

# 鉱石試料分析データの多変量解析による日本の熱水鉱床の化学組成的特徴とその生成要因の解釈

江夏 道晴\*・柏谷 公希\*・小池 克明\*

## Chemical composition features of hydrothermal deposits in Japan through multivariate analysis of ore sample data and interpretation of their generation factors

Michiharu Enatsu\*, Koki Kashiwaya\* 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 615-8540, Japan.  
E-mail: enatsu.michiharu.56v@st.kyoto-u.ac.jp (Enatsu)

キーワード：熱水鉱床，主成分分析，独立成分分析，対数比変換，元素移動

Key words: Hydrothermal deposit, Principal component analysis, Independent component analysis, Logratio transformation, Element migration

### 1. はじめに

近年，世界的な経済発展や技術革新に伴う需要の急増により，金属資源の供給リスクが顕在化しており，新たな鉱床の探査・開発が重要である．新規鉱床の探査・開発には生成プロセスとその要因についての理解が必要不可欠で，そのために，種々の分析データをもとにした数理統計解析や機械学習を駆使したデータの特徴抽出法が注目されている．なかでも多変量解析による次元圧縮は多次元のデータにおいて，直観的に理解が難しい隠れた構造を見出すための有効な手段で，鉱床学の分野においてもこの手法が適用されている．例えば Makvandi et al.(2016)はカナダの Izok Lake 鉱山と Halfmile Lake 鉱山の磁鉄鉱を対象に化学組成データの主成分分析を行った結果，対象地域にマグマ由来の磁鉄鉱と熱水由来の磁鉄鉱が共存することを見出した．しかしこのような多変量解析を用いた研究例は，多くても数カ所程度の鉱山を対象としており，対象が広範囲にわたった例は見当たらない．

そこで本研究では，日本に存在する金属鉱床の鉱石試料を可能な限り収集し，化学組成データの主成分分析と独立成分分析を行い，化学組成的特徴を抽出した．さらに，鉱物組成データ，薄片試料観察，流体包有物分析の結果を組み合わせ，鉱床生成のプロセスの解明を目指している．

### 2. 分析対象試料

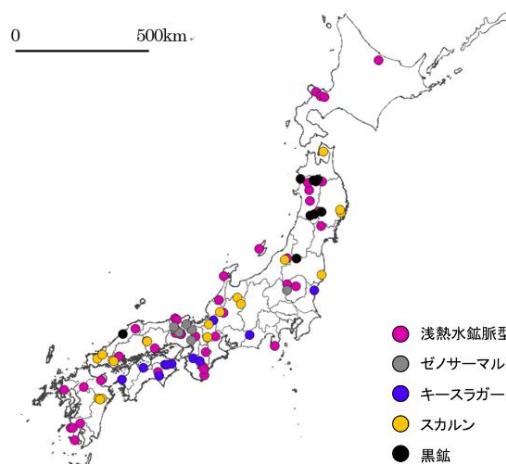
本研究では，京都大学総合博物館に収蔵されている鉱石から日本の 94 鉱山について，鉱山ごとに 1~5 個の鉱石を選び，合計 286 個の試料について分析を行う．分析した鉱山の鉱床タイプは浅熱水鉱脈型鉱床，ゼノサーマル型鉱床，キースラガー，スカルン鉱床，黒鉱型鉱床といずれも熱水鉱床である．第 1 図に対象とした鉱山の分布を示す．

はじめに，鉱石の一部をカッターで切断し，粉砕機を用いて切り出し部分を粉末化する．作成した粉末試料について鉱物組成分析を XRD (X 線回折分析装置)，化学組成分析を XRF (蛍光 X 線分析装置) と ICP-MS (誘導結合プラズマ

質量分析) を用いて行った．また，無色鉱物が豊富に含まれる 15 試料に関して，流体包有物の均質化温度を測定し，鉱物形成時の熱水温度推定を行った．さらに，薄片試料を作成し，EDX 搭載の走査型電子顕微鏡を用いた元素濃度マッピングによる鉱物同定を行い，分析に使用した試料における鉱物の分布形態を把握した．

