

2025年3月27日

国立大学法人新潟大学
国立研究開発法人海洋研究開発機構

オマーンオフィオライトの独立成分分析から 推定した上部マントルの改変プロセス ー マントル構成岩への独立成分分析（ICA）の適用 ー

新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程の三木悠登さん、同大学自然科学系理学部の高澤栄一教授、海洋研究開発機構(JAMSTEC)海域地震火山部門の上木賢太副主任研究員、桑谷立グループリーダーからなる研究グループは、オマーンオフィオライト^{注1}のマントルかんらん岩^{注2}の組成を、独立成分分析（Independent Component Analysis; ICA）^{注3}という数理解析手法を用いて解析しました。その結果、4つの独立した成分で、かんらん岩の組成の変動を説明できることが分かりました。これらの成分を鉱物の量や化学組成、岩石の主要元素・微量元素の含有量、空間分布などの観測結果と比較したところ、それぞれ異なる地質プロセスに対応していました。具体的には、(1) 拡大海嶺における無水融解^{注4}、(2) 沈み込み帯におけるスラブ由来の流体を伴う含水融解^{注5}、(3) 蛇紋岩化作用^{注6}、(4) 岩石流体反応^{注7}です。本研究により、オマーンオフィオライトのマントルかんらん岩の組成変動は、主に拡大海嶺での溶融と、その後のプレートの沈み込みに伴う溶融及び流体との反応によって引き起こされたことが明らかになりました。本研究成果は、2025年3月25日、アメリカ地球物理学連合論文誌「Geochemistry, Geophysics, Geosystems」に掲載されました。

【本研究成果のポイント】

- オマーンオフィオライトに露出する最上部マントル(深さ 7~15km 相当)の物質・化学的な多様性を生み出す独立なプロセスの数理的な抽出と解釈を行いました。
- 独立成分分析（ICA）という数理手法を用いた結果、4つの独立した地球化学成分で、マントルかんらん岩の組成変動を説明できることが分かりました。
- 4つの独立成分は、鉱物の量比、鉱物・岩石の組成、空間分布などの地質情報と統合することで、3つのマントルプロセス（拡大海嶺での無水溶融、沈み込みに伴う含水溶融と岩石流体反応）及び、蛇紋岩化作用に対応することが明らかになりました。

1. 研究の背景

オマーンオフィオライトは、地球の歴史を物語る“タイムカプセル”です。約1億年前、テチス海に形成された海洋プレートがアラビア半島東端に押し上げられたこの大規模な地質体（80 km × 500 km）は、地表に上部マントルのかんらん岩を明瞭に露出させている世界的にも稀な存在です。そのため、地球内部の仕組みを探る上で、研究者たちにとって格好のフィールドです。特に注目されるのは、オマーンオフィオライトが伊豆・小笠原・マリアナ海溝に似た環境で形成された点です。ここでは5200万年前に海洋プレートに沈み込み帯が発生し、それに伴う拡大海嶺も形成されました。この点で、オマーンオフィオライトは、海嶺でのマントルの溶融から、沈み込みによるマントル物質の変化やリサイクルに至るまで、地球史におけるマントル進化の記録を陸上で観察できる有意性を兼ね備えています。世界中の研究者がオマーンオフィオライトを調査し、多くの仮説が生まれてきましたが、これまでの議論の多くは経験則的な指標に基づいており、数理解析による定量的アプローチは十分に進んでいませんでした。一方、新潟大学の高澤栄一教授の研究グループは、数十年に及ぶ地質調査と研究活動の蓄積により、世界的にも類を見ない規模のオマーンオフィオライトのマントルかんらん岩の岩石試料および化学組成データを保有しています。この世界有数のデータセットをもとに、ICAを駆使してマントルプロセスを定量的に解明することで、オフィオライト形成過程に伴う最上部マントルの進化に新たな視点を提示しました。

