

**アパタイトFT法に基づいた東北日本弧における隆起・削剥史の推定：
島弧山地形成過程の解明を目指して**

福田将真*・末岡 茂**・長谷部徳子***・田村明弘***・
荒井章司***・田上高広*

**Estimation of uplift/denudation history of NE Japan Arc based on
the apatite fission-track (AFT) method: Toward understanding of
the mountain building process in an island arc**

Shoma Fukuda*, Shigeru Sueoka**, Noriko Hasebe***, Akihiro Tamura***,
Shoji Arai*** and Takahiro Tagami*

* 京都大学, Kyoto University

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

*** 金沢大学, Kanazawa University

はじめに

本研究は、典型的な島弧地形を有する東北日本弧の山地を対象とし、その形成史を定量的に明らかにすることを目的としている。東北日本弧に分布する山地は海溝に平行な地形配列であり、これらは3 Ma以降のプレートの沈み込みに伴う東西圧縮応力場を主因として形成されたと考えられている(Sato, 1994; Nakajima, 2013)。これまで、地形・地質学的な検討によって、東北日本弧の山地形成史や隆起イベントが解明されつつあるが、山地の隆起・削剥に関する定量的研究は数が限られるのが現状である。

近年の低温領域の熱年代学の発展により、日本列島の比較的若く小規模な山地の隆起・削剥史の推定が可能となってきた(末岡ほか, 2015; Sueoka, et al., 2016)。このような背景から、Sueoka et al. (2017)は東北日本弧の南部に分布する阿武隈山地(前弧側)～奥羽脊梁山地～朝日山地(背弧側)を対象に、初めて(U-Th)/He法(He法)を適用し、島弧横断方向には熱史および削剥史のコントラストが存在することを明らかにした。今回はSueoka et al. (2017)でHe分析に使用された同一試料(白亜紀～古第三紀の花崗岩類試料)を用い、アパタイトフィッション・トラック

(AFT)法による年代測定とFT長の測定および、これらに基づいた熱史逆解析を計算ソフトHeFTy (Ketcham, 2005)を用いて実施し、削剥速度を計算した。これらの結果と地質学的意義を報告する。

熱史逆解析

熱史逆解析から推定される東北日本南部の最終冷却時期をFigure 1に示す。前弧側では年代値も古く、基本的に徐冷パターンだが、40～30 Ma頃に若干の変曲点が見られた。奥羽脊梁山地では、山地の中央に向かうにつれて急冷時期が新しくなる傾向が推定され、最も新しい地点で1 Maを切る値が得られた。背弧側では、朝日・飯豊山地の中心部で3～1 Ma前後の最終冷却が推定された。このように各構成单元内でも最終冷却の時期は異なり、3～2 Ma以降の東西圧縮(e.g., Nakajima, 2013)の影響は、空間的な不均質が存在することが示唆された。

削剥速度と考察

熱史逆解析から推定される最終冷却時期の温度や年代、地温勾配のデータベース(田中ほか, 2004; 産総研, 2009)を用いて、削剥速度を計算した(Figure 2)。

