

1次元熱移流-拡散-生成方程式に基づく数値モデリングと 熱年代学を組み合わせた鮮新世谷川岳花崗岩類の高確度な削剥史 Highly accurate exhumation history combined thermochronology with 1D numerical modelling of heat advection-diffusion- production equation

南 沙樹^{*, **}・末岡 茂^{*}・Luca C. Malatesta^{***}・福田将眞^{*}・田上高広^{**}
Saki Minami ^{*, **}, Shigeru Sueoka^{*}, Luca C. Malatesta^{***},
Shima Fukuda ^{*} and Takahiro Tagami^{**}

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

** : 京都大学, Kyoto University

*** : GFZ 地球科学研究所, GFZ Helmholtz Centre for Geosciences

はじめに

花崗岩類は一般的に数 km 以深で固結するため、固結年代が若い花崗岩の露出地域では、極めて急速な隆起・削剥が期待される。実際、過去 500 万年以内に固結した花崗岩類は、活発な地震活動や火成活動で特徴づけられるプレート収束境界で報告されている (Harayama, 1992)。このような若い花崗岩は、激しい地殻変動に関連して露出したことが期待されるが、その高確度な削剥速度やプロセスに関する知見は十分ではない。

数百万年より長期の岩石の熱/削剥史を推定するには、一般に熱年代学的手法を用いる。この手法は、岩石の経験した冷却史を、適当な地温構造を仮定することで削剥史に読み替える (末岡・田上, 2019)。読み替えの前提条件には、(a) 冷却年代が削剥のみを反映して閉鎖温度を通過したこと、(b) 地温構造が数百万年スケールで一定であること、などが挙げられる。しかし、固結年代の若い花崗岩類の場合、貫入してから地表に露出するまでの時間が短いため、冷却年代は貫入～周囲の温度までの急冷を示す初期冷却および削剥による冷却の両方を反映している可能性がある (Murray et al.,

2019)。よって、単純に冷却速度から計算した削剥速度は、実際の速度よりも過大評価されている可能性がある。本研究では、複数の年代データがある谷川岳地域の鮮新世花崗岩類を事例として、貫入プルトンの冷却史を 1 次元熱数値モデリングによって生成し、複数の熱年代データと比較することで、高確度な削剥速度の推定を試みた。

適用地点

中部日本背弧域に位置する谷川岳地域には、主に後期中新世-鮮新世花崗岩類 (谷川岳花崗岩類; Minami et al., 2021) が露出する。我々の既往研究では、これらの花崗岩類の年代値を以下のように報告してきた：固結年代と解釈されるジルコン U-Pb 年代 (ZU-Pb: ~6.0-3.2 Ma)、冷却年代であるジルコン (U-Th)/He 年代 (ZHe: 3.3-2.6 Ma)、アパタイト (U-Th-Sm)/He 年代 (AHe: 3.3-1.0 Ma) (Minami et al., 2021; 南ほか, 2022)。本研究では、3 種類の年代データがそろっている、固結年代が ~3.3 Ma のプルトン 1 地点 (TNG20-10)、~4.0 Ma のプルトン 2 地点 (TNG21-B03: TNG20-05) にモデリング手法を適用した (Fig. 1)。年代値-閉

鎖温度をプロットから推定される冷却史によれば、TNG20-10およびTNG21-B03は、ZHe法の閉鎖温度に冷却して以降は、比較的一定の速度で冷却を受けている。一方でTNG20-05は、ZHe~AHe年代間に急冷傾向がある (Fig. 1)。

1次元熱モデリング

モデリング手法は、下記手順で実施した。まず、貫入プルトンの削剥史、定置深度、プルトンの厚みを仮定した。次に、1次元熱移流-拡散-生成方程式及び境界条件で記述される地温構造モデルに、これらの3つのパラメーターをインプットすることで、地温構造の経時変化をモデリングした。すなわち、地温構造は岩体の貫入により大きく擾乱され、やがて平衡状態に戻っていく。この変化する地温構造を用いて、上昇する岩石の削剥史を冷却史 (モデル冷却史) へと読み替えた。最後に、アウトプットされたモデル冷却史と既報年代の適合性を評価するために、Misfit値 (μ) を計算した:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{(t_i^{mod.} - t_i^{obs.})^2}{\Delta t_i^{obs.2}}}$$

