

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340123

研究課題名(和文)複合的熱年代分析による現世沈み込み帯震源域の熱過程研究

研究課題名(英文)Thermal processes of seismogenic zone faults in plate subduction zone revealed by thermochronologic analyses

研究代表者

田上 高広 (Tagami, Takahiro)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80202159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：断層運動の履歴復元と、それに伴う熱の発生と輸送を定量的に評価する事を目指して、熱年代学による断層帯の温度履歴解析をおこなった。プレート沈み込み帯震源断層を対象に、フィッション・トラック(以下FTと略)法等を用いて、断層活動の時期推定と、断層帯での熱の発生・輸送のモデル化を進めた。その結果、ジルコンFTデータのインバージョンにより加熱イベントの時期を $48 \pm 6\text{Ma}(2\text{SE})$ と求めることが出来た。この年代値は、四万十付加体の形成・進化における“out-of-sequence thrust”の活動時期として解釈されることが判明した。

研究成果の概要(英文)：Thermal history of fault zones were analyzed by thermochronology, in order to reconstruct the history of fault motions as well as to quantitatively assess relevant heat generation and transfer. The estimation of the time of fault motion and modeling of heat generation and transfer were conducted by applying the fission-track and other methods to seismogenic zone faults of plate subduction zone. As a result, the time of heating episode was estimated as  $48 \pm 6\text{Ma}(2\text{SE})$  by thermal history inversion of zircon FT data. The age is best interpreted by the time of activity of “out-of-sequence thrust” during the formation and evolution of the Shimanto accretionary complex.

研究分野：テクトニクス

キーワード：熱年代学 温度履歴 震源断層 四万十帯 付加体

## 1. 研究開始当初の背景

断層運動に伴う熱の発生と輸送を定量的に評価する事は、地震断層の力学と地震発生のエネルギー収支の解明に必要不可欠であり (Scholz, 1996) また、変動帯の熱・物質収支とテクトニクスを理解するためにも欠かす事ができない (例えば、Fukahata and Matsu'ura, 2001) 加えて、熱的リセットないし (再) 結晶化を利用した断層岩の年代決定により、地震断層の活動履歴復元に新たな光を当てる事が出来る (例えば、Murakami and Tagami, 2004; 田上他, 2010)。

断層帯に特徴的な熱過程としては、一般に、断層摩擦発熱と流体移動による熱輸送の2つが考えられる。前者は高応力下での高速破壊において顕著に生じるとされており、試験機を用いた高速破壊実験 (Tsutsumi and Shimamoto, 1997) および、断層帯中にしばしば見られるシュードタキライトの存在 (Sibson, 1975) から示唆されて来た。後者は、断層帯が高浸透率を保持する場合に想定され、活断層近傍にしばしば湧出する熱水の存在や、断層帯に広く見られる炭酸塩岩脈などから予想されている (Fujimoto et al., 2007) 。

しかしながら、両者は共に、主として地殻深部で起る過程であるため、直接観測が難しくわからない事が多かった。

これらの問題に近年、天然での観測と分析から新しい展開がもたらされた。それらは、ボーリング孔における精密温度計測 (Kano et al., 2006) および、我々が行った断層岩の高精度温度履歴解析であり、共に兵庫県南部地震後に進められた野島断層をはじめとする活断層の学術掘削の成果である。

さらに、南海トラフ震源域掘削の先行研究として、四万十付加帯興津メランジェ直上に発見されたかつての震源断層も同様に分析した所、断層面より上盤側に地殻深部からの熱水移動に起因する幅約 20 m の加熱帯が広く分布することを見出した。また、他の内陸型断層にも応用研究を広げている。これらの研究を通じて、断層帯に広く含まれるジルコンの方が、アパタイトより有用であることもわかった。

## 2. 研究の目的

まず上述の四万十帯の古震源断層について、熱水加熱の時期、期間、温度の推定を行う。このために、フィッシュトラック (FT) 法で分析したジルコン試料に対して (U-Th)/He 年代測定を行う。(U-Th)/He 法は最も低い閉鎖温度を持つ熱年代計であり、今世紀に入ってから広く用いられるようになって来た。FT 法と組み合わせた際の興味深い特徴は、両手法で熱的リセットに伴う活性化エネルギーが異なるため、地質学的な長い時間スケールでの加熱に対しては、FT 法より (U-Th)/He 法の方が閉鎖温度が低い一方、断層摩擦発熱などの短い時間スケールの場合、その逆が起る事である (研究計画の図 2

