

「ニュースバル放射光施設の光電子顕微鏡を用いた火山噴出物の解析」

兵庫県立大学大学院地域資源マネジメント研究科

佐野 恭平

1 研究の背景と目的

111 もの活火山を有する日本では、たびたび火山噴火による被害が発生する。火山噴火が起こった際に噴火推移を予測し、適切な防災・減災対策につなげていくためには「噴火様式の時間変化はどのような過程に支配されているのか」を正確に理解する必要がある。噴火現象のうち火砕流と呼ばれる火山碎屑物と火山ガスの混合物が高温・高速で地表を流れ下る現象は、一度発生するとその被害が広範囲に及ぶことから、その発生を予測することは火山防災・減災の観点から重要である。火砕流は爆発的な噴火が発生した際に噴煙柱が不安定になり、崩壊した際に発生すると考えられている（例えば Woods, 1988）。噴火時のマグマの噴出率、噴煙の温度、噴煙が大気を取り込む効率が噴煙柱形成の支配要因であると考えられており、噴煙が大気を取り込み、温度を上昇させることで大気は膨張し、噴煙全体の密度が周囲の大気よりも低下することで噴煙柱が形成・維持される。このような噴火現象を理解する上で、火山噴出物から噴煙の温度を推定することが重要である。高温状態で噴煙が大気を取り込む際に火山噴出物は酸化され、 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比（ここで $\Sigma\text{Fe}=\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ ）が高くなるのに対し、低温状態では $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比が低下することが予測される。そこで本研究では、放射光を用いて軽石から $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比や $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比の岩石組織内における不均質さを明らかにするための分析手法の確立を目指し、放射光分析を実施した。

2 研究方法・研究内容

ニュースバル放射光施設での分析は、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所所属の原田哲男博士および山川進二博士と共同で実施した。ニュースバル放射光施設のビームライン BL-10 にて、軟 X 線放射光（ ~ 750 eV）を用いた Fe^{2+} および Fe^{3+} に由来する放射光スペクトルのピークを確認した。BL-10 では粉末およびチップ状に加工した軽石・黒曜石溶岩試料をカーボンテープでステージに固定して分析を実施した。ピーク位置の確認後、 Fe^{2+} および Fe^{3+} に由来するピークの面積と Fe^{2+} および Fe^{3+} の濃度との関係から $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比を定量するための検量線の作成を試みた。

次に、ビームライン BL-09 にて光電子顕微鏡（PEEM）観察を行った。PEEM は試料表面から放出される光電子の空間情報を可視化する手法で、試料表面の形状のみならず、組成、化学状態、磁気情報などを同時に可視化することができる（小飼・大河内, 2016）。観察には北海道遠軽町白滝地域に噴出した黒曜石溶岩のうち（和田・佐野, 2015）、肉眼で不均質な赤色酸化組織を観察できる試料を用いた。火山岩のような絶縁体試料に対して PEEM 観察を実施する場合、試料表面に帯電効果を低減するための蒸着が必要となる（大河内, 2013）。本研究では火山岩試料を観察・分析する際にどの程度の研磨が必要なのか、炭素蒸着など試料表面の帯電を防止する加工が必要なのかなど、観察に必要な試料の加工・前処理方法を検討した。

3 研究成果

ニュースバル放射光施設ビームライン BL-10 における分析では ~ 750 eV の軟 X 線放射光を用い、708 および 720 eV 付近に Fe 原子の L 殻に由来するピークを確認した（図 1）。また、 Fe^{2+} および Fe^{3+} 由来のピーク（Brotton et al., 2007）は正規分布を用いてピーク分離できることから、 Fe^{2+} および Fe^{3+} の濃度既知の試料を用いて分析を実施し、ピーク分離

の結果から $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比を定量するための検量線作成を試みた (佐野ほか, 2024JpGU). しかしながら, 現時点では検量線の精度が良くないため, 標準試料の見直しを含め, 検量線の更なる改良を要する.

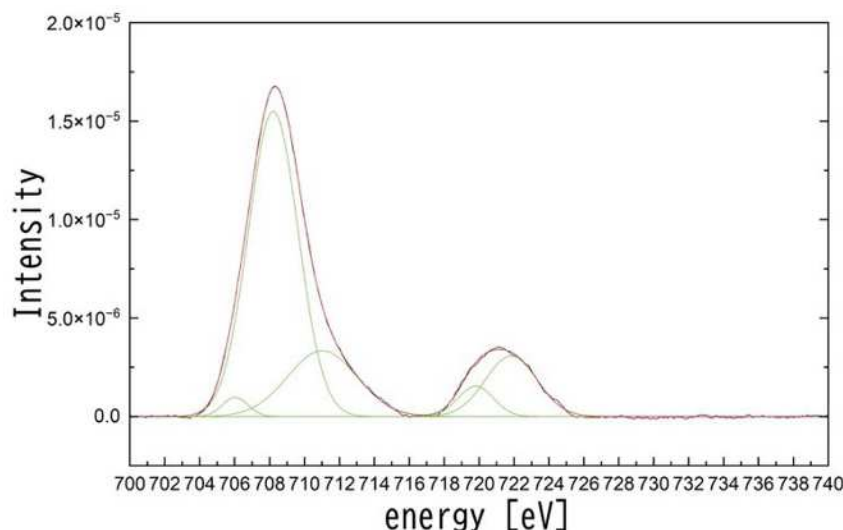


図 1 本研究で取得した Fe 元素の L 殻に由来する放射光スペクトル. 黒線が分析結果, 緑が分離したピーク, 赤が分離したピークを合成したスペクトル.

