

## 反応輸送シミュレーションによる海底熱水鉱床の生成モデリング

富田昇平\*・小池克明\*\*・後藤忠徳\*\*\*・鈴木勝彦\*\*\*\*・笠谷貴史\*\*\*\*

### Generation modeling of seafloor hydrothermal deposit through reactive transport simulation

Shohei Albert Tomita\*, Katsuaki Koike\*\*, Tada-nori Goto\*\*\*, Katsuhiko Suzuki\*\*\*\* and Takafumi Kasaya\*\*\*\*

\*大林組技術研究所地盤技術研究部 Geotechnical Engineering Department, Technology Research Institute, Obayashi Corporation, 4-640 Shimokiyoto, Kiyose, Tokyo, 204-8558, Japan.

E-mail: tomita.shohei@obayashi.co.jp

\*\*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.

\*\*\*兵庫県立大学大学院生命理学研究科 Graduate school of Life science, University of Hyogo, 3-2-1, Koto, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo 678-1297, Japan.

\*\*\*\*海洋研究開発機構 Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 2-15, Natsushima-cho, Yokosuka-city, Kanagawa, 237-0061, Japan.

キーワード: TOUGHREACT, 水-岩石反応, 化学反応, 熱水循環, 鉱物沈殿

Key words: TOUGHREACT, Water-rock interaction, Chemical reaction, Hydrothermal fluid circulation, Mineral precipitation

#### 1. はじめに

海底熱水鉱床は、その多量の埋蔵量と高い金属品位から、近未来の重要な採掘ターゲットとみなされている。日本周辺海域では、沖縄トラフ海域や伊豆・小笠原海域において海底熱水鉱床の徴候が数多く確認されており、純国産資源として期待されている。海底熱水鉱床の開発を実現するためには、科学的な成因論に基づいて調査候補地を絞り込む方法を確立することが重要となっている。

近年、海底熱水域である沖縄トラフ伊是名海穴 Hakurei サイトを対象とした海底掘削により、塊状硫化鉱物の鉱体を胚胎する海底下の地質構造が明らかとなった (Nozaki et al., 2021)。また、熱水循環を考慮した熱水流動シミュレーションにより、鉱床の形成を引き起こす具体的な物理条件（熱水の温度・圧力・相状態、流体流動）が明らかにされた (Tomita et al., 2020)。しかしながら、海底熱水鉱床の形成プロセスは、熱の流れ、流体の流れ、および化学反応が組み合わせられた複雑なプロセスであるが、これら3つの側面を統合し、包括的に検討した例はこれまでになかった。そこで本研究では、上記3つの観点から海底熱水鉱床の形成プロセスを明らかにすることを目的に、伊是名海穴 Hakurei サイトをケーススタディとして、熱・水・化学 (THC) 連成解析手法である反応輸送シミュレーションを適用した。

#### 2. 研究方法

反応輸送シミュレーションでは、熱と気液二相流の三次元流れおよび溶質の輸送と化学反応（鉱物の溶解・沈殿反応など）を考慮した解析が可能な TOUGHREACT V4.13-

OMP (Sonnenthal et al., 2021) を用いた。対象領域として、温度検層や熱流束測定、海底掘削、噴出熱水の化学組成分析などが行われている中部沖縄トラフに位置する伊是名海穴 Hakurei サイトを選んだ。

反応輸送シミュレーションでは、はじめに現地観測では明らかにできない深部熱水の化学組成を推定するため、海水が海底下を流下して熱水となるまでの過程をモデル化し、シミュレーションを行った。次に、推定した深部熱水を用いて、熱水が深部から上昇し海底面から噴出することで鉱床が形成される過程をモデル化し、シミュレーションを行った。以下では、これら2つのシミュレーションの概要について述べる。

##### 2.1 深部熱水の化学組成の推定

深部熱水の化学組成を推定するため、高さ 5 km、幅 10 m、奥行き 10 m の 1 次元数値モデルを作成した。グリッド分割数は 50 であり、各セルの厚さは 100 m とした。岩石の物性値は、伊是名海穴の掘削データ (Kumagai et al., 2017) を参考に、間隙率 20%、浸透率  $1.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ 、密度  $2750 \text{ kg/m}^3$ 、熱伝導率  $1.3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、熱容量  $1000 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  とした。