参照)。この関係を用いると、両者の見かけ年代値の比較から時間スケールを定量的に絞り込める。これに、温度履歴のインバージョン解析を組み合わせると、加熱の時期、期間、温度を求める事が出来る。その結果を、ビトリナイト反射率データや浸透率構造 (Kato et al., 2002) 等と比較検討し熱輸送モデルを構築する。

次に、IODP 掘削において採取予定の南海トラフ震源断層 (分岐断層) および東日本大震災震源断層について、以上述べた方法論を用いて、断層運動に伴う熱の発生と輸送および活動履歴を定量的に決定する。この際、鍵となるのが熱水移動の化石記録である方解石脈の形成時期の決定であり、これを 230Th 年代測定により行う。加えて、断層ガウジの自生イライトの K-Ar (Ar/Ar) 年代も組み合わせ、さらに高い時間分解能を持つ熱輸送モデルと活動履歴を確立する。

## 3. 研究の方法

### (1) ジルコン FT 分析

砂岩からジルコンを鉱物分離する。形状・透明度・粒径の良好なジルコンを実体顕微鏡下でハンドピックし、埋め込み、研磨の後、アルカリ溶液中でエッチングし、自発トラックを出現させる。高解像度の透過型光学顕微鏡下で観察し、トラック密度を測定する。次に、レーザー照射四重極型 ICP 質量分析装置を用いて該当エリアのウラン濃度を定量し、年代値を算出する。別途、同様に試料を作成し、結晶内部に両端が有り全長を示すトラックの長さを測定する。

### (2) (U-Th)/He 年代測定

形状・透明度・粒径の良好なジルコンをハンドピックし、実体顕微鏡下で粒径等を測定・記載した後、所定の白金パケットに封入する。レーザー照射により、ジルコンからヘリウムを抽出し、希ガス専用質量分析計 (VG5400) を用いて同位体分析する。脱ガスの済んだジルコンは LiBO<sub>3</sub> を用いて溶解し、四重極型 ICP 質量分析装置によりウランとトリウムを定量し、年代値を算出する。

### (3) 温度履歴のインバージョン解析

分析済み試料のうち、断層近傍で顕著に熱影響の見られた 4 試料を用いて、トラック長分布と FT 年代を用いたインバージョンを行い、試料ごとに最適な温度履歴を復元し比較する。これにより、断層近傍の加熱イベントの時期 (厳密には、その後の冷却開始時期) を推定する。解析は Monte Trax (Gallagher, 1995) を用いて行う。

## 4. 研究成果

本研究の結果、以下のことがわかった。

(1) 四万十付加帯興津メランジェ直上の古震源断層 (境界断層) について、ジルコン FT データの空間分布をより高密度に求めることができた。また、インバージョンに用いる FT 熱アニーリング関数が試料依存性を持た

ないかどうかについて、年代と放射線損傷量の異なる標準試料などの加熱実験データを検討した結果、100Maよりも若い年代レンジにおいては有意な依存性が見られないことがわかった。そこで、信頼度の高いインバージョンにより、加熱イベントの時期を $48 \pm 6\text{Ma}$ (2SE)と確定することができた。

(2) 加熱イベントの年代値の持つ地質学的な意味を、既報の熱年代データおよび地質学的な制約条件も入れて検討した。その結果、四万十付加体の形成・進化における“out-of-sequence thrust”の活動時期として解釈されることが判明した。また、興津の現地調査を共同研究者たちと再度行い、産状の確認や解釈の妥当性の検討を行った。これに基づき、現在投稿論文の作成を進めている。

