

プレート境界における揮発性元素の物質循環に関する研究

○鹿児島渉悟¹

(¹ 富山大学)

良い試料と適切な化学分析手法を組み合わせることで、我々は直接観察するわけでもなく、地球の内部で起きている現象をある程度まで推測することができる。これは偉大な先人たちと活動中の研究者らによる知見・知恵の積み重ねに基づくもので、大変ワクワクすることなので、公金で活動をさせて頂いている立場ではあるものの純粋に楽しむ心を持ちながら研究に臨んで良いと思う。私のこれまでの研究成果は主に固体地球科学に関するもので、プレート境界における火山活動や断層を通じた物質循環に関する報告が多い。これらは希ガス同位体などをトレーサとして用いた研究であるという共通点を持ち、研究対象は様々だが専門性が活かされている。本講演では、以下に記載する研究成果について紹介をさせて頂く予定である。

(1) 中央海嶺—沈み込み帯を通じた揮発性元素の物質循環に関する研究

全球的な揮発性元素の物質循環や各リザーバにおける滞留時間に関する知見は、地球史を通じた大気・海洋の化学組成や環境の変動を紐解く上で重要であり、将来の環境変動の予測などにも役立つと考えられる。マントル起源成分をよく保存する物質の化学・同位体組成は、固体地球内部—地球表層の物質循環に関する重要な情報を与えてくれる。たとえば、中央海嶺玄武岩の急冷周縁相を破碎することで揮発性元素を抽出することで、元素濃度と希ガス同位体組成を測定することができる。すると、ヘリウム-3の固体地球内部から地球表層へのフラックスはよく制約されているため、³He との濃度比に基づき揮発性元素の物質循環を議論することが可能となる (e.g., Kagoshima et al., 2012)。私たちは世界中の MORB や海底熱水・火山ガスの化学・同位体組成に基づいて、中央海嶺と沈み込み帯の火山活動を通じた硫黄のフラックスを推定し、固体地球内部—地球表層における全球的な硫黄の物質循環像を制約した。また、火山ガスに含まれる硫黄の大部分は沈み込んだ物質由来であり、マントル起源の割合は僅かであることを示した (Kagoshima et al., 2015)。

(2) 火山の地球化学的観測研究

日本には多くの活動的な火山が存在する。火山で放出されるガス・地下水の化学・同

位体組成は、流体の起源を反映するため熱水系構造の推定に役立つ。また、化学データはマントル起源物質の混入率などに応じて変動するため、マグマ・熱水系の状態・活動度を評価する上でも有用である。私たちは活動的な火山の地球化学的観測を実施し、熱水系構造や火山噴火に伴い山体内部で発生した現象を解明してきた。たとえば 2014 年 9 月の木曽御嶽山の噴火や、2015 年 6 月の箱根山大涌谷の噴火の前後でガス試料に含まれる希ガス・炭素・窒素などの同位体組成を測定し、時系列データに基づいて噴火に伴う熱水系状態の変動を明らかにした (Kagoshima et al., 2016; Kagoshima et al., 2019)。また、このような研究で得られる観測データは、それぞれの火山において活動度のトレーサとして有用な元素・同位体は何であるかという情報を示すため、その後の観測研究に役立つ。火山観測を通じて熱水系の構造・状態を解明することは地球科学的に重要であるとともに、減災・防災の観点からも高い意義を持つものであり、現在に至るまで調査を実施している。

(3) 海溝近傍の断層を通じた流体循環に関する研究

海溝近傍では沈み込む海洋プレートの屈曲に伴い地形的高まりが生じ、断層やプチスポット火山の形成など様々な現象が発生する。このような現象に伴う流体循環はマグマの発生や地震活動、プレート沈み込み過程を通じた地球深部—表層のリザーバの化学進化に影響すると考えられ、その規模や時間変動を解明することは重要である。私たちは 2019 年から研究航海を通じて、三陸沖日本海溝近傍の海底断層の堆積物・間隙水試料を採取して希ガスの同位体組成などを測定し、間隙水の起源と化学データの時空間分布を調査してきた (e.g., 鹿児島ほか, 2022; Park et al., 2021)。得られたデータは当該海域の海底下の広範囲に高い $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比を持つリザーバが存在することを示唆しており、海溝近傍における流体循環の実態を明らかにするため、今後も観測を継続する計画である。

(本講演の関連研究)

Kagoshima et al. (2012) *Geochem. J.* **46**, e21-e26.; Kagoshima et al. (2015) *Sci. Rep.* **5**, 8330.; Kagoshima et al. (2016) *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **325**, 179-188.; Kagoshima et al. (2019) *Geochem. Geophys. Geosyst.* **20**, 4710-4722.; Park et al. (2021) *Sci. Rep.* **11**, 12026.; 鹿児島ほか (2022) 日本地球化学会 2022 年度年会基調講演.

