

## 感度分析による海底熱水系数値シミュレーションの支配パラメータの特定

富田 昇平\*・小池 克明\*・後藤 忠徳\*\*・鈴木 勝彦\*\*\*

### Identifying controlling parameters on numerical simulation of seafloor hydrothermal system by sensitivity analysis

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

\*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: tomita.shohei.57n@st.kyoto-u.ac.jp

\*\* 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：海底熱水系，数値シミュレーション，TOUGH2，感度分析，熱流束

Key words: Seafloor hydrothermal system, Numerical simulation, TOUGH2, Sensitivity analysis, Heat flux

#### 1. はじめに

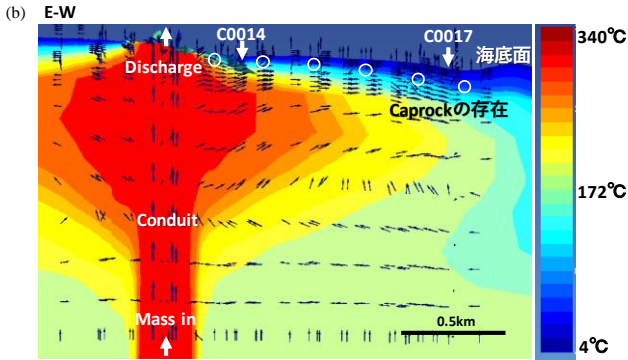
世界的な経済成長と人口増加により金属資源の需要が急増している中で、海底熱水鉱床は新たな金属資源として注目を集めている。海底熱水鉱床の開発のためには、熱水循環システムの解明と鉱床賦存可能性の高い領域の推定の2つが不可欠である。熱水循環メカニズムの解明のため、これまで主に陸域において熱水流動シミュレーションが行われていたが、近年海域においても熱水流動シミュレーションが適用されるようになってきた(例えば Gruen *et al.*, 2014)。熱水流動シミュレーションは海底面からの海水の浸透、流体の加熱・上昇、金属成分の溶解・沈殿という一連の熱水循環プロセスを再現できるが、海底熱水系の熱水循環システムを再現しうる地質構造・物性値分布は未だ明らかになっていない。また、熱水流動シミュレーションでは未知パラメータについては試行錯誤的に変動させてモデルを構築するが、熱水流動形態に大きな影響を及ぼす支配的なパラメータも明らかになっていない。

そこで本研究では、これらの問題に対処し、局所的な亀裂や不透水層などを考慮した詳細モデル化の前段階として、シンプルな Preliminary モデルを構築し、海底熱水系の大局的な温度・圧力・熱水流動形態を推定することを目的とした。そのために、伊平屋北海丘をケーススタディに選び、熱水流動シミュレーションと感度分析を実施した。本研究の最終目標は、推定した温度分布と熱水流動形態に基づき、鉱床ポテンシャルの高い領域を特定することである。

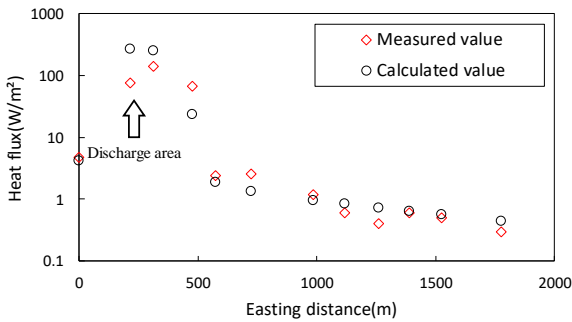
#### 2. 熱水流動シミュレーション

数値計算では、ダルシー則および質量・エネルギー保存則を支配方程式とする気液二相流と熱の3次元流れの解析ソフトTOUGH2を用いた。解析領域の大きさは南北1.2km、東西4km、鉛直方向2kmとし、さらに周辺に10kmの緩衝領域を設けた。シンプルなモデルを構築するため、地質構造として以下の三つのみをモデルに組み込んだ。第一に、高温流体の深部からの上昇流を再現するために、Conduit (浸透率  $k=10^{-13} \text{ m}^2$ ) を配置した(図1)。このConduitは伊平屋北海丘の熱水活動の中心として考えられているNBC直下に鉛直方向に設置している。第二に、高温流体の横方向の流れを可能にするため、ボーリング調査で確認されているCaprockの深度を基に、表層付近にCaprock ( $k=10^{-16} \text{ m}^2$ ) を配置した。第三に、上記以外の解析領域の大半部分にVolcanic basementを配置しており、ボーリング調査においてVolcanic basementの中に複数枚の不透水層が確認されたことから、水平方向の浸透率 ( $k=10^{-14} \text{ m}^2$ ) を鉛直方向 ( $k=10^{-15} \text{ m}^2$ ) に比べて1オーダー大きく設定している。