(3) 加熱イベントの期間・温度を絞り込むため、上記の試料などについて、ジルコンを用いた(U-Th)/He年代測定の検討を進めた。共同研究先であるメルボルン大学にある(U-Th)/He年代システムを用いて、本邦産白亜紀花崗岩中の試料についてデータ再現性等の確認は行えたが、上記の砂岩中ジルコンについては、少数の試料では有意な年代情報抽出が困難であることがわかったので、今後の課題となった。

(4) IODPによる現世の震源断層(日本海溝の東日本大震災震源断層、および南海トラフの付加体中の分岐断層)掘削については、前者の掘削において震源断層の貫通に成功したが、残念ながら、砂岩と方解石脈は得られなかった。断層ガウジは得られたが、該当深度では被熱が不十分なため分析は行わなかった。南海トラフの付加体中の分岐断層については、掘削が進まず断念せざるを得なかった。そこで、上記成果(1)-(3)の位置づけを明確にするために、日本列島の既存熱年代データの系統的なコンパイルをあわせて行い、国際会議等で成果発表を行った。

以上本研究により、世界ではじめて、付加体震源域における断層運動にともなう加熱イベントの時期を精度よく決定することができた。この方法論は世界の他地域においても広く用いることが出来るため、国際的に大きなインパクトを与えている。また、付加体の形成・進化における“out-of-sequence thrust”の活動時期を決定しうる新しいアプローチも提案できた。これら一連の「島弧変動帯熱年代学」の成果により、*Tectonophysics* 誌へのレビュー論文掲載に続き、*Geoscience Frontier* 誌からのレビュー論文執筆の招待も受けた(現在 Minor revision で修正中)。今後は、上記の日本列島の既存熱年代データの系統的なコンパイルを進めるとともに、広域的な山地隆起に伴う地殻ひずみ速度の時空間分布解析にとりかかっている。また、ESRやTLなども含めた低温熱年代学の統合的解析により、内陸型断層の活動時期を正確に求める新しいアプローチも検討中である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計14件)

M. Harada, Y. Watanabe, T. Nakatsuka, S. Tazuru-Mizuno, Y. Horikawa, B. Subiyanto, J. Sugiyama, T. Tsuda, T. Tagami, 2015. Assessment of Sungkai tree-ring  $^{18}\text{O}$  proxy for paleoclimate reconstruction in western Java, Indonesia. *Quaternary International*, in press.

M. Harada, Y. Watanabe, T. Nakatsuka, S. Tazuru-Mizuno, Y. Horikawa, J. Sugiyama, T. Tsuda, T. Tagami, 2014. Alpha-cellulose extraction procedure for the tropical tree sungkai (*Peronema canescens* Jack) by using an improved vessel for reliable paleoclimate reconstruction. *Geochem. J.*, 48, 299-307, doi:10.2343/geochemj.2.0306.

S. Yamasaki, H. Zwingmann, K. Yamada, T. Tagami, K. Umeda, 2013. Constraining the timing of brittle deformation and faulting in the Toki granite, central Japan. *Chem. Geol.*, 351, 168-174, doi:10.1016/j.chemgeo.2013.05.005.

Ujiie, K., Tanaka, H., Saito, T., Tsutsumi, A., Mori, JJ., Kameda, J., Brodsky, EE., Chester, FM., Eguchi N., Toczko, S., Expedition 343 and 343T Scientists, 2013, Low Coseismic Shear Stress on the Tohoku-Oki Megathrust Determined from Laboratory Experiments, *Science* 342, 1211, doi: 10.1126/science.1243485

T. Tagami, 2012. Thermochronological investigation of fault zones. (Review article) *Tectonophysics*, 538-540, 67-85, doi:10.1016/j.tecto.2012.01.032.

K. Yamada, T. Hanamuro, T. Tagami, K. Shimada, H. Takagi, R. Yamada and K. Umeda, 2012. The first (U-Th)/He thermochronology of pseudotachlylyte from the Median Tectonic Line, southwest Japan. *J. Asian Earth Sci.*, 45, 17-23, doi:10.1016/j.jseaes.2011.08.009.

S. Sueoka, B. P. Kohn, T. Tagami, H. Tsutsumi, N. Hasebe, A. Tamura and S. Arai, 2012. Denudation history of the Kiso Range, central Japan, and its tectonic implications: Constraints from low-temperature thermochronology. *Island Arc*, 21, 32-52,

doi:10.1111/j.1440-1738.2011.00789.x.

