

熱年代学的手法による、ネパールヒマラヤに分布する 高度変成岩ナップの冷却プロセスの解明

中嶋 徹*・岩野英樹**・檀原 徹**・酒井治孝*

Cooling process of the high-grade metamorphic nappe
in eastern Nepal revealed by thermochronological study
Toru Nakajima*, Hideki Iwano**, Tohru Danhara** and Harutaka Sakai**

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学地質学鉱物学教室, Geology and Mineralogy,
Department of Earth and Planetary Science, Kyoto University

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

はじめに

ヒマラヤ山脈は50Maに始まったインド亜大陸とアジア大陸の衝突により形成された衝突型の造山帯である。ネパールヒマラヤでは過去30年間、数100~1000万年スケールでの山脈の削剥史を明らかにする目的で多くの熱年代学的研究が行われてきた。先行研究では年代一標高測線や山脈を横断する南北測線上の熱年代分布に基づき、山脈の上部地殻の削剥プロセスにおいてテクトニックな営力が支配的であることや、南北測線上で地域ごとに削剥速度が大きく異なることが明らかにされた(Arita and Ganzawa, 1997; Blythe *et al.*, 2007; Robert *et al.*, 2009)。一方、提示された年代データの解釈として複数の全く異なったtectono-thermalモデルが提唱されており、統一的な熱年代データの解釈には至っていない(Herman *et al.*, 2010; Robert *et al.*, 2009; Sakai, 2015)。これは報告されたデータセットが散点的な熱年代値であり、議論の時間分解能の向上が難しいことに起因する。

本研究の目的は東ネパールの高度変成岩ナップと下位の堆積岩類の詳細な冷却史を解明し、東ネパールの上部地殻の削剥プロセスの描像として適当なtectono-thermalモデルを明らかにすることである。東ネパールには柘榴石-藍晶石(珪線石)片麻岩で構成される高度変成岩ナ

ップが分布し、下位の堆積岩を南北幅約100 kmにわたりカバーしている(Figure 1)。本研究では高度変成岩ナップの先端からルートゾーンに至る南北測線上で採取した岩石試料について、ジルコン、アパタイトのフィッション・トラック(ZFT/AFT)年代測定とZFT/AFT長測定を行った。また、それらのデータを元に熱史逆解析を行い、350 °C以下の温度領域における温度-時間履歴を高精度で制約した。

FT年代測定

高度変成岩ナップと堆積岩類から採取された岩石試料についてLA-ICP-MSを用いたFT年代測定(Hasebe *et al.*, 2004; Iwano *et al.*, 2020)を行い、19試料のZFT年代、12試料のAFT年代を得た(Figure1, 2b)。

ZFT年代は高度変成岩ナップ先端部で11-10 Maであり、北方に向け徐々に若くなり、ルートゾーンで 5.1 ± 0.3 Maと最も若くなる。AFT年代は最前縁部の若い年代値(4.1 ± 0.4 Ma)を除けば同様に北方に徐々に若くなる年代分布を示す。高度変成岩ナップのルートゾーンで報告されたZFT/AFT年代(4.6 ± 0.4 Ma, 2.4 ± 0.3 Ma; Larson *et al.*, 2017; Sakai *et al.*, 2013)と比較すると、ZFT/AFT年代はいずれも大局的には顕著な北方若年化の年代分布を示す。また下位の堆積岩

との間でZFT/AFT年代の顕著なギャップは認められない。これらの結果は、高度変成岩ナップが約11 Maに定置した後、下位の堆積岩類と一体となって、先端からルートゾーンへ向け冷却したことを示唆する。同様のZFT/AFT年代パターンはネパール各地の高度変成岩ナップや下位の堆積岩類からも報告されており (Nakajima *et al.*, 2020a, b; van der Beek *et al.*, 2016), 高度変成岩ナップと下位の堆積岩の北方冷却は広域的に認められる。

