

日本の熱水鉱床形成に関連する花崗岩類の化学組成的特徴の抽出

谷口 卓也*・江夏 道晴*・小池 克明*

Extraction of Chemical Compositional Features of Granitoids Related to Formation of Hydrothermal Deposits in Japan

Takuya Taniguchi*, 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, Kyoto 615-8540, Japan.
E-mail: taniguchi.takuya.22i@st.kyoto-u.ac.jp (Taniguchi)

キーワード：鉱化花崗岩類, 不適合元素, 熱水鉱床, 機械学習, ランダムフォレスト

Key words: Mineralized granitoids, incompatible element, Hydrothermal deposit,
Machine learning, Random Forest

1. はじめに

世界的な金属資源需要の増加(Watari et al., 2021)に伴い、新たな金属鉱床の探査・開発は資源工学における喫緊の課題となっている。日本の金属鉱床の多くは熱水鉱床であり、その形成メカニズムの解明は資源開発戦略において極めて重要である。熱水鉱床は多くの場合花崗岩を伴って形成されるが、日本全土に広く分布する花崗岩の中には鉱床を伴わないものも多数存在する。この差異を支配する要因を特定することは、熱水鉱床の生成プロセスの解明、および効率的な鉱床探査において不可欠である。

そこで本研究では、岩石データベースを利用して日本国内に広く分布する花崗岩類の化学組成を詳細に分析し、鉱床形成への関連の有無によって花崗岩類の化学的特徴がどのように異なるのかを明らかにすることを目的におく。これまで、特定の地域や鉱床付近の花崗岩類の化学組成に関する研究報告は多いものの(例えば石原, 2002 など)、日本全土を対象とした花崗岩類の化学組成に関する網羅的な議論は少なく、鉱床形成との関連性についての知見は限られている。この問題に対し、本研究は機械学習を用いて熱水鉱化作用をもたらした花崗岩類の元素や化学成分を特定するとともに、岩石試料の分析によりそれを検証することを目指している。

2. 研究手法

2.1 花崗岩類データの解析

本研究は岩石化学組成データベースである DODAI database と GEOROC に注目し、これから花崗岩類のデータを抽出し、日本の熱水鉱脈およびスカルン鉱床の位置情報と GIS で統合した。これらの熱水鉱床からの距離に応じて花崗岩類を分類し、10 km 以内を鉱化、その範囲外を不毛の花崗岩類と定義した。日本全土の鉱化／不毛花崗岩類の分布を第 1 図に示す。鉱化／不毛花崗岩類の化学組成の相違を明らかにするために、化学組成データに教師あり機械

学習の一つである Random Forest (RF) を適用した。また、火成岩類の化学組成を議論するのに有効なハーカー図を用いた。この図は横軸に SiO_2 濃度(wt%)と縦軸に元素濃度(wt%)をとり、これらの濃度関係を表す。

2.2 分析対象試料

本研究では、鉱化花崗岩類の試料として 9 種(釜石, 船津, 広瀬, 行者山, 沢入, 笠木, 苗木, 仁堀, 万成), および不毛花崗岩の試料として 8 種(稲田, 土岐, 武節, 金勝山, 大文字山, 人形峠, 広島, 竜門ダム)の計 17 種の花崗岩類試料を収集した。すべての試料の主要元素を XRF で分析し、一部の試料に対しては ICP-AES と ICP-MS で微量元素を分析した。得られた化学組成データをハーカー図で特徴付けた。

3. 結果と考察

3.1 RF の結果

まず、主要元素の酸化物(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5)と不適合元素(Cs, Rb, Ba, Th, U, Nb, Ta, La, Ce, Sr, Hf, Zr, Y)に注目し、鉱化と不毛花崗岩類の分類に寄与した割合である重要度を第 2・3 図で比較する。第 2・3 図からわかるように、RF の結果では主要元素の酸化物の特徴量はほぼ同じであったが、不適合元素である Ta, Hf, Cs が鉱化／不毛花崗岩での差が大きいことがわかった。Ta, Hf, Cs はいずれも周期表で第 6 周期の原子量が大きい元素であり、Cs はイオン半径が大きく、Ta と Hf はイオンの酸化数が大きいという特徴がある。そのため鉱物中に取り込まれにくいという性質があるため、これらは鉱化／不毛花崗岩類の指示元素となり得ることを明らかにできた。また、Nb も同様に特徴量が少し大きい、これは Nb が同族である Ta と花崗岩中の挙動が類似しているためと解釈できる。

3.2 ハーカー図での特徴

次にハーカー図を第 4・5 図に示すが、本研究では最も特徴が現れた Fe_2O_3 と TiO_2 を SiO_2 との関連付けに選んだ。

鉬化／不毛花崗岩類それぞれにおける濃度関係を表す回帰直線を最小二乗法で求め、それぞれの図に描いている。第4・5図より鉬化／不毛花崗岩類のいずれも SiO_2 の増加とともに線形的に Fe_2O_3 と TiO_2 が減少するが、同じ SiO_2 濃度に対して鉬化花崗岩類の方が Fe_2O_3 を 0.3wt%, TiO_2 を 0.1wt%程度多く含むという傾向を明らかにできた。この傾向は 17 個の岩石試料の分析結果からも得られた。鉬化花崗岩類で Fe_2O_3 , TiO_2 濃度が不毛花崗岩類より高いことから、花崗岩質マグマ活動期において Fe_2O_3 と TiO_2 が主要金属元素に代わって花崗岩類に濃集され、金属元素が熱水により多く分配されることで鉬床を形成したと考えられる。これにより、花崗岩類中に Fe^{3+} , Ti^{4+} の存在量が少ない、あるいは鉬種となる金属元素と置換し難い状態であることが鉬床を形成しない要因の一つである可能性が示唆された。

