

## 鉱石試料分析に基づく日本の熱水鉱床のタイプと生成年代による 金属濃度の特徴

下地 悠<sup>1</sup>・大田 優介<sup>2</sup>・小池 克明<sup>1</sup>・白勢 洋平<sup>3</sup>

### Characterization of metal contents of ore samples in hydrothermal deposits in Japan depending on type and geologic ages

Yu Shimoji<sup>1</sup>・Yusuke Ohta<sup>2</sup>・Katsuaki Koike<sup>1</sup>・Yohei Shirose<sup>3</sup>

- 1) 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2, Kyoto 615-8540, Japan.  
E-mail: i.am.you718@gmail.com (Shimoji)
- 2) 名古屋大学環境科学科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furou D2-1, Chikusa, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan.
- 3) 愛媛大学理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Ehime University, 10-13 Dogo-Himata, Matsuyama, Ehime 790-8577, Japan.

キーワード：金属鉱床，鉱物組成，金属元素濃度，主成分分析，対数比変換

**Key Words** : metal deposits, mineral composition, metal element content, principal component analysis, logratio transformation

#### 1. はじめに

世界的に金属資源の需要が増加し、供給リスクが高まっている(原田ほか, 2007). この状況において、新たな金属鉱床の探査・開発は重要な課題である. 鉱床学分野においても金属元素の分布形態の把握や鉱床の成因解明のために、分析データや数理統計解析を活用するデータ駆動型解析の適用が注目されている. 日本ではかつて多種多様な鉱石(金・銀・銅・鉛・亜鉛・タングステン等)を対象とした複数のタイプの鉱山が採掘されていた. これらの鉱山からの鉱石を分析することで、これまでとは異なる観点から資源の分布、鉱床の成因、鉱床形成支配要因などに関する情報を抽出できれば、日本列島における鉱床形成の理解に繋がり、類似の変動地域や新たな探査領域での活用も期待できる.

そこで本研究では、熱水鉱床に分類される日本の94ヶ所における金属鉱山に注目し、それらの鉱石の元素濃度と鉱物組成分析を行い、データ解析を通して資源地質学的な観点から元素濃集の特徴、およびこれと鉱床のタイプや生成年代との関係を明らかにすることを目的とした.

#### 2. 対象鉱石試料

本研究では、京都大学総合博物館に収蔵されている日本の94鉱山の鉱石の中で、主要鉱脈や高品位部に位置する2~5個を選び、カッターで一部を切断して分析に用いた. 試料数は合計で343である. 分析した鉱山の鉱床タイプはキースラガー、スカルン鉱床、浅熱水鉱脈型鉱床、ゼノサーマル型鉱床、黒鉱型鉱床といずれも熱水性鉱床である. 各鉱床の生成年代は、中生代のジュラ紀から新生代の新第三紀・第四紀にわたり、浅鉱脈型鉱床とゼノサーマル型鉱床は古第三紀と新第三紀、第四紀、スカルン鉱床はジュラ紀から新第三紀、黒鉱型鉱床はすべて新第三紀、キースラガーはすべてジュラ紀に生成されており(下中, 1996)、鉱床タイプによ

って生成された年代には偏りがある.

#### 3. 鉱石試料分析とデータの解析手法

試料の分析の前処理として、粉碎機を用いて各試料を粉末化し、鉱物組成はXRD(X線回折分析装置)、元素濃度はXRF(蛍光X線分析装置)を用いて定性・定量分析を行った.

元素濃度と鉱物組成の分析結果を用い、それぞれに対して統計分析を行った. その後、14種類の元素の濃度データに主成分分析を適用した. この際、元素濃度データがもつ定数と制約を除去するために、各変数を共通して一つの規格化変数との比に置き換え、その比の対数をとる対数比変換を用いた. その規格化変数として、風化作用で移動・分解されにくく、熱水変質においても移動性が低いという特徴をもつため、元素移動の基準となるAl濃度を用いた.