熱史逆解析による温度—時間履歴の制約

高度変成岩ナップの片麻岩試料8個についてZFT/AFT長測定を行った。またFTアニーリング関数を用いたFT年代とFT長データの逆計算を行い、各試料の350°C以下の温度—時間履歴を制約した。逆計算にはHeFTy ver1.9.3 (Ketcham, 2005) を用いた。

8つの試料のt-T pathはいずれも急冷 (>100°C/Myr) と徐冷 (<50°C/Myr) を繰り返しながら冷却する曲線を示す (Figure3)。特に高度変成岩ナップ中央部の試料 (曲線3-7) については徐冷ステージと急冷ステージが明確に識別される。またナップ先端部からroot zoneの試料にかけて、急冷ステージの時期が徐々に若くなる傾向も見られる。最も前縁の試料 (曲線1) では第四紀以降の急冷も検出された。

これらの冷却曲線の形状や、急冷ステージの年代の変化、最前縁部の第四紀の急冷といった温度—時間履歴の特徴は、複数のスラストの活動を想定したDuplex model (Herman *et al.*, 2010; McQuarrie and Ehlers, 2015)ではなく、単一のスラストの活動に伴い上部地殻が上昇・削剝を受けた場合に得られる冷却曲線のパターンとよく一致する (Robert *et al.*, 2009; Coutand *et al.*, 2014), 即ち、ネパールヒマラヤの熱年代分布や削剝速度分布は、インドアジアプレート境界断層の活動とその形状を強く反映している可能性が高い。

今後、高度変成岩ナップの先端部、中央部、ルートゾーンそれぞれの地域のデータを緻密化

し、高度変成岩ナップと下位の堆積岩類の三次元的な冷却過程をより詳細に明らかにすることで、延性剪断帯における熱水活動やアウトオブシーケンススラストの活動が及ぼす影響を検討する必要がある。また、地殻の熱輸送モデルを用いた冷却曲線の逆計算により、プレート境界断層の形状や変位速度、地温勾配の時間変化を定量的に議論することが可能になると期待される。

謝辞

Melborne大学のBarry Kohn教授には、アパタイトFT長測定の前処理として²⁵²Cf照射処理をしていただいた。

引用文献

- Arita, K. and Ganzawa, Y., 1997. Trust Tectonics and Uplift Process of the Nepal Himalaya Revealed from Fission-Track Ages: *Journal of Geology*, **106**, p. 156–167.
- Van der Beek, P., Litty, C., Baudin, M., Mercier, J., Robert, X. and Hardwick, E., 2016. Contrasting tectonically driven exhumation and incision patterns, western versus central Nepal Himalaya: *Geology*, **44**, p. 327–330, doi: 10.1130/G37579.1.
- Blythe, A.E., Burbank, D.W., Carter, A., Schmidt, K. and Putkonen, J., 2007. Plio-Quaternary exhumation history of the central Nepalese Himalaya: 1. Apatite and zircon fission track and apatite [U-Th]/He analyses: *Tectonics*, **26**, p. 1–16, doi: 10.1029/2006TC001990.
- Coutand, I., Whipp, D.M., Grujic, D., Bernet, M., Felling, M.G., Bookhagen, B., Landry, K.R., Ghalley, S.K. and Duncan, C., 2014. Geometry and kinematics of the Main Himalayan