4. まとめ

RF の結果から鉬化関連の花崗岩類においては、原子量が大きく、イオン半径が大きい、またはイオンの酸化数が大きい元素が濃集しやすいという特徴が見出された。また、鉬化過程を経た花崗岩類では、 Fe_2O_3 と TiO_2 相対的に多いという傾向にあり、熱水鉬床形成において Fe_2O_3 と TiO_2 は共に濃集しやすいという可能性が示唆された。さらに、岩石試料の解析結果は、サンプル数が少ないにもかかわらず、データ解析結果と同様のトレンドを示していたため、データ解析から抽出できた特徴の妥当性を確認できた。

本研究の成果は、鉬化／不毛花崗岩類の特徴の差を明らかにすることで、鉬床未発見域において鉬床形成に関連する花崗岩類であるか否かを判定する指標となり、鉬床形成の要因の特定において重要な役割をもつ可能性がある。熱水鉬床を伴う花崗岩類の化学組成的特徴を十分に把握することによって新たな熱水鉬床の探査に繋がると考えられる。

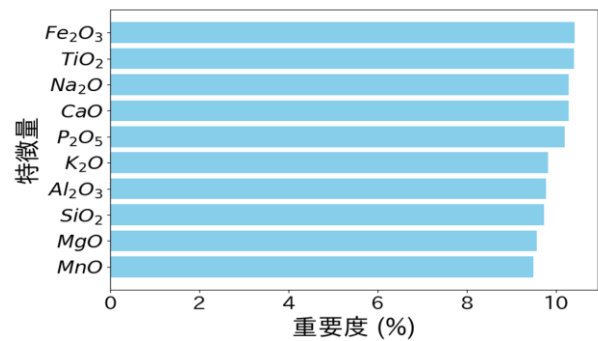
文 献

石原舜三 (2002) 鉬化花崗岩特性(I): 西南日本内帯のモリブデンとタングステン鉬床生成区。地質調査所研究報告, vol.53, no.9-10, pp.657-672.

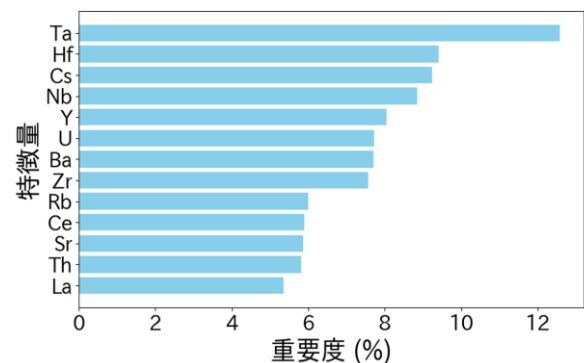
Watari, T., Nansai, K. and Nakajima, K. (2021) Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, vol.164, 105107.



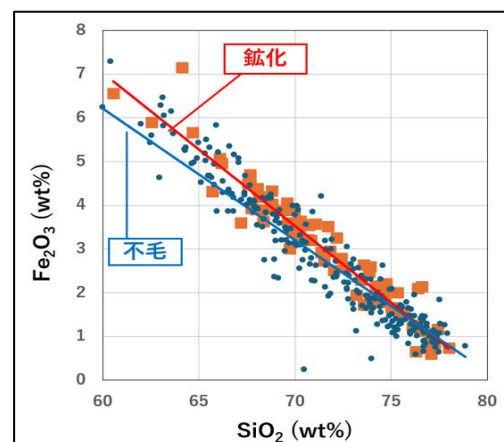
第 1 図 鉬化／不毛花崗岩類での化学組成データの位置



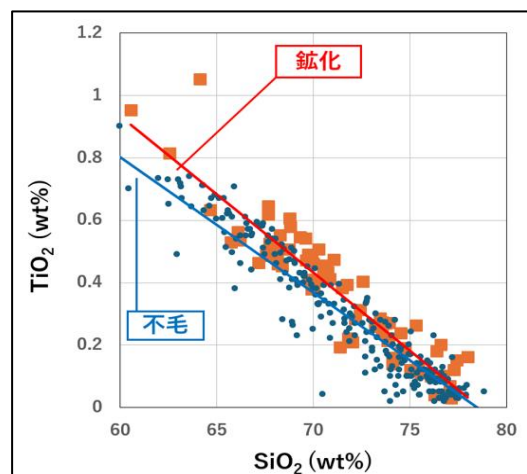
第 2 図 RF による主要元素の酸化物の重要度



第 3 図 RF による不適合元素の重要度



第 4 図 ハーカー図による鉬化／不毛花崗岩類での Fe_2O_3 濃度の比較



第 5 図 ハーカー図による鉬化／不毛花崗岩類での TiO_2 濃度の比較