

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名	YAO Yuan
学位	博士 (理学)
学位記番号	新大院博 (理) 第 453 号
学位授与の日付	令和 2 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	The genesis of podiform chromitites in the Samail ophiolite, the sultanate of Oman: constraints from the inclusions (オマーン国サマイル・オフィオライトのポディフォーム型クロミタイトの成因：包有物からの制約)
論文審査委員	主査 教授・高澤 栄一 副査 教授・M. Satish-Kumar 副査 教授・小西 博巳 副査 准教授・植田 勇人

博士論文の要旨

本論文は、アラビア半島北東部オマーン国のサマイルオフィオライトに分布するクロム鉄鉱に含まれる多相固体包有物を高解像度 X 線コンピューター断層撮影 (HRXCT) と走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて解析し、クロム鉄鉱中のメルト包有物の進化過程を解明したものである。研究に使用したクロム鉄鉱は、サマイルオフィオライトの 3 箇所から採取された。(1) サマイル山地の地殻-マントル遷移帯 (MTZ) の塊状ダナイト中の縞状クロム鉄鉱、(2) ワジタイン山地の ICDP オマーン掘削プロジェクト CM2B 掘削孔から採取された MTZ のクロム鉄鉱脈、および (3) フィズ山地西部のポディフォーム型クロム鉄鉱山である。クロム鉄鉱内の多相包有物の 3D および 2D 画像を取得するために、高解像度 X 線コンピューター断層撮影 (HRXCT) および走査電子顕微鏡 (SEM) を使用した。包有物は、ポディフォーム型クロム鉄鉱試料ではまれであるが、縞状クロム鉄鉱および OmanDP コアのクロム鉄鉱脈では一般的に存在する。多相固体包有物の直径は 5 $\mu$ m から 200 $\mu$ m で、その中にパーガス閃石、ソーダ金雲母、高 Cr# (= Cr / [Cr + Al]原子比) (Cr # > 60) クロム鉄鉱ライニング、透輝石、頑火輝石、硫鉄ニッケル鉱などが含まれる。縞状クロム鉄鉱と OmanDP コアのクロム鉄鉱脈では、初期の大きなメルト包有物がネッキングダウンによって小さな包有物に分離し、その中に様々な娘鉱物の集合体が生成される過程が観察された。このことから、ネッキングダウンがメルト包有物の不均一性をもたらす要因であった可能性が示唆される。

縞状クロム鉄鉱の試料では、骨格形態をもつホストのクロム鉄鉱が観察された。さらに、包有物の空間分布の 3D HRXCT 画像から、ホストのクロム鉄鉱の骨格結晶の急速な成長が、メルト包有物をトラップするケージあるいはホッパーとなったことが示された。これらの 2 つの重要な観察結果は、クロム鉄鉱の急速な冷却とも調和的である。すなわち、メルト包有物を捕捉した後、クロム鉄鉱は内壁に成長し続けたが、その際に、急速冷却による過成長が、高 Cr#クロム鉄鉱のライニングを形成したものと考えられる。

メルト包有物の組成を求めるために縞状試料の高温均質化実験も実施した。1200°C における実験では、熔融後に高 Cr#クロム鉄鉱ライニングとかんらん石と推定される残留相が

認められた。そのため、均質化ガラスの組成から、ホストのクロム鉄鉱に閉じ込められた親メルトの組成を得ることはできなかった。そこで、高 Cr#クロム鉄鉱ライニングを含む娘鉱物の占有領域に基づいて、メルト包有物の組成を計算によって求めた。その結果、トラップされたメルトの  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含有量が最大 9.6%に達することが明らかになった。このような高い  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含有量を有する親メルトの存在が、サマイルオフィオライトのポディフォーム型クロム鉄鉱を形成する要因であったと考えられる。

包有物の形成時期に関する検討では、Nano-SIMS によるアパタイト包有物の局所 U-Pb 年代測定を行い、アパタイトのモデル年代として  $130.1 \pm 55.1 \text{ Ma}$  を得ることができた。この年代は比較的若く、MTZ クロム鉄鉱の形成が、高速拡大海嶺におけるサマイルオフィオライトの形成 (94 – 95 Ma) と関連していた可能性を示している。

以上の結果から、クロム鉄鉱の親メルトがクロム鉄鉱に過飽和状態であったことが明らかになった。また、クロム鉄鉱の親メルトの冷却速度が、ホストのクロム鉄鉱の成長メカニズムと包有物の捕捉メカニズムを制御していた可能性が示された。メルト包有物の研究から MTZ クロム鉄鉱の起源について、急速冷却、過飽和クロム鉄鉱の親メルト、および比較的若い形成年代が今回明らかになった。MTZ クロム鉄鋼またはその親メルトが急速に冷却した理由については、今後さらなる議論が必要である。

#### 審査結果の要旨

オフィオライトに産出するポディフォームクロミタイトは、メルト-マントル反応、地球深部におけるマグマの進化、マントルダイナミクスなど、さまざまなマントルプロセスに関する貴重な情報を提供してくれるために多くの研究がなされてきた。最近では、白金族元素鉱物、ケイ酸塩鉱物、さらには超高压鉱物であるモアッサナイトなど、多くの種類の包有物がサマイルオフィオライトのポディフォームクロム鉄鉱に発見されている。メルト包有物は、メルトの化学組成や、包有物がトラップされたときの圧力および温度条件など、ホスト鉱物を結晶化した一次メルトに関する重要な情報を提供することができる。メルト包有物は、ホスト鉱物に捕獲された後、閉じたシステムまたは孤立したシステムと見なすことができるため、包有物形成時の物理的および化学的条件に関する情報を保存するタイムカプセルと見なすことができる。さらに、複数のメルト包有物の組成を調べることにより、場合によってはマグマ系の液体の降下ラインを推測することができる。しかし、クロム鉄鉱中の多相固体包有物のほとんどの研究は、娘鉱物の組成に焦点を当てており、包有物の起源と進化はこれまでよくわかっていなかった。本論文は、クロム鉄鉱に含まれる多相固体包有物を高解像度 X 線コンピューター断層撮影 (HRXCT) と走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて解析し、クロム鉄鉱中のメルト包有物の進化過程を解明することを試みた。その研究手法は斬新で、クロム鉄鉱中の多相固体包有物の存在形態を多角的に明らかにすることに成功した。研究の結果、クロム鉄鉱の親メルトは、クロム鉄鉱に過飽和状態であったことが明らかになった。また、クロム鉄鉱の親メルトの冷却速度が、ホストのクロム鉄鉱の成長メカニズムと包有物の捕捉メカニズムを制御していた可能性を示すに至った。これらの成果によって、本論文はオフィオライトのクロム鉄鉱の形成に関する新たなモデルを提供することに成功した。よって、本論文は博士 (理学) の博士論文として十分であると認定した。