

令和4年2月10日

報道機関 各位

東北大学大学院環境科学研究科

### 変質した岩石の化学組成を機械学習で復元！ —地球内部の元素循環の統一的な解明へ—

#### 【発表のポイント】

- 変質・変成した玄武岩から、元の玄武岩の化学組成を復元する原岩組成復元モデルを開発。
- 全球の玄武岩の化学組成データをもちいて、元素濃度の相関を機械学習の一種である勾配決定木により学習。
- たった4つの元素の濃度から、12元素の濃度を $\pm 25\%$ で推定可能。
- 海洋底の熱水変質作用や沈み込み帯の変成作用など、地球内部の元素循環の解明に繋がると期待される。

#### 【概要】

岩石の化学組成は、地震や地熱活動、鉱床形成など、地球内部の岩石と水との化学反応のプロセスを記録しています。岩石からこうした地化学プロセスを抽出するためには、変質する前の「原岩」と比較して、岩石が被った元素移動量を明らかにする必要があります。しかしながら、多くの場合「原岩」の直接採取はできないため、元素移動量の解析は特殊な場合に限られていました。

東北大学大学院環境科学研究科の松野哲士（修士課程2年）および宇野正起助教の研究グループは、変成した玄武岩から元の玄武岩の化学組成を、機械学習をもちいて復元する原岩組成復元モデルを開発しました。この方法では、元素組成が改変されていない「不動元素」をたった4つ与えることで、12元素の濃度を $\pm 25\%$ で復元できます。この原岩組成復元モデルは、これまで「原岩」のわからなかった様々な岩石に適用することができるため、固体地球内部の元素循環の統一的な評価につながると期待されます。

本成果は、2022年1月26日、ネイチャー・リサーチ社が発行する科学誌 *Scientific Reports* に掲載されました。

### 【詳細な説明】

地球の表層を覆う海洋プレートは、海水との反応により水を固定し、海溝から沈み込むことで地球内部へと水を持ち込みます。こうした海洋プレートを介した水循環は、地震や火山・地熱活動、鉱床形成などに大きな影響を与えています。地球内部の水は元素を溶解して輸送するため、こうした地化学プロセスは岩石中の化学組成の変化、すなわち元素移動量として記録されています。

岩石中の元素移動量を解析するためには、変質する前の「原岩」と化学組成を比較する必要があります。しかしながら、変成作用や海洋底熱水変質作用などは広範囲に渡って反応をひきおこすため、「原岩」を直接採取することは原理的に不可能です。したがって、こうした広範囲の地化学プロセスに起因する元素移動量を定量的に評価することは難しかったのが現状です。

東北大学大学院環境科学研究科の松野哲士（修士課程 2 年）、宇野正起助教、岡本敦教授、土屋範芳教授らのグループは、機械学習をもちいて、変成・変質した玄武岩から元の玄武岩の化学組成を復元する原岩組成復元モデルを開発しました（図 1）。まず、全球の玄武岩 8080 サンプル、16 元素（Rb、Ba、U、K、Pb、Sr、希土類元素（REE））の化学組成データについて、元素間の濃度の相関を、機械学習の一種である勾配決定木により学習しました。入力元素を 1-9 元素とし、残りの 15-7 元素の濃度を出力として予測します。すべての入力元素の組み合わせは 511 通りであり、入力元素と出力元素の組み合わせ 5872 通りのモデルをすべて計算しました（図 2）。その結果、高々 4-5 元素を入力すれば、誤差 $\pm 25\%$ （常用対数上で $\pm 0.1$ ）で出力元素の濃度を推定できることがわかりました（図 2e）。

代表的なモデルとして、水への溶解度が低く、変成・変質作用で移動しない Th、Nb、Zr、Ti の 4 元素を入力とした例を示します（図 3、4）。海洋島玄武岩（OIB）、中央海嶺玄武岩（MORB）、島弧玄武岩（VAB）など、さまざまな地質環境の玄武岩の化学組成をよく再現していることがわかります。