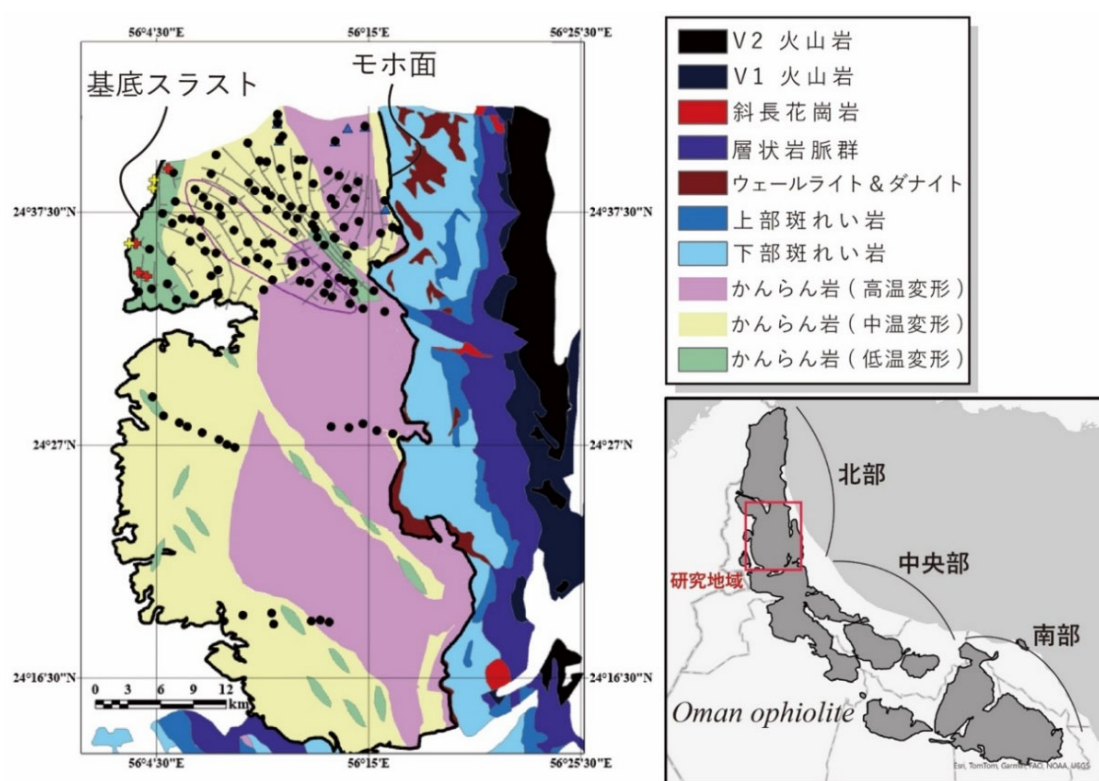


図1 オマーンオフィオライトの地図および地質図。右下はオマーンオフィオライト全域を示します。そのうち、赤枠で囲まれた範囲が本研究の対象地域です。左図の着色は凡例の色と対応しており、各岩石が地表に露出している分布範囲を示します。本研究では、赤・黄色・緑で示される西側のマントルかんらん岩を対象としました。

II. 研究の概要と成果

本研究は、数理手法である ICA を駆使し、これまでベールに包まれていたマントルプロセスの全貌を、定量的に解明することに成功しました。ICA は、高次元データから独立した本質的な要素（独立成分）を抽出する先進的な多変量解析手法です。岩石中に百万分の 1 の単位で含まれる微量元素の濃度データに対して ICA を適用し、得られた独立成分を、岩石の主要元素・微量元素の含有量、構成鉱物の量比と化学組成、空間分布などの地質学的情報と組み合わせ、統合的に解釈することを試みました。

