

# 博物館収蔵の鉱石試料の分析により日本全体の熱水鉱床の生成要因を解明

## —地球資源の生成メカニズム理解の深化に向けて—

### 概要

金、銅、ニッケルなどに代表される金属資源は 2000 年以降需要が急増しており、今後の世界的な経済成長・人口増加、再生可能エネルギーの利用増加、電子機器の高機能化などにより、さらに需要が増加し続けることが見込まれています。日本のようなプレート沈み込み帯には種々のタイプの熱水鉱床が数多く存在し、鉱山として開発されて金属資源の重要な供給源を担っています。しかし、多くの鉱床を対象とした体系的な研究により、鉱石の化学組成の類似性や相違、地域性、生成年代での特徴、それらを生み出した地質学的要因などはまだ十分に理解されておらず、新たな資源の発見のためにも鉱床生成のメカニズムと支配因子の解明が求められています。

そこで、京都大学大学院工学研究科大学院生 江夏道晴、同研究科 小池克明 教授、愛媛大学大学院理工学研究科 白勢洋平 講師、秋田大学大学院国際資源学研究所 渡辺 寧 名誉教授らの共同研究グループは、日本を網羅する 116 鉱山から収集され、京都大学総合博物館と秋田大学鉱業博物館に収蔵された 326 個の鉱石試料の鉱物組成と元素濃度分析を行い、得られたデータの多変量解析によって、日本の熱水鉱床鉱石の化学的特徴とそれを作る要因を初めて体系的に明らかにしました。

- ① 化学組成の類似性から日本の熱水鉱床は「黒鉄鉱的な化学組成の鉱床」、「黄鉄鉱と黄銅鉱に富んだ鉱床」、「亜鉛と鉛に富んだ鉱床」、「ケイ酸塩鉱物に富んだ鉱床」の 4 つのクラスターに分類される (図 1)。
- ② クラスターを作った要因は、(i)中生代白亜紀以前の中央海嶺での鉱床生成と古島弧への付加、(ii)白亜紀から古第三紀にかけての磁鉄鉱系列とイルメナイト系列のマグマ活動によるそれぞれ鉄と銅、鉛と亜鉛の富化、(iii)新第三紀中新世での引っ張り応力場と背弧海盆での海底火山活動、および(iv)鮮新世から第四紀にかけての島弧浅部での熱水活動、と解釈できる (図 2)。

鉱床の形成年代とクラスターの関連は、鉱床のタイプ、形成年代、地殻変動環境、熱水起源として機能した貫入岩体を特定することにより、新たに発見される熱水鉱床の主要な金属元素の推定に寄与すると期待されます。