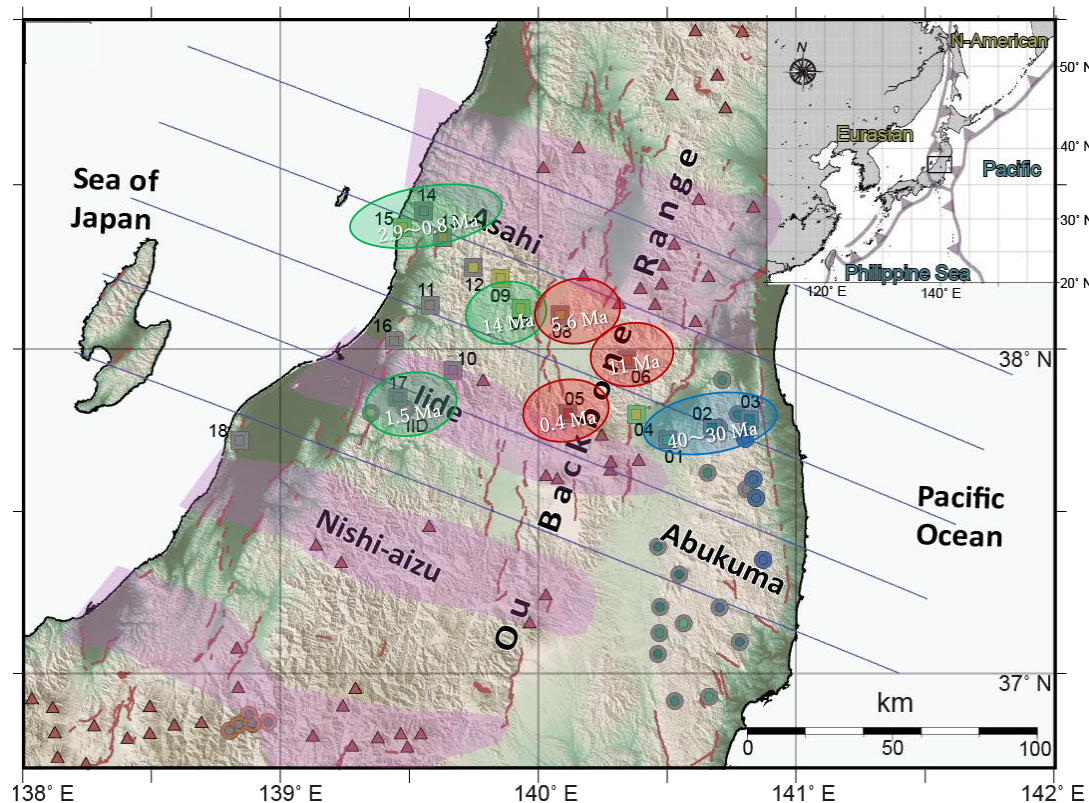


Figure 1. Last cooling episodes estimated from thermal inverse modeling using HeFTy in NE Japan Arc.

前弧側では新生代を通じて安定的な削剥環境にあり、アパタイトHe (AHe) 年代から求めた削剥速度 (Sueoka et al., 2017) とも整合的な < 0.05 mm/yr と比較的小さな値となった。しかしこの値は、海成段丘面の高度分布 (Suzuki, 1989) や宇宙線生成核種 (e.g., Shiroya et al., 2010; Regalla et al., 2013) など、比較的短いタイムスケール ($\sim 10^5$ yr) を対象とした地形学的手法から推定される隆起・削剥速度と比較して一桁小さい。このギャップは、古第三紀を通じて比較的安定的な削剥環境であった前弧側が、第四紀後期に入って隆起・削剥が加速したことに起因すると推察される。つまり、熱年代学から推定される削剥速度は、隆起・削剥が加速する前までの安定的な削剥環境を含む平均値であり、最終冷却からの削剥量は熱年代で検出できる削剥量 (約 2 km) に満たないものと考えられる。これらの考察は、阿武隈山地に広く分布する隆起準平原 (木村, 1994) や、鮮新世末に隆起を開始したとする指摘 (太田ほか, 2010) から支持される。

奥羽脊梁山地では、地点によって値に幅はあるが、AHe 年代から計算した削剥速度 (Sueoka et al., 2017) とも整合的な $0.1 \sim$ 数 mm/yr の比較的大きな削剥速度が得られた。この値は、河成段丘による第四紀後期の隆起速度 (厳密には、やや北方の地点: 田力 池田, 2005) や、高度分散量を用いた短期間の削剥速度 (藤原ほか, 1999) とも調和的な値であり、第四紀の東西圧縮によって急激な隆起・削剥を被ったことが示唆される。ただし、最終冷却時期や年代の空間分布は、先行研究で指摘されるような逆断層による傾動 pop-up モデル (e.g., Nakajima, 2013) では説明できず、むしろ山地の中心に向かって最終冷却時期が新しくなる傾向が見えてきた。