海水が上端（海底面）から流下し、下端において  $350^\circ\text{C}$  まで加熱される過程を再現するため、初期条件として上端の流体圧を 30 MPa、下端の流体圧を 25 MPa としてその間は均等に勾配を付けて流体圧を与え、初期温度は下端を除く全域で  $4^\circ\text{C}$  とし、下端は  $350^\circ\text{C}$  とおいた。境界条件として、上端から  $4^\circ\text{C}$  の海水を  $3.0 \times 10^{-5} \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$  の割合で与え、下端は温度圧力一定境界とし、下端で  $350^\circ\text{C}$  まで加熱されるように、全てのセルにおいて  $1 \text{ W/m}^2$  の熱流束を与えた。

また、化学条件として、初期間隙水および上端に注入する流体は海水の化学組成を与えた。初期母岩は、Hakurei サ

トで採取された軽石の全岩化学組成（山崎ほか, 2018）を参考に流紋岩の化学組成を与え、曹長石 40.4%、石英 34.56%、カリ長石 11.6%、灰長石 7.45%、鉄雲母 4.61%、その他白雲母、金雲母、角閃石、輝石がそれぞれ 1%未満と設定した。また、二次鉱物として硬石膏、カオリナイト、緑簾石、クリノクロア、滑石、モンモリロナイト、イライト、ダフナイト、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱を考慮した。以上の条件のもと、5000年間の反応輸送シミュレーションを行った。

## 2.2 海底熱水鉱床の形成モデリング

熱水の上昇に伴う減圧、それに起因した沸騰を再現するため、高さ 300 m、幅 10 m、奥行き 10 m の 1 次元垂直数値モデルを作成した。グリッド分割数は 30 であり、それぞれのグリッド幅は 10 m とした。初期圧力は上端を除いて 19 MPa とし、上端は 16 MPa（Hakurei サイト海底面の水深約 1600 m に相当）とし、初期温度は全域で 345°C と設定した。境界条件として、底部から約 352°C の熱水を 1.0 g/s・m<sup>2</sup> の割合で与え、上端は温度圧力一定境界とした。

化学条件として、初期間隙水および下端から注入する熱水の化学組成は 2・1 節のシミュレーションで得られた化学組成を与えた。それ以外の条件は、2・1 節のモデルの条件と同じである。以上の条件下で、1000 年間の解析を行った。

## 3. 結果および考察

### 3.1 深部熱水の化学組成の推定

シミュレーションの結果、水-岩石反応に伴って流体の化学組成が以下のように変化することが明らかとなった（第 1 図）。概ね 100°C 以下の低温領域では、Mg を含有するフィロケイ酸塩鉱物の多くが沈殿し、流体中の Mg 濃度が低下するとともに pH が低下した。85–200°C の領域では、温度上昇に起因して硬石膏が沈殿し、Ca と SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が岩石に固定された。100°C 以上の温度領域になると、緑簾石が沈殿をはじめ、HS<sup>-</sup> が流体中に添加された。高温になるにつれて流体の pH が低下したことにより、Fe、K、Zn を含有する鉱物が徐々に溶解し、流体中のそれらの濃度が上昇した。

### 3.2 海底熱水鉱床の形成モデリング

シミュレーションの結果、熱水の上昇に伴って圧力が低下し、海底面付近で沸騰が生じること、および沸騰に伴って二酸化炭素の脱ガスが生じ、それに付随して pH が上昇することが示された。また、pH の上昇に起因して、沸騰領域で硫化鉱物が急激に沈殿することがわかった（第 2 図、第 3 図）。これらの硫化鉱物の沈殿量は、海底掘削で確認された沈殿量と整合的であった。また、伊平屋北海丘を対象とした熱水流動シミュレーションでは、キャップロックの形成に伴って海底下での沸騰が誘発され、キャップロック下部に鉱床が形成されることが示唆されている（Tomita et al., 2020）。以上の結果・考察から、熱水の沸騰は高品位鉱化帯形成に最も重要なプロセスであると考えられる。