表面を鏡面研磨した黒曜石試料を用いて PEEM 観察を行った. これまでに我々が実施した PEEM 観察では, 試料表面が耐電してしまい当初は PEEM 像が全く得られなかった. そこで試料表面に炭素膜を十分量蒸着して UV 光源による PEEM 観察を試みたところ, 試料の導電性が向上し PEEM 像を取得できた (図 2). 図中の黄色く囲っている部分は研磨痕であり, その他にも研磨時にできたと思われる凹凸が確認された. しかしながら炭素膜が厚すぎたために, 表面化学組成のコントラスト像は得られなかった. このため, 炭素膜の蒸着量を調整するために試料上部に $\phi 100\mu\text{m}$ のワイヤーを貼り, 試料表面に炭素の蒸着領域と非蒸着領域を作成し, PEEM 観察を行った. その結果, 非蒸着領域を観察することはできたが, 帯電の影響が出てしまうことが明らかとなった.

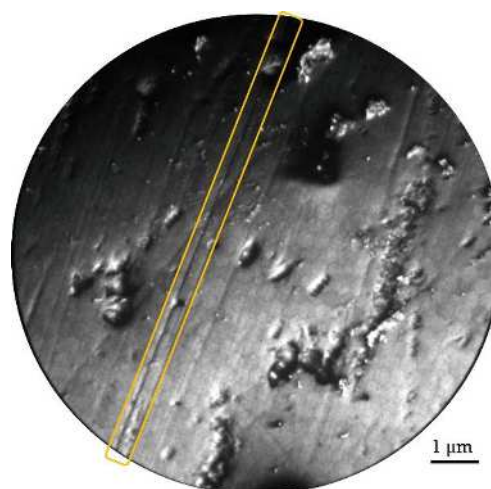


図 2 炭素膜を十分量蒸着した火山岩試料の PEEM 像.

そこで蒸着物質を白金に変更し, 蒸着時に試料上部にワイヤーを貼ることで観察試料表面の白金濃度に濃淡をつけ, 放射光光源 (入射光エネルギー 550 eV) による観察を試みた. その結果, 試料の化学組成を反映していると思われるコントラスト像を得ることができた (図 3a). 画像中の明るい部分を Pos. 1、暗い部分を Pos. 2 として光電子スペクトルを作成したところ, 明確にピークの立ち上がり位置が異なっており, それぞれの位置の化学組成が異なることが強く示唆された (図 3b). 今後は得られた像がど

のような違いを反映しているのかや、岩石組織との対応関係を調べる予定である。

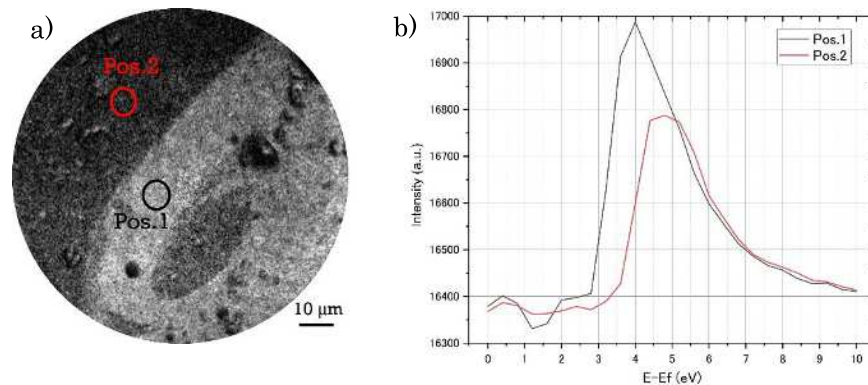


図3 a)白金の薄膜コートをした火山岩試料のPEEM像と
b)Pos.1 および Pos.2 から作成した光電子スペクトル

4 生活や産業への貢献および波及効果

目の前で噴火している火山が今後どのような活動に移行するのかを推定し、そこから適切な防災・減災対策につなげていくためには、噴火開始から収束に至るまでのマグマ上昇・脱ガス過程の時間変化や、火砕流発生メカニズムを明らかにすることが重要である。本研究で実施した火山噴出物の $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比やその組織内における不均質さを明らかにするための研究は、噴火推移の予測に貢献できる可能性を秘めている。また、これらの物質科学的な情報は、火山噴火予測を行う上での基礎データとなる。

[引用文献]

- 大河内拓雄 (2013) 「絶縁性試料の光電子顕微鏡 (PEEM) 観測」, 表面科学 Vol. 34, No. 11, pp. 586-591.
- 小嗣真人, 大河内拓雄 (2016) 「光電子顕微鏡の基礎と応用」, 表面科学 Vol. 37, No. 1, pp. 3-8.
- 佐野恭平, 原田哲男, 和田恵治, 佐藤鋭一 (2024) Magma ascent and pyroclastic flow formation in 7.6 ka Mashu eruption: Insights from textural and synchrotron analyses of pumice deposit, 日本地球惑星科学連合2024年大会ポスター発表, SVC31-P01
- 和田恵治, 佐野恭平 (2015) 「北海道, 白滝ジオパークの黒曜石溶岩の内部構造」, 火山 第60 巻 (2015) 第2号 151-158頁.
- Woods, A. W. (1988) The fluid dynamics and thermodynamics of eruption columns, Bull. Volcanol, 50, 169-193.