

学 位 論 文 題 名

Igneous petrology and hydrothermal alteration associated
with massive sulfide mineralization in Oman Ophiolite Extrusives,
with special reference to Ghuzayn and Ghayth areas

(オマーン・オフィオライト噴出岩における
塊状硫化物鉱床形成に関する火成岩岩石学と熱水変質作用
-特に Ghuzayn および Ghayth 地域について-)

学位論文内容の要旨

オマーンオフィオライトは、テーチス オフィオライトの一部を構成し、白亜紀のアラビア地塊中に定置した。本オフィオライトは、海洋地殻から上部マントルまでの典型的なオフィオライト層序が認められ、地殻最上部を構成する火山岩層は、オマーンオフィオライト噴出岩部層と呼ばれる。本研究では、この噴出岩部層に産する含銅塊状硫化物鉱床の形成と熱水変質作用について、(1) マグマ-熱水系の相互作用に関する地質構造場の進化とその影響、(2) 鉱床形成後の海底及び陸上風化による金属元素の再分配、特に金に富む及び金に乏しい鉱床の形成機構に着目して検討した。

オマーンオフィオライト噴出岩部層は、主に Ghayth 地域に産し、下位から上位に向かい Unit 1a, Unit 1b および Unit 2 の 3 層序単位に区分される。Unit 1a および Unit 1b は、同一マントル起源の Unit 1 の sub-unit である。下位の Unit 1 と Unit 2 の地層境界には、金属元素に富む堆積物(umber)が認められる。単斜輝石の微量元素含有量から、Unit 1a および Unit 1b 噴出岩はソレライト玄武岩の特徴を示し、Unit 2 の火山岩はより島弧ソレライトの特徴を示す。一方、全岩分析による Y-La-Nb 岩石区分図に基づくと、Unit 1a 及び Unit 1b は N-MORB、背弧海盆玄武岩および島弧ソレライト境界線の会合部周辺にプロットされる。Unit 1a と Unit 1b の全岩微量元素含有量のスパイダーダイアグラムは、より背弧玄武岩のパターンと類似している。また、Unit 1a と 1b の Nb-Ta, Zr/Hf 比は、N-MORB に対して相対的に低い値を示す。Unit 1a と Unit 1b のコンドライト規格化 REE パターンは、LREE がやや右上がりであり全体的にフラットな REE パターンを持つ。これらの微量元素の特徴から、Unit 1a と Unit 1b の火山岩類が、背弧海盆の特徴を持つ成分で汚染されたマントル起源物質から形成されたことを示している。

Ghuzayn 地域は、オマーンと日本の政府間協同で実施された鉱床探査プロジェクトによる地質調査が行われ、多数のボーリングコアが得られた。本研究では、これらのボーリング試料を用い、変質した Ghuzayn 火山岩類の詳細な初生・二次鉱物の産状記載、全岩化学組成および塊状硫化物やストックワーク鉱化作用に関して新しいデータを追加した。

Ghuzayn 火山岩類は、本調査地域に分布する 3 つの塊状硫化物鉱床の胚胎母岩である。これら火山岩類は同一のマントル起源を持ち、分化の乏しい玄武岩質溶岩とより分化の進んだ安山岩質溶岩に区分される。Ghuzayn 火山岩類の immobile な微量元素含有量 (Y-La-Nb ダイアグラム) は、N-MORB、背弧海盆玄武岩および島弧ソレライトの境界線の会合部周辺にプロットされ、ラウ トンガ背弧海盆と類似した特

