

# 反応性化学輸送シミュレーションによる熱水鉱床の形成プロセスの推定

須山 傑\*・江夏 道晴\*・富田 昇平\*\*・小池 克明\*

## Estimation of Formation Process of Hydrothermal Deposits through Reactive Chemical Transport Simulation

Suguru Suyama\*, Michiharu Enatsu\*, Shohei Tomita\*\* 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 C1-2-214, Kyoto 615-8540, Japan.

E-mail: suyama.suguru.37e@st.kyoto-u.ac.jp

\*\*金沢大学理工学研究域地球社会基盤学系 School of Geoscience and Civil Engineering, College of Science and Engineering, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan.

キーワード：熱水鉱床, 熱水変質, 熱・水理・化学連成解析

**Key words:** Hydrothermal deposit, Hydrothermal alteration, Thermal-Hydrological-Chemical coupled analysis

### 1. はじめに

日本の陸域には多くの熱水鉱床が存在しており、排他的経済水域 (EEZ) 内にも海底熱水鉱床有望地の分布が報告されている。混沌とする世界情勢や高まる金属資源の需要を踏まえれば、熱水鉱床の成因や形成プロセスへの理解の深化は、今後の鉱床開発事業ひいては日本の資源政策に多大に貢献し得る。

これまで熱水鉱床の形成プロセスに関して様々な議論がなされている。このプロセスを解明するためには、熱水流体の物理的挙動と水-岩石反応による化学的反応が相互に影響し合う複雑な系を研究の対象にする必要がある。そこで、このような系の地質学的時間スケールにおける地殻内部の変化を把握するために、本研究では数値シミュレーションの手法を用い、鉱床形成に重要な影響を及ぼす因子の特定を試みた。

### 2. 手法

本研究では、熱・水理・化学連成解析コードの一つである TOUGHREACT-v4.13 を用い、熱水の流動および岩石との化学反応を計算する。複数の条件設定のモデルを用意するために、計算領域に単純な一次元垂直モデルを作成し、パラメーターとして熱水の化学組成・浸透率・モデルサイズの3つに限定した。TOUGHREACT では境界条件として、深部熱水の化学組成を設定する必要があるが、一般に地下深部での熱水の化学組成を観測することは不可能である。そこでまず、熱水の混合のない独立した熱水循環系を仮定し、モデル上部から海水が涵養されて深部熱水に変質する過程(涵養域)、および深部熱水が上昇して母岩と反応する過程(反応域)を再現した。同様に天水起

源のモデルを作成し、熱水の起源が異なる場合の熱水の化学組成や鉱物の析出量を比較した。

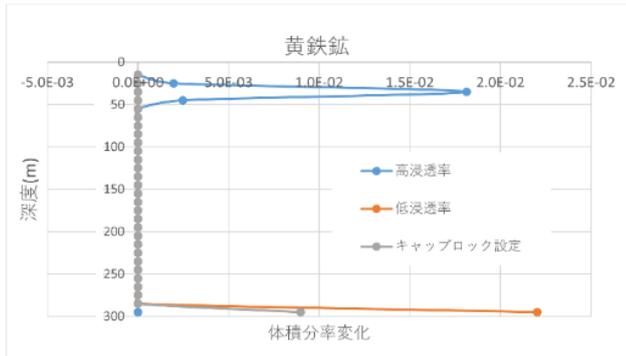
次に、反応域における母岩の浸透率の影響を検討した。浸透率が高い場合、低い場合、モデル上部の浸透率のみが低い場合の3通りを用意し、鉱物の析出状態を求めた。さらに、陸域鉱床を模するため、深度範囲 3000 m の大規模サイズと初期条件を設定した一次元垂直モデルを作成し、海底熱水鉱床モデルと熱水変質鉱物の析出量の相違を明らかにした。

### 3. 結果と考察

天水由来の熱水と海水起源の熱水にはイオン強度に差があり、本モデルにおいては海水起源の熱水の方が鉱床形成に有効に作用すると考えられた。第1図は、浸透率の大きさによって硫化鉱物の析出が異なることを示す。高浸透率モデルでは、沸騰が生じた領域において、母岩に占める硫化鉱物の体積分率変化が  $2.26 \times 10^{-2}$  であったのに対し、低浸透率モデルにおいては  $1.17 \times 10^{-7}$  と格段に小さかった。これは浸透率が低いことで流体圧が増加し、沸騰し難い環境になるためである。一方、モデル上部の浸透率のみが低い場合も  $7.10 \times 10^{-8}$  と小さいままであった。これは本モデルが一次元モデルであり、上昇した熱水の流体圧が上昇したことで黄鉄鉱の析出が小さかったためと考えられる。

以上より、沸騰が生じる条件下で黄鉄鉱が多く生成されることがわかった。また高浸透率層の存在が重要であり、海底熱水鉱床の噴出孔付近ではキャップロックが形成されることで、鉱物の沈殿が促進されると考えられる。このような海底熱水系における

高浸透率層の存在は、ボーリングコアデータを用いた先行研究においても見出されている(de Sá et al., 2021).