Research of geochemical cycles of volatile elements at plate boundaries

*T. Kagoshima¹ (¹Univ. Toyama)

副成分鉱物の局所分析を駆使した地殻進化の研究

○板野敬太^{1,2}

(¹ 秋田大学、²University of Granada)

副成分鉱物の微量元素・同位体局所分析は、分析技術の発展とともに岩石成因や形成メカニズムを議論するために必須の研究手法となってきた。私はこれまでに、レーザーアブレーション ICP 質量分析(LA-ICP-MS)や二次イオン質量分析(SIMS)による副成分鉱物の年代・同位体・微量元素分析を駆使した地殻成長に関する研究に取り組んできた。本発表では、副成分鉱物の中でもジルコンやモナザイトの局所分析を組み合わせた地殻進化に関する研究と、地球化学データ解析へ数理・データサイエンスの手法を応用する試みについて紹介する。

苦鉄質岩石中ジルコンを用いた下部地殻成長タイムスケールの制約

ジルコンはU-Pb年代測定に最適な鉱物の1つであり、LA-ICP-MSの普及による迅速かつ高精度な局所分析が可能になって以降、その重要性は不動のものとなっている。ジルコン U-Pb 年代が地殻進化の理解に大きく貢献した1つの例としては、花崗岩の形成が単一のマグマ形成・輸送・定置プロセスによって作られるものでなく、断続的に数百万年から数千万年かけた多段階的なものであることの発見が挙げられる。しかし、多くの火成活動タイムスケール制約を目的とした研究は化学進化を経た花崗岩質マグマ由来のジルコンを用いており、熱・物質の供給源であるマントル起源マグマの供給・貯蔵期間の直接的な制約は得られてこなかった。

そこで、飛騨帯に産するポイキリティックな組織を持つ角閃石カンラン岩[1]に含まれるジルコンから苦鉄質なマグマ供給系が保持されるタイムスケールの解明を試みた[2]。SIMSによるU-Pb年代分析・酸素同位体分析とLA-ICP-MSによるHf同位体分析を組み合わせることで、ジルコン粒子内部に保存されたマグマ活動履歴を読み解くことが可能となる。ジルコン粒子のカソードルミネッセンス像(CL像)において、暗色の中心部は希土類元素やSc, Ta, Th, Uに富む一方で、明色の縁辺部はこれらの元素濃度が低い特徴を持つ。角閃石カンラン岩の成因がカンラン石主体の集積岩形成とその後の含水苦鉄質マグマによる角閃石形成の2段階であったこと[1]を考慮すると、暗色部ジルコンは単斜輝石や角閃石不在条件で苦鉄質メルトからの結晶化、明色部ジルコンは角閃石の結晶化により作られる珪長質な間隙メルトからの結晶化によるものと解釈される。これらの暗色部からは約 196.1 ± 0.9 Ma、縁辺部からは 186.3 ± 1.1 Ma のU-Pb年代が得られた。年代差は1000万年に及ぶにも関わらず、同様の酸素・Hf同位体組成($\delta^{18}\text{O} = 7.7\text{‰}$)

$\pm 0.8\text{‰}$, $\varepsilon\text{Hf} = 10.3\text{‰} \pm 1.7\text{‰}$)を保持していることから、ジルコンを形成したマグマ活動は同一のマグマ起源物質を共有していたことが示唆される。したがって、1000 万年間にも亘り連続的、あるいは断続的に苦鉄質マグマ供給系が活動していた物的証拠を得たと考えられる。

砕屑性モナザイトを用いた造山運動史の解明

モナザイトはジルコンと同様に U-Pb 年代局所分析が可能であることから、砕屑性モナザイトを用いた研究例が近年増えている。主流である砕屑性ジルコンを用いた研究の仮説検証には、異なる情報を保持する砕屑性モナザイトを用いた研究は重要となる。しかし、火成岩だけでなく変成岩に豊富に含まれるモナザイトの多様な起源は得られる情報量の多さをもたらすと同時に、年代や同位体記録の解釈が困難になるという欠点も含む。この欠点を補うために、モナザイトの微量元素を組み合わせた研究手法の確立にこれまで取り組んできた。

砕屑性モナザイトの U-Pb 年代に微量元素情報を組み合わせることで、砕屑性モナザイトの起源岩石の推定を行い、造山運動の時期と性質を制約する新たな研究アプローチを提案した[3]。砕屑性モナザイト年代ピークは火成活動だけでなく変成活動も含めた造山運動の推移を捉えており、砕屑性ジルコンよりも衝突型造山運動の履歴を詳細に保存していることが明らかになった。モナザイトの微量元素については、LA-ICP-MSを用いたモナザイト希土類元素分析手法[4]や磁鉄鉱系列/チタン鉄鉱系花崗岩中モナザイトの微量元素システムティクスについての研究[5]など多方面へ研究が展開された。その中でも地球化学データの多変量解析は現在の研究の柱の1つとなっており、鉱物の微量元素組成データによる起源岩石分類モデルの構築に取り組んできた[6, 7]。データサイエンスや機械学習の手法を用いることで、回帰や分類問題における推定の不確実性をより定量的に評価することが可能となる。大量の地球化学データへ容易にアクセスできる現在こそ、探索的データ分析によって新たな知見を創出するチャンスも眠っていると言える。鉱物化学組成データでは測定時の検出限界に関わる非ランダム欠損値や不均衡データなどの問題も残されており、今後は地球化学データの性質に合わせた最適なデータ解析の改善に取り組んでいく。

[1] Itano et al. (2021) *Lithos*; [2] Itano et al. (2024) *Geology*; [3] Itano et al. (2016) *Precam. Res.*; [4] Itano & Iizuka (2017) *J. Anal. At. Spectrom.*; [5] Itano et al. (2018) *Chem. Geol.*; [6] Itano et al. (2020) *Geosciences*; [7] Itano & Sawada (2024) *Math. Geosci.*

Crustal evolution revealed by microanalysis of accessory minerals

*K. Itano^{1,2}, (¹Akita Univ., ²Univ. Granada)