

12 - 3 低温領域の熱年代学を用いた島弧山地の長時間スケール隆起 - 削剥史研究 Long-term uplift and exhumation histories of island arc mountains revealed by low-temperature thermochronology

田上 高広 (京都大学大学院理学研究科)

Takahiro Tagami (Graduate School of Science, Kyoto University)

1. はじめに

熱年代学とは、熱応答性の異なる放射年代測定法を組み合わせることで、岩石や地層の温度 - 時間履歴 (熱史) を推定する学問分野のことである。造山帯や山地から採取した岩石をこの方法を用いて分析することにより、山地の隆起 - 削剥によって地殻深部の岩石が (地表面に対して) 上昇し冷却される過程を復元できる。得られた熱史と試料採取地域の地温構造から、試料の経験した隆起 - 削剥過程が定量的に復元される。

1970年代に閉鎖温度の概念が定式化されて以降¹⁾、熱年代学を用いた解析はヨーロッパアルプスを始めとして世界の大山脈に広く適用され、造山運動の隆起 - 削剥過程が明らかにされてきた。同様の解析はニュージーランドなどの衝突型の島弧山地にも適用されてきたが、海洋プレートの沈み込みにより形成される島弧山地では一般に隆起 - 削剥速度が小さいため解析が困難であった。しかし近年、(U-Th)/He法の開発とフィッシュトラック (FT) 法の発展によって低温領域における熱史解析の精度が大きく向上し、島弧山地でも広く適用が進められている。

以下ではその概要を紹介するが、詳細は最新のレビュー論文を参照されたい²⁾。

2. 熱年代学の原理

放射年代測定では、親核種から娘核種への放射壊変速度とそれら核種の定量から、経過した地質時間を測ることができる。一般に、親核種は鉱物の結晶構造中に安定に存在するのに対し、娘核種は親核種とは異なる元素であるためより不安定であり、鉱物の融点よりはるかに低い温度でも熱拡散等によって散逸する場合がある。このため、高温で形成された岩石がゆっくり冷却してきた場合や、地層が形成後の埋没により続成作用・変成作用などを受けた場合には、得られた放射年代値が岩石・地層の形成時期ではなく、その後の冷却の時期や2次的温度上昇 (の後の冷却) の時期を反映することがある。そのような冷却する系において閉鎖温度の概念が定式化され、ある手法を用いて得られたある鉱物の年代値は、岩石の冷却曲線上において手法と鉱物の組み合わせに固有の閉鎖温度 (第1表) に対応する時刻 (閉鎖時刻) であることが示された¹⁾。従って、一つの岩石について閉鎖温度の異なる放射年代の手法・鉱物を組み合わせることで適用することにより、岩石の経験してきた熱史を定量的に復元することが可能になった。

3. 熱年代学による山地の隆起 - 削剥履歴の復元

造山運動などにより山地が隆起すると、表層部分が次第に削剥され、深部にあった岩石は地表面に近づき遂には露出する (第1図)。地温は深さとともに一定の割合で上昇するため、深部にあった岩石は山地の隆起 - 削剥に伴い、深部の高温状態から地表面の温度まで冷却されることになる。従って、熱年代データを用いて復元した岩石の熱史と、当該地域の地温勾配から、岩石が地表面に対して上昇し冷却される過程を定量的に復元できる (第2図)。山地から数多くの岩石を系統的に採取し熱年代学的に分析することにより、山地全体の隆起 - 削剥履歴が復元される。

4. 日本列島への応用

熱年代学による隆起 - 削剥履歴解析は、ヒマラヤ・アルプスなどの大山脈やニュージーランド・台湾などの衝突型島弧山地と共に、日本列島のような海洋プレートの沈み込みにより形成される島弧山地にも長年適用が試みられてきた。しかし、通常の島弧山地では一般に隆起 - 削剥速度が小さいため、1990年代までの手法では高精度の解析が困難であった。ところが、今世紀に入った頃から二つの重要な技術的・方法論的な新展開があり、低温領域における熱史解析の精度が大きく向上した。それが、(1) (U-Th)/He 法の見直しと低い閉鎖温度をもつ熱年代計としての発展、および (2) FT 法におけるトラック長分布データを用いた熱史逆解析の実用化である。特にこれらの手法をアパタイトに用いることにより、約 100°C またはそれ以下の温度領域において高精度の熱史解析が可能になってきた。