第 1 図 黄鉄鉱の体積分率変化

陸域鉱床を模したモデルにおいては、温度変化に従って析出する鉱物に違いがみられた。第 2 図から第 5 図は高温なモデル下部からカリ長石-イライト-白雲母-カオリナイトの順に体積分率変化にピークが表れていることを示す。このような累帯配列の形成は鹿児島県菱刈金鉱山の浅熱水鉱脈型鉱床においても確認されている(Shikazono et al., 2002)。また、アルカリおよびアルカリ土類交代反応による雲母鉱物やケイ酸塩鉱物の変質もシミュレーションで得られた。これは、沸騰が生じたモデルにおいて顕著に現れたことから、沸騰により熱水変質が促進されることが示唆される。

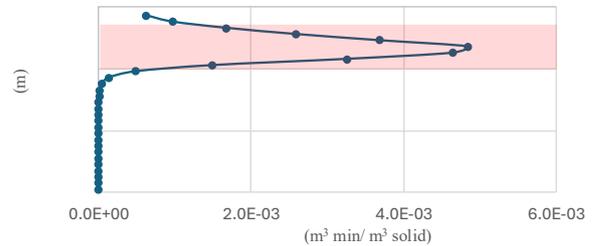
4. まとめと今後の課題

本研究では数値シミュレーションにより熱水上昇に伴う岩石の熱水変質を再現することができた。また、沸騰が生じることで硫化鉱物の沈殿が促進されること、アルカリおよびアルカリ土類交代反応が顕著にみられることがわかった。しかしながら、海底熱水系で観察されているようなキャップロックを設定したモデルでは硫化鉱物が析出しなかった。この要因として、モデル内の流体圧が高まり、沸騰が生じなかったことが考えられる。この問題を解決するためには、モデルを 2 次元あるいは 3 次元に拡張し、熱水の側方流動を再現することが必要である。本研究で得られたいくつかの単純なモデル設定を組み合わせ、スカルン鉱床、斑岩銅鉱床、海底熱水鉱床など、種々の熱水鉱床タイプの形成プロセスの全体像を明らかにすることが最終目標である。

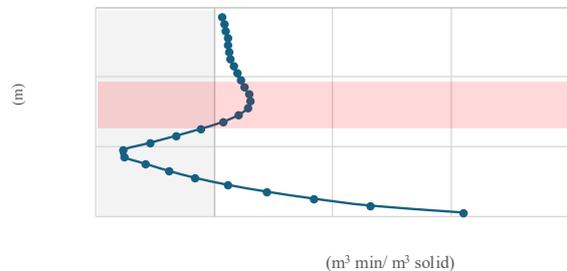
文 献

de Sá, V. R., Koike, K., Goto, T. N., Nozaki, T., Takaya, Y., and Yamasaki, T. (2021) A combination of geostatistical methods and principal components analysis for detection of mineralized zones in seafloor hydrothermal systems. *Natural Resources Research*, vol. 30, no. 4, pp. 2875-87, <https://doi.org/10.1007/s11053-020-09705-4>.  
 Shikazono, N., Yonekawa, N., and Karakizawa, T. (2002) Mass transfer, oxygen isotopic variation and gold

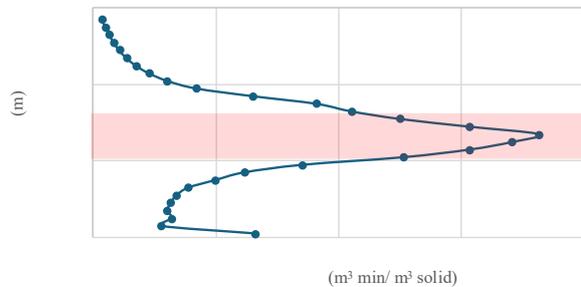
precipitation in epithermal system: a case study of the Hishikari deposit, southern Kyushu, Japan. *Resource Geology*, vol. 52, no. 3, pp. 211-22, <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2002.tb00131.x>.



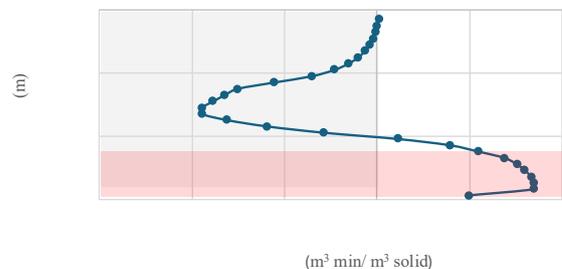
第 2 図 カオリナイトの体積分率変化



第 3 図 白雲母の体積分率変化



第 4 図 イライトの体積分率変化



第 5 図 カリ長石の体積分率変化