この原岩組成復元モデルを、原岩組成が分かっているマリアナ沖の海洋底変質玄武岩に適用してみます（図 5a、b）。すると、復元された原岩の化学組成は、既往研究で火山ガラスから見積もられた原岩の組成範囲と一致しており、復元が正確におこなわれていることがわかります。また、復元された元素移動度も既知の元素移動量度を再現していることがわかります。

さらに、同じ原岩組成復元モデルを、深さ約 90 km（ $\sim 2.7$  GPa）まで沈み込み、約 650°C の変成作用を受けたザンビアの玄武岩質変成岩（エクロジャイト）に適用してみます（図 5c、d）。この岩石は、既往研究で様々な地質学的な観察や分析結果と経験則を組合せて、原岩組成が推察されている数少ない例です。本研究では化学組成の情報のみからそれらが復元されていることが分かります。このように、本研究で開発された原岩組成復元モデルは、海洋底の変質作用から沈み込み帯の変成作用まで、幅広い条件で有効であることが示されました。

本研究の原岩組成推定モデルは、任意の変質・変成玄武岩に対して適用するこ

とができます。今まで「原岩」を特定することができなかった世界中の様々な海洋底変質岩や広域変成帯の岩石に適用することで、地球内部の元素循環がこれまででない詳細さで統一的に明らかにされることが期待されます。

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業 若手研究（JP18K13628）、国際共同研究加速基金（国際共同研究強化（A））（JP18KK0376）、東京大学地震研究所共同利用（2015-B-04、2018-B-01、2020-B-07、2021-B-01）、および、東北大学 環境・地球科学国際共同大学院プログラム（GP-EES）の支援を受けて実施されました。

#### 【掲載論文】

タイトル：Machine-learning techniques for quantifying the protolith composition and mass transfer history of metabasalt

著者名：Satoshi Matsuno, Masaaki Uno<sup>1\*</sup>, Atsushi Okamoto<sup>1</sup>, and Noriyoshi Tsuchiya<sup>1</sup>

著者所属：1 国立大学法人 東北大学大学院環境科学研究科

掲載雑誌：Scientific Reports (2022) 12, 1, 1385.

DOI 番号：10.1038/s41598-022-05109-x

U R L：http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-05109-x

#### 【問い合わせ先】

<研究に関すること>

東北大学大学院環境科学研究科

助教 宇野 正起（うの まさおき）

電話： 022-795-7401

E-mail：uno@geo.kankyo.tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学大学院環境科学研究科 情報広報室

