日本列島の若い山地における低温熱年代法の適用性

末岡　茂*

Applicability of low-temperature thermochronology to young mountains in the Japanese Islands

Shigeru Sueoka*

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

はじめに

フィッション・トラック（FT）法や(U-Th)/He法などの低温熱年代法は，世界各地の山地において，隆起・削剥史の解明のため用いられてきた（例えば，Herman et al., 2013; Schildgen et al., 2018）．一方，日本列島の山地の大半は，鮮新世から第四紀に隆起を開始した極めて若い山地だと考えられている（米倉ほか，2001）．そのため，概して隆起開始以降の総削剥量が小さく，低温熱年代法では，現在の山地形成に関連した若い時代の冷却・削剥を検出することは必ずしも容易ではない（Sueoka et al., 2016）．本研究では，日本列島のような若い山地における低温熱年代法の適用性を確認するために，熱史のモデル計算に基づいて，年代の若返りが検出できる可能性がある山地の条件の抽出を試みた．

モデルセッティング

Willett and Brandon (2013)の式に基づけば，ある時刻t_1から一定速度uで隆起した場合の地温Tを任意の時刻tと深度zについて計算することができる．これを用いて，隆起開始年代t_1，隆起速度u，モデルの開始年代t_0を変化させたときの地温構造の時間変化を計算し，現在地表に露出している岩石が経験した温度-時間履歴を求めた．本研究では，鮮新世～第四紀の隆起のみでできた山地を前提としており，それ以前の温度変化・削剥は無視した．また，地温構造の時間変化は，隆起（鉛直方向の岩石の変位）の影響のみを考慮した．

入力したパラメータの値は，隆起開始年代t_1が0.5～5 Ma（0.5刻み，10ケース），隆起速度uが0.01～10 mm/yr（$10^{0.5}$倍刻み，7ケース），モデルの開始年代t_0が15 Ma，60 Ma，120 Maの3ケースである．モデルの開始年代t_0の値は，日本列島における花崗岩の形成年代（中島，2018）を考慮して，代表的な値として決定した．隆起開始年代t_1以前の地温勾配は25°C/km，地殻の熱拡散率は32 m²/yr，海水準における地表温度は10°Cで固定した．また，地表の標高は変化しない場合（標高は常にゼロ，隆起速度＝削剥速度）と，標高および削剥速度がOhmori (1978)のモデルに従って時間変化する場合（地表温度は気温逓減率6°C/kmで計算）の2通りの計算を行った．

計算された温度-時間履歴は，HeFTy ver.1.9.3（Ketcham, 2005）のフォワード機能によって，アパタイトおよびジルコンのFT法および(U-Th)/He法の冷却年代に変換した．変換に用いたアニーリングモデルないし拡散モデルは，アパタイトFT法がKetcham et al. (2007)，アパタイト(U-Th)/He法がFlowers et al. (2009)，ジルコンFT法がYamada et al. (2007)のfanning Arrheniusモデル，ジルコン(U-Th)/He法がReiners et al. (2004)である．アパタイトFT法のアニーリングモデルでは，Cl濃度は一律0.00 wt%とした．

解析結果

得られたモデル年代は，標高変化の有無に関わらずどちらのケースでも，隆起速度および隆起開始年代が既知の山地（六甲山地，木曽山

脈，赤石山脈北部）の既報年代（末岡ほか，2010; Sueoka et al., 2012, 2017）と整合的な値を示した．したがって，本研究で行った簡易的な計算でも，より精緻な方法で推定された隆起速度-隆起開始年代-冷却年代の関係と大きな矛盾は生じなかったと言える．

モデル年代の結果をまとめると，ジルコンのFTおよび(U-Th)/He年代が部分的にでも若返るためには，約3 mm/yrを超える隆起速度が必要となる．アパタイトのFTおよび(U-Th)/He年代は，標高変化の有無や隆起開始年代にもよるが，隆起速度が0.3 mm/yrを超えたあたりから部分的に若返る可能性があり，1 mm/yrを超えると山地の隆起開始時期より新しい若い年代が出る可能性がある．

これらの隆起速度の推定結果は，隆起開始年代t_1に依存して大きな幅を示すが，一般にt_1が先行情報として利用できることは稀である．隣接する堆積盆への礫の供給開始年代などからt_1が制約されている場合（例えば，狩野，2002; 及川・和田，2004; 守屋ほか，2008），隆起速度をさらに狭い範囲に絞り込むことが可能である．