#### 4. 元素濃度と鉱物組成の統計解析結果

元素濃度分析データの統計解析から、以下の鉱床タイプ別の元素濃集の特徴が明らかになった. キースラガーは他の鉱床タイプと比較してMg, Fe, Coの濃度が高く、Mn, W, Pbは極端に低い. スカルン鉱床は高いFe, Mn濃度によって特徴付けられる. また、生成年代によって濃度分布の特徴が変化する元素は少ないが、ジュラ紀の鉱床は他の年代よりもFe, Co濃度が高い. 白亜紀の鉱床はやや高いFe, Al濃度を示すが、Cu, Zn, Pbでは他の年代の鉱床よりも著しく低い濃度を示す.

鉱物組成分析の結果からは、Fe, Cu, Zn, Pb等の元素は鉱床タイプに関わらず硫化物として生成されることが多いことがわかった. その中でもキースラガーは高い黄鉄鉱と黄銅鉱の含有比で、黒鉱型鉱床は高い閃亜鉛鉱と方鉛鉱の含有比で特徴付けられる. また、浅熱水鉱脈型とスカルン鉱

床では、磁鉄鉱や赤鉄鉱などの酸化鉱物や珪酸塩鉱物が高い含有比を示す場合もみられた。

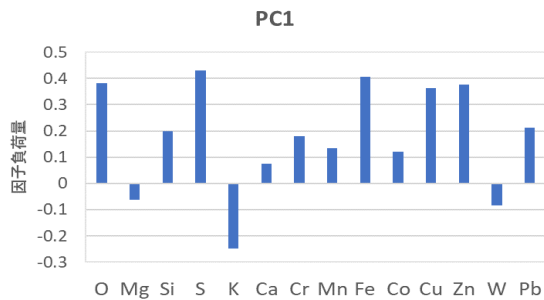
## 5. 主成分分析の結果と考察

主成分分析の結果、第1主成分(以下 PC1)、第2主成分(PC2)、第3主成分(PC3)までの合計で約60%の寄与率をもつことがわかった。

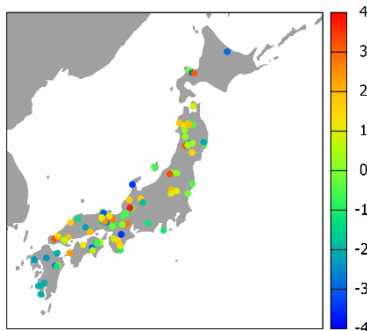
寄与率約30%のPC1における各元素の因子負荷量を第1図に示す。高い負荷量をもつ Fe, Cu, Zn の鉱物は硫化物が最も多いこと、および本研究で用いた試料はすべて熱水性鉱床に属することから、PC1 は「熱水による鉱化作用に伴う成分の挙動、特に硫化鉱物の生成」を表すと考えられる。

寄与率約17%のPC2の因子負荷量として、珪酸塩鉱物との親和性が高い Cr, W, および国内の鉱床において石英や灰鉄輝石との共生例が報告されている Co が高い値を示すことから、「熱水による鉱化作用に伴う酸化鉱物の生成」を表すと解釈できる。

さらに、寄与率約14%のPC3として、接触交代反応に伴うスカルン鉱床の母岩に多く含まれる Ca, Mg が高い因子負荷量を示すことから、PC3 は「スカルン鉱物生成の顕著さ」を表すと考えられる。実際にスカルン鉱床のみが高い PC3 値をもち、その他の鉱床タイプでは低い値であることから妥当な解釈といえる。