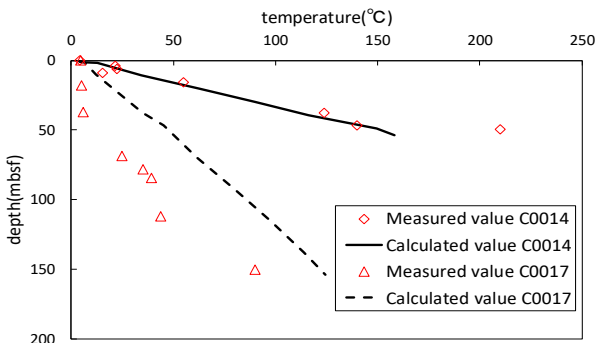
初期条件は静水圧状態および表層を4°Cとし、熱水地域を除く本地域の平均温度勾配である0.12°C/mを与えた。境界条件として、表面を温度・圧力一定の透水性境界とし、側面・底面は不透水性境界としている。さらに、Conduitの底面からは340°Cの熱水を流入させ、Conduitの表層からは圧力に応じて熱水が流出するように設定している。岩石の物性値は現地調査で得られた値を参考に設定し、熱水噴出量、熱水流入量、浸透率は試行錯誤的に変化させ、適宜調整した。



第1図 温度分布と熱水流動形態のシミュレーション結果



第2図 熱流束データと計算値の比較  
(熱流束の観測値は Masaki *et al.*, 2011 より引用)

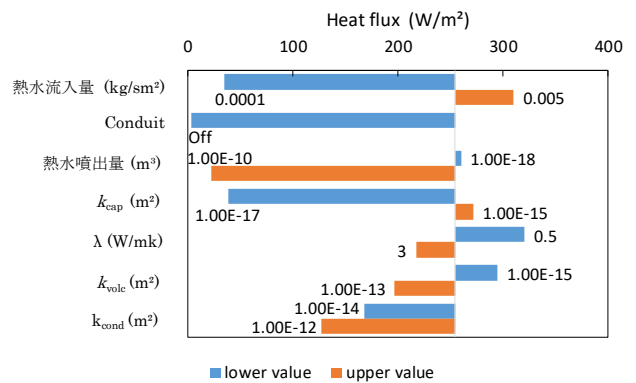


第3図 Site C0014 と C0017 における温度データと計算値の比較  
(温度の観測値は Takai *et al.*, 2011 より引用)

数値計算により、大局的な温度分布と熱水流動形態を推定した(第1図)。底面から流入した高温流体が熱水噴出域での流出に加えて、Caprockに沿って横方向に移動していること、および表層から流入した海水が対流していることがわかる。熱流束について観測値と比較すると、計算値は全体的な傾向をよく再現しており、流れが複雑となる Discharge area においても概ね一致している(第2図)。Site C0014 における温度プロファイルについて、計算値は 50mbsf における高温を除き、観測値と概ね一致している(第3図)。一方、Site C0017 における温度プロファイルについては、計算値は全体的に 30°C 程度過大評価する傾向であった。この原因としては、Site C0017 の周辺には海水の涵養域として考えられている Volcanic ridge が存在するが、Preliminary モデルでは局所的な recharge を考慮していないことが考えられる。

### 3. 感度分析による支配パラメータの特定

熱水流動の支配パラメータを特定するために、感度分析手法の一つである One Factor at a Time study (OFAT) を適用した。OFAT とは、一つのパラメータの値を変化させ、他のパラメータを全てベースケースの値に固定させたときに、アウトプットの値の変化を把握する手法である。ベースケースとして Preliminary モデルを選択し、様々なパラメータについて変化させた。その一例を第4図に示す。第4図では熱水流動の重要な指標の一つである表層の熱流束をアウトプットとして選択し、そのうち最も熱流束が高くなる熱水噴出域地点での感度分析結果を示している。感度分析の結果から、熱水流入量、熱水噴出量、Conduitの有無およびキャップロックの浸透率が感度の高い支配的なパラメータであることがわかった。今後はこれらを主要パラメータとして位置付け、適切な値を特定することで詳細モデルを構築する。



第4図 熱水噴出域の熱流束に対する感度分析結果。棒グラフの横の値は各パラメータの上限/下限入力値を表す。下付き文字の cap, volc, cond は Caprock, Volcanic basement, Conduit を表す。

### 4. まとめ

伊平屋北海丘を例として、熱水流動シミュレーションを行い、観測された熱流束と温度を概ね満足する地質構造・物性値分布を明らかにした。また、感度分析を行うことにより、熱水流動に対して熱水流入量、熱水噴出量、Conduitの有無、およびCaprockの浸透率が支配的なパラメータであることがわかった。

謝辞：本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「次世代海洋資源開発技術プログラム」(管理法人：JST)の一環として実施した。

### 文献

Gruen, G., Weis, P., Driesner, T., Heinrich, A. C., and Cornel E.J. de Ronde. (2014) Hydrodynamic modeling of magmatic-hydrothermal activity at submarine arc volcanoes, with implications for ore formation, *Earth and Planetary Science Letters*, vol.404, pp.307-318.

Masaki, Y., Kinoshita, M., Inagaki, F., Nakagawa, S., and Takai, K. (2011) Possible kilometer-scale hydrothermal circulation within the Iheya-North field, mid-Okinawa Trough, as inferred from heat flow data, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.*, vol.12, pp.1-12.

Takai, K., Mottl, M.J., Nielsen, S. H., and the Expedition 331 Scientists. (2011) *Proceedings of the Integrated Ocean Drilling Program*, vol.331, 253p.