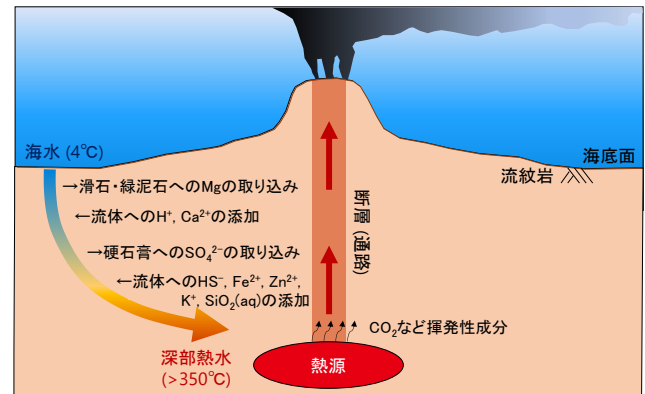
## 4. まとめ

伊是名海穴 Hakurei サイトを対象として、海水が流下して熱水となる過程を再現し、深部熱水の化学組成を推定するとともに、深部熱水が上昇して海底面付近で鉱床を形成する過程をシミュレーションした。その結果、熱水の上昇に伴って圧力が低下し、海底面付近において沸騰が生じ、その沸騰に起因して二酸化炭素の脱ガスおよび pH の上昇が誘発され、沸騰領域において硫化鉱物が著しく沈殿することがわかった。今後の課題としては、反応-輸送シミュレーションを 2 次元に

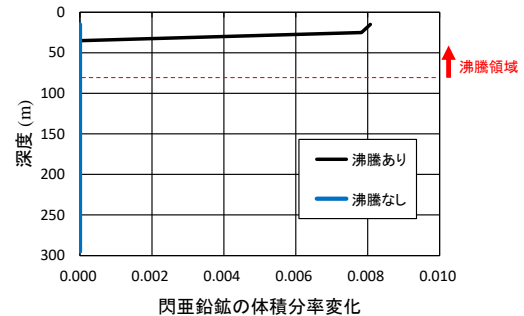
拡張し、観測データと比較することにより、鉱化帯形成プロセスについてより詳細な検討を行うことがあげられる。

## 文献

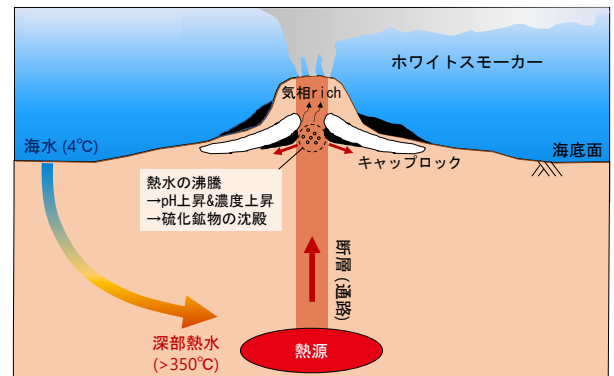
- Kumagai, H. et al. (2017). Cruise Report SIP-HOT II "Explorer" CK16-05 (Exp. 908), JAMSTEC.
- Nozaki, T. et al. (2021). Subseafloor sulphide deposit formed by pumice replacement mineralisation. *Sci. Rep.*, 11(1), 8809.
- Sonnenthal, E. et al. (2021). TOUGHREACT V4.13-OMP and TReactMech V1.0 Geochemical and Reactive-Transport User Guide. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Tomita, S. A. et al. (2020). Numerical Simulation-Based Clarification of a Fluid-Flow System in a Seafloor Hydrothermal Vent Area in the Middle Okinawa Trough. *Geophys. Res. Lett.*, 47(20).
- 山崎ほか (2018). 海洋資源の成因の科学的研究に基づく調査海域絞り込み手法の開発: 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代海洋資源調査技術」における産総研地質調査総合センター (GSJ) の研究開発成果, 地質調査研究報告, 69(6), 265–303.



第 1 図 水-岩石反応による流体の化学組成変化の概念図



第 2 図 沸騰ありなしモデルにおける閃亜鉛鉱の沈殿量の推移。赤い破線は沸騰領域を表す。沸騰ありモデルにおいて著しく閃亜鉛鉱が沈殿していることがわかる。



第 3 図 反応輸送シミュレーションに基づく鉱床成熟期（キャップロック形成後）における鉱化帯形成プロセスの概念図