

# データ駆動型解析に基づいた日本の熱水鉱床鉱石の化学組成的特徴と地質年代ごとの鉱床形成要因の関係

江夏 道晴\*・小池 克明\*

## Data-driven analysis for relating geochemical ore features over Japan to formation factors of hydrothermal deposits in each geological age

Michiharu Enatsu\* and Katsuaki Koike\*

\* 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 Department of Urban Management, Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-225, Kyoto, Japan. E-mail: enatsu.michiharu.56v@st.kyoto-u.ac.jp (Enatsu)

キーワード：熱水鉱床，因子分析，k means++ clustering，地質年代，花崗岩系列

Key words：hydrothermal deposit, factor analysis, k means++ clustering, geological age, granite series

### 1. はじめに

プレートの沈み込み帯では多種多様な熱水鉱床が存在し、さらなる資源開発が期待できる。新規鉱床の開発において、資源有望地の絞り込みは探査の効率化の観点から重要であり、そのためには地質学的なプロセスにより、どの地域にどのような資源が分布するのか、に関する理解を深化させることが必要である。これまででも広域的な鉱床形成プロセスを考察している研究は存在するが、形成年代や関連火成岩を限定したモデルにすぎない (e.g., Mao et al., 2021)。そこで、本研究では日本全域を対象にして、形成年代や関連火成岩を限定せずに可能な限り集めた熱水鉱床の鉱石試料を分析し、そのデータを基に鉱山の特徴と地質学的要因の関係について考察する。

### 2. 分析対象試料

京都大学総合博物館及び秋田大学鉱業博物館に収蔵の鉱石試料を使用した。日本の 116 鉱山から収集された合計 326 個の鉱石試料を各種分析に用いる。対象鉱山は全て熱水鉱床で、浅熱水鉱脈鉱床、ゼノサーマル鉱床、キースラガー鉱床、スカルン鉱床、黒鉱床の 5 つのタイプに分けられる。第 1 図に分析に用いた試料が収集された鉱山と、それぞれの鉱床タイプを示す。分析の前処理として、鉱石の一部を岩石カッターで切断し、粉砕機で粉末化を行った。粉末試料は XRD による鉱物組成分析と、XRF, ICP-MS, ICP-AES による元素濃度分析に使用した。

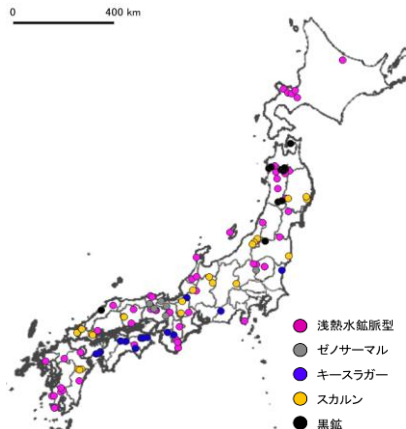
### 3. 解析手法

分析によって得られた化学組成データは多数の元素濃度から構成される多次元データセットであり、データの構造を直観的に把握することが困難である。また、分析により得られた元素濃度データには、元素同士の相関性が見出された。したがって鉱石の化学組成的特徴を抽出するためには、次元削減が有効な手段である。本研究では次元削減の代表的手法の一つである因子分析を用いた。因子分析は、

他の手法と比較して、重要な変数の負荷量を強調できること、合成変数同士の相関を認めることができるなどの特長があり、解釈が容易な解析方法である。データの前処理として、欠損値に各元素の検出限界を $\sqrt{2}$ で除した値の代入、各データを変数の幾何平均で割り対数変換を行った有心対数比変換、各変数のオートスケーリングを行った。因子分析を実行したのち、因子得点の鉱山ごとの平均値を計算し、求めた値を k means++ cluster により、各クラスターに分類した。クラスタリングを用いることで各鉱山における鉱石の化学組成的な特徴を一元的に捉えることが可能になる。

### 4. 解析結果

因子分析では相関行列の固有値が大きな第 1 因子から第 4 因子までを最尤法とバリマックス回転によって導出した。各因子の因子負荷量は、第 1 因子が Nb, Hf, Th, V, U,  $\Sigma$ REE, Y が大きく正で Pb, Ag, Zn, Cd が大きく負、第 2 因子が Li, Si, Cr, Ta, W, O, Co が大きく正で Zn, Cd が大きく負、第 3 因子は Cs, K, Rb が大きく正で S, Cu, Fe, Ni が大きく負であり、第 4 因子は Mg, Mn が大

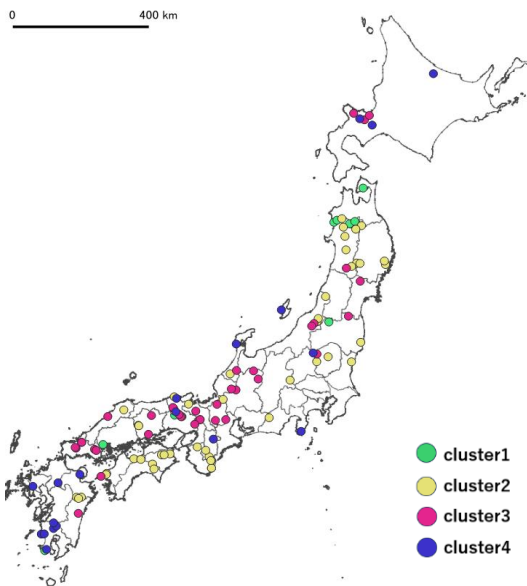


第 1 図 分析対象の鉱山分布と鉱床タイプ。

第1表 各クラスターの因子得点の中央値（上）と各クラスターと鉱床の形成年代（下）

	F1	F2	F3	F4
cluster1	-0.276	-0.785	-0.361	-1.757
cluster2	0.252	0.209	-0.673	-0.011
cluster3	-0.441	-0.712	0.271	0.755
cluster4	-0.032	1.302	1.387	-0.107

