言われ、遣り甲斐を感じた。
- ごくろうさまと言われたことがある

【問】モニタリングや一斉調査に参加してくれる人を増やすために、参加してよかったと思えるような仕組みについて、何かアイデアがありましたら教えてください。

- ある程度希望を聞いて、できそうな人は調査キットや調べるポイントをもっと増やす。
- 測定結果を客観的に分かりやすく公開することで、資源保護の必要性を周知する必要があると思います。
- 各温泉にモニタリングをしていることを掲示する。ホームページのアドレス等も載せ

る。

【問】その他、モニタリングを行うにあたって、感じていること、改良すべき点、感想など、何でも結構ですので、何かありましたらお書きください。

- モニタリングが1つだけなので、あと何か所か行ってみたい。
- 担当していた温泉が閉鎖されたことは、モニタリングで伺うのに管理者への事前の連絡が必要なため、電話を入れ始めて知りました。連携不足を感じました。
- 別府の場合、重要な要素として湯量の変化もあげられる。
- モニタリングの数を増やす。

4. 市民参加型温泉モニタリング体制の構築および温泉科学の市民科学化への課題

前節でも述べたとおり、アンケートの結果、温泉の科学データが温泉を好む人々の興味の対象の一つであることが伺え、一般市民に対する温泉の科学データの価値を見いだすことは出来そうである。考えてみると、そもそも温泉には泉質がつきもので、温泉利用者が泉質について興味をもつことは自然であり、この結果は至極普通の結果であるとも言える。一般の温泉利用者が、“泉質”というもの（泉温を含む）を“科学データ”としては十分に認識していない可能性はあるものの、泉質という科学データは一般市民にとって身近な存在であり、温泉科学が市民科学として定着することが出来るポテンシャルを有していると言えよう。

今回のアンケート結果では、モニタリングをすることを通じて、参加者の温泉に対する見方に影響を与える可能性が示唆された。このようなイベントに参加してもらう機会を増やすことが、温泉科学の市民科学化への一つの糸口となるのではないかと考えられる。特に、源泉所有者のような、温泉と常に対峙している人に積極的に参加してもらうことは、SHへの温泉に関する科学リテラシーの涵養という観点において、重要な意味をなすのではないかと考える。

以上のように、モニタリングに参加してもらうことに一定の効果があることが期待されるが、モニタリング体制の構築という観点ではそれほど容易ではない。というのも、意味のある温泉の科学データを採るには、それほど高価ではないにしろ、ある程度コストがかかる測器を研究者側で準備する必要がある。また、アンケート結果から見てきたとおり、研究者からのデータの扱い方等の丁寧なレクチャーは必要不可欠である。モニタリングに参加してくれる人が増えれば増えるほど、期待できる効果は大きくなると考えられるが、その分、研究者側の負担は大きくなり、実質的に運用は難しくなる。この点については、現在モニタリングに参加いただいている方々のような、温泉に対して熱意を持っておられる方々を中心としたグループワークのような方式による展開も考える必要があるかもしれない。

市民科学という観点からも、市民である方々を中心として、そこから裾野を広げていくような形が理想的ではないかと思われる。

5. まとめ

現在、体制を構築中の市民参加型温泉科学データモニタリングに参加いただいている方々にアンケートに答えていただいた結果、ほんの一端ではあるが、市民が温泉の科学的調査に参加すること、もしくは、参加している際の意識の有り様を見ることが出来た。今回の調査は、温泉モニタリングに参加していただいているごく少数の人に対する調査であり、あくまで定性的な解釈でしかないが、温泉科学が市民科学として定着するために必要なものは何かを知る上で参考となる基礎的な情報を収集することが出来たのではないかと考える。少なくとも今回のアンケート結果からは、このようなイベントが、市民への温泉の科学リテラシーの涵養に対して貢献できるポテンシャルを有していると考えられたので、今後も継続していくことが重要であると考えている。

謝辞

市民参加型温泉科学データモニタリングを実施するにあたって、モニタリング（データ採取）に参加いただいている方々、対象泉源の泉源所有者および管理者の方々には多大なご協力をいただきました。また、モニタリング対象の泉源の選定や、それらの泉源管理者との連絡等の際して、別府市温泉課の方々にご尽力いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- せーので測ろう！別府市全域温泉一斉調査 Web マップ：<https://www.wefn.net/beppu/>
- 内閣府（2015）国際的動向を踏まえたオープンサイエンスに関する検討会報告書。
- 林和弘（2015）オープンな情報流通が促進するシチズンサイエンス（市民科学）の可能性，科学技術動向, 160, 21-25.
- 船守美穂（2017）オープンサイエンス推進に関わる学術機関の役割と課題，情報知識学会誌, 27（4）, 309-322.
- 山田誠・王智弘（2018）別府市内の温泉を対象とした市民参加型温泉一斉調査．地熱資源をめぐる 水・エネルギー・食料ネクサス（馬場健司・増原直樹・遠藤愛子編），近代科学社，260-270.
- 由佐悠紀・山田誠（2017）：2016（平成28）年11月13日の別府温泉一斉調査，大分県温泉調査研究会報告，63, 1-9.