背弧側では、 $0.1 \sim 2.0$ mm/yr 程度の削剥速度が得られ、海成・河成段丘の分布高度から求められた隆起速度 (伊倉 太田, 2003; 宮内ほか, 2004) や、高度分散量を利用した削剥速度 (藤原ほか 1999) と整合的である。その一方で、同じ試料を用いた AHe 年代による削剥速

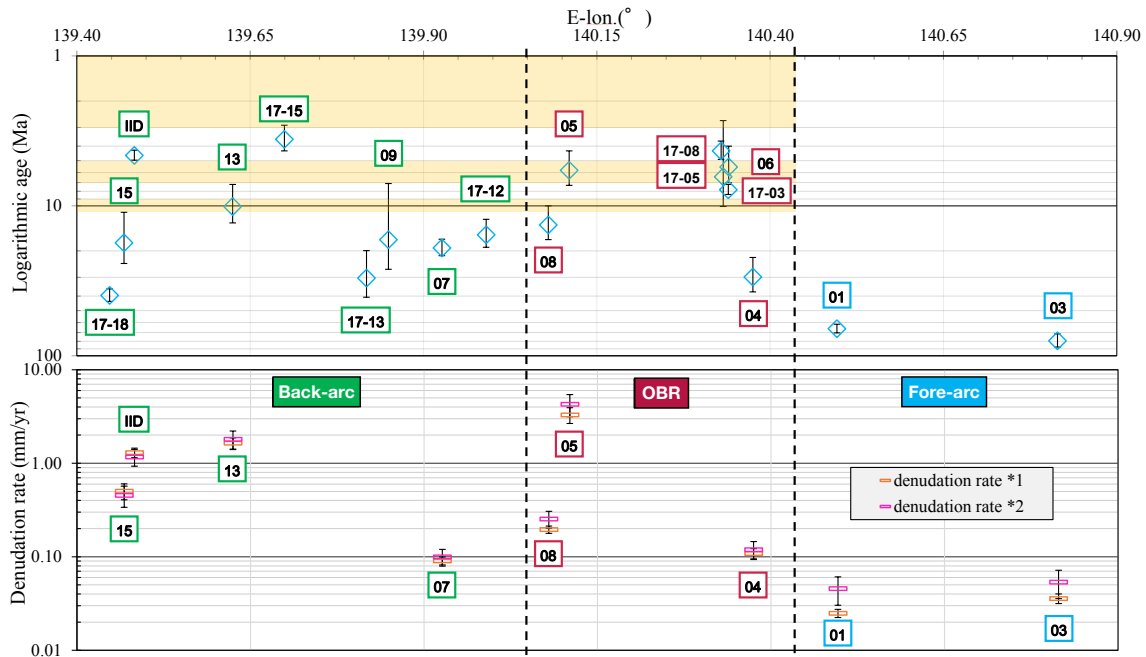


Figure 2. Previous and newer AFT ages, and denudation rates on S-profile. All error bars show 1 SE. Number boxes below the symbols indicate sampling codes skipped “A02-ST” or “A02-FST”. Uplift events at 3–1 Ma, 7–5 Ma, 12–9 Ma were plotted after Moriya et al. (2008) and Nakajima (2013) in the upper figure. In lower figure, *1: calculated using the data of Tanaka et al. (2004); *2: calculated using the data of AIST (2009).