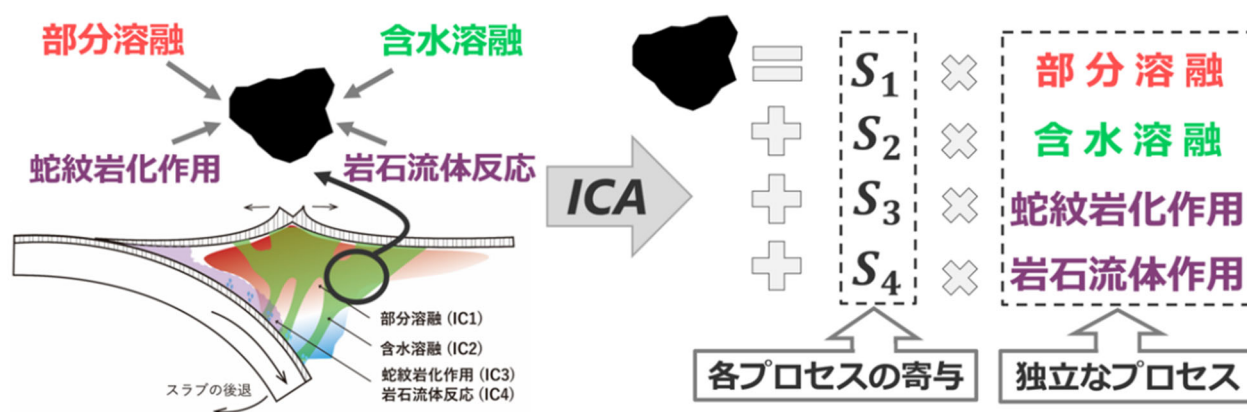


図 2 ICA を用いて独立したマントルプロセスを抽出・評価する一連の工程。かんらん岩の組成は、多様なプロセスを経た結果として形成される複雑な結果です。ICA を用いることで、岩石の化学組成データを数理的に分解し、独立した化学プロセスを定量的に抽出することができます。また、任意の岩石標本における各プロセスの寄与度を定量的に評価することが可能です。

その結果、オマーンオフィオライトにおけるかんらん岩の物質的多様性は、次の 4 つの独立したマントルプロセスによって説明できることが明らかになりました。(1) 無水環境でのマントルの部分溶融、(2) 沈み込むプレート（スラブ）由来の流体による含水溶融、(3) 約 600°C 以下の環境での蛇紋岩化作用、(4) スラブ由来の流体とかんらん岩の岩石流体反応。

さらに、オフィオライト内部における独立成分の空間分布を調査することで、単なる物質的多様性だけでなく、マントルプロセスの空間的な変遷や不均質性を可視化することにも成功しました。また、4 つの独立したマントルプロセスが異なる割合で組み合わせることで、現在観察される岩相が形成されたことも明らかにしました。