徴をもつ。このことから、Ghuzayn 火山岩類は、海洋性から大陸性ソレアイトの特徴をもつことが示唆される。

Ghuzayn における塊状硫化物鉱床の No2 鉱体近傍の変質帯は、二次鉱物の産状から Zone I, Zone II, 珪化帯に分けられる。Zone I は、No2 鉱体北部の上部に位置し、コーレンサイト、サポーナイトおよびブドウ石の産出により特徴付けられる。一方、Zone II は No2 鉱体南部に分布し、緑泥石と緑簾石により特徴付けられる。珪化帯は、No2 鉱体中央部の下部にパイプ状の変質帯として分布する。珪化帯の構成鉱物は、主に多量の石英と緑泥石からなり、鉱染状の硫化物と少量の緑簾石を伴う事により特徴付けられる。これら 3 つの変質帯は、以下の 4 ステージの熱水変質作用によって形成されたと考えられる；ステージ 1：反応が極めて乏しい流体により、150°C から 250°C の温度範囲で Mg 緑泥石と曹長石を晶出した。ステージ 2：時間経過に伴い流体が進化し、Mg に乏しくなり、Si や金属元素に富み、250°C から 350°C の温度の条件下で、Fe²⁺ 緑泥石、緑簾石、石英および硫化物を晶出した。ステージ 3：更に熱水流体の進化が生じて、Mg や Ca に富み、150°C から 220°C の温度でブドウ石、濁沸石、コーレンサイトおよびサポーナイトを晶出した。ステージ 4：熱水活動最末期に、ゼオライトおよび方解石が変質した玄武岩質溶岩中に脈状、もしくは先に晶出した相にオーバーグロースして発達した。

Ghuzayn 火山岩中の塊状硫化物鉱床の形態、鉱石タイプ、鉱物学および全岩化学組成は、Troodos オフィオライトに見られる典型的なキプロス型塊状硫化物鉱床と同一である。この硫化物鉱床は半地溝帯に位置し、その鉱化作用は構造規制を強く受けている。Ghuzayn No. 2 鉱体と No. 3 鉱体の最も厚い部分は、明瞭なマウンド状の形態を示す。これらの鉱体の厚さは周辺に向かって減少し、鉱石層準は Fe 及び Si 富む熱水性堆積物、もしくは金属に富む堆積物層へと連続する。

Ghuzayn 地域における 3 つの塊状硫化物鉱床の鉱化作用は、前述のステージ 2 の熱水活動期に密接に関連している。このステージ 2 熱水活動には、以下の主要な 3 つのイベントが認められる；イベント 1：高温流体の噴出により黄鉄鉱に富む硫化物鉱体を形成した。この黄鉄鉱は、自形から半自形およびコロフォーム、フランボイダル黄鉄鉱として産し、黄銅鉱、閃亜鉛鉱および稀に磁硫鉄鉱を包有する。一方、黄銅鉱は、黄鉄鉱の割れ目や粒間を充填し、また黄銅鉱コロフォームバンドを形成している。イベント 2：低温流体の噴出により塊状硫化物鉱体下部にストックワークの鉱石が形成され、石英、フィラメント状およびコロフォーム状の赤鉄鉱と少量の他形閃亜鉛鉱を産する。イベント 3：塊状硫化物鉱石は著しく破碎され、一部ではジャスパーと互層状を呈する石英脈により切られる。石英中には、しばしばスメクタイトのようなケイ酸塩鉱物が認められる。

海底で形成された、いくつかのオマーン塊状硫化物鉱床の風化作用は、部分的もしくは完全に酸化した鉱体（いわゆるゴッサン）を形成している。これらの酸化鉱体は各々異なる場所、鉱物学的性質、化学組成を示すが、硫化物鉱床の関係ではオマーンオフィオライト噴出岩中に普通に見られる。本研究で検討したすべての酸化鉱体は Mn と Al の低含有量と Si の高含有量を示し、これらは酸化された熱水鉱床であることを示唆する。また、これら酸化鉱体は次の 2 タイプに大別することができる；タイプ 1：Ghuzayn 及び Zuha の gossans の様に、陸上風化により形成され、低 Au, Cu, Zn 含有量で特徴付けられる。タイプ 2：Rakah gossan の様に、海底風化により形成され、高 Au 含有量、中程度の Cu, Zn 含有量で特徴付けられる。

本研究結果から、オマーンオフィオライト噴出岩類は背弧海盆と類似したテクトニック・セッティングで形成したと推定される。また、Ghuzayn 地域の塊状硫化物鉱床の鉱化作用と鉱床形成は、オマーンオフィオライト噴出岩類を形成した背弧海盆での火山活動と密接に関連している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 松 枝 大 治

副 査 教 授 竹 下 徹

副 査 助 教 授 新 井 田 清 信

副 査 教 授 宮 下 純 夫 (新潟大学大学院

自然史科学研究科)

学 位 論 文 題 名

Igneous petrology and hydrothermal alteration associated
with massive sulfide mineralization in Oman Ophiolite Extrusives,
with special reference to Ghuzayn and Ghayth areas

(オマーン・オフィオライト噴出岩における
塊状硫化物鉱床形成に関する火成岩岩石学と熱水変質作用
-特に Ghuzayn および Ghayth 地域について-)

