

熱水流動・地球化学連成解析による海底熱水鉱床の形成シミュレーション

大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 ○藤田 クラウディア
 大成建設 技術センター 社会基盤技術研究部 正会員 山本 肇
 九州大学大学院理学研究院 石橋 純一郎
 九州大学大学院工学研究院 辻 健

1. はじめに

近年、海底熱水鉱床が新しい金属鉱物資源として注目されている。2014年度から内閣府による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の一つとして「次世代海洋資源調査技術（海のジパング計画）」が採択され、関連する様々な研究開発が実施されている。

海底熱水鉱床は、海底下を熱水流体が移動・循環するシステム（＝海底熱水系）の作用によって、亜鉛・鉛・銅・金といった金属元素が濃集することで形成される。海底下深部のマグマに加熱された300～400℃に達した熱水流体が、断層系などの亀裂を通じて海底面から噴出するのが熱水噴出孔である。熱水噴出孔に向かう激しい上昇流に伴って、周囲の海底下では水平方向の移流や海水の浸入が引き起こされる。その結果、物理・化学的性質が異なる熱水流体と海水由来流体が混合する場が形成され、鉱物の沈殿生成をはじめとする様々な化学反応が生じることが、金属元素の濃集過程として重要であると考えられている。

しかし、鉱床形成に至るまでには長い時間が必要とされることもあり、これらの過程を直観的に理解することは難しい。

本研究では、熱水・海水の対流と地球化学反応を連成した数値シミュレーションを実施し、海底熱水鉱床の形成過程を調べた。

2. 数値解析

本研究では数値解析コード TOUGHREACT V3.0-OMP¹⁾を用い、熱水・海水の対流と地球化学反応を連成した数値シミュレーションを実施した。本シミュレーションで用いたモデルパラメーターの一部は

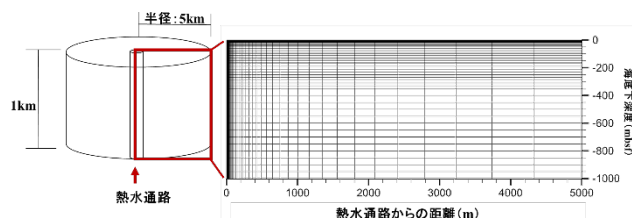


図1 解析モデルの断面メッシュ（二次元放射状モデル）

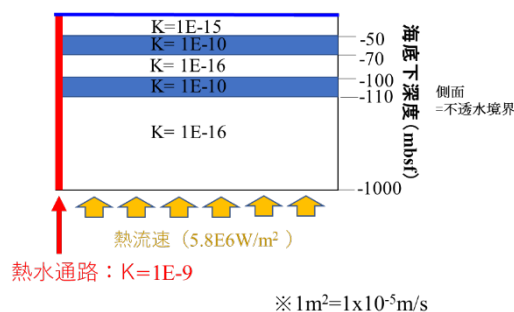


図2 解析モデルの浸透率分布と境界条件

実際の海底熱水活動域（沖縄トラフの伊平屋北海丘周辺）で取得された地震探査データと掘削データを参考に設定した^{2), 3)}。

解析モデルとしては熱水噴出孔を中心とする、半径5km（61分割）、深度1km（海底下0kmから1kmの領域、55分割）の二次元放射状モデルを作成した（図1）。本モデルの浸透率分布と境界条件を図2に示す。熱水噴出孔の下部に熱水通路を表現するために浸透率が $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ の領域（直径10cm）を設定した。周囲の地質は軽石と半遠洋性堆積物の互層を表現するために、図2のように浸透率が大きく異なる層を、大局的に深度に沿って低くなるように $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \sim 1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ で設定している。境界条件ではモデルの側面を不透水境界、海底面は圧力固定した。初期の温度分布としては海底面を2℃、深度方向に温度勾配（4.8℃/100m）を設定した。また、底面からの熱流速は $5.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ に設定するとともに、300℃の熱水が、流量約1000t/日で海底面下で噴出するように設定し

キーワード 海底熱水鉱床、対流、TOUGHREACT、熱水流動・地球化学連成解析

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設（株）技術センター TEL 045-814-7217

た．初期水は海水で満たした条件とした．熱水流体と海水起源流体の化学組成は表 1 の通りとし，両者の混合ならびに冷却によって生じる鉱物の沈殿生成反応（石英，硬石膏，閃亜鉛鉱）を，溶解度を計算してシミュレーションに取り込んだ．簡素化のため，金属元素は Zn^{+2} のみを取り扱い，酸化還元反応は考慮しない．