助手 物部 朋子（ものべ ともこ）

電話： 022-752-2241

FAX： 022-752-2236

E-mail：tomoko.monobe.d4@tohoku.ac.jp

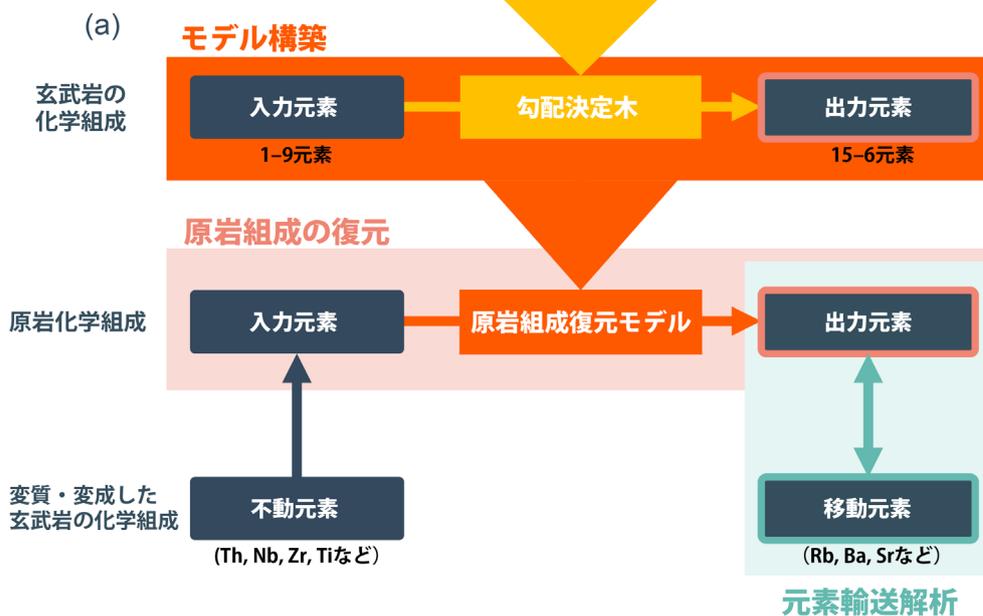
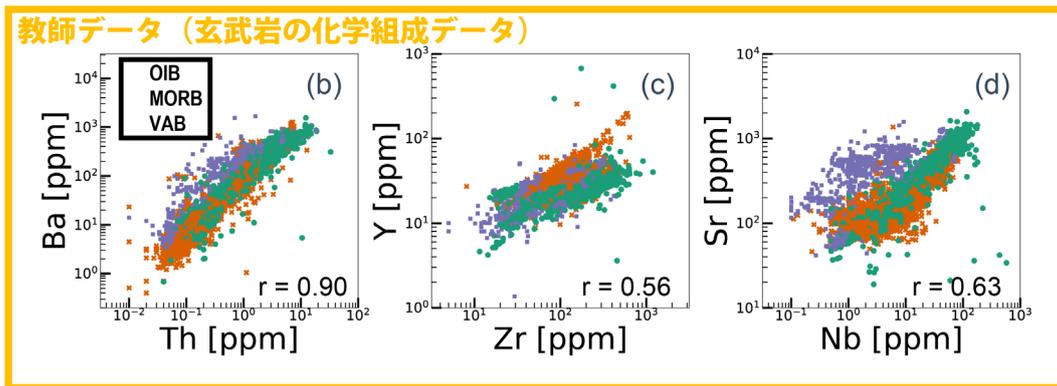


図 1 本研究で開発した原岩組成復元モデルの概要。(a) モデルの概要。新鮮な玄武岩の化学組成データに基づき、勾配決定木によりモデルを構築し、変成した玄武岩に適用する。変成玄武岩の不動元素濃度（例えば Th、Nb、Zr、Ti 濃度）が元の玄武岩と等しいと仮定することで、原岩組成復元モデルの入力として使用でき、原岩中の他の微量元素濃度を推定することができる。復元された原岩組成と実際の変成玄武岩の組成を比較することで元素移動量を求めることができる。(b-d) 教師データに用いた玄武岩の化学組成。