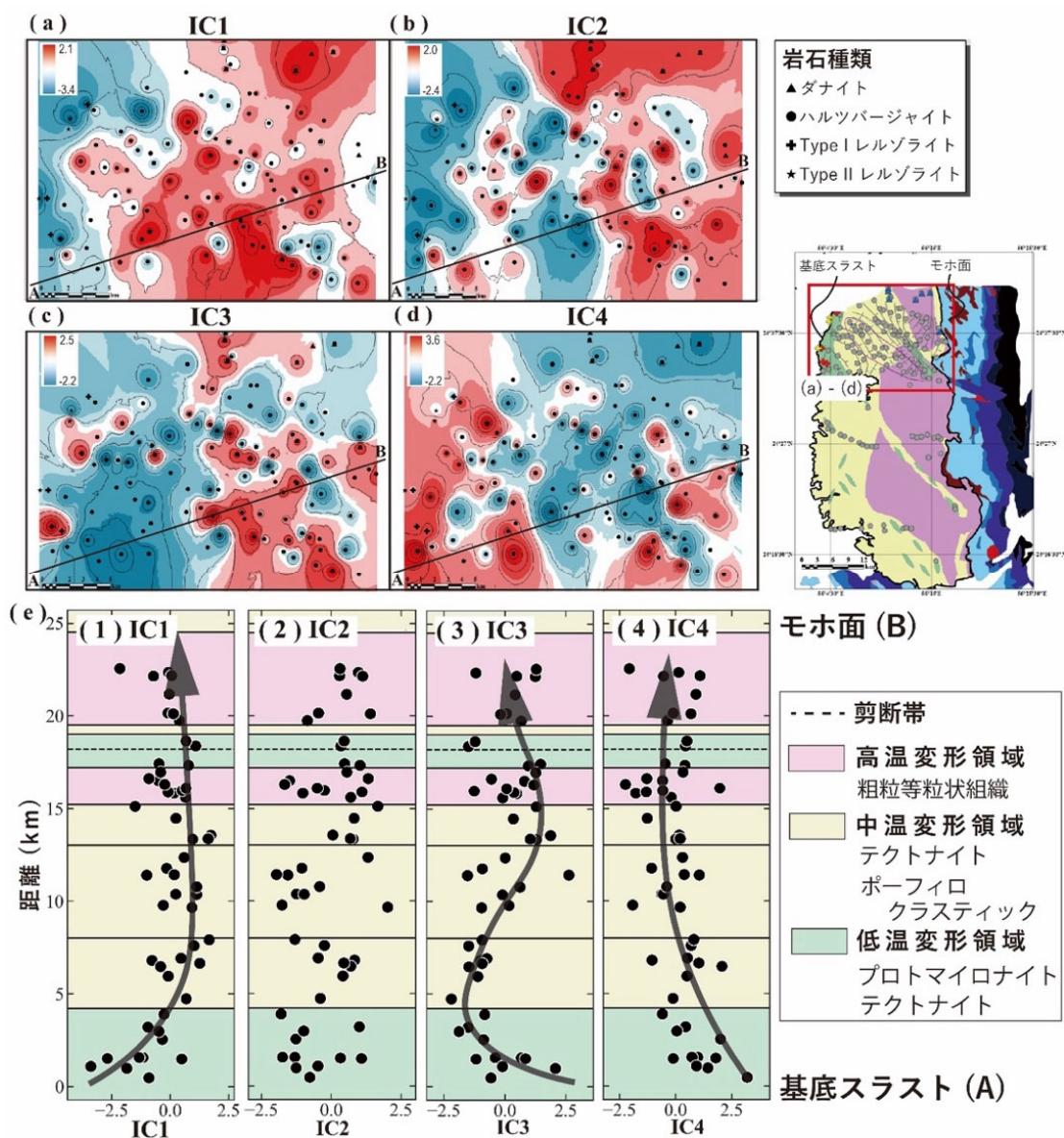


図 3 独立成分の空間分布。(a-d) ICA により抽出された独立成分 (IC1-IC4) を空間内に内挿し、マントルプロセスの空間分布を可視化しました。(e) マントル深部 (A) から浅部 (B) にかけての独立成分の変化傾向を示します。

本研究と先行研究の成果に基づき、沈み込み帯の形成初期におけるマントルの進化史を次の二段階モデルとして提唱するものです。すなわち、(1) 浅部での沈み込みの発生に伴い、高温のマントルが深部から上昇し溶融する段階、(2) プレーートの沈み込みの進行によるスラブ流体とかんらん岩の反応を通じた含水溶融、蛇紋岩化作用、交代作用の段階に分けることにより、マントルの動的な進化過程をより明確に描き出しました。