表 1 海水と熱水の化学組成の初期値

	海水	熱水
Ca^{+2} (mol/kg)	1.0×10^{-2}	1.2×10^{-2}
Mg^{+2} (mol/kg)	5.4×10^{-2}	1.0×10^{-10}
Zn^{+2} (mol/kg)	1.0×10^{-10}	1.5×10^{-4}
Na^{+} (mol/kg)	4.6×10^{-1}	5.4×10^{-2}
Ba^{+2} (mol/kg)	1.0×10^{-10}	2.2×10^{-4}
K^{+} (mol/kg)	1.0×10^{-2}	5.0×10^{-2}
NH_3 (mol/kg)	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-3}
H_4SiO_4 (mol/kg)	1.0×10^{-4}	2.0×10^{-2}
SO_4^{-2} (mol/kg)	2.8×10^{-2}	1.0×10^{-10}
S^{-2} (mol/kg)	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-2}
HCO_3^{-} (mol/kg)	1.4×10^{-3}	1.0×10^{-1}
Cl^{-} (mol/kg)	5.6×10^{-1}	5.6×10^{-1}
pH	8	4.5

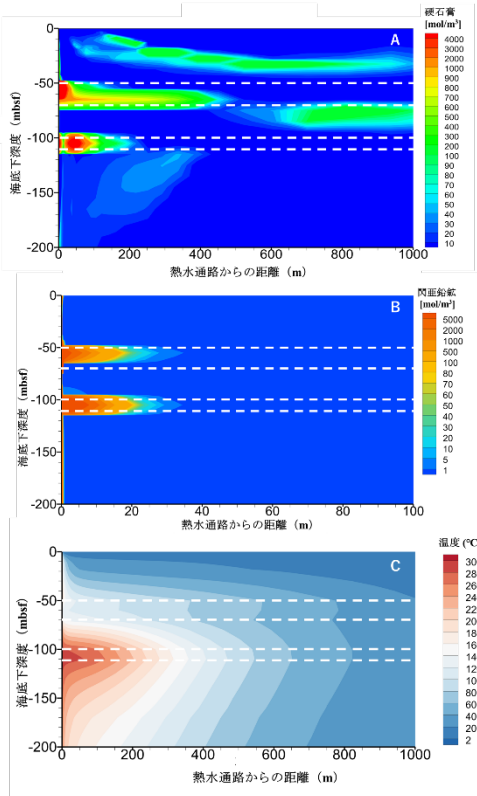


図 3 生成鉱物量と温度，シミュレーション開始から 2000 年後

3. 解析結果

図 3 にシミュレーションで得られた 2000 年後の生成鉱物量と温度分布を示す．熱水通路周辺の高温域で熱水通路の上昇流に巻き込まれるように対流が生じていることがわかる (図 3C)．これに伴う混合によ

り硬石膏などの鉱物が沈殿する (図 3A)．また，熱水中に含まれている亜鉛 (Zn^{+2}) と硫化物イオン (S^{-2}) から沈殿生成する閃亜鉛鉱の蓄積が見られる (図 3B)．閃亜鉛鉱は主に海水との混合より急速に冷えることにより熱水通路の周辺に析出する．この結果では，互層構造のうち浸透率が高い層で，熱水の側方への流れとともに閃亜鉛鉱の沈殿域が側方に広がる様子が示されており，海底熱水域において見受けられる産状をシミュレーションの結果が良く説明している．

4. まとめ

本研究では数値解析コード TOUGHREACT を用い，熱水・海水の対流と地球化学反応の連成シミュレーションを実施し，海底熱水鉱床の形成過程の再現を試みた．その結果をまとめると次の通りである．

- ① 熱水通路周辺の高温域での上昇流に伴い，海底面から海水が浸透する対流が起こり，熱水と海水の混合フロントで鉱物の生成 (硬石膏等) が進む．
- ② 互層構造のうち浸透率が高い層において，熱水の側方への流れが生じ，それに伴って鉱物の沈殿域が側方に伸びる．これは海底熱水域に見られる鉱床分布との類似している．

今後は，海底熱水鉱床域での掘削から得られた地質構造と化学種の特定により鉱床形成過程をシミュレーションで再現してみる必要がある．

謝辞

本研究は，内閣府 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」によって実施されたものである．

参考文献

1) XU et al., TOUGHREACT V3.0-OMP Reference Manual: A Parallel Simulation Program for Non-Isothermal Multiphase Geochemical Reactive Transport, LBNL-DRAFT. -Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, 2014.

2) Tsuji et al., Hydrothermal fluid flow system around the Iheya North Knoll in the mid-Okinawa trough based on seismic reflection data. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 213-214, 41-50, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.11.007>

3) Takai et al., IODP Expedition 331: Strong and Expansive Subseafloor Hydrothermal Activities in the Okinawa Trough, Sci. Dril., 13, 19-27, 2012. <https://doi.org/10.2204/iodp.sd.13.03.2011>