近年、オフィオライトの成因とテクトニクスに関する精力的な研究が国際的に展開されているが、特に本論文の研究対象としたオマーン・オフィオライト地域はその良好な露出状況から、世界各国の岩石・テクトニクス関係研究者が注目し活発な研究活動が行われ、著しい研究成果が挙げられつつある。しかし、本論文では単に岩石・テクトニクスの観点からのみならず、密接に伴われる塊状硫化物鉱床形成とそれに関与した熱水活動に伴うオフィオライトの変質作用について、野外調査及び試料採集、各種室内実験と考察を行い、特にマグマ活動とそれに関係する熱水活動及び鉱床形成過程と生成条件を解明する事を目的としたものである。

オマーン・オフィオライトはテーチス オフィオライトの一部を構成し、白亜紀のアラビア地塊中に定置した。本オフィオライトでは、海洋地殻から上部マントルまでの典型的なオフィオライト層序が認められ、地殻最上部を構成する火山岩層はオマーン・オフィオライト噴出岩部層と呼ばれる。本研究では、この噴出岩部層に産する含銅塊状硫化物鉱床の形成と熱水変質作用について、(1) マグマ-熱水系の相互作用に関する地質構造場の進化とその影響、(2) 鉱床形成後の海底及び陸上風化による金属元素の再分配、特に金に富む及び金に乏しい鉱床の形成機構に着目して検討した。

オマーン・オフィオライト噴出岩部層は主に Ghayth 地域に産し、下位から上位に向かい Unit 1a , Unit 1b および Unit 2 の3層序単位に区分される。Unit 1a および Unit 1b は、

同一マントル起源の Unit 1 の sub-unit である。下位の Unit 1 と Unit 2 の地層境界には、金属元素に富む堆積物(umber)が認められる。単斜輝石の微量元素含有量から、Unit 1a および Unit 1b 噴出岩はソレイト玄武岩の特徴を示し、Unit 2 の火山岩はより島弧ソレイトの特徴を示す。一方、全岩分析による Y-La-Nb 岩石区分図に基づく、Unit 1a 及び Unit 1b は N-MORB、背弧海盆玄武岩および島弧ソレイト境界線の会合部周辺にプロットされる。Unit 1a と Unit 1b の全岩微量元素含有量のスパイダーダイアグラムは、より背弧玄武岩のパターンと類似している。また、Unit 1a と 1b の Nb/Ta、Zr/Hf 比は、N-MORB に対して相対的に低い値を示し、それらのコンドライト規格化 REE パターンは LREE がやや右上がり、全体的にフラットな REE パターンを持つ。これらの微量元素の特徴から、Unit 1a と Unit 1b の火山岩類が背弧海盆の特徴を持つ成分で汚染されたマントル起源物質から形成されたことを示している。

Ghuzayn 地域は、オマーンと日本の政府間協同で実施された鉱床探査プロジェクトによる地質調査が行われ、多数のボーリングコアが得られた。本研究ではこれらのボーリング試料を用い、変質した Ghuzayn 火山岩類の詳細な初生・二次鉱物の産状記載、全岩化学組成および塊状硫化物鉱床やストックワーク鉱化作用に関して新しいデータを追加した。

Ghuzayn 火山岩類は、本調査地域に分布する 3 つの塊状硫化物鉱床の胚胎母岩である。これら火山岩類は同一のマントル起源を持ち、分化の乏しい玄武岩質溶岩とより分化の進んだ安山岩質溶岩に区分される。Ghuzayn 火山岩類の immobile な微量元素含有量(Y-La-Nb ダイアグラム)は、N-MORB、背弧海盆玄武岩および島弧ソレイトの境界線の会合部周辺にプロットされ、ラウトンガ背弧海盆と類似した特徴をもつ。このことから、Ghuzayn 火山岩類は海洋性から大陸性ソレイトの特徴をもつことが示唆される。