なお，モデルの開始年代t_0（岩体の形成年代に相当）は，今回試した3ケースでは結果にはほぼ影響しなかった．ただし，5 Maより若い岩体が分布する地域では，岩体貫入後の冷却と削剥による冷却が同時進行で起こるため，今回の結果をそのまま当てはめることはできない．このような若い岩体は，飛騨山脈の黒部地域（Ito et al., 2013）・滝谷地域（Sano et al., 2002）や谷川岳（Minami et al., 2021）などで報告されており，こういった地域では別途検討が必要である．

実データへの適用

以上の結果を踏まえ，低温熱年代データベース（Sueoka and Tagami, 2019）を用いて，本結果を日本全国の既報FTデータに適用し，数100万年スケールの隆起速度分布の制約を試みた．利用できる既報年代の組み合わせの都合上，各地点においてジルコンFT年代の値をモデル開始年代t_0として，アパタイトFT年代の若返りの程度から隆起速度を評価した．

その結果，現在の山地形成に関連した年代の若返りが期待できる，すなわち5 Maより若い年代が得られたのは日本アルプス，関東山地，谷川岳，飯豊山地などの地域となった．対照的に，若返りが期待できない（t_0の90%より古い年代が算出された）のは，北上山地北部，阿武隈山地，六甲山地，淡路島などであった．両者の中間で，部分的な若返りが期待できる地域には，飛騨高原，美濃高原，四国山地などが含まれた．

段丘から求められた10万年スケールの隆起速度分布（藤原ほか，2005）と比べると，概ね調和的な分布が得られたが，室戸岬・伊勢湾西岸・北陸など一部の地域では食い違いがみられた．この原因として，最近約50万年以内における隆起速度の変化や，段丘が形成・保存される条件に基づいたバイアス（例えば，Malatesta et al., 2023）などの影響が考えられる．

一方，ダム堆砂量や宇宙線生成核種法から推定された，数10〜数1000年スケールの侵食速度分布（原子力機構・電中研，2020）とは比較的整合的な分布を示した．このことは，短期間の侵食速度が地形量（起伏量，傾斜量など）と高い相関を示すこと，山地規模での起伏量や傾斜量は100万年スケールの隆起に応じて発達していることを考慮すると，妥当な結果なのかもしれない．

引用文献

Flowers, R.M. et al. (2009) Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 2347-2365.

藤原　治ほか (2005) 原子力バックエンド研究, 11, 113-124.

原子力機構・電中研 (2020) 平成３１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 報告書, 251p.

Herman, F. et al. (2013) Nature, 504, 423-426.

Ito, H. et al. (2013) Scientific Reports, 3, 1306.
狩野謙一 (2002) 地震研究所彙報, 77, 231-248.
Ketcham, R.A. (2005) Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 58, 275-314.
Ketcham, R.A. et al. (2007) American Mineralogist, 92, 799-810.
Malatesta, L.C. et al. (2023) Abst. AGU Fall Meeting.
Minami, S. et al. (2021) Earth, Planets and Space, 73, 231.
守屋俊治ほか (2008) 地質学雑誌, 114, 389-404.
中島　隆 (2018) 地質学雑誌, 124, 603-625.
Ohmori, H. (1978) Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo, 10, 31-85.
及川輝樹・和田　肇 (2004) 地質学雑誌, 110, 528-535.
Reiners, P.W. et al. (2004) Geochimica et Cosmochimica Acta, 68, 1857-1887.
Sano, Y. et al. (2002) Journal of Volcanology and Geothermal Research, 117, 285-296.
Schildgen, T.F. et al. (2018) Nature, 559, 89-93.
末岡　茂ほか (2010) 地学雑誌, 119, 84-101.
Sueoka, S. et al. (2012) Island Arc, 21, 32-52.
Sueoka, S. et al. (2016) Geoscience Frontiers, 7, 197-210.
Sueoka, S. et al. (2017) Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122, 6787-6810.
Sueoka, S. and Tagami, T. (2019) Island Arc, 28, e12305.
Willett, S.D. and Brandon, M.T. (2013) Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 14, 209-222.
Yamada, R. et al. (2007) Chemical Geology, 236, 75-91.
米倉伸之ほか編 (2001) 日本の地形1総説, 東大出版, 349p.