本研究成果は、2025 年 11 月 13 日に国際学術誌「Ore Geology Reviews」のオンライン版で公開されました。

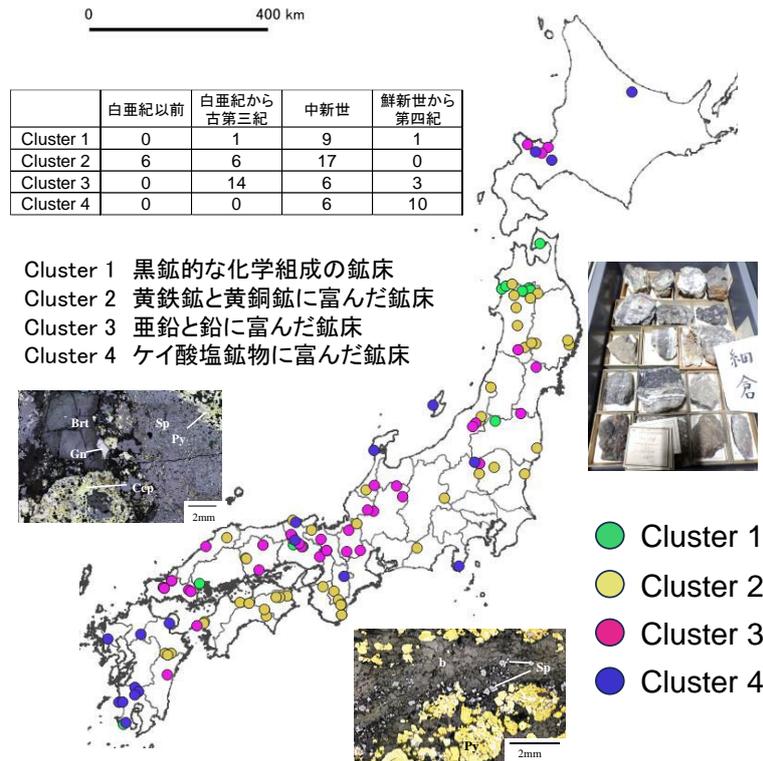


図 1：日本列島全体にわたる熱水鉱床からの鉱石試料の化学成分濃度データに基づく 4 つのクラスターの分布、および各クラスターが各年代に何個あるかを表すクラスターと鉱床の形成年代との関係。各クラスターの特徴、鉱石の写真と顕微鏡画像の一例も表す。

### 1. 背景

金属は私達の生活のあらゆるところに使われており、持続可能な社会発展のために欠かせないものです。そのため金属資源の需要は 2000 年以降急増しており、今後の世界的な経済成長・人口増加、再生可能エネルギーの利用増加、電子機器の高機能化などにより、さらに需要が増加し続けることが見込まれています。海洋プ

レートの沈み込み帯に位置する日本にはかつて金、銅、鉛、亜鉛などの鉱石を産出した鉱山が2,500箇所程度あったと言われており、銀などを輸出するなど資源大国でありました。また日本には地下深部からの熱水を起源とした熱水鉱床が多く、しかも鉱脈型、別子型、スカルン型、黒鉱型という異なったタイプの熱水鉱床が存在するという特徴もあります。京都大学総合博物館や秋田大学鉱業博物館には、日本全国の鉱山から明治初期より収集された熱水鉱床の鉱石が多数収蔵されています。これらは現在では入手できないほどの高濃度で金属を含む鉱石であり、国内至高のまさに「地の宝物」です。これらを網羅的に分析すれば日本全体にわたる熱水鉱床の化学組成の特徴、それと鉱床タイプや形成年代との関係などを明らかにでき、鉱床生成のメカニズムを理解できると期待できます。しかし、従来の研究では個々の鉱床の特徴付けや成因解明に主眼が置かれ、全体を俯瞰して個々の特徴を生み出した地質学的・地殻変動学的要因や法則性を見付け出すという体系的な研究はなされていませんでした。新たな金属資源の発見による今後の安定供給のためにも、鉱床生成のメカニズムと支配因子の解明が求められています。

## 2. 研究手法・成果

研究成果のポイント

- 日本を網羅する主要鉱山から収集され、京都大学総合博物館と秋田大学鉱業博物館に収蔵された鉱石試料を有効に活用し、その鉱物組成、および主要元素とレアアースを含む微量元素の濃度を詳細に分析した。
- 元素濃度データの因子分析により、相関行列の固有値が大きかった第1から第4までの4つの因子を導出し、各鉱山での各因子得点の平均値を用いてクラスター分析を行った。その結果、クラスターごとに集中する鉱床の形成年代が異なるなど、鉱床の形成年代とクラスターとに関連性が見出された。
- 4つのクラスターの特徴は鉱床タイプとは異なり、化学組成の観点からの新たな鉱床分類が可能になった。化学組成の支配因子は各鉱床形成年代での地殻変動、広域応力場、マグマ活動、海底火山活動であると解釈できた。
- このような博物館所属の第一級の鉱石試料を用いて全国にわたる特徴と法則性を見出した研究成果は初めてである。化学組成の特徴は、新たに発見される熱水鉱床の主要な金属元素の推定に寄与すると期待できる。