Ghuzayn の塊状硫化物鉱床における No.2 鉱体近傍の変質帯は、二次鉱物の産状から Zone I、Zone II、珪化帯に分けられる。Zone I は、No.2 鉱体北部の上部に位置し、コーレンサイト、サポーナイトおよびブドウ石の産出により特徴付けられる。一方、Zone II は No.2 鉱体南部に分布し、緑泥石と緑簾石により特徴付けられる。珪化帯は、No.2 鉱体中央部の下部にパイプ状の変質帯として分布する。珪化帯の構成鉱物は主に多量の石英と緑泥石からなり、少量の鉱染状の硫化物と緑簾石を伴う事により特徴付けられる。これら 3 つの変質帯は、以下の 4 ステージの熱水変質作用によって形成されたと考えられる；ステージ 1：反応度が極めて乏しい流体により、150℃から 250℃の温度範囲で Mg 緑泥石と曹長石を晶出した。ステージ 2：時間経過に伴い流体が進化し、Mg に乏しくなり Si や金属元素に富み、250℃から 350℃の温度の条件下で Fe²⁺緑泥石、緑簾石、石英および硫化物を晶出した。ステージ 3：さらに熱水流体の進化が生じて Mg や Ca に富み、150℃から 220℃の温度でブドウ石、濁沸石、コーレンサイトおよびサポーナイトを晶出した。ステージ 4：熱水活動最末期に、ゼオライトおよび方解石が変質した玄武岩質溶岩中に脈状、もしくは先に晶出した相にオーバーグロースして発達した。

Ghuzayn 火山岩中の塊状硫化物鉱床の形態、鉱石タイプ、鉱物学および全岩化学組成は、Troodos オフィオライトに見られる典型的なキプロス型塊状硫化物鉱床と同一である。この硫化物鉱床は半地溝帯に位置し、その鉱化作用は構造規制を強く受けている。Ghuzayn

No. 2 および No. 3 鉱体の最も厚い部分は、明瞭なマウント状の形態を示す。これらの鉱体の厚さは周辺に向かって減少し、鉱石層準は Fe および Si 富む熱水性堆積物、もしくは金属に富む堆積物層へと連続する。

Ghuzayn 地域における 3 つの塊状硫化物鉱床の鉱化作用は、前述のステージ 2 熱水活動と密接に関連している。このステージ 2 熱水活動には、以下の 3 つの主要イベントが認められる；イベント 1：高温流体の噴出により、黄鉄鉱に富む硫化物鉱体を形成した。この黄鉄鉱は、自形から半自形およびコロフォーム、フランボイダル黄鉄鉱として産し、黄銅鉱、閃亜鉛鉱および稀に磁硫鉄鉱を包有する。一方、黄銅鉱は黄鉄鉱の割れ目や粒間を充填し、また黄銅鉱コロフォームバンドを形成している。イベント 2：低温流体の噴出により塊状硫化物鉱体下部にストックワークの鉱石が形成され、石英、フィラメント状ないしコロフォーム状の赤鉄鉱と少量の他形閃亜鉛鉱を産する。イベント 3：塊状硫化物鉱石は著しく破碎され、一部ではジャスパーと互層状を呈する石英脈により切られる。石英中にはしばしばスメクタイトのようなケイ酸塩鉱物が認められる。

海底で形成された、いくつかのオマーン塊状硫化物鉱床の風化作用は、部分的もしくは完全な酸化鉱体（いわゆるゴッサン）を形成している。これらの酸化鉱体は各々異なる場所、鉱物学的性質、化学組成を示すが、硫化物鉱床の関係ではオマーン・オフィオライト噴出岩中に普通に見られる。本研究で検討したすべての酸化鉱体は Mn と Al の低含有量と Si の高含有量を示し、これらは酸化された熱水鉱床であることを示唆する。また、これら酸化鉱体は次の 2 タイプに大別することができる；タイプ 1: Ghuzayn 及び Zuha の gossans の様に、陸上風化により形成され、低 Au, Cu, Zn 含有量で特徴付けられる。タイプ 2: Rakah gossan の様に、海底風化により形成され、高 Au 含有量、中程度の Cu, Zn 含有量で特徴付けられる。

本研究結果から、オマーン・オフィオライト噴出岩類は背弧海盆と類似したテクトニック・セッティングで形成したと推定される。また、Ghuzayn 地域の塊状硫化物鉱床の形成と母岩の変質作用は、オマーンオフィオライト噴出岩類を形成した背弧海盆での火山活動と密接に関連している。

これを要するに、著者はオマーン・オフィオライトの岩石学・テクトニクス、および塊状硫化物鉱床形成と熱水変質作用、酸化鉱体の形成について重要な新知見を得たものであり、マグマ成因論およびテクトニクス論のみならず、塊状硫化物鉱床の探査指針を得る上でも多大な貢献をすると期待される。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。