

別紙 4

報告番 ー	※ ー	第
----------	--------	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 Studies on deformation of minerals applying computational science including computer simulation and machine learning analyses

(コンピューターシミュレーションや機械学習分析を含む計算科学を応用した鉱物の変形に関する研究)

氏 名 嚴 泰勳 (UHMB Tae-hoon)

論 文 内 容 の 要 旨

固体地球の構造発達過程は、ミクロ的には岩石と鉱物の物理化学特性からマクロ的にはプレートの力学までの様々な地質現象の相互作用による複雑な関係性と大きな時空間スケールから成り立っている。そして、膨大な観測量をコンピュータアルゴリズムによって解析するデータ駆動型の計算科学が、複雑性と大きな時空間スケールをもつ固体地球の構造発達過程を理解するツールとして近年大きく注目されている。計算科学にはコンピューターシミュレーション、人工知能(AI)なども含まれ、計算ハードウェアとソフトウェアの発達によりデータ処理速度とデータ分析方法において驚異的な進歩を遂げており、これら計算科学の方法は、固体地球の構造発達過程を従来とは異なる視点で解き明かす有効な方法として急速に広がっている状況にある。

本論文は、このような近年の発展著しい計算科学を用いて、地球深部の塑性流動によって形成された鉱物の変形微細構造を研究したものである。研究は2つのパートに分かれており、パートごとに異なる計算科学の方法を用いた。パート1では、クリープ現象に関する理論を構築し、それに基づく数値モデル解析を行って数100万年スケールの地質学的規模の時間における地殻深部における鉱物の変形過程を明らかにした。パート2では、人工知能(AI)の一種である機械学習分析を適用して鉱物の化学的特徴と幾何学的形態の関係を解析し、上部マントル流動における鉱物の変形機構を解明した。

【パート1】 瀬戸内海の塩飽諸島に位置する手島には領家変成帯の花崗岩が広く分布している。この花崗岩には幅数 cm の延性剪断帯が形成されており、花崗岩には主要構成鉱物である石英・斜長石・カリ長石・黒雲母が著しく剪断変形した変形微細構造が観察された。本研究は、この延性剪断帯の中心で最も強く変形した石英粒子に内包したカリ長石粒子の形状変化に着目し、その微細構造から延性剪断帯の形成条件と変形量を見積もることを目的とした。本研究の最大の成果

は、延性剪断帯におけるカリ長石粒子の形状変化が、応力によって駆動される転位クリープと拡散クリープによる変形過程と、変形時の温度条件によって表面積を減らして球体に戻ろうとする拡散過程の競合による関係性を非線形微分方程式で定式化することに成功したことである。さらに本研究では、数100万年スケールの地質学的時間におけるカリ長石粒子の形状変化について、この方程式を使った数値実験を行って岩石薄片から測定した変形微細構造の形状分布と比較した。数値モデルに必要な温度や応力などの因子は、延性剪断帯の石英粒子による古差応力計と結晶方位定向配列から決定した。そして、数値実験によって得られた理論的な形状変化パターンと、花崗岩の延性剪断帯に観察されたカリ長石の形状パターンを比較して、最終的に延性剪断帯におけるカリ長石の形状変化過程を説明することに成功した。これを基にして、世界で初めて延性剪断帯における変形時間（歪速度）と歪量を算出した。変形条件として温度540–550°Cと差応力156MPaの条件で最適解が得られ、そこから算出された延性剪断帯の変形時間は2250年～4000年、歪量は3400%～4500%であった。本研究は変形微細構造解析に新しい研究方法を提示し、鉱物粒子の形状変化に関する定式化はカリ長石粒子だけでなくその他の多くの鉱物粒子にも応用可能であり、今後の応用研究が期待される。

【パート2】 北海道日高変成帯幌満カンラン岩体は、上部マントル物質として世界的に有名な超苦鉄質岩体である。本研究では、幌満カンラン岩体から採取したダナイト試料について、上部マントル条件における変形機構を解明する目的として、スピネル粒子の鉱物化学組成の累帯構造と幾何学的形状の関係性について機械学習を用いて分析した。スピネルの化学組成と形状との関係を機械学習アルゴリズムに適用するために、1) 化学組成分析、2) データ前処理、3) データクラスタリング、4) データ分割、5) 分類およびノード分析、6) 要因重要度(feature importance)の順で解析した。計算速度を速めて機械学習分析の精度を高めるためにはデータ標準化を必要とした。そこで、データ前処理の段階でデータを無次元量に規格化した。次に規格化されたデータのクラスタを識別するために、平均移動クラスタリング(MCA)方法を適用し、分類を含む機械学習分析と要因重要度の推定を行った。要因重要度を推定した結果、スピネル粒子の幾何学的形状中で粒子サイズが化学組成と最も深い関係性を持ち、粒子サイズと格子拡散の支配性は比例関係にあることを世界で初めて定量的に確かめることに成功した。さらに、化学組成の累帯構造をもつスピネル粒子の粒径分布と拡散フラックス比の関係からスピネルの変形温度として1250–1100°Cが導出された。この温度条件は幌満カンラン岩のスピネル安定領域と一致しており、最上部マントルにおける変形過程をスピネルの化学組成と形状が記録していることを意味する。本研究における機械学習を用いたスピネル粒子の微細構造解析は、他のカンラン岩体のスピネル粒子にも応用可能であり、最上部マントルの物質科学的な研究が今後大きく進展することが期待される。