これを受けて、日本列島においてもまず丹沢山地に (U-Th)/He 法が適用され、若い山地の隆起 - 削剥履歴解析に初めて成功した³⁾。続いて、木曾山脈において FT 熱史逆解析も合わせて適用した結果、山脈東西断面における隆起 - 削剥過程の全容が初めて定量的に復元された (第3図)⁴⁾。これにより、木曾山脈の傾動隆起モデルや山麓断層帯の長期的な累積垂直変位量などについて多くの新知見がもたらされ、島弧山地の隆起 - 削剥履歴研究において世界をリードする新展開が開始された^{5) 6) 7) 8)}。現在、日本列島全域の熱年代マッピング⁹⁾を目指して、東北脊梁山脈、飛騨山脈、南部フォッサマグナ地域などで一連の国際共同研究が展開されている。上述の低温領域の熱年代学に加えて、光励起ルミネッセンス (OSL) 法、電子スピン共鳴 (ESR) 法などのさらに閉鎖温度の低い超低温熱年代計の開発と導入、また角閃石圧力計や河川地形解析、宇宙線照射核種分析などとの統合により、日本列島をはじめとする島弧山地の隆起 - 削剥履歴解析が今後さらに進むことが期待される。

参考文献

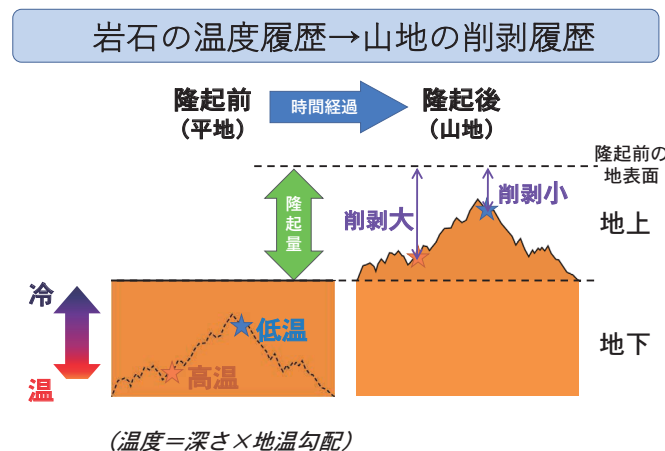
- 1) 末岡茂・田上高広 (2019): 低温領域の熱年代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへの応用。地学雑誌, **128**, 707-730.
- 2) Dodson, M.T. (1973): Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **40**, 259-274.
- 3) Yamada, K. and Tagami, T. (2008): Postcollisional exhumation history of the Tanzawa Tonalite Complex, inferred from (U-Th)/He thermochronology and fission track analysis. *Journal of Geophysical Research*, **113**, B03402, doi:10.1029/2007JB005368.
- 4) Sueoka, S., Kohn, B.P., Tagami, T., Tsutsumi, H., Hasebe, N., Tamura, A. and Arai, S. (2012): Denudation history of the Kiso Range, central Japan, and its tectonic implications: Constraints from low-temperature thermochronology. *Island Arc*, **21**, 32-52.
- 5) Sueoka, S., Tsutsumi, H. and Tagami, T. (2016): New approach to resolve the amount of Quaternary uplift and associated denudation of the mountain ranges in the Japanese Islands. *Geoscience Frontiers*, **7**, 197-210.
- 6) Sueoka, S., Ikeda, Y., Kano, K., Tsutsumi, H., Tagami, T., Kohn, B.P., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S. and Shibata, K. (2017a): Uplift and denudation history of the Akaishi Range, a thrust block formed by arc-arc collision in central Japan: Insights from low-temperature thermochronometry and thermokinematic modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **122**, 6787-6810,

doi:10.1002/2017JB014320.

- 7) Sueoka, S., Tagami, T. and Kohn, B.P. (2017b): First report of (U–Th)/He thermochronometric data across Northeast Japan Arc: implications for the longterm inelastic deformation. *Earth, Planets and Space*, **69**, 79, doi:10.1186/s40623-017-0661-z.
- 8) Fukuda, S., Sueoka, S., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S. and Tagami, T. (2019): Thermal history analysis of granitic rocks in an arc-trench system based on apatite fission-track thermochronology: A case study of the Northeast Japan Arc. *Journal of Asian Earth Sciences: X*, **1**, 100005, doi:10.1016/j.jaesx.2019.100005.
- 9) Sueoka, S. and Tagami, T. (2019): Low-temperature thermochronological database of bedrock in the Japanese Islands. *Island Arc*, in press.