### 3. 多変量解析による次元圧縮

主成分分析と独立成分分析は，ともに高次元のデータ空間から隠れた構造を見出すための多変量解析手法である．主成分分析は第一主成分の分散が最大化するように設定し，続く主成分はそれまでに得られた主成分と直交する制約条件のもと，分散が最大となる変数を決定する手法である．一方で独立成分分析は統計的に独立で，非ガウス性を持つ特徴を抽出する手法である．本研究では熱水活動に関連する 19 元素の元素濃度データに対し，主成分分析と独立成分分析を行った．その際，化学組成データのもつ定数制約を解消するために相対対数比変換を行った．規格化変数



第 1 図 分析対象の鉱山分布と鉱床タイプ

として熱水変質の際に移動性が低く、元素移動の基準となる Al の元素濃度データを用いた。

## 4. 結果と考察

### 4.1 主成分分析

主成分分析では第 1 から第 4 主成分までに解釈し得る地化学的な特徴が現れた。結果の例として第 1 主成分負荷量を第 2 図に示す。また、第 4 主成分までの累積寄与率は約 66%であった。以下に第 4 主成分までの解釈をまとめる。

第 1 主成分は酸性熱水によって溶脱される K, Mg(Werner, 1984)の主成分負荷量が負であるのに対し、その他の元素の多くが大きく正であるため、「酸性熱水による元素の溶出」と「元素の付加の程度」の 2 つの情報を持つと解釈した。

第 2 主成分は Si, Co, W の負荷因子量が大きく正である。Co について、国内のコバルト鉱は石英や灰鉄輝石と共生することが知られていること、W は鉱物組成分析の結果より鉄重石  $\text{Fe}(\text{WO}_4)$  や灰重石  $\text{Ca}(\text{WO}_4)$  として検出され、明延・生野鉱山等の国内の鉱山では石英脈中に鉄重石や灰重石等のタングステン鉱物が存在していること (Ishihara and Chappell, 2012), さらに石英脈を豊富に含む熱水鉱脈型鉱床の主成分得点が高いことから第 2 主成分を、「石英形成に伴う元素移動に関する指標」とであると解釈した。

第 3 主成分は O, Mg, Si, Mn, Ca の負荷因子量が大きく正である。スカルン鉱床は炭酸塩岩と貫入花崗岩類の接触交代反応によって生成される。その際、母岩となるのは石灰石  $\text{CaCO}_3$  および苦灰岩  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  が一般的である (Uchida and Nakano, 2018)。また、Mn は Ca と交代反応を示し、ペブス石等の Mn を含むスカルン鉱物を形成することから、PC3 は「スカルン鉱物の生成の有無を表す指標」と考えられる。スカルン鉱床の主成分得点が高いこともこの解釈と整合する。

第 4 主成分は Fe, Co, Cu, Ni の負荷因子量が大きく負である。XRD の鉱物組成結果では黄鉄鉱や黄銅鉱が多くの試料で検出されたこと、イオン半径が近いことから Ni は黄銅鉱  $\text{CuFeS}_2$  の銅、Co は黄鉄鉱  $\text{FeS}_2$  や黄銅鉱の Fe に置換されること (Ito, 1976), さらに薄片試料において黄銅鉱と黄鉄鉱が隣接して存在している例が多く観察されたことから、第 4 主成分は「黄鉄鉱・黄銅鉱形成に伴う元素移動」を表す指標と解釈した。