〔学会発表〕(計 47 件)

Sueoka, S., Tagami, T., 2014. Compilation of thermochronological data from central Japan Arc and its neotectonic implications. 14th International Conference on Thermochronology, Chamonix (France), 11 September 2014.

原田麻央・渡邊裕美子・中塚武・田鶴寿弥子・堀川祥生・バンバンスピヤント・杉山淳司・津田敏隆・田上高広, 2014. インドネシア西ジャワにおける古気候復元のためのスンカイの年輪の 180 プロキシの評価. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜パシフィコ国際会議場(神奈川), 4月28日-5月2日.

久持亮・渡邊裕美子・阿部勇治・田上高広, 2014. 古気候復元に向けた滋賀県多賀鉱山鍾乳洞鍾乳石の成長縞観察. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜パシフィコ国際会議場(神奈川), 4月28日-5月2日.

末岡茂・堤浩之・田上高広・長谷部徳子・田村明弘・荒井章司・柴田健二, 2014. 養老鈴鹿 布引山地の隆起・削剥史: アパタイト FT 解析に基づく制約. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜パシフィコ国際会議場(神奈川), 4月28日-5月2日.

長谷川航・渡邊裕美子・松岡廣繁・大沢信二・田上高広, 2014. アジア熱帯域の洞窟における現在の洞外気象と石筍成長の関係. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 横浜パシフィコ国際会議場(神奈川), 4月28日-5月2日.

田上高広, 2014. 断層帯の熱年代学: 四万十帯興津メランジェ震源断層の熱過程研究. フィッショントラック研究会, 不死王閣 (大阪), 2月16-18日.

Yamasaki, S., Tagami, T., Takahashi, E., 2013. The duration of the shield stage of Hawaiian volcano; unspiked K-Ar dating of the submarine tholeiites from Koolau volcano. IAVCEI 2013, Kagoshima (Japan), 20-24 July, 2013.

Hasegawa, W., Y. Watanabe, H. Matsuoka, S. Ohsawa, B. Brahmantyo, K. A. Maryunani, T. Tagami, 2013. Relationship between modern speleothem formation and surface weather in an Asian tropical cave. Goldschmidt Conference, Florence (Italy), 25-30 August 2013.

Tagami, T., Thermochronological investigation of seismogenic fault zones: an

overview and examples from Japanese Islands. Goldschmidt Conference, Florence (Italy), 25-30 August 2013.

Yamasaki, S., Zwingmann, H., Tagami, T., 2013. Intermethod comparison for K-Ar dating of clay gouge. Goldschmidt Conference, Florence (Italy), 25-30 August 2013.

Watanabe, Y., S. Tamura, T. Nakatsuka, S. Tazuru, J. Sugiyama, B. Subiyanto, T. Tsuda and T. Tagami, 2013. Comparison of Sungkai tree-ring components and meteorological data from western Java, Indonesia. GCOE-ARS Final Symposium, Uji (Japan), 1-3 December 2013.

Harada, M., Yumiko Watanabe, Takeshi Nakatsuka, Suyako Tazuru-Mizuno, Yoshiaki Horikawa, Junji Sugiyama, Toshitaka Tsuda, Takahiro Tagami, 2013. Estimation of alpha-cellulose extraction time for tropical tree for reliable paleoclimate reconstruction and its applications. INQUA 2013 Early Career Researcher Inter-congress meeting, Wollongong (Australia), 2-6 December 2013.

Tagami, T., Thermochronological investigation of seismogenic fault zones: an overview and examples from Japanese Islands. American Geophysical Union Fall Meeting 2013, San Francisco (USA), 9-13 December 2013.

末岡茂・山田国見・柴田健二・堤浩之・田上高広・長谷部 徳子・田村 明弘・荒井 章司, 2013. 鈴鹿山脈から採取したアパタイトのフィッション・トラック年代および(U-Th)/He 年代とその地形学的意義. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 5月19-24日.