本共同研究チームは、日本を網羅する116鉱山から収集され、京都大学総合博物館と秋田大学鉱業博物館に収蔵された326個の鉱石試料の鉱物組成と化学組成に注目しました。XRDによりどのような鉱物が含まれているのかの鉱物組成を、XRF・ICP-MS・ICP-AES分析により主要元素とレアアースを含む微量元素の濃度を求めました。まず、濃度データの因子分析を行い、相関行列の固有値が大きかった第1から第4までの4つの因子を導出し、鉱物組成結果と組み合わせると、各因子は第1：閃亜鉛鉱と方鉛鉱、第2：ケイ酸塩鉱物、第3：黄鉄鉱と黄銅鉱の生成に起因した元素移動、および第4：黒鉱鉱石の地化学的特徴を表すものと解釈できました。

次に、各鉱山での各因子得点の平均値を用いてクラスター分析を行った結果、化学組成の類似性から日本の熱水鉱床は「黒鉱的な化学組成の鉱床」、「黄鉄鉱と黄銅鉱に富んだ鉱床」、「亜鉛と鉛に富んだ鉱床」、「ケイ酸塩鉱物に富んだ鉱床」の4つのクラスターに分類できることがわかりました。これは従来の鉱床タイプとは異なる分類で、同じ鉱床タイプでも違ったクラスターに分類される場合もあります。また、クラスターごとに集中する鉱床の形成年代が異なるなど、鉱床の形成年代とクラスターとに関連性が見出されました(図1)。日本列島の地殻変動史に基づいてクラスターの化学組成的特徴と形成年代との関連について考察した結果、関連性を作った地質学的要因は(i)中生代白亜紀以前の中央海嶺での鉱床生成と古島弧への付加、(ii)白亜紀から古第三紀にかけての磁鉄鉱系列とイルメナイト系列のマグマ活動によるそれぞれ鉄と銅、鉛と亜鉛の富化、(iii)中

新世での引っ張り応力場と背弧海盆での海底火山活動、(iv)鮮新世から第四紀にかけての島弧浅部での熱水活動である(図2)と解釈できました。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究の特筆すべき意義は、熱水鉱床を代表する第一級の鉱石試料を分析の対象とし、日本全体の熱水鉱床を俯瞰して化学組成の特徴から鉱床をグループ化し、各クラスターの特徴がどのような地質学的要因やプロセスによって作られたのかを明らかにできた点です。熱水鉱床生成の重要なプロセスとして、(1)マグマの性質(熱水の起源となった貫入岩体の物理的・化学的性質)、(2)地殻変動の場の性質(圧縮場、引っ張り場など)のような広域応力場にあったのか、(3)元素の濃集(どのようなメカニズムでどのような元素が濃集したのか)などがあげられます。このようなプロセスが地質年代や日本列島の場所によってどのように、なぜ異なるのかを明らかにできました。特に鉱床の形成年代とクラスターとの関連は、鉱床のタイプ、形成年代、地殻変動環境、熱水起源として機能した貫入岩体を特定することにより、新たに発見される熱水鉱床の主要な金属元素の推定に寄与すると期待されます。

今後は、鉱床形成のプロセスを数値シミュレーションによって再現できるようにするとともに、インドネシアのような日本と同様に熱水鉱床が多い国を対象とし、本研究での手法を適用することで未発見の熱水鉱床が存在する可能性の高い場所を絞り込むなど、研究を世界的に展開していきます。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は JSPS 科研費基盤研究(課題番号 23K23285 と 25K01714)の助成による成果です。