### 4.2 独立成分分析

主成分分析では抽出できなかった情報の検出を目的に、自然勾配法 (Amari et al., 1998) による独立成分分析を行った。地化学的な特徴が見られた第 1 独立成分と第 6 独立成分の負荷量を第 3 図に示す。第 1 独立成分では多くの元素における負荷量が正であり、第 6 主成分は K, Mg の負荷量が負であった。これらの特徴から主成分分析では第一主成分として得られた 2 つの情報「酸性熱水による元素の溶出」と「元素の付加の程度」が、独立成分分析により分離でき、K と Mg の溶脱の大きさがより明瞭になったと考えられる。

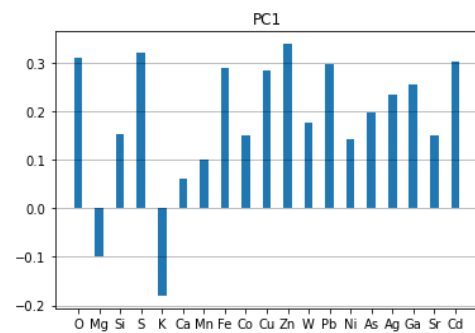
## 5. まとめ

本研究では、日本の熱水鉱床における化学組成的特徴の抽出を目的とし、94 鉱山からの 286 個の鉱石試料の分析データの多変量解析を行い、鉱物組成データや薄片観察等を組み合わせて、特徴形成の要因を考察した。主成分分析と独立成分分析の結果から、熱水鉱床の化学組成の主な生成要因は「酸性熱水による元素の溶出」、「元素の付加の程度」、「石英形成に伴う元素移動」、「スカルン鉱物の生成の有無」、および「黄鉄鉱・黄銅鉱形成に伴う元素移動」であることを明らかにできた。

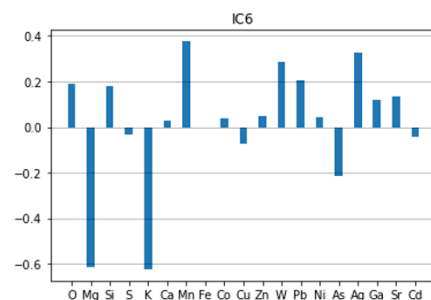
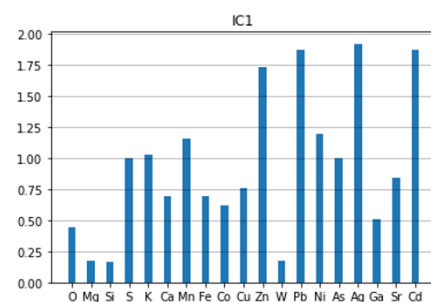
謝辞：本研究のために貴重な鉱石試料を提供いただいた京都大学総合博物館に深甚の謝意を表したい。

## 文献

- Amari, S. (1998) Natural gradient works efficiently in learning. *Neural Computation*, vol. 10, no. 2, pp. 251-276.
- Ishihara, S., Chappell, B. W. (2012) Petrochemistry of the Late Cretaceous-Paleogene igneous rocks in the Ikuno-Akenobe mine area, Southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 63, pp.181-202.
- Ito, S. (1976) Geochemical study of bedded cupriferous pyrite deposits in Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 27, pp. 245-377.
- Makvandi, S., Ghasemzadeh-Barvarz, M., Beaudoin, G., Grunsky, E., McClenaghan, M. B., Duchesne, C. (2016) Principal component analysis of magnetite composition from volcanogenic massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews*, vol. 72, pp. 60-85.
- Ishihara, S., Chappell, B. W. (2012) Petrochemistry of the Late Cretaceous-Paleogene igneous rocks in the Ikuno-Akenobe mine area, Southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 63, pp.181-202.
- Uchida, E., Nakano, T. (2018) Approach to skarn deposits. *Chikyukagaku (Geochemistry)*, vol. 52, pp. 149-169.
- Werner, F. G. (1984) Mass transfer in hydrothermal alteration systems—A conceptual approach. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 48, pp.2693-2711.



第 2 図 各元素の第 1 主成分負荷量



第 3 図 各元素の第 1 と第 6 独立成分(IC1 と IC6)負荷量