山崎誠子・磯部 翔太郎・佐藤 洋樹・田上高広, 2013. K-Ar 年代測定における試料サイズと過剰アルゴンの関係. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 5月19-24日.

田上高広, 2013. 放射年代測定から推定される山地の隆起史・速度. 地震研究所共同利用研究集会“地殻ダイナミクスの解明 - 地球物理学と地質学の知見の総合 - ”, 東京大学地震研究所, 7月13-14日.

末岡茂・山田国見・柴田健二・堤浩之・田上高広・長谷部 徳子・田村 明弘・荒井 章司, 2013. 低温領域の熱年代学に基づく鈴鹿山脈の隆起・削剥史と近畿三角帯東縁のテクトニクス. 日本地質学会第 120 年学術大会(仙台大会), 東北大学, 9月14-16日.

山崎誠子・山田国見・田上高広・Zwingmann

H., 2013. 断層粘土のK-Ar年代測定～自生鉱物の高純度分離手法と研究例～. フィッショントラック研究会, 筑波大学(茨城), 2月23-24日.

Yamasaki, S., Zwingmann, H., Yamada, K., Umeda, K., Tagami, T., 2012. New time constraints on brittle faulting in the Toki Granite, central Japan. Goldschmidt Conference, Montréal (Canada), 24-29 June 2012.

Zwingmann, H., Mancktelow, N., Viola, G., Pleuger, J., Yamasaki, S., Tagami, T., 2012. Brittle fault dating from the Mesoproterozoic to the Neogene. Goldschmidt Conference, Montréal (Canada), 24-29 June 2012.

⑳ Tagami, T., 2012. High-resolution paleoclimate reconstruction of tropical Asia using stable isotopic data from speleothem and trees, International Symposium on Sustainability / Survivability Science for a Resilient Society Adaptable to Extreme Weather Conditions, Uji (Japan), 3-4 August 2012.

㉑ Sueoka S., Kohn B.P., Tagami T., Tsutsumi H., Hasebe N., Tamura A. and Arai S., 2012. Tilted uplift of the Kiso Range, central Japan, since 0.8 Ma constrained from low-temperature thermochronology. 13th International Conference on Thermochronology, Guilin (China), 25 August 2012.

㉒ Sueoka S., Kohn B.P., Ikeda Y., Kano K., Tsutsumi H., Tagami T., Hasebe N., Tamura A. and Arai S., 2012. Denudation history of the Akaishi Range, central Japan, and its tectonic implications: Constraints from low-temperature thermochronology. American Geophysical Union Fall Meeting 2012, San Francisco (USA), 4 December 2012.

㉓ 山崎誠子・澤田遼太郎・田上高広, 2012. ハワイソレライト試料のK-Ar年代測定における変質の影響評価. 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 5月20-25日.

㉔ 福永卓也・渡邊裕美子・坂井三郎・田上高広・竹村恵二・余田成男, 2012. インドネシア・東部ジャワの鍾乳石の炭素・酸素同位体比と降水量との時系列比較. 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 5月20-25日.

㉕ 北愛美・渡邊裕美子・坂井三郎・田上高広・竹村恵二・余田成男, 2012. インドネシア・ジャワ島西部の石筍における過去千年間の炭素・酸素同位体比変動. 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 5月20-25日.

㉖ 末岡茂・Kohn B.P.・池田安隆・狩野謙一・堤浩之・田上高広・長谷部 徳子・田村 明弘・荒井 章司, 2012. 低温領域の熱年代学的手法に基づいた赤石山脈の隆起・削剥史の検討. 日本地球惑星科学連合2012年大会, 幕張メッセ国際会議場(千葉), 5月20-25日.

㉗ 長谷川航・渡邊裕美子・田上高広, 2012. 東南アジア熱帯域の洞窟における現在の石筍生成と洞外気象の関係. 日本第四紀学会, 立正大学(埼玉), 8月20-22日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田上 高広 (TAGAMI, Takahiro)  
京都大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 80202159

### (2) 研究分担者

堤 昭人 (TSUTSUMI, Akito)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 90324607

### (3) 連携研究者

渡邊 裕美子 (WATANABE, Yumiko)  
京都大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 20509939