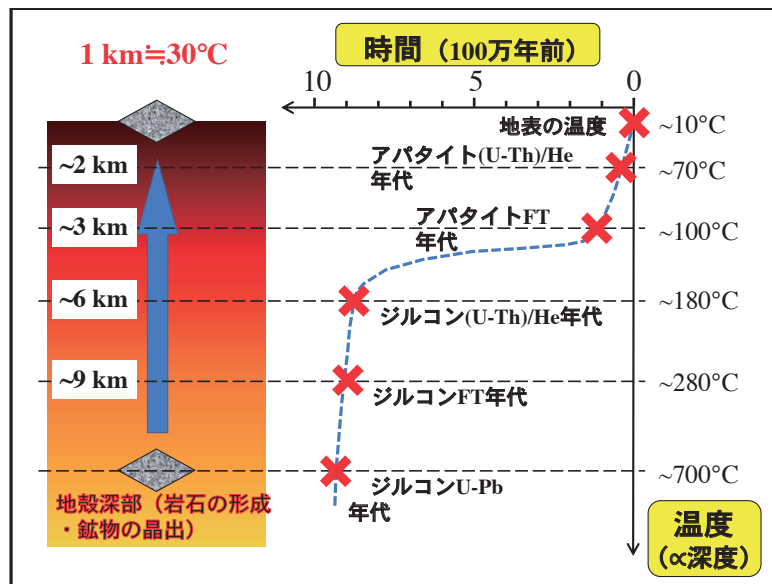
表1 地質学的時間スケールでの放射年代測定法の閉鎖温度
Table 1 Closure temperatures of radiometric dating methods at geological timescale

年代測定法	鉱物	閉鎖温度 (°C)
U-Pb	zircon	>900
	monazite	~700
Rb-Sr	whole rock	Crystallization
	muscovite	450-550
	biotite	280-360
40Ar/39Ar (K-Ar)	hornblende	400-600
	muscovite	~425
	biotite	350-400
	K-feldspar	150-350
Fission track	zircon	~280
	apatite	90 -120
(U-Th)/He	zircon	160-200
	apatite	50 - 80

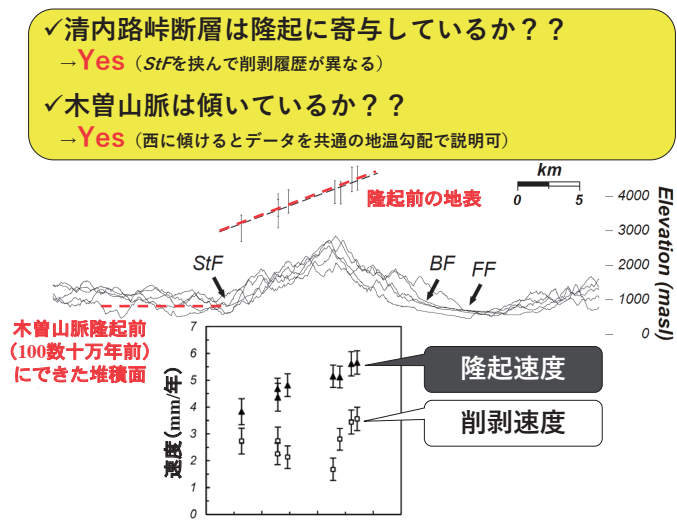


第1図 岩石の熱史（温度履歴）から山地の隆起・削剥史を復元する概念図
標高の高い地点の方が、総削剥量は小さく、隆起前の古地温は低いことがわかる。

Figure 1 Schematic diagram of reconstructing the uplift-denudation history of a mountain range using rock's thermal history. The locality of rock sampling at higher altitude (blue star) represents a smaller amount of total denudation and lower paleotemperature prior to the onset of uplift.



第2図 閉鎖温度の異なる様々な熱年代計（手法・鉱物）を組み合わせると同一の岩石を分析することにより、その岩石の熱史と隆起・削剥史を復元する概念図
 Figure 2 Schematic diagram of reconstructing the thermal and uplift-denudation history of a rock sample by combining a series of thermochronometers having a wide range of closure temperatures.



第3図 低温領域の熱年代データの解析結果に、既報の地質学・地形学的な情報を加味し、木曾山脈形成に伴う平均的な隆起・削剥速度が推定された⁴⁾。山脈西縁の断層（清内路峠断層）が隆起に寄与したことで、山脈全体が西に傾動しながら隆起したことも明らかになった。
 Figure 3 Average uplift and denudation rates of the Kiso Range at a geological timescale were estimated from low-temperature thermochronologic data coupled with geological and geomorphological constraints.⁴⁾ It suggests that the fault at the western edge of the Range (i.e., Seinaijitoge fault) contributed to the uplift-denudation, and that the entire Range has uplifted along with a westward tilting.