- Thrust and Neogene crustal exhumation in the Bhutanese Himalaya derived from inversion of multithermochronologic data: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, p. 1446–1481, doi: 10.1002/2013JB010891. Received.
- Hasebe, N., Barbarand, J., Jarvis, K., Carter, A. and Hurford, A.J., 2004. Apatite fission-track chronometry using laser ablation ICP-MS: *Chemical Geology*, **207**, p. 135–145, doi: 10.1016/j.chemgeo.2004.01.007.
- Herman, F., Copeland, P., Avouac, J.P., Bollinger, L., Maheo, G., Le Fort, P., Rai, S.M., Foster, D., Pecher, A., Stuwe, K. and Henry, P., 2010. Exhumation, crustal deformation, and thermal structure of the Nepal Himalaya derived from the inversion of thermochronological and thermobarometric data and modeling of the topography: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **115**, p. 1–38, doi: 10.1029/2008JB006126.
- Iwano, H., Danhara, T., Danhara, Y., Hirabayashi, S., Nakajima, T., Sakai, H. and Hirata, T., 2020. Zircon fission-track and U-Pb double dating using femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry: a technical note: *Island Arc*, doi: 10.1111/iar.12348.
- Ketcham, R.A., 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **58**, p. 275–314, doi: 10.2138/rmg.2005.58.11.
- Larson, K.P., Camacho, A., Cottle, J.M., Coutand, I., Buckingham, H.M., Ambrose, T.K. and Rai, S.M., 2017. Cooling, exhumation, and kinematics of the Kanchenjunga Himal, far east Nepal: *Tectonics*, **36**, p. 1037–1052, doi: 10.1002/2017TC004496.
- McQuarrie, N. and Ehlers, T.A., 2015. Influence of thrust belt geometry and shortening rate on thermochronometer cooling ages: Insights from thermokinematic and erosion modeling of the Bhutan Himalaya: *Tectonics*, **34**, p. 1055–1079, doi: 10.1002/2014TC003783.
- Nakajima, T., Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2020a. Northward cooling of the Kuncha nappe and downward heating of the Lesser Himalayan autochthon distributed to the south of Mt. Annapurna, western central Nepal: *Island Arc*, doi: 10.1111/iar.12349.
- Nakajima, T., Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2020b. Northward younging zircon fission-track ages from 13 to 2 Ma in the eastern extension of the Kathmandu nappe and underlying Lesser Himalayan sediments distributed to the south of Mt. Everest: *Island Arc*, **29**, p. 1–18, doi: 10.1111/iar.12352.
- Robert, X., van der Beek, P., Braun, J., Perry, C., Dubille, M. and Mugnier, J.L., 2009. Assessing quaternary reactivation of the Main Central thrust zone (central Nepal Himalaya): New thermochronologic data and numerical modeling: *Geology*, **37**, p. 731–734, doi: 10.1130/G25736A.1.
- Sakai, H., Iwano, H., Danhara, T., Takigami, Y., Rai, S.M., Upreti, B.N. and Hirata, T., 2013. Rift-related origin of the paleoproterozoic kuncha formation, and cooling history of the kuncha nappe