第1図 PC1における各元素の因子負荷量。

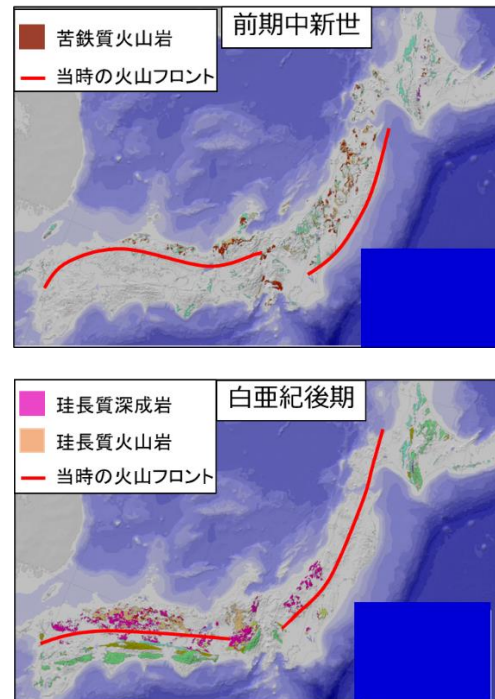


第2図 PC1の主成分スコア分布図。

第2図に示したPC1のスコア分布図から、PC1のスコアが高い地域は、黒鉄型鉱床の多い東北地方および浅熱水、ゼノサーマル、スカルン鉱床が多い西南日本(近畿・中国地方)であることがわかる。火山性塊状硫化物の一種である黒鉄型鉱床において高いPC1スコアを示すことは、上記のPC1の解釈と整合する。このPC1スコアが高い2つの地域のうち、東北地方のPC2スコアは西南日本と比較すると低い。この特徴は、第3図に示した白亜紀後期における西南日本の火成活動、前期中新世における東北地方付近の火成活動という時期の相違に起因すると考えられる。火山フロントの背弧側に位置し、酸化度が低い火成岩が分布する東北地方ではPC2が低い。一方、火山フロント付近で酸化度が高

い火成岩が分布する西南日本ではPC2が高くなり、これは上記のPC2の解釈と整合し、妥当性が確かめられる。また、熱水による鉱化作用の硫化鉱物/酸化鉱物のバランスは、鉱床生成期における鉱床と火山フロントとの位置関係を反映しているという可能性が示唆された。

以上の考察から、日本の金属鉱床の元素濃度の全体的特徴は鉱床生成に関与した火山フロントとの位置関係、およびそれに起因する熱水の酸化度が最も重要な要素であるということを明らかにできた。



第3図 前期中新世(上)と白亜紀後期(下)の岩石分布、および当時の火山フロントの一(日本列島の地質編集委員会, 1996に一部加筆)。

## 6. まとめ

日本の94鉱山の鉱石試料343個を用いて鉱物組成・元素濃度分析を行い、主要な構成鉱物、および鉱床タイプや生成年代による元素濃度の特徴を明らかにした。Alを規格化元素として対数比変換を行い、これによる元素濃度データに主成分分析を適用した結果、寄与率が大きい主成分から、「熱水による鉱化作用に伴う成分の挙動、特に硫化鉱物の生成」、「熱水による鉱化作用に伴う酸化鉱物の生成」、および「スカルン鉱物生成の顕著さ」という特徴を抽出することができた。さらに、全体的な特徴として、日本の金属鉱床の元素濃度は、鉱床生成に関与した火山フロントとの位置関係とそれに起因する熱水の酸化度に支配されていると考えられ、火山フロントの位置と熱水の酸化度が最も重要な要素であることを明らかにできた。

謝辞：本研究にあたって貴重な鉱石試料を提供いただいた京都大学総合博物館に深甚の謝意を表したい。

## 文献

- 原田幸明・島田正典・井島 清(2007) 2050年の金属使用量予測. 日本金属学会誌, vol. 71, no. 10, pp. 831-839.  
 下中 弘(1996) 新版地学辞典 付図付表・索引. 平凡社: pp. 46-47.  
 日本列島の地質編集委員会(1996) コンピューターグラフィックス 日本列島の地質, 丸善出版。