

活火山熱水系における不均一系地球化学平衡に関する理論的ならびに観測的研究

穂山 拓実^{1,2}・大沢 信二¹

Theoretical and Observational Research on Heterogeneous Geochemical Equilibria in the Hydrothermal System of Active Volcanoes

Takumi Akiyama^{1,2} and Shinji Ohsawa¹

1. 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設 Beppu Geothermal Research Laboratory
Noguchibaru, Beppu City, Oita, 874-0903, Japan. E-mail: ohsawa.shinji.3w@kyoto-u.ac.jp
2. 京都大学大学院工学研究科（現所属）Kyoto University, Graduate School of Engineering (Current)
C1-2, Katsura Campus, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan.

キーワード：九重硫黄山，水蒸気噴火，熱水系，低温噴気

Key words：Kuju Volcano, Phreatic Eruption, Hydrothermal System, Low-temperature Gas

1. はじめに

突発的に発生する水蒸気噴火に伴う人的被害の軽減には、火山性地震や地殻変動、マグマ性ガスの検知のみならず、噴火の直接的な原因となる火山体内の熱水系の挙動に対する理解が必要不可欠である。

九重火山では1995年に、火山ガスを継続的に放出している噴気地「九重硫黄山」の南東にある星生山山頂の東方尾根部で、水蒸気噴火が発生した。現在は、新たに生じた噴火口群からの火山ガス放出はおさまり、硫黄山における火山ガスの放出量も低下しているが、火山活動は依然として続いている。総合科学技術会議の火山噴火予知計画により、九重硫黄山は「活動的火山及び潜在的爆発活力を有する火山」に指定されており、数10年～100年間隔で水蒸気噴火を起こしているため、過去の九重硫黄山の水蒸気爆発の原因を探り、未来の噴火に備えることは非常に重要である。

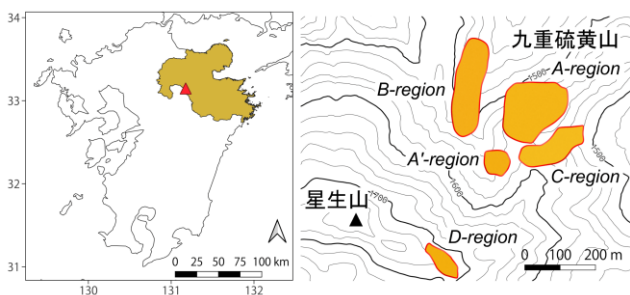
本研究では、高温噴気（火山ガス）だけでなく、熱水系に結びつく低温の噴気や、温泉水の地球化学観測データが得られている九重火山に焦点を当て、気液二相系の物理化学の理論に基づいて噴気の水同位体組成やガス組成から、水蒸気噴火を引き起こす火山熱水系の重要な情報である、温度や蒸気分率などの抽出を試みた。水同位体組成の分析では、既存資料を参照して解析を行ったが、低温噴気ガス組成の解析では、既存資料に加え、2023年10月23日に実施した現地調査時の得られたデータも解析を行った。

2. 噴気の地球化学的調査

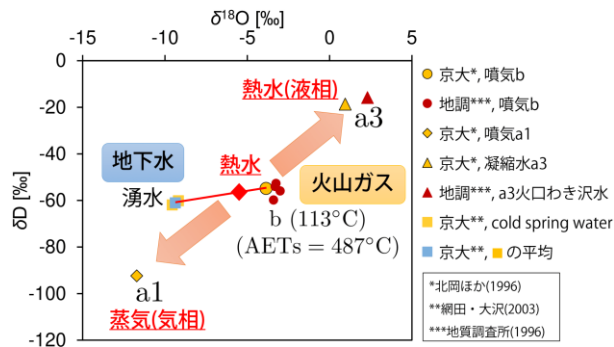
2023年10月23日に九重硫黄山A-regionにおいて、熱水系に結びつく低温の噴気の採取を行った。まず注射器にチューブを接続しテフロン系のグリースで密封性を高めた上で、真空抜気した後、5mol/LのKOH水溶液を充填した。噴気温度が100℃以下かつSO₂が検出されない噴気について、パイプの先端にアルミ製ロートを取り付け、ロートの開口部を噴出口にあてがい、周縁を土封し噴気を導入した。その際、氷水で注射器を冷却しつつKOH水溶液中に蒸気を凝縮させ、SO₂などの成分を溶解して採取した。これを実験室に持ち帰り、ガスクロマトグラフィー、CO₂ガス電極、イオンクロマトグラフィーを用いて分析を行った。