$t_i^{mod.}$ はモデル冷却史と閉鎖温度から計算された年代、 $t_i^{obs.} \pm \Delta t_i^{obs.}$ は、既報年代と2 σ の誤差を示す。 $i=1, 2, 3$ はそれぞれ、ジルコンU-Pb, ZHe, AHe法に対応する。Misfit値が小さいほど、年代データに整合的なモデル冷却史であると言える。よって、Misfit値が小さいときのインプットパラメーター (削剥史、定置深度、プルトンの厚み) は、観測データとより整合的な、信頼できる値であることが期待される。本研究では、貫入以降の削剥速度が一定の場合 (一定削剥史) と、二段階で削剥速度が変化する場合 (2steps削剥史) の二通りを仮定し、高精度な削剥史を探索した。

結果

TNG20-10では、一定削剥史および、2steps削剥史をインプットすることで、

3種類すべての既報年代データに2 σ の誤差範囲内で整合的なモデル冷却史が生成できた (Fig. 2a)。Misfit値の小さい3つのパラメーターの組み合わせを探索するために作成したヒートマップを、一定削剥史の場合について示す (Figs. 2b-d)。その結果、削剥史と定置深度のヒートマップにおいて、Misfit値が顕著に小さくなる領域が認められた (Fig. 2b)。このことから、削剥史と定置深度が、岩石の冷却モデルを支配する主要なパラメーターであることが示唆される (Fig. 2b)。一方でプルトンの厚みは、様々な値をとりうる (Figs. 2c-d)。Misfit値が小さくなる上位3%中のパラメーターに含まれる削剥速度及び定置深度の組み合わせは、1.3-1.5 mm/yr, 4.0-5.0 kmであった (Figs. 2b, 3a)。2steps削剥史の上位3%は、(1)削剥速度が0.7-1.9 mm/yrで変化しなかった場合、または(2)貫入後0.1-1 Myr間の急速な削剥の後1.0-1.6 mm/yr程度の削剥を受けた場合であり、定置深度は4.0-7.0 km深度であった (Fig. 3a)。一定削剥史と2steps削剥史のいずれの場合でも、少なくとも、3 Ma以降は概ね一定の1.0-1.6 mm/yr程度で削剥されていることが明らかとなった (Fig. 3a)。

TNG21-B03では、TNG20-10と同様に、一定削剥史と2steps削剥史の両方において、2 σ の誤差範囲で既報年代に重なるモデル冷却史が得られた。その結果、少なくとも2.2 Ma以降は、0.7-1.1 mm/yrの一定速度で削剥されていることが明らかになった。

一方で、TNG20-05では、2steps削剥史をインプットしたときのみ、2 σ の誤差範囲で重なるモデル冷却史がアウトプットされた。Misfit値の小さい上位3%の削剥史を見ると、2-7 mm/yrの急速な削剥が貫入後1-2 Myr間続いたのち、0.2-0.4 mm/yrの速度で現在まで削剥された可能性が示唆された (Fig. 3b)。

2つの手法で推定された削剥速度の比較

TNG20-10について熱年代学的手法 (AHe年代, ZHe年代および現在の地温

勾配一定の仮定) および数値モデリングで推定された削剥速度を比較した。AHe年代を用いて推定された削剥速度 (1.2–1.6 mm/yr ; 南ほか, 2022) は, モデリングで推定された削剥速度 (1.0–1.6 mm/yr) と同程度である (Fig. 3a) . よって少なくとも 3.3 Ma の固結年代を持ち, 単調冷却されているサンプルでは, AHe年代は初期冷却を反映していないことが示唆される。一方で, ZHe年代の閉鎖深度は, モデリングで推定された削剥史よりも深い傾向を示す (Fig. 3a) . このことから, ZHe年代は初期冷却と削剥による冷却の双方の影響を受けている可能性が高い (Fig. 3a) . ゆえに, 本研究地域の場合, ZHe年代は削剥速度の推定には用いない方が妥当であると考えられる。

