PR0114

変成岩・火成岩の化学組成に対する機械学習の適用：定量的元素濃度変化量の推定による沈み込み帯流体流動の解明にむけて

○松野 哲士[1]、宇野 正起[1]、岡本 敦[1]
（[1]東北大学大学院環境科学研究科）

【背景：沈み込み帯の流体移動とその直接的な記録】

沈み込み帯では、表層の水が含水した海洋プレートによって地球表層から内部へと持ち込まれ、脱水することで、沈み込み帯内部で流体の移動が起こる。高圧変成帯に産する玄武岩質変成岩は、海洋プレートの一部を構成しており、海洋底の変質から沈み込み帯の変成作用における流体移動の痕跡を元素濃度変化・構成鉱物として直接的に記録している。特に岩石-流体反応に伴って、流体によって移動しやすい元素濃度は大きく変化すると予想されるが、これまでは原岩である変成作用・変質作用前の玄武岩の組成を一意に決められず、特定の反応帯などを除き、元素移動は定性的な議論に留まっていた[1]。一方で、変成玄武岩組成には、多次元の元素濃度に原岩組成の痕跡が残されている。しかし、この原岩組成の痕跡から、全体の原岩組成を求める手法は確立されていなかった。本研究は、変成玄武岩組成に残された原岩組成の痕跡から、原岩組成全体を推定することを目的とし、教師あり学習による手法の構築、および教師なし学習によるデータの可視化を行った。最後に、四国中央部の変成岩組成データ群に適用し、沈み込み帯における深さ方向に連続的な元素の溶脱トレンドを明らかにした。

【1.　多次元玄武岩組成データの教師あり学習：決定木】(Matsuno et al. 2022, Sci.Rep[2])

変成作用・変質作用による元素濃度の変化量を定量的に求めるため、玄武岩の化学組成データベースに対して、教師あり機械学習手法である決定木による回帰機械学習モデルを構築した。学習の対象とした玄武岩の組成データは、地球化学データベース PetDB を使用しており、中央海嶺・海洋島・島弧から得られた計 8080 個の玄武岩試料である。データの前処理として、各モデルで使用するデータに欠損値の存在する試料は削除し、Log 変換を行った。機械学習モデルは、玄武岩の一部の組成から全体の組成（e.g., Th, Nb, Zr, Ti 濃度から Rb, Ba など）を推定するように構築し、玄武岩組成を学習データとして使用した。使用した元素は、Rb, Ba, Th, U, Nb, K, La, Ce, Pb, Sr, Nd, Zr, Ti, Y, Yb, Lu である。モデルの精度は、学習データから 20%をテストデータとして使用することで確かめた。

Th, Nb, Zr, Ti 濃度から Rb, Ba, U, K, La, Ce, Pb, Sr, Nd, Y, Yb, Lu 濃度を推定した例では、テストデータで平均二乗誤差 0.1 程度（約 25%）で推定が可能である。また、各種の玄武岩（中央海嶺・海洋島・島弧玄武岩）によらず、各元素濃度を推定できることが明らかとなった。さらに原岩組成が明らかになっている海洋底変質岩への適用から、機械学習モデルによって原岩組成を定量的に明らかにし、また元素濃度変化量が正確に得られ

ることが検証された。

【2.　多次元玄武岩組成データの教師なし学習：UMAP】

1 で構築された回帰機械学習モデルは、玄武岩組成データに基づき、多次元の元素濃度間の定量的な関係性を学習し、モデル化することができたと考えられる。この玄武岩組成データ内の多次元元素間の関係性を可視化するため、教師なし学習手法 UMAP を用いて多次元データを二次元上に可視化した。データの前処理として、欠損値の存在する試料は除外し、Log 変換と標準化を行った。元素濃度 Th, Nb, Zr, Ti (計 3108 試料)を二次元上に可視化すると、各テクトニックセッティングごとにクラスターを形成した。さらに、二次元上の玄武岩試料データの分布に対し、二次元上の可視化に使用していない Rb, Ba, Ce などの元素濃度をそれぞれ重ねて表示すると、濃度分布は、UMAP による二次元上の分布に対し、連続的に変化した。つまり、４次元の元素濃度は、Rb, Ba, Ce などの元素濃度と相関し、その濃度を推定するのに十分な情報が内包されていると考えられる。

【3.　変成岩に記録された定量的元素濃度変化量】

本研究では、1 で構築した機械学習モデルを、三波川変成帯の塩基性片岩の組成データに適用し、原岩の推定および、元素移動量の推定を行なった。適用した試料は、三波川変成帯・四国中央部の汗見川ルートから採取した。この地域では、緑泥石帯から灰曹長石―黒雲母帯まで最高到達温度が連続的に変化する（300~550°C)。計 47 試料の全岩化学組成は、XRF, ICP-MS によって分析し、一部の試料は上昇過程の吸水による反応進行度を角閃石の組成累帯構造を用いて評価した[3]。

解析の結果、各地域における Rb, Ba, Sr の元素移動度の最低値は、沈み込み帯のより深部で温度が上昇するほど溶脱する（変化量が 90%以上）。一方で、元素が付加した試料が見られ、元素移動度は上昇過程における反応進行度と正の相関をした。従って、沈み込み過程において元素の溶脱が段階的に発生する一方で、上昇過程では流体の流入に伴う反応で元素が付加することが明らかになり、沈み込み帯における各変成段階での元素濃度変化量を定量的に評価できるようになった。

References:

[1] Bebout 2007. *Earth and Planetary Science Letters* 260 (3-4): 373–93.

[2] Matsunoet et al. 2022. *Scientific Reports* 12 (1): 1385.

[3] Okamoto & Toriumi 2005. *Journal of Metamorphic Geology* 23 (5): 335–56.

Machine-learning application to igneous and metamorphic rock compositions: Quantitative estimation of compositional changes recorded in subduction-related metamorphic rocks

*S. Matsuno[1], M. Uno[1], A. Okamoto[1] ([1]Graduate school of Environmental Studies, Tohoku university)