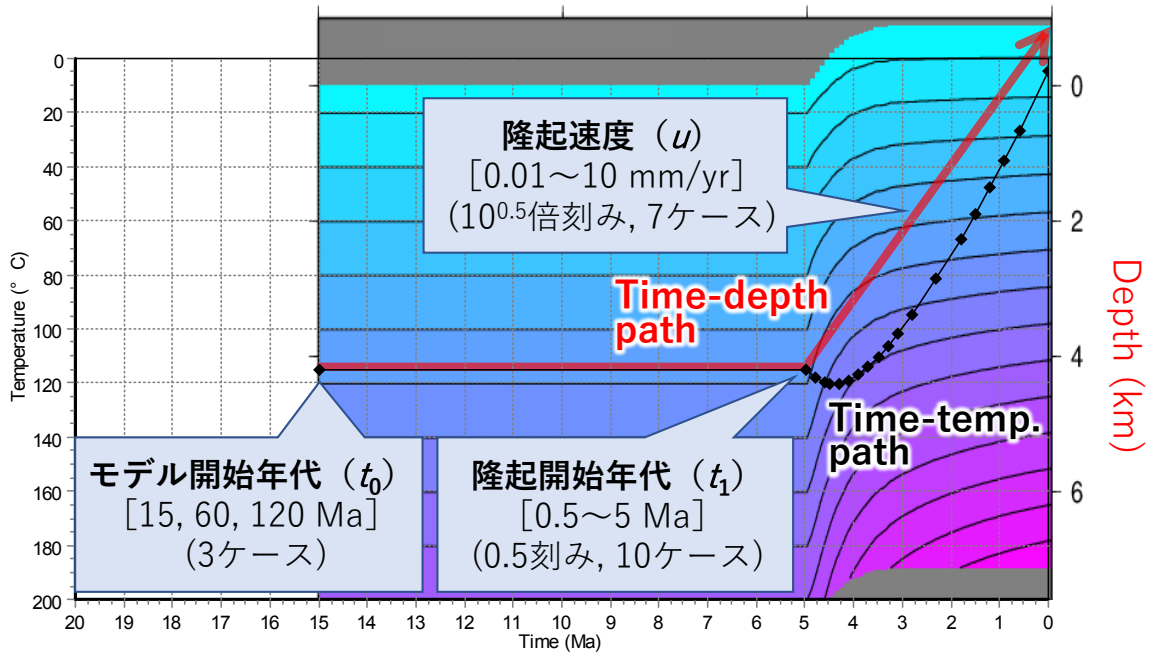

図1　温度-時間履歴の計算方法の概念図．Ohmori (1978) モデルにより標高を変化させた場合の例を示す．

Fig. 1 Conceptual diagram for calculations of time-temperature histories. This example incorporates elevation increase based on Ohmori (1978) model.

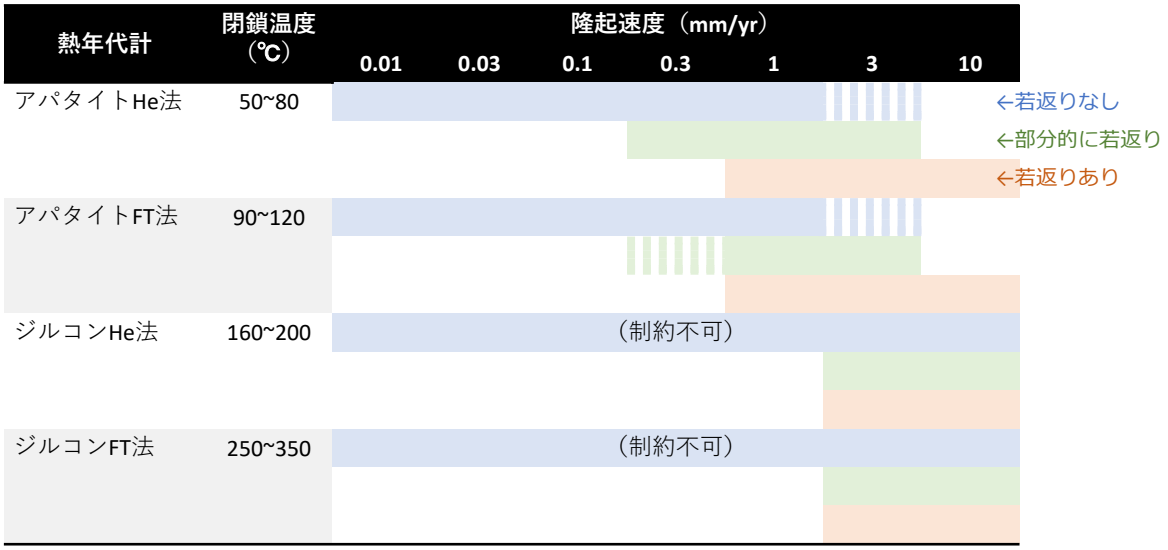

図2　冷却年代の若返りと隆起速度の関係．破線部は，標高変化の有無に依存して変化する．

Fig. 2 Relationships between reset of cooling ages and uplift rates. The dashed ranges changes depending on presence or absence of elevation change.