3. 研究1：地球化学-地球熱学連成的解析

九重火山の1995年噴火（主として水蒸気噴火）は、既存の噴気地帯から300mほど離れた噴気活動の無いD-regionで発生した。既存資料等を参照し、噴火以前に地下水とマグマ性水蒸気の混合により新たな熱水が形成されていたとして、既往研究の噴気凝縮水や湧水の水同位体組成 δD - $\delta^{18}O$ の解析から地下水とマグマ性水蒸気の混合率を求めると、およそ37:63であった。この結果を用いて、熱量保存則により、水蒸気噴火の原因となった熱水温度を計算すると、372℃と臨界温度付近に推定された。



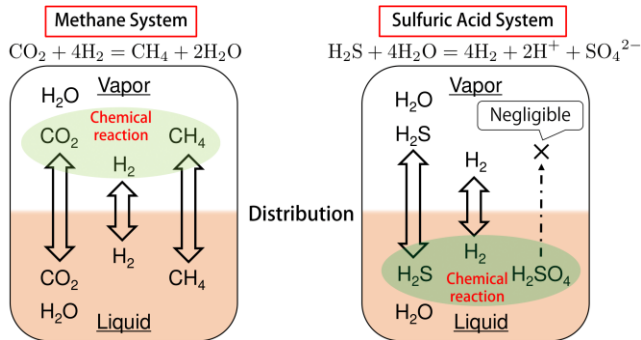
第1図 九重硫黄山の位置及び噴気地の分布



第2図 熱水が生じ同位体分別を起こす過程

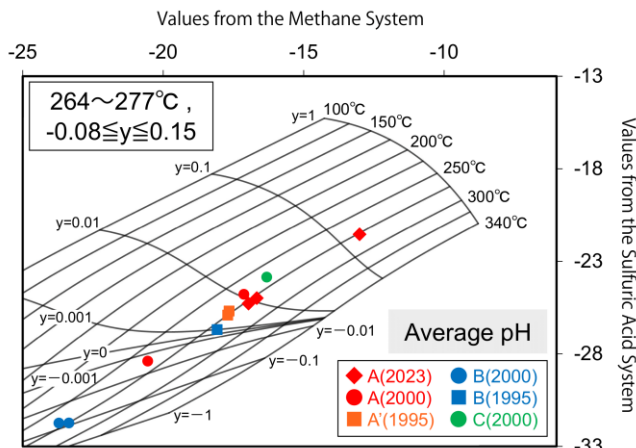
4. 研究2：低温噴気ガス組成の不均一化学平衡解析

火山噴気ガスの先行研究の多くは、気相一相由来と考えられる高温噴気を対象とし（例えば、AETsによるマグマと平衡状態にあった火山ガスの温度解析）、気液二相を想定した不均一地球化学平衡に基づく研究はほとんどみられない。本研究では、火山体内にある気液二相系の熱水貯留層で、 $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ （メタン系と呼称）と、 $\text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4\text{H}_2 + 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$ （同様に硫酸系）の2つの化学平衡の成立を想定し、気相・液相間のガス成分の分配を考慮して、熱水貯留層の温度と蒸気分率等を計算する手法を新たに構築した。



第3図 熱水が生じ同位体分別を起こす過程

既存の噴気地帯（A,B,C・region）から水蒸気噴火の前後にわたって継続的に放出されていた比較的低温（95℃程度）かつ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の低い噴気を計算対象とした。その結果、古くから存在したが水蒸気噴火の場とならなかった活発な噴気地の地下にある気液二相の熱水貯留層は、pH や SO_4 濃度に多少左右されるものの、噴火前後を通し、熱水卓越状態（蒸気分率はほぼ0.1未満）で、温度は264℃～277℃程度と解析された。また、本研究の温度推定手法を検証するため、地熱調査井での噴気組成と貯留層温度（実測最高温度）が揃っているデータに着目して、先述と同様の温度推定解析を行い、実測値と比較した結果、酸性熱水では実測温度と近い値が推定値として得られており、本研究の解析手法の妥当性が示されている。