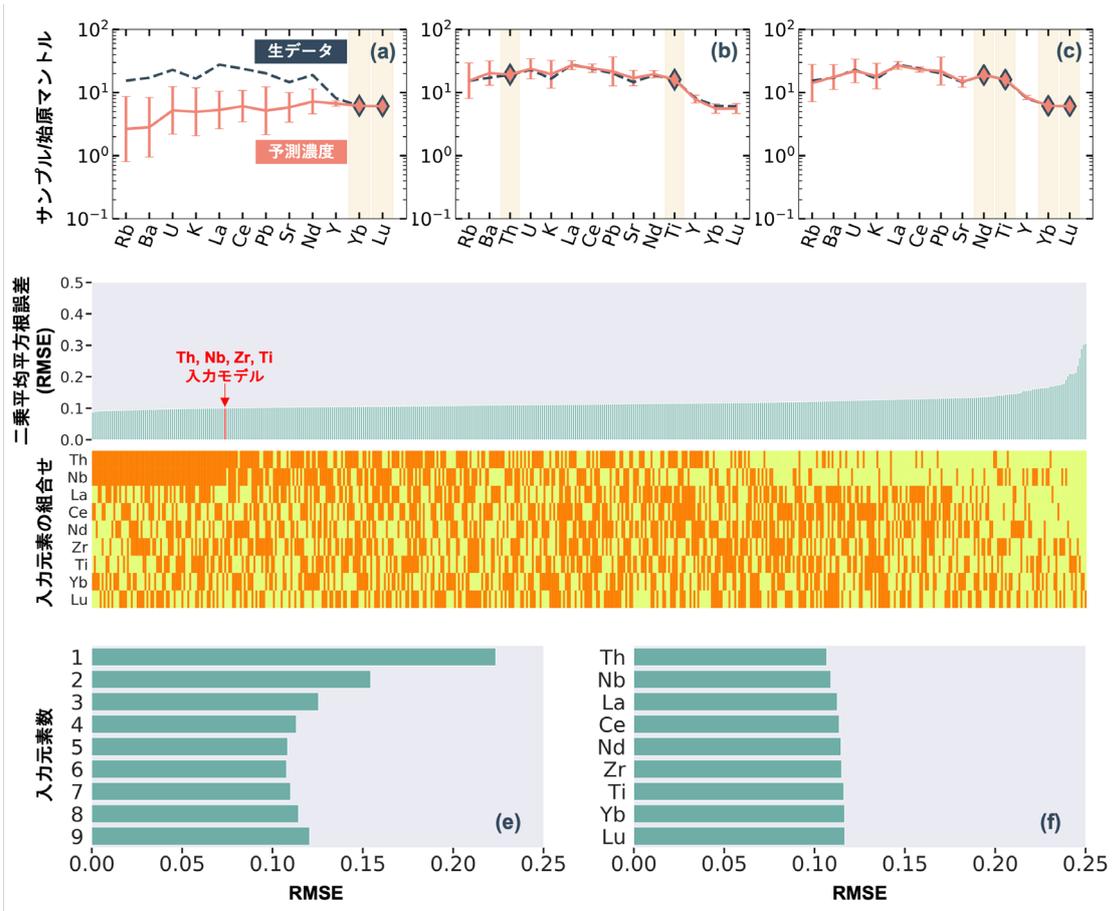


図2 玄武岩組成によるモデル構築。(a-c) モデルの例。ひし形は入力元素、青点線は玄武岩の組成、ピンク色は復元された組成を示す。縦軸は始原マンントルに対する濃度比。Yb、Lu の2 元素を入力として場合はうまく復元できないが、Th、Ti の2 元素あるいはNd、Ti、Yb、Lu の4 元素を入力とした場合はうまく復元できていることがわかる。(d) 入力元素 511 通りにおける二乗平均平方根誤差 (RMSE; 推定誤差の指標)。多くのモデルは誤差 0.1 ( $\pm 25\%$ ) で推定できていることがわかる。上位のモデルには Nb と Th が含まれる。(e) 入力元素の個数と RMSE の関係。入力元素が4 以上だと RMSE が 0.1 付近に収束することがわかる。(f) ある元素を含むモデルの平均 RMSE。Th や Nb が含まれていると誤差が小さくなることが分かる。

