

## 低温熱年代学に基づくスラブ起源流体活動に伴う熱異常検出の試み

末岡 茂\*・岩野英樹\*\*・檀原 徹\*\*・岡本 晃\*\*\*・田上高広\*\*\*

Attempts to detect thermal anomalies associated with slab-derived fluid activities  
based on low-temperature thermochronology

Shigeru Sueoka\*, Hideki Iwano\*\*, Tohru Danhara\*\*,  
Akira Okamoto\*\*\* and Takahiro Tagami\*\*\*

\* 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

\*\* (株)京都フィッション・トラック, Kyoto Fission-Track Co., Ltd.

\*\*\* 京都大学地球惑星科学専攻, Division of Earth & Planetary Sciences, Kyoto University

### はじめに

沈み込み帯では、スラブからの脱水によりメルトが生成され火山弧が形成されることはよく知られている。一方で、西南日本前弧域などでは、メルトの生成を伴わないスラブ起源流体の活動が報告されている（風早ほか，2014など）。このような流体活動は、前弧域における熱輸送・物質移動に関わるのみならず、内陸の地震活動との関連が指摘されている。また、地熱資源の開発や地下重要施設の安全性評価などの社会的な側面からも、その性質の理解が望まれている。

本稿では、過去のスラブ起源流体活動の痕跡と考えられる熱水変質帯を対象に、低温領域の熱年代学に基づいて、流体活動の熱的特徴（到達温度、継続期間など）の検討を試みた事例を紹介する。事例地域は、スラブ起源流体の湧出地域として知られる紀伊半島本宮地域（例えば、Umeda et al., 2007; Yamaguchi et al., 2009; Morikawa et al., 2016）と有馬地域（例えば、西村, 2011; Kusuda et al., 2014）の2つである。

### 本宮地域の事例

本宮地域では、平治川の3地点の熱水脈露頭を対象とした（本事例の詳細は、Sueoka et al., 2020のpreprintを参照）。いずれの露頭でも、母岩である四万十帯音無川層群の砂岩中

に、幅50 cm~1 m程度の熱水脈（石英脈）が確認されており、熱水脈およびその近傍の母岩を採取した。

熱水脈試料については、熱水活動の温度を推定するために、流体包有物解析を適用した。初生包有物を対象とした均質化温度測定の結果、3地点中2地点の熱水脈から、熱水温度をそれぞれ約150°Cと200°Cと推定することができた。

母岩試料については、熱年代解析により、熱水活動の時期、熱影響の空間的範囲、継続時間などの推定を試みた。すなわち、熱水脈-母岩の境界からの距離に応じて、< 5 cm~3 mの範囲で複数の試料を採取し、複数の熱年代手法を適用した。その結果、77.3~66.9 MaのジルコンU-Pb年代、34.1~24.0 MaのジルコンFT年代、23.6~8.7 Maのジルコン(U-Th)/He粒子年代、12.0~9.0 MaのアパタイトFT年代が得られた。しかし、いずれの熱年代計においても、熱水脈からの距離に応じた冷却年代の変化、すなわち熱水活動による熱異常は検出できなかった。原因としては、活動時期が古かったためにそれ以降の削剥等により冷却年代が上書きされた可能性と、活動継続期間が短すぎた（150°Cなら約10年以下、200°Cなら数ヶ月以下）可能性が考えられる。

## 有馬地域の事例

有馬地域では、白水峡付近の六甲断層露頭 (Mitchell et al., 2011) を対象とした。本宮地域のような大規模な熱水脈は確認できなかったため、熱水の移行経路として期待される断層からの距離に応じて、熱年代解析用の基盤岩 (風化した六甲花崗岩) を採取した。いずれの試料もアパタイトの含有に乏しかったため、ジルコンFT長による検討を行った。断層から0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm, >500 cmの試料を測定したところ、いずれも平均長約11  $\mu\text{m}$  の単峰性のFT長分布を示した。すなわち、再加熱の兆候は認められず、熱水活動に伴う熱異常は検出できないという結果となった。

