

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

氏 名 嚴 泰勳 (UHMB Tae-hoon)

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)

論文審査担当者

主 査 名古屋大学大学院環境学研究科 教授 道林 克禎

副 査 名古屋大学大学院環境学研究科 教授 竹内 誠

副 査 名古屋大学大学院環境学研究科 講師 瀬瀬 佑衣

副 査 東北大学大学院環境科学研究科 教授 岡本 敦

論文審査の結果の要旨

本論文は、近年の発展著しい計算科学の手法を取り入れて、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。本論文は2つのパートに分かれている。パート1では、岩石の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100万年の時間スケールでおこる地殻流動に関係する鉱物の形態変化を花崗岩の微細構造解析から明らかにした。パート2では、鉱物の形態と化学的特徴の関係を機械学習分析によって解析し、上部マントル流動における鉱物の変形機構をカンラン岩の微細構造解析から明らかにした。

地球深部の塑性流動を理解するためには、流動時の温度・圧力に加えて歪の様式、歪量、差応力や歪速度などの変形条件を明らかにする必要がある。しかし、これらの変形条件のいずれについても岩石の微細構造から直接推定することは容易ではなく、唯一差応力については主要構成鉱物の粒径から推定されている程度であった。こうした背景において、本論文では岩石中の比較的大きな結晶中に存在する微小な鉱物包有物に着目した。鉱物包有物に関する研究は少なくこれまでほとんど注目されてこなかった。しかし、鉱物包有物とそれを被うホスト鉱物結晶に限定することによって、多くの鉱物の相互作用によって生み出される複雑な岩石の微細構造を見かけ上2相系における形状変化と単純化して岩石の組織発達過程を取り扱える利点があった。本論文では、花崗岩を用いた地殻内流動の研究をパート1、カンラン岩を用いた上部マントル流動の研究をパート2として、鉱物包有物の形状変化の解析から導出された岩石の変形条件の結果をまとめている。

【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た。結果として、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。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から得られたカリ長石の形状分布と比較して、延性剪断帯におけるカリ長石の形状変化過程を説明されることが示された。そして、変形条件として温度 550 °C と差応力 90 MPa の条件で最適解が得られ、延性剪断帯の変形時間を 8400 年～16500 年、歪量を 50～260 として算出された。このような見積もりはこれまでほとんど例がなく、変形微細構造解析の新しい研

究方法を提示したばかりでなく、鉱物粒子の形状変化に関する定式化はカリ長石粒子以外のその他の多くの鉱物粒子にも応用可能であり、今後の地殻における塑性流動の応用研究が期待されると高く評価された。

【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。結果として、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格子拡散と界面拡散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、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た。このことは、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と高く評価された。

全体として、本研究における鉱物包有物の形態分布と化学組成を用いて塑性流動の実態を解明する手法は、機械学習を積極的に取り入れた高い独創性と優れた考察力に基づいており、研究した岩石だけでなく世界中に分布する類似した多くの変形岩にも応用できる可能性があるとして議論された。特にパート2で示したスピネルの変形機構の研究については、博士課程在学3年間では間に合わなかったが、近い将来、パート1で確立した数値モデルをパート2のスピネル粒子の研究に適用して未だ達成されていない上部マントルの歪速度を算出できる可能性が示唆されており、学術的価値が高いと評価された。

よって、本論文の提出者嚴 泰勳 (UHMB Tae-hoon) さんは博士 (理学) の学位を授与される資格があるものと判定した。