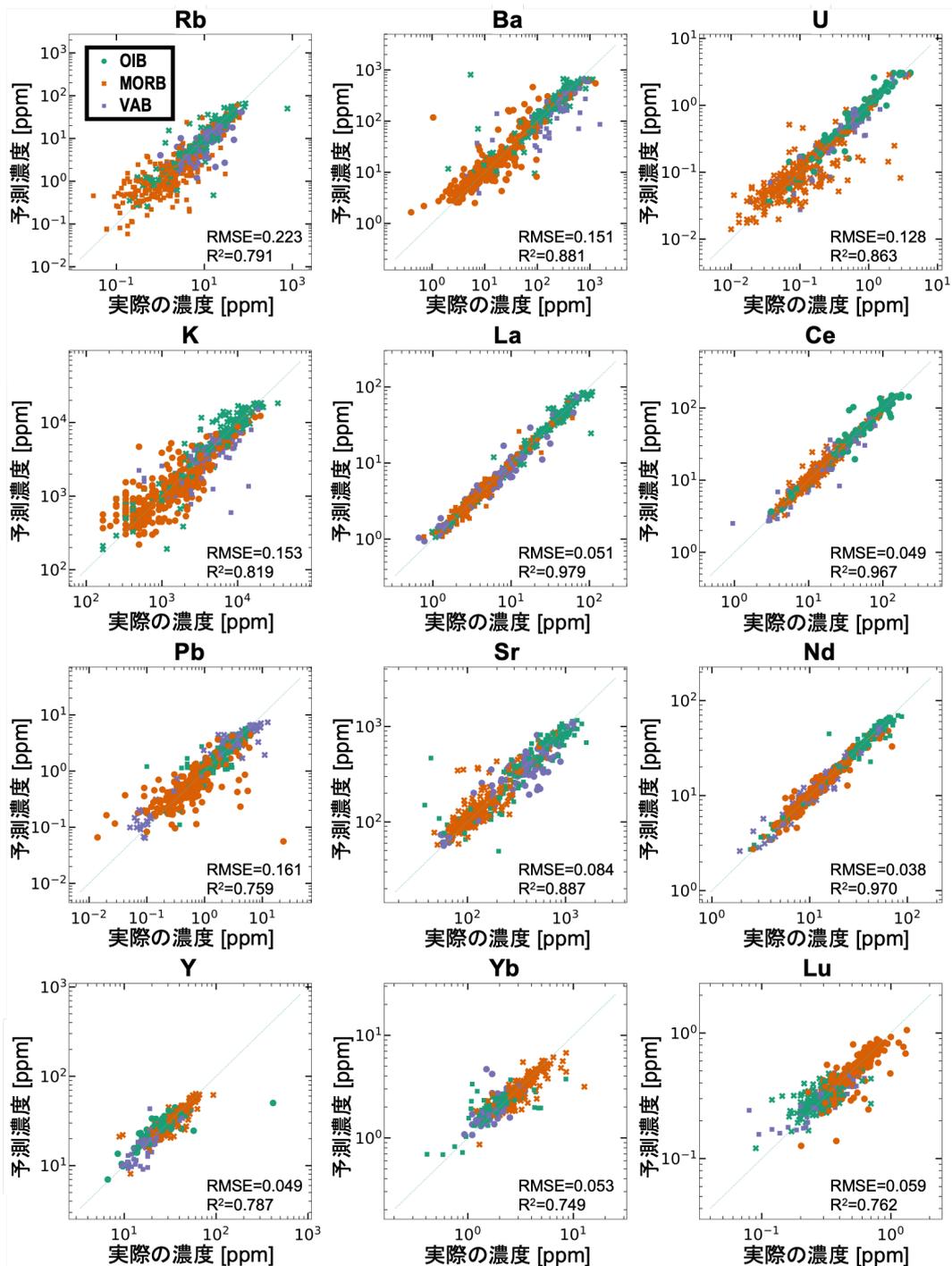


図 3 Th、Nb、Zr、Ti を入力元素とした原岩組成復元モデルの予測性能。学習に使用していない玄武岩のテストデータをプロットしたもの。横軸は生データの濃度、縦軸は予測された濃度を示す。R<sup>2</sup>は決定定数。