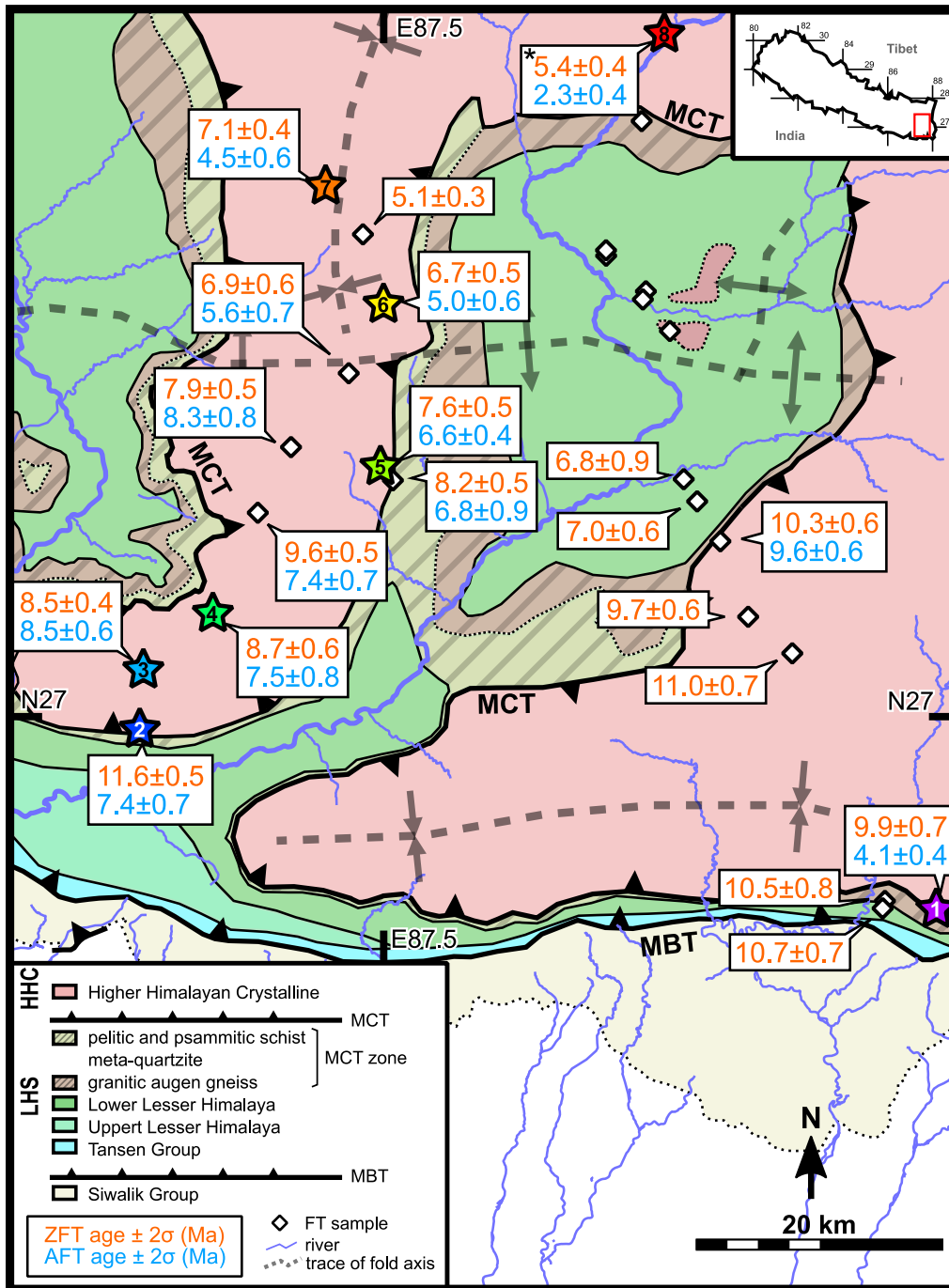


Figure 1 Geotectonic map of eastern Nepal modified after Sakai *et al.* (2013a) and the Department of Minerals and Geology (unpublished report). The ZFT and AFT ages by the present study are also shown. *FT data from Sakai *et al.* (2013a) were used for thermochronological inversion.