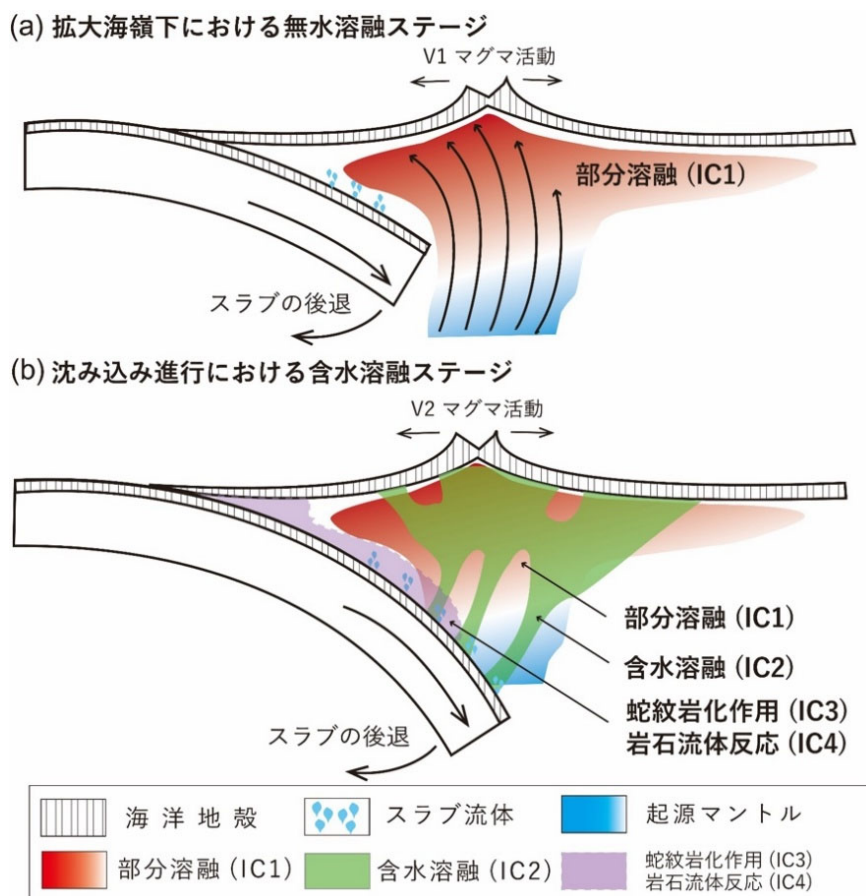


図 4 本研究から解釈された北部オマーンオフィオライトの形成史。(a) 浅部での沈み込みの開始に伴い、高温のマントルが深部から上昇し、部分溶融が進行する段階、(b) プレーートの沈み込みが進行するにつれ、スラブ由来の流体とかんらん岩の相互作用によって含水溶融が引き起こされ、蛇紋岩化作用や岩石流体反応が進行する段階を示します。

本研究の公表論文は、新潟大学大学院博士前期課程学生で筆頭著者である三木悠登が責任著者として、自身の卒業論文および JAMSTEC で実施したデータサイエンス・インターンシップの成果を結集し、学術論文として昇華させたものです。これは、新潟大学と JAMSTEC が取り組んだデータサイエンス教育の成果の一つでもあります。

Ⅲ. 今後の展開

本研究は、オマーンオフィオライト北部地域に焦点を当てたものであり、全長 500km に及ぶオフィオライト全域にこのモデルが適用可能か、あるいは地域ごとの顕著な差異が存在するのかは、いまだ未解決の重要な課題です。さらに、マントルプロセスに関する核心的な定量パラメータ（溶融度、流体組成、流体流入率など）の特定も、今後の探求に委ねられています。

現在、本研究グループはオマーンオフィオライト南部地域での集中的な地質調査と精密な化学分析を精力的に推進しています。データサイエンス的手法を駆使することで、広範囲 (>500 km) にわたるマントルプロセスの共通点と地域差を鮮明に描き出すことを目指しています。加えて、質量保存則に基づく開放系マントル溶融モデルを適用することで、オマーンオフィオライト形成時の沈み込み環境におけるマントルプロセスの詳細なパラメータを精確に決定し、スラブ流体の組成を高精度で推定・精密化することが可能になると確信しています。

Ⅳ. 研究成果の公表

本研究成果は、2025 年 3 月 25 日、科学誌「Geochemistry, Geophysics, Geosystems」に掲載されました。

【論文タイトル】 Variable upper mantle geochemical processes constrained from independent component analysis of the Fizh massif, northern Oman ophiolite

【著者】 Yuto Miki, Eiichi Takazawa, Kenta Ueki, Tatsu Kuwatani

【doi】 10.1029/2024GC012134

V. 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP23K20245、JP20H20005、JP16H02742、JP26610173、JP26610173、JP19540478、JP19K04026、JP23H01280、JP24K00744)、東京大学地震研究所 (ERI JURP2021-B01、ERI JURP2024-B01)、国立研究開発法人科学技術振興機構 (CREST; JPMJCR1761) の助成を受けて行われました。

【用語解説】

(注 1) オマーンオフィオライト

プレートテクトニクスにより、海底にあった海洋地殻と上部マントルの一部が、断層によって大陸にのし上げ、地上に露出した地質体をオフィオライトと呼び、主にプレートの収束域に分布します。オマーンオフィオライトは 1 億年前にテチス海で形成した海洋プレートの断片がアラビア半島の東端に乗り上げたオフィオライトで、世界最大の露出規模を持ちます。