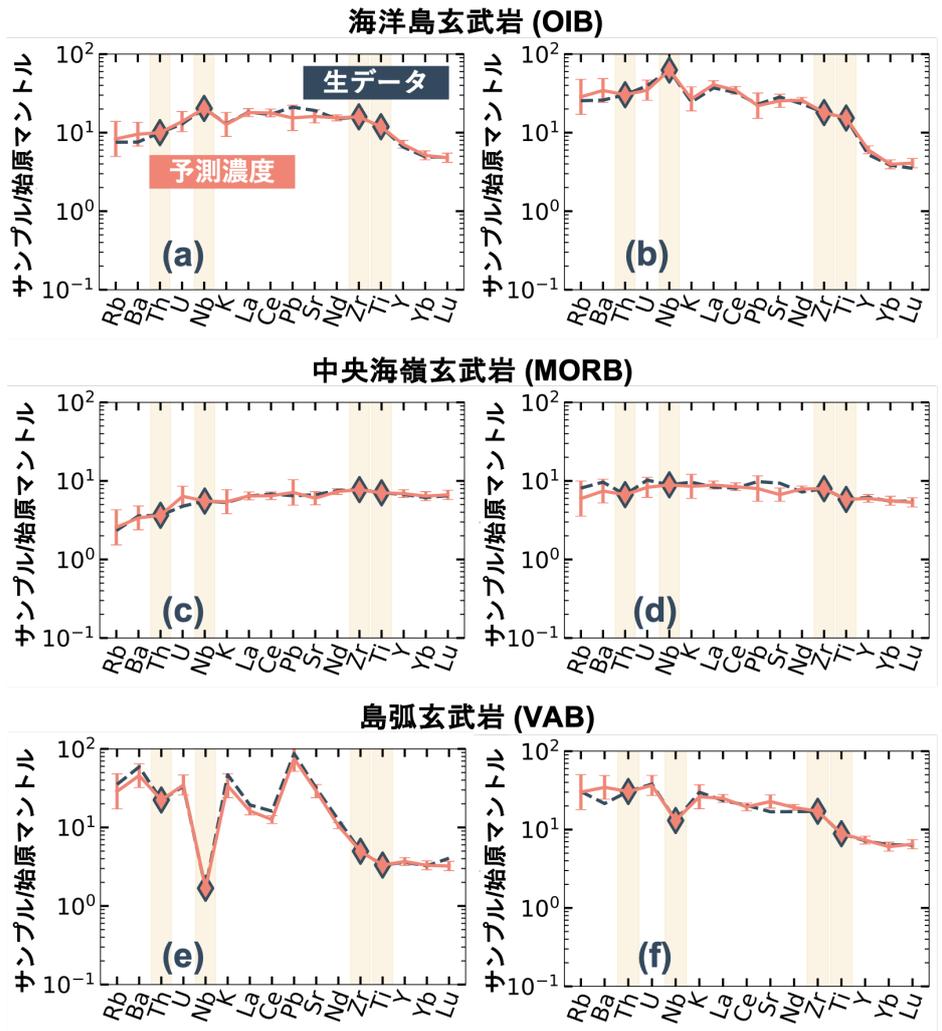


図4 Th、Nb、Zr、Tiを入力元素とした原岩組成復元モデルの適用例。海洋島玄武岩 (OIB)、海洋底玄武岩 (MORB)、島弧玄武岩 (VAB) のいずれも誤差範囲内で正確に推定できていることがわかる。