## 数値モデルとの比較・検討

以上の結果を整理・検討するため、数値モデルとの比較を行った。すなわち、温度一定の熱水活動がある期間にわたって継続した場合に、周囲の母岩から得られる冷却年代の空間分布をモデル計算した (図1)。母岩への熱影響は熱伝導のみを考慮し、一次元熱伝導方程式で各地点の温度-時間履歴を計算した (母岩中への熱水の浸透は考慮していないため、最小限の熱影響を評価していることになる)。得られた温度-時間履歴を、HeFTy ver. 1.9.3 (Ketcham, 2005) のフォワード機能により、アパタイトFT年代、ジルコン(U-Th)/He年代、ジルコンFT年代にそれぞれ変換した。

計算の結果を図1に示す。熱水温度が150°Cの場合、いずれの熱年代計でも、誤差範囲を超えた年代の若返りはみられない。少なくとも1000年以下の加熱期間については、これらの熱年代計では熱異常の検出は困難と考えられる。一方、熱水温度が200~300°Cの場合、1000年以下の加熱期間でも、アパタイトFT年代とジルコン(U-Th)/He年代の若返りが期待できる。すなわち、熱水活動の時期、熱影響範囲、継続期間などに関する情報が取得できる可能性がある。なお、いずれのケース、いずれの熱年代計でも、熱水脈から0~30 cmの範囲で

は、一般的な誤差範囲を超えた有意な年代差はみられなかった。したがって、断層帯の年代測定のようなmm~cm単位の精密なサンプリング戦略 (d'Alessio et al., 2003; Murakami & Tagami, 2005) は、熱水活動の場合は不要であると期待できる。

## 謝辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成30~令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (地質環境長期安定性評価技術高度化開発) 」 (JPJ007597) の成果の一部である。流体包有物解析は地熱エンジニアリング株式会社に、ジルコン(U-Th)/He年代測定はメルボルン大学のBarry Kohn教授にそれぞれ依頼した。

## 引用文献

- d'Alessio M.A. et al. (2003) No frictional heat along the San Gabriel fault, California: Evidence from fission-track thermochronology. *Geology*, 31, 541-544.
- Guenther W.R. et al. (2013) Helium diffusion in natural zircon: radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U-Th)/He thermochronology. *Amer. Jour. Sci.*, 313, 145-198.
- 風早康平ほか (2014) 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴. *日本水文科学会誌*, 44, 3-16.
- Ketcham R.A. (2005) Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Rev. Min. Geochem.*, 58, 275-314.
- Ketcham R.A. et al. (2007) Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *Amer. Min.*, 92, 799-810.
- Kusuda C. et al. (2014) Arima hot spring waters as a deep-seated brine from

- subducting slab. *Earth, Planets Space*, 66:119.
- Mitchell T.M. et al. (2011) Pulverized fault rocks and damage asymmetry along the Arima-Takatsuki Tectonic Line, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 308, 284-297.
- Morikawa, N. et al. (2016) Widespread distribution of ascending fluids transporting mantle helium in the fore-arc region and their upwelling processes: Noble gas and major element composition of deep groundwater in the Kii Peninsula, southwest Japan. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 182, 173-196.
- Murakami M. and Tagami T. (2004) Dating pseudotachylyte of the Nojima fault using the zircon fission-track method. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12604, doi:10.1029/2004GL020211.
- 西村 進 (2011) 近畿地方の高温泉とその地質構造. *温泉科学*, 60, 481-491.
- Sueoka S. et al. (2020) Thermal characteristics of fossil fluids from the Philippine Sea slab: Insights from fluid inclusions and thermochronology. *ESSOAr*, <https://doi.org/10.1002/essoar.10504421.1>.
- Umeda K. et al. (2006) Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high  $^3\text{He}$  emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan. *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, 149, 47- 61.
- Yamada R. et al. (2007) Statistical modelling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; Reassessment of laboratory experiments. *Chem. Geol.*, 239, 75-91.
- Yamaguchi S. et al. (2009) Modification of the Network-MT method and its first application in imaging the deep conductivity structure beneath the Kii Peninsula, southwestern Japan. *Earth Planets Space*, 61, 957-971.