結論

本研究では, 谷川岳地域に露出する年代既知の鮮新世花崗岩類 3 地点を対象に, 1次元熱モデリングを実施することで, より信頼性の高い削剥速度の推定を試みた。その結果, 3.3 Ma プルトンと 4.0 Ma プルトンの 2 地点では, 少なくとも 2.2 Ma 以降に 0.7–1.6 mm/yr の速度で削剥されていることが明らかになった。また, 少なくとも 3.3 Ma より固結年代が古く, 単調冷却しているような貫入プルトンの AHe年代は, 削剥速度のみを反映した冷却年代であることが示唆された。年代データと熱モデリングを組み合わせた手法は, 若い花崗岩類のような, 熱史と削剥史の対応付けが容易ではない場合において, 冷却年代の解釈の高度化に有用だと考えられる。今後の展望としては, 花崗岩類の定置深度データを取得することで, より高精度な削剥速度推定に繋がることが期待される。

謝辞

本研究は, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2110 の支援を受け実施した。また, GFZ German Research Centre for Geosciences Potsdam においてリサーチアシスタントとして雇用いただき, 金銭的支援および研究遂行の機会を得た。ここに深く感謝申し上げます。

引用文献

- Harayama, S., 1992, Youngest exposed granitoid pluton on Earth: Cooling and rapid uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani Granodiorite in the Japan Alps, central Japan. *Geology*, **20**, 657-660.
- Minami, S., Nagata, M., Sueoka, S., Fukuda, S., Kajita, Y., Ogita, Y., Kagami, S., Yokoyama, T., Tagami, T., 2021, Two pulse intrusive events of the Pliocene Tanigawa-dake granites revealed from zircon U–Pb dating. *Earth, Planets, and Spaces*, **73**, 231.
- 南 沙樹・末岡 茂・福田将眞・長田充弘・Barry P. Kohn・横山立憲・鏡味沙耶・梶田侑弥・田上高広, 2022, 熱年代学的手法に基づく谷川岳地域の熱史・削剥史の推定. *フィッション・トラックニュースレター*, **35**, 22-26.
- Murray, K. E., Braun, J., Reiners, P. W., 2018, Toward robust interpretation of low-temperature thermochronometers in magmatic terranes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **19**, 3739-3763.
- 末岡 茂・田上高広, 2019, 低温領域の熱年代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへの応用. *地学雑誌*, **128**, 707-730.

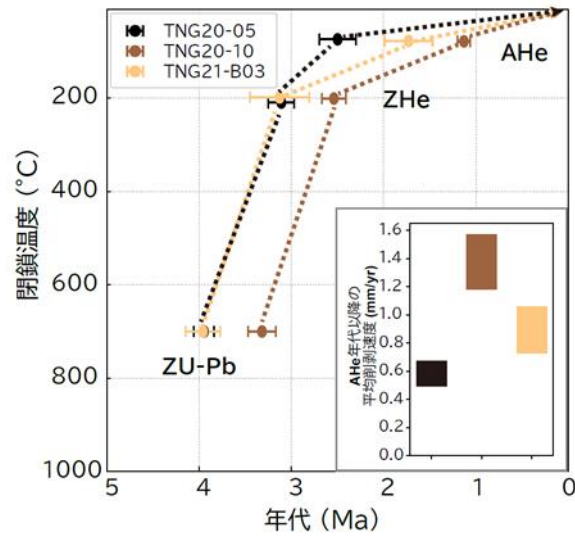


Fig. 1 冷却史および熱年代学的手法に基づく削剥速度。
年代データおよび平均削剥速度は Minami et al. (2021), 南ほか (2022) より引用。