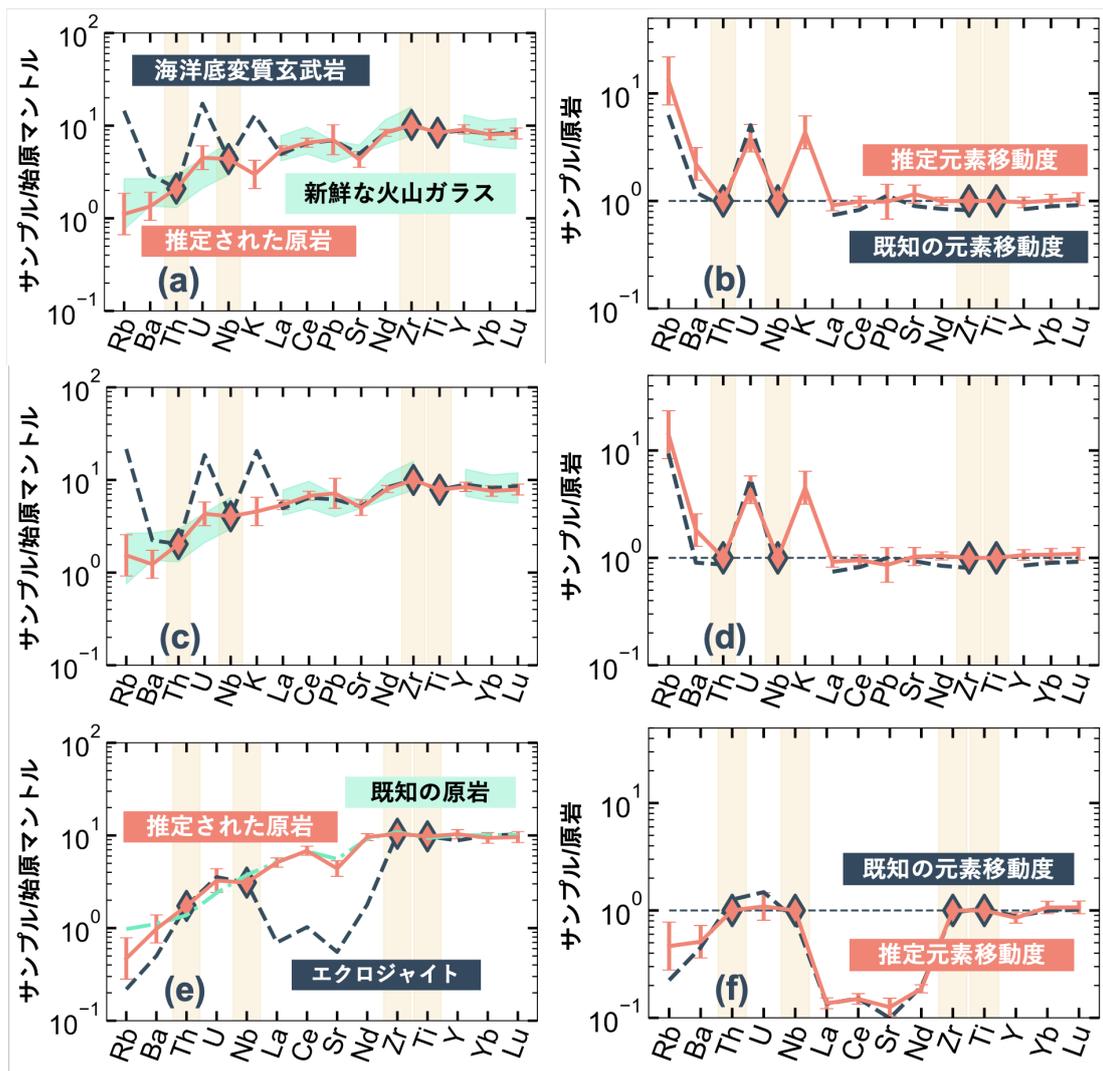


図5 海洋底変質玄武岩および変成岩への適用例。

(a, c) 推定された原岩組成。(b, d) 元素移動度 (サンプルと原岩の濃度比)。

(a, b) マリアナ沖の海洋底玄武岩。推定された原岩組成は、残存している新鮮な火山ガラスの組成範囲と一致しており、正確に復元されていることがわかる。元素移動度もよく復元されている。(c, d) ザンビアのエクロジヤイト (玄武岩質変成岩)。推定された原岩組成は、既往研究で経験的に推察された組成と誤差範囲内でほぼ一致する。