熱影響 (熱拡散のみを仮定)

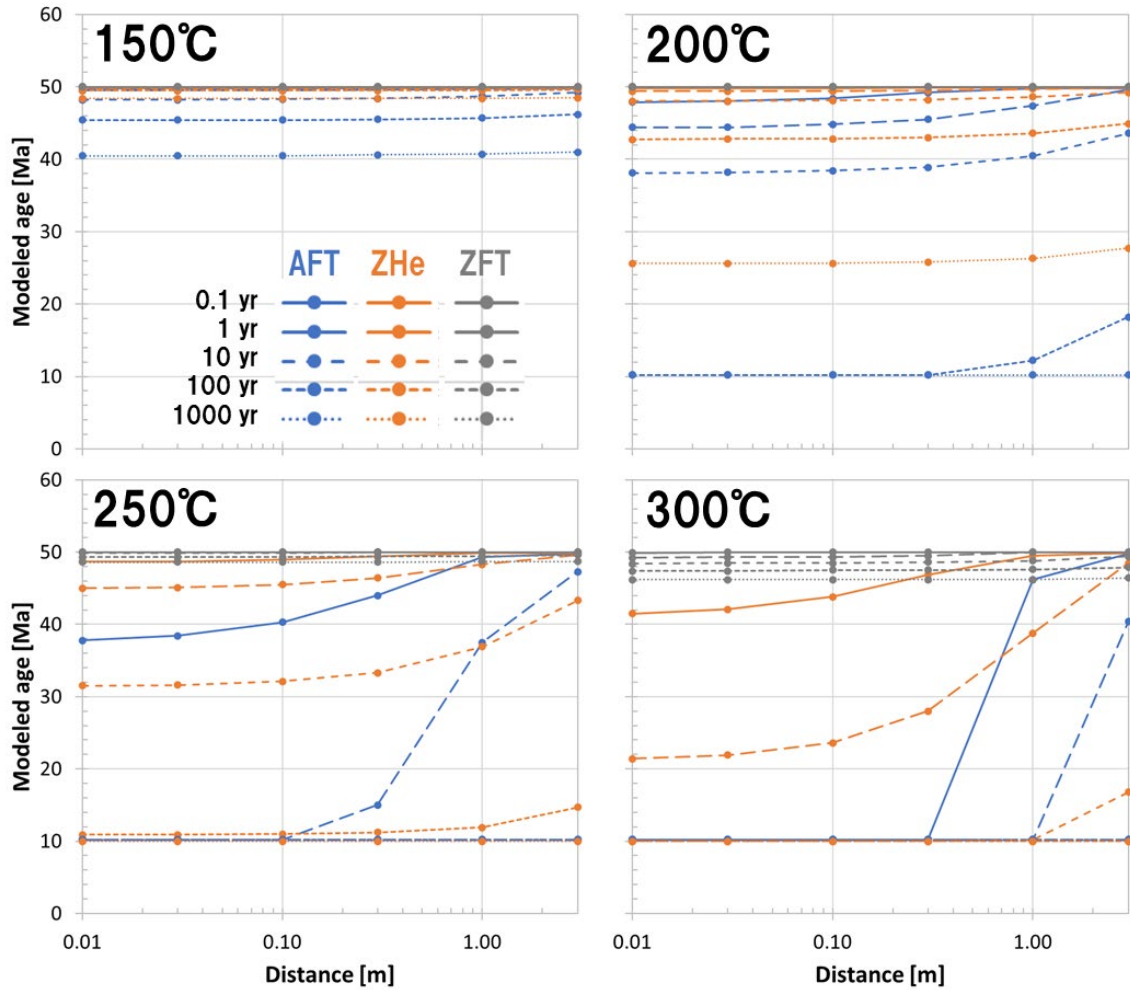


図1. 数値モデルの概念図と結果. 母岩の非加熱時の年代を50 Ma, 熱水活動の開始を10 Maとした時の熱水温度150°C, 200°C, 250°C, 300°Cの計算結果を示す. 初期温度 (環境温度) は20°C, 熱拡散率は $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ とした. カイネティクスは, アパタイトFT法はKetcham et al. (2007), ジルコン(U-Th)/He法はGuenther et al. (2013), ジルコンFT法はYamada et al. (2007) の Fanning Arrheniusをそれぞれ用いた.