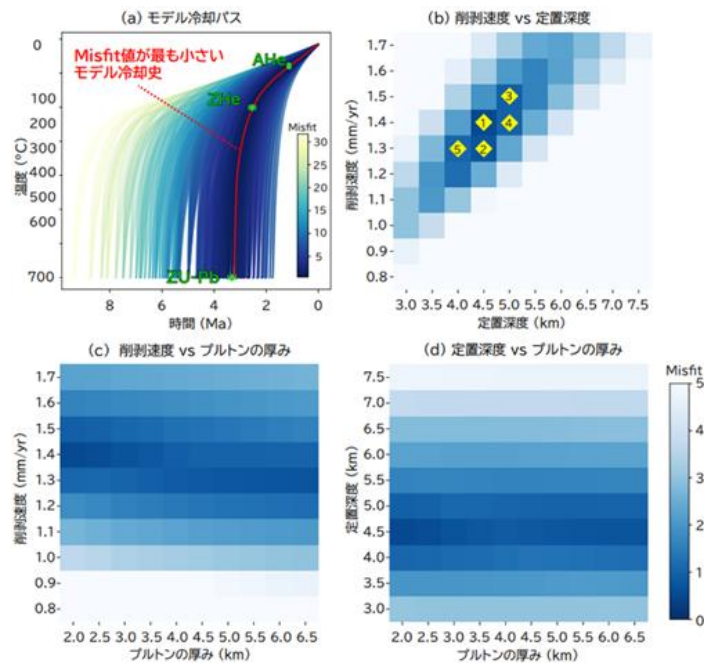


Fig. 2 一定削剥速度をインプットした場合のモデリング結果。
(a) モデル冷却パス。緑○で示される年代は、Minami et al. (2021), 南ほか (2022) より引用。
(b-d)各インプットパラメーターの組み合わせについてのヒートマップ。1つのセルに対して複数ある Misfit 値のうち、最小の値となる組み合わせを最前面に表示。
(b) 図中のダイヤと番号は、Misfit 値が小さい上位 3%のパラメーター中に含まれる削剥速度-定置深度の組み合わせを Misfit 値の小さい順に番号を付けた。

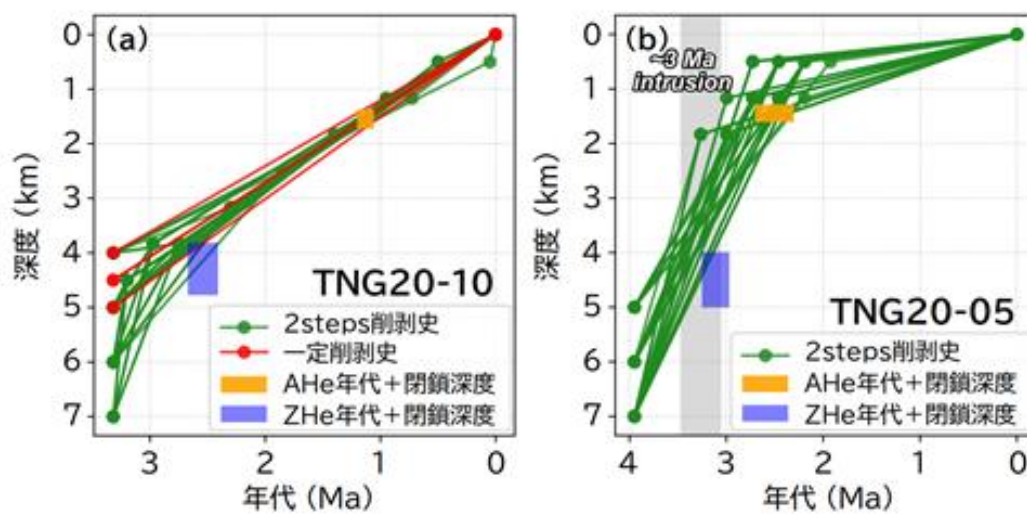


Fig. 3 2つの手法で推定された削剥速度の比較