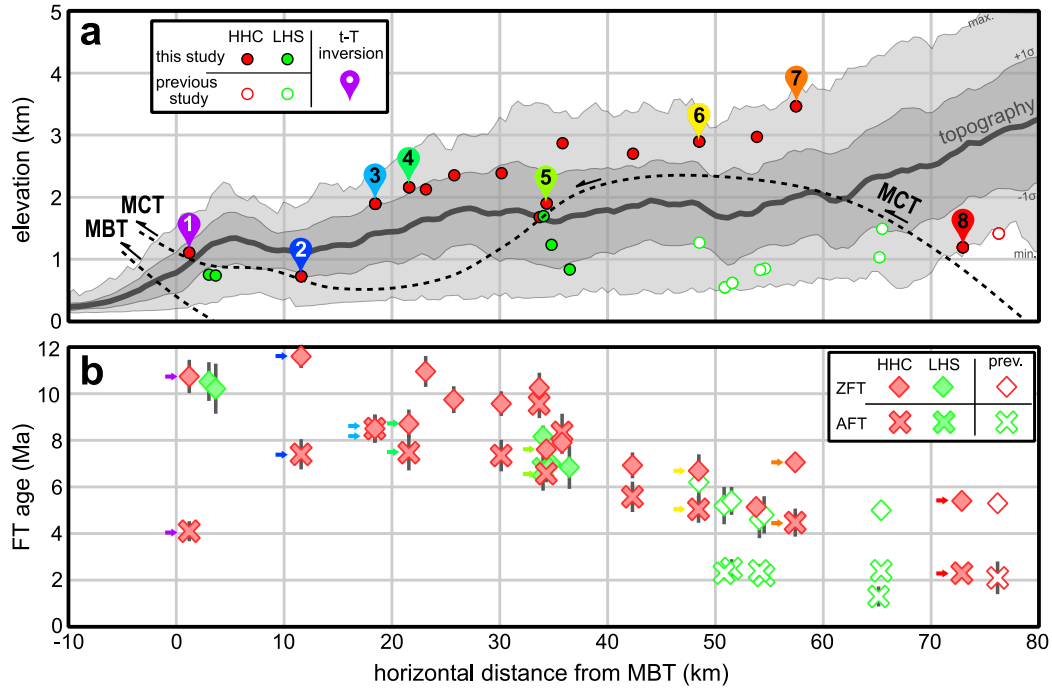


Figure 2 (a) The average topography of the N-S section of eastern Nepal. The approximate positions of major faults are represented by the dotted line. (b) The N-S distribution of the ZFT and AFT ages reported by the present study, Larson *et al.* (2017), and Sakai *et al.* (2013a). The horizontal axis of the diagram is corresponding to the topography shown in (a).

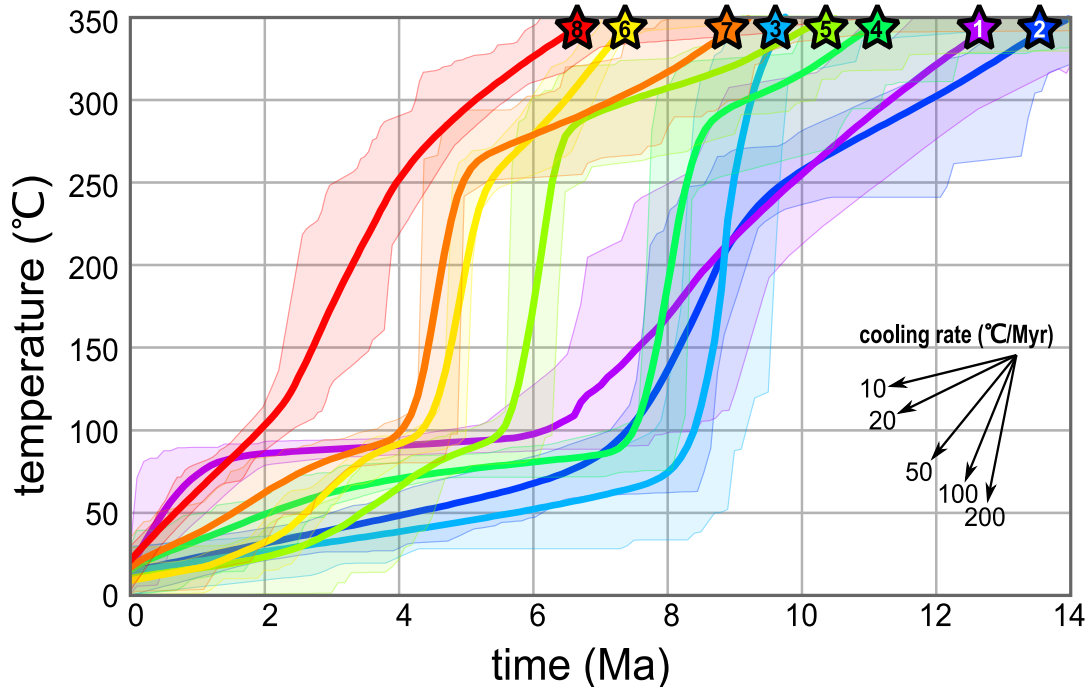


Figure 3 Thermochronological inversions showing t-T paths created by HeFTy ver1.9.3 (Ketcham, 2005). The color of 8 t-T paths corresponded to the sample location shown in Figures 1 and 2a. The solid line represents the weighted mean path. The transparent filled represents the area where the P-value is larger than 0.5.