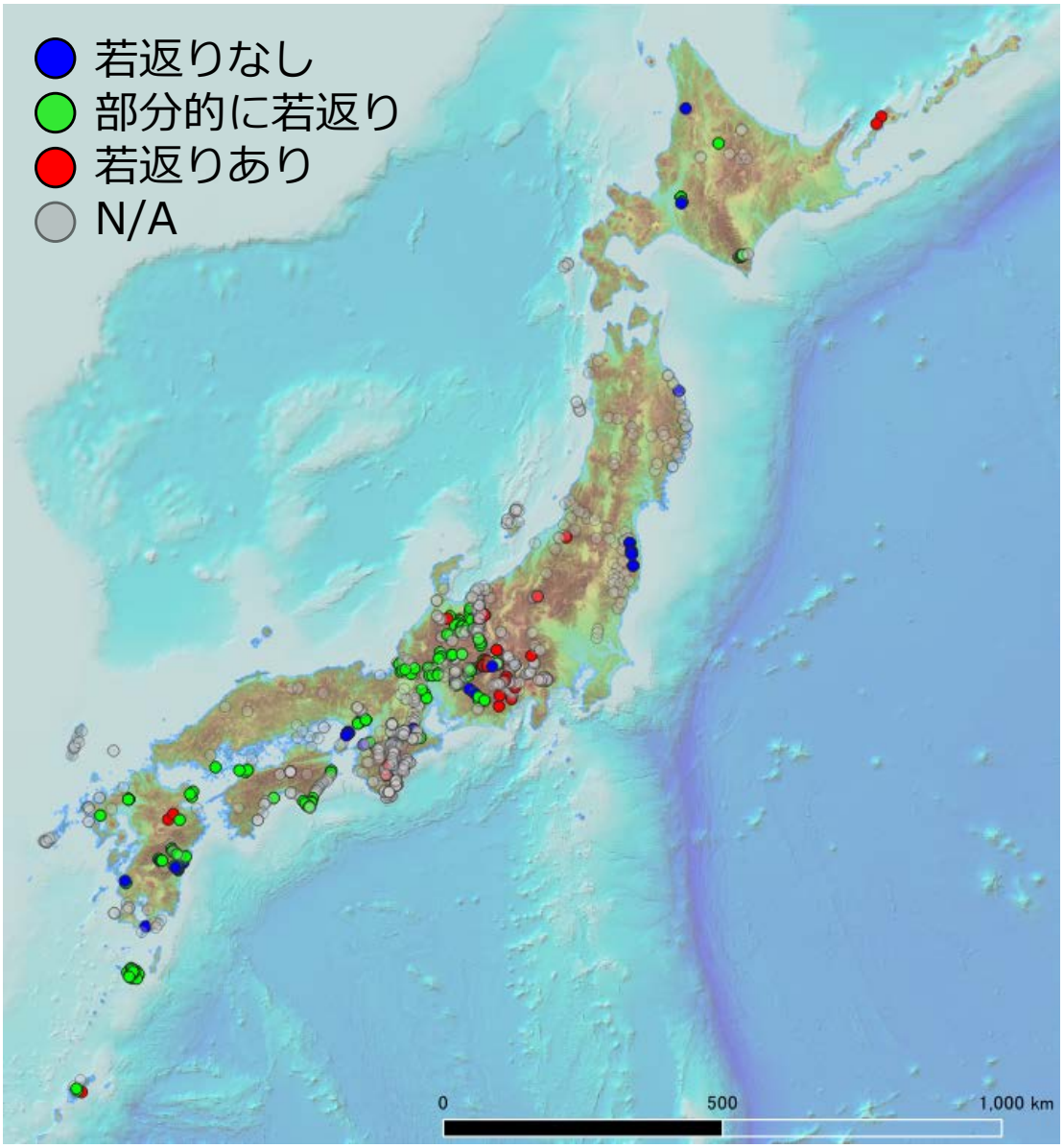

図3　アパタイトFT年代の若返りに基づいた隆起速度．N/Aはアパタイトとジルコンの FTのいずれかが未報告の地点．

Fig. 3　Uplift rates derived from apatite FT dates. N/A indicates sites where either apatite FT or zircon FT date is not available.