

はじめに

熱水系の浸透率は、熱水循環の強さやパターンを特徴づける最も重要な物理量である。この十数年、海底掘削孔を用いた水理学的な浸透率測定により、海底地殻の浸透率に関する理解は大きく進んだ (Fisher, 1998)。玄武岩の海底地殻は、その最上部 200-300 m では 10^{-10} - 10^{-14} m² 程度の大きな値を持ち、その下部では 10^{-17} m² といった比較的小さな値を持つ。通常、玄武岩の上には浸透率が小さな堆積物が覆うため、地殻内の流体は堆積物と玄武岩の境界付近を水平方向に流れると予想される。実際、水平方向に流れる熱水の流れを示唆する観測例が、多数得られている。

熱水系の近傍では、掘削孔を用いて浸透率を測ることは (高温のため) 難しく、別な方法での推定が行われる。その代表的な方法は、流量や熱に関する保存則を立て、その中の、単独では求めにくい物理量間の関係を観測値で制約することである (たとえば、流速と浸透率のように)。この方法は雑把ではあるが、浸透率のおおよその桁を知ることが可能であるため強力である。

本発表では、伊豆小笠原弧の海底火山、水曜海山の熱水系に対して、熱流量観測のデータから浸透率を見積もる。求めた浸透率を用いて 2 次元の熱対流 (+ 化学反応) の数値計算を行い、観測された熱流量との関係を見直してみる。

対象地域と観測

水曜海山は第四紀の成層火山で、山頂には陥没カルデラがあり、その底部に高温熱水系を有する。2000-2005 年に行われた「アーキアンパーク計画」の一環として、この熱水系で集中的な観測が行われた。熱水系から噴出する熱水の最高温度は 350°C におよび、硫化物のチムニーを有する。熱水系の掘削が行われ、硬石膏、硫化鉱物、粘土鉱物などの二次的沈殿物が採取された。浦辺らは、鉱物沈殿層の下に熱水だまりがあり、その上に海水の循環がある、という描像を提出した。

さらに、稠密な熱流量観測の結果、熱水循環には m スケールと km スケールという複数の空間スケールがあることが明らかになった (Kinoshita et al., 2005; 2006)。熱水地帯の大きさは 200 m x 200 m 程度であり、この範囲にブラックスモーカーが点在する。熱水系に水を供給する循環は、海山のスケールを持つと推定された。一方、熱水地帯には高熱流量の他に低熱流量値が数 m スケールでパッチ状に点在し、このような小規模の熱流量異常を引き起こす m スケールの循環の存在が示唆されている。また、いくつかの場所では、地下の温度プロファイルの形状から上昇流や下降流があることが確認されている。

解析手法および結果

1) パイプモデル

本発表では、それぞれの循環に関連した浸透率を、パイプモデル (e.g., Lowell et al., 1995) を用いて推定する。ここではパイプモデルの代表的な使い方を一つ挙げておく (川田ほか, 2009)。Darcy の法則を流路に沿って積分すると、流量 Q [kg/s] は

$$Q = \frac{\Delta \rho g H}{\int \frac{\nu}{k A} ds} \quad (1)$$

と与えられる。ここで $\Delta \rho$ [kg/m³] は高温流体と低温流体の密度差、 g [m/s²] は重力加速度、 ν [m²/s] は動粘性係数、 k [m²] は浸透率、 A [m²] は流れの断面積、 H [m] は対流層の深さである。(1)式を電気回路に

おけるオームの法則になぞらえると、左辺は電流、右辺分母は電圧、右辺分子は抵抗である。いま熱水の上昇域のみで抵抗が効くと仮定すると、Darcy 速度 $q = Q / (\rho A)$ [m/s] は

$$q_U = \frac{\rho_U k_U \Delta \rho g}{\nu_U} \quad (2)$$

となる。下付き添字の U は上昇域の量を示す。(2)式は、流速 (観測量) と浸透率 (知りたい量) との関係を与える式である。

このモデルを水曜海山の m スケールの熱水循環に適用すると、浸透率 10^{-11} m^2 程度が得られる。一方、km スケールの循環に適用すると、浸透率 10^{-14} m^2 程度が得られる。つまり、地殻の最上部で浸透率が大きく、その深部では浸透率が小さい、という 2 層構造を持つことが示唆される。

2) 流体計算

次に、このような層状の浸透率構造を持つ地殻の中の熱水循環について議論する (Kawada and Yoshida, in press)。水曜海山の熱水系では硬石膏の沈殿物が得られているので、これを参考に、海水と熱水との混合によって硬石膏の沈殿が形成する化学反応過程を取り扱う。計算領域は地殻の最上部で、パイプモデルで得られた浸透率の 2 層構造を与えた。下部からは熱水が流入し、海底からは海水が流入する。

計算の結果、初期の沈殿がない状態では、海水と熱水との混合が盛んに起こり、沈殿物が成長する。沈殿が進行して沈殿物が空隙を埋めるようになると、その部分の浸透率が下がるために流れが妨げられる。最終的には、下部から流入する熱水と海底から流入する海水とは、沈殿物に隔てられて別々の経路を取るようになる。この構造は、浦辺ら (2005) が考えた熱水だまりモデルと調和的である。

さらに、このような循環に擾乱を与えた計算を行い、その振る舞いを元に、時間依存を持つ観測を理解する。たとえば、特筆する観測として

- ・ 高温熱水噴出孔の近傍での掘削で「人工ブラックスモーカー」を形成した (Marumo et al., 2008)
- ・ 噴出孔近傍で得られた温度分布に、孔に向かう流れを示唆するものがある (Masaki et al., 準備中?)

がある。ここで構築したモデルは、上記の観測を整合的に説明することが出来る。

参考文献

- Fisher, A. T. (1998), Permeability of oceanic crusts, *Rev. Geophys.*
- 川田 佳史, 島 伸和, 沖野 郷子 (2009), 海洋地殻構造と地殻内熱水循環, *地学雑誌*, 118(6), 1037-1063.
- Kawada, Y., and S. Yoshida, (2010) Formation of a hydrothermal reservoir due to anhydrite precipitation in an arc-volcano hydrothermal system, submitted to *J. Geophys. Res.*, in press.
- 木下 正高, 護摩堂 雅子, 川田 佳史, 田中 明子 (2005), 熱流量精査による水曜海山カルデラの熱水循環様式の推定, *海の研究*, 14(2), 165-175.
- Kinoshita, M., Y. Kawada, A. Tanaka, and T. Urabe (2006), Recharge/discharge interface of a secondary hydrothermal circulation in the Suiyo Seamount of the Izu-Bonin arc, identified by submersible-operated heat flow measurements, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 245, 498-508, doi:10.1016/j.epsl.2006.02.006.
- Lowell, R. P., P. A. Rona, and R. P. Von Herzen (1995), Seafloor hydrothermal systems, *J. Geophys. Res.*, 100(B1), 327-352, doi:10.1029/94JB02222.
- Marumo, K., T. Urabe, A. Goto, Y. Takano, and M. Nakaseama (2008), Mineralogy and isotope geochemistry of active submarine hydrothermal field at Suiyo Seamount, Izu-Bonin Arc, West Pacific Ocean, *Resource Geol.*, 58(3), 220-248.