(注 2) マントルかんらん岩

上部マントルの最上部を構成する主要な岩石です。マグネシウムや鉄に富み、かんらん石、直方輝石、単斜輝石、スピネルなどを主要構成鉱物として含みます。オマーンオフィオライトのかんらん岩は、海嶺直下を上昇するマントルの部分溶融によって生じた溶け残り岩です。

(注 3) 独立成分分析 (Independent Component Analysis; ICA)

独立成分分析 (ICA) は、観測データが複数の独立な信号の線形混合で構成されていると仮定し、それらを統計的に独立な成分に分解する多変量解析手法です。目的は、データ中に隠れた「独立な情報 (独立成分)」を抽出することです。例えば、パーティー会場で複数の人が同時に話しているとき、録音された音声には周囲の音が混ざっています。ICA を用いることで、この混ざった音声データから、それぞれの話し声を分離することができます。ICA は、統計的に最も独立している成分を探し出します。ここでの「独立」とは、各成分の分布の非正規性が高くなるべく高くなるよう最適化することを指します。ICA は複雑なデータから独立した情報を抽出する強力な手法で、さまざまな分野で応用され、データの背後にある本質的なパターンを明らかにするのに役立ちます。本研究は、世界で初めて ICA をマントルかんらん岩の化学組成に適用しました。

(注 4) 拡大海嶺における無水部分融解

海嶺は「開くプレート境界」とも呼ばれ、年間数センチメートルの速度で拡大しています。その拡大によって生じる隙間を埋めるように、深部から高温のマントルが上昇します。このマントル物質は圧力の低下に伴って、海嶺下約 50km の深さで部分的に融解を開始します。このと

き、融解して生成されたマグマは密度が小さいため、周囲の固体マントルの間を上昇し、海嶺直下に集積します。そこでマグマは徐々に冷却・結晶化し、新たな海洋地殻を形成します。海嶺下のマントル物質は、水をほとんど含まない無水状態にあると考えられており、そのためこの部分融解は無水部分融解として知られています。

（注 5）沈み込み帯におけるスラブ由来の流体を伴う含水融解

海洋プレートの上面は海水と接することで、水を含んだ状態に変化します。この海洋プレートが収束境界で他のプレートの下に沈み込むと、次第に高温のマントルによって加熱され、プレート内の鉱物に含まれる水分が脱水反応によって放出されます。放出された水は周囲のマントルに供給されることで、融点を下げる役割を果たします。その結果、沈み込んだプレート（スラブ）の上盤側のマントルが部分的に融解し、マグマが生成されることが考えられます。

（注 6）蛇紋岩化作用

かんらん岩の加水作用によって蛇紋岩が形成されるプロセスは、蛇紋岩化作用と呼ばれます。海嶺における部分融解の結果、溶け残ったマントル物質(かんらん岩)は海洋地殻とともに海洋プレートを形成します。海洋プレートの上面は海水と接することで、水を含んだ状態に変化すると同時に、温度が徐々に低下していきます。温度が 600℃を下回ると、海洋プレートに浸透した海水とかんらん岩が反応して、蛇紋岩化作用が進行します。

（注 7）岩石流体反応

岩石が流体と高温で反応し、その結果として生じるさまざまな変化を「岩石流体反応」と呼びます。本研究では、沈み込んだプレートから放出された流体が上盤側のマントルに浸透し、かんらん岩と化学反応を起こす現象を指します。この反応によって、岩石中に新たな鉱物が結晶化したり、特定の元素の濃度が上昇または減少したりすることが確認されています。

本件に関するお問い合わせ先

【研究に関すること】

新潟大学自然科学系（理学部・大学院自然科学研究科）

教授 高澤 栄一（たかざわ えいいち）

E-mail：takazawa@geo.sc.niigata-u.ac.jp

国立研究開発法人海洋研究開発機構

海域地震火山部門 火山・地球内部研究センター

固体地球データ科学研究グループ

副主任研究員 上木 賢太（うえき けんた）

【広報担当】

新潟大学広報事務室

TEL：025-262-7000

E-mail：pr-office@adm.niigata-u.ac.jp

国立研究開発法人海洋研究開発機構

海洋科学技術戦略部 報道室