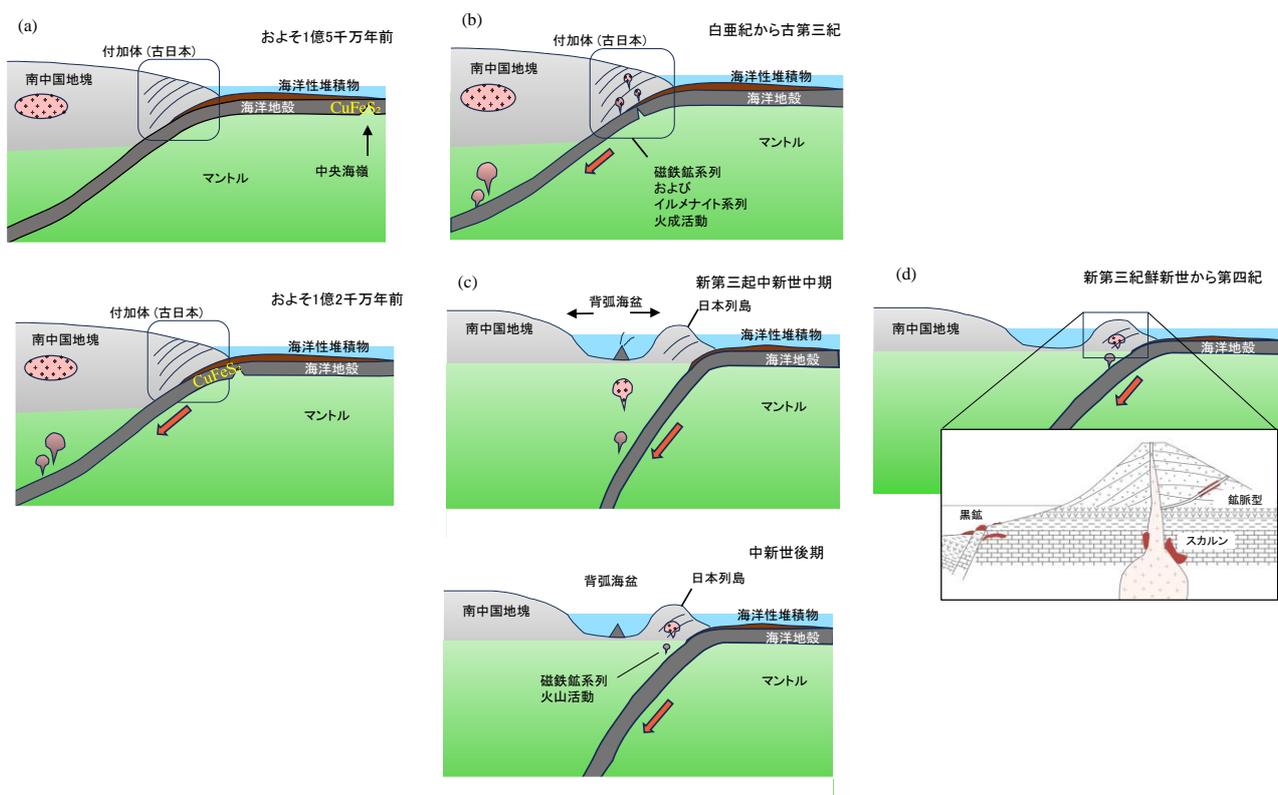


図2. 4つの地質年代(a)白亜紀以前、(b)白亜紀から古代三紀、(c)中新世、(d)鮮新世から第四紀における地殻変動場と鉱床生成プロセスのモデル図

<論文タイトルと著者>

タイトル：Ore Geochemical Composition Characterization of Hydrothermal Deposits throughout the Japanese Islands: Interpreting Spatial and Temporal metallogeny (日本列島全域における熱水鉱床鉱石の地球化学的組成の特徴抽出：鉱床成因の時間－空間的解釈)

著者：Michiharu Enatsu、 Yu Shimoji、 Katsuaki Koike、 Yohei Shirose、 Yasushi Watanabe

掲載誌：Ore Geology Reviews

DOI：10.1016/j.oregeorev.2025.106979