	ジュラ紀	白亜紀	古第三紀	中新世	漸新世以降
cluster1	0	2	1	9	1
cluster2	6	6	1	14	1
cluster3	0	13	3	4	4
cluster4	0	1	0	5	11



第2図 k means++ による因子得点のクラスタリング結果。

大きく正で Mo, As, Ba が大きく負であった。次に、各鉱山における第1因子から第4因子までの因子得点の平均値を用いてクラスタ分析を行った。各クラスターの因子得点の中央値、およびクラスターと鉱山の形成年代の対応を第1表、地図上に各鉱山のクラスターをプロットした結果を第2図に表す。cluster1 は第4因子の中央値が低く、cluster2 は第3因子の中央値が低い。cluster3 は第1因子と第2因子の中央値が低く、cluster4 は第2因子と第3因子で高い中央値が得られた。また、鉱山の形成年代と形成年代の間に一定の対応関係が見られたので、以下で各クラスターと鉱床形成に関連する地質学的要因について考察する。

## 5. 考察

表2で示した各クラスターの因子得点の中央値から、それぞれのクラスターの特徴は cluster1: 「黒鉄的な化学組成をもつ鉱石」、cluster2: 「Fe-Cu rich な鉱石」、cluster3: 「Pb-Zn rich な鉱石」、cluster4: 「silicate rich な鉱石」と解釈できる。

また、地質年代を1. ジュラ紀以前, 2. 白亜紀～古第三紀, 3. 新第三紀中新世, 4. 新第三紀漸新世～第四紀に大別し、地質年代と鉱石の化学的特徴について考察する。本研究においてジュラ紀以前に形成された鉱床はすべてキースラガー鉱床であり、cluster2に属している。キースラ

ガー鉱床は約 150Ma に古太平洋の中央海嶺熱水系で形成された鉱床である。その他の鉱床はジュラ紀以前の火山活動が活発でないことを鑑みて、少数の熱水鉱床しか生成されなかったと考えられる。

白亜紀～古第三紀では中央海嶺の沈み込みによる花崗岩の大規模貫入が発生した。花崗岩は酸化還元状態の違いから酸化的な磁鉄鉱系列と還元的なイルメナイト系列に大別される。磁鉄鉱系列花崗岩に関連した鉱床はすべて cluster2 に分類され、Fe-Cu rich な鉱石が形成されている。一方、イルメナイト系列花崗岩に関連した鉱床は主に cluster3 に属し、Pb-Zn rich な鉱石を産出する。また、イルメナイト系列花崗岩に関連した鉱床のうち cluster2 に属する鉱山も存在するが、これらの鉱山の鉱量は小規模である。

中新世の鉱床は主に東北日本と西南日本外帯に分布する。東北日本では 16～14Ma の間に黒鉄鉱床が生成され、黒鉄鉱床のほとんどが cluster1 に属する。黒鉄形成後には浅熱水鉱脈型鉱床が形成され、これらは cluster2 に属する。黒鉄形成後の浅熱水鉱脈型鉱床の一つである阿仁鉱山では、関連花崗岩が磁鉄鉱系列であることが分かっており (Ishihara and Chappell, 2010)、周辺の鉱床も磁鉄鉱系列花崗岩によって形成されたと考えられる。また、西南日本外帯ではイルメナイト系列花崗岩により鉱化された鉱床が存在し、大半が cluster2 に属するところが白亜紀～古第三紀鉱床の結果と異なる。特に、大分県の尾平鉱床区は中規模の Sn 鉱床であり、なぜ同鉱床区が cluster2 に分類されたのか議論の余地がある。

漸新世以降の鉱床は北海道や九州など、現在も火山活動が活発な地域に多く存在する。その多くが cluster4 に属しており、これらの鉱床は含金珪酸塩を鉱石とする浅熱水金鉱床である。浅熱水金鉱床は比較的浅所 (3 km 以深) に形成され、古い鉱床は保存されず、若い年代の鉱床のみが残りやすいため cluster4 の鉱床は漸新世以降に集中する。また、cluster3 に属する豊羽鉱床は磁鉄鉱系列とイルメナイト系列両方の鉱化作用を受けて多金属鉱床を形成しており、その周辺にも cluster3 に属する鉱床が存在する。

## 6. まとめ

本研究では、日本の熱水鉱床における鉱石の化学組成的特徴と広域的な鉱床形成環境の関係を明らかにすることを目的とし、116 鉱山における合計 326 個の鉱石試料の化学組成データの因子分析とクラスタ分析を行った。クラスタ分析の結果から日本の鉱山における鉱石の化学的特徴は「黒鉄的な微量元素濃度を持つ鉱床」、「Fe-Cu rich な鉱床」、「Pb-Zn rich な鉱床」、「Silicate rich な鉱床」の4種類に大別されることが分かった。これらの違いは各鉱山が形成された年代ごとに地質的な要因が異なることに起因している。

謝辞：本研究のために貴重な鉱石試料を提供いただいた京都大学総合博物館と秋田大学鉱業博物館に深甚の謝意を表したい。

## 文献

- Ishihara, S., and Chappell, B. W. (2010) Petrochemistry of I-type magnetite-series granitoids of the northern Chile, Highland Valley, southern B. C., Canada, Erdenet mine, Mongolia, Dexing mine, China, Medet mine, Bulgaria, and Ani mine, Japan, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 61, pp. 383-415.
- Mao, J., Liu, P., Goldfarb, R. J., et al. (2021) Cretaceous large-scale metal accumulation triggered by post-subduction large-scale extension, East Asia. *Ore Geology Reviews*, vol. 136, 104270.