第4図 メタン系と硫酸系を用いた地化学温度計

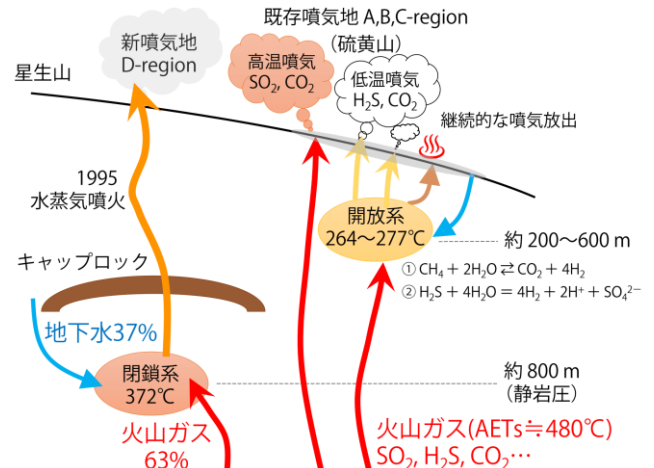
5. 考察

研究1により示された熱水温度372℃は、気液二相状態にある熱水のものであることから、水蒸気噴火発生場の地下に形成された熱水貯留層の圧力は一意的に212atmとな

り、静岩圧下では深度814mと換算できる。この結果は、1995年九重火山噴火に伴う地殻変動の原因となる浅部力源が海拔500m（約1000m深）にあるという結果（西ほか、1996）と整合的であり、その圧力源はマグマ性水蒸気によって臨界温度近くまで昇温した地下水であった可能性がある。また、北岡ほか（1996）においても、水同位体の分析により、活火山体における天水の浸透経路として、天水が臨界点まで熱せられる部分があると述べられていることから、本研究の結果は整合的であると考えられる。

一方、研究IIによる既存の噴気地帯（A,B,C-region）の温度推定結果（264℃～277℃）から、噴火前から継続的に火山体内に存在していた気液二相貯留層は、今回の研究でD-region下に知られたものに比べ低圧（49atm～60atm）で、浅い深度（静岩圧平衡では深度189m～231m）に存在する別の熱水系であると推定される。既存噴気地では、熱水の水蒸気圧力の低さに加え、継続的な噴気放出による封圧緩和や、気液二相貯留層を安定に存在させる岩盤の強度が関係して、熱水系が安定に維持された結果、水蒸気噴火に至らなかったと想像される。水蒸気噴火に関わる熱水が強酸性である限り、本研究で構築した噴気ガス組成の地球化学的解析で導出される熱水系の温度や蒸気分率の情報は、噴火の予測だけでなく、活火山における他の分野の研究にも活用できる重要な情報となり得る。

今回の研究対象である九重硫黄山では、1995年水蒸気噴火時の噴気の地球化学データは、水同位体でしか存在しておらず、低温かつ $\text{SO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比の低い噴気については、噴気孔が大きく、大気の混入などの理由から、ガス組成は得られていない。従って、同位体のデータから推定した温度372℃を本研究で構築・提案した噴気ガス組成データの不均一化学平衡解析から検証することはできなかったが、今後低温の SO_2 を含まない噴気に対して継続的な観測を続けることによって、水蒸気噴火に至る高温の熱水系が検出できると考える。



第5図 新噴気地と既存噴気地の熱水系の差異

文献

西潔, 小野博尉, 中坊真, 平林順一 (1996) 「地殻変動観測から推測される九重火山の浅部力源」, 1995年10月九重火山の水蒸気爆発の発生機構と火山活動推移の調査・研究, 研究成果報告書, 文部省科学科研費 (No.0730017), 突発災害調査研究成果, 105-113.

北岡豪一, 大沢信二, 由佐悠紀, 日下部実 (1996) 「九重硫黄山における深部循環熱水の沸騰による化学及び同位体組成の変化」, 温泉科学, 46, 156-175.