度とは、誤差範囲を考慮しても一致しない地点が見られる。これは、冷却開始時の古地温がAHe法のPartial Retention Zone (PRZ) 内を始点としたため、冷却時期より古い見かけ年代が得られた可能性が考えられる。また、背弧側のテクトニクスモデルとして、Sato (1994) やAcocella et al. (2008)は、5~3.5 Maに背弧側で著しく変形し、その後2~1 Maに変形場が遷移するモデルを提唱した。しかし、最終冷却時期が奥羽脊梁山地と同様の時期である (Figure 1) ため、従来のモデルとは異なる結果となった。

高空間分解能の熱年代マッピング：予察

これまで述べてきたように、奥羽脊梁山地と背弧側では、熱年代学的な検討によって、先行研究との相違点が明らかになってきた。そこで筆者らは、さらに稠密な熱年代マッピングを行うことにより、隆起モデルやテクトニクスモデルを制約可能であると考え、奥羽脊梁山地と背弧側を対象に、新たにAFT分析を実施した。

予察的な結果ではあるが、奥羽脊梁山地では

7.8~4.3 Ma、背弧側では 39.6~3.6 MaといったAFT年代が得られた (Figure 2)。これまでに得られているAFT年代や熱史逆解析結果と総合すると山地の中心部でより急速な剝削が推定され (Figure 2)、奥羽脊梁山地ではNakajima (2013) などが指摘するような逆断層による傾動pop-upモデルよりむしろ、Hasegawa et al. (2005) から推定されるドーム状の隆起形態という推定を補強する結果となった (c.f. 末岡ほか, 2015のFig. 12)。背弧側では、奥羽脊梁山地での変形と同時期と思われるような比較的若いAFT年代が得られ、Sato (1994) やAcocella et al. (2008) のモデルを再検討する必要性が示唆される結果となった。

ただし、これらの結果は、あくまでも見かけAFT年代にのみ依存して推定した結果であることに注意したい。今後はトラック長の測定と熱史逆解析を行うことで、より高精度な熱史の推定を目指す予定である。また、He法やZFT法などの複数の熱年代計の適用も課題である。

謝辞

本研究は、平成26年～30年科学研究費補助金助成事業（新学術領域研究 地殻ダイナミクス A02：変形班 異なる時空間スケールにおける日本列島の変形場の解明 代表：鷲谷 威）の助成を受けた。また、（株）京都フィッシュン・トラックには、鉱物分離を実施していただいた。Melbourne大学のBarry Kohn教授には、アパタイト試料のFT長測定のために、²⁵²Cf照射処理を実施していただいた。

引用文献

- Acocella, V. et al., 2008. Structural control on late Miocene to Quaternary volcanism in the NE Honshu arc, Japan. *Tectonics* 27, 1–24.
- 藤原 治ほか, 1999. 日本列島における侵食速度の分布. サイクル機構技報, 5, 85–93.
- 地質調査総合センター 2009. 全国地熱ポテンシャルマップ. 数値地質図, GT-4
- Hasegawa, K., Wakamatsu, K., Matsuoka, M., 2005. Mapping of Potential Erosion-Rate Evaluated from Reservoir Sedimentation in Japan. *Japan Soc. Nat. Disaster Sci.* 24, 287–301.
- 伊倉 久美子, 太田 陽子, 2003. 朝日山地西縁の完新世海成段丘と地殻変動. *地学雑誌*. 112, 394–405.
- Ketcham, R.A., 2005. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data. *Rev. Mineral. Geochemistry* 58, 275–314.
- 宮内嵩裕ほか, 2004. 長井盆地西縁断層帯の第四紀後期活動性と地形発達. *活断層研究*. 53–61.
- Nakajima, T., 2013. Late Cenozoic Tectonic Events and Intra-Arc Basin Development in Northeast Japan. *INTECH* 153–189.
- 太田陽子ほか, 2010. 日本列島の地形学. 東大出版. P 220
- Regalla, C., et al., 2013. Active forearc shortening in Tohoku, Japan: Constraints on fault geometry from erosion rates and fluvial longitudinal profiles. *Geomorphology* 195, 84–98.
- Sato, H., 1994. The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan stress. *J. Geophys. Res.* 99, 261–274.
- Shiroya, K et al., 2010. Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic ¹⁰Be and ²⁶Al depth profile. *Geochemical Journal* 44, e23–e27.
- Sueoka, S., et al., 2017. First report of (U-Th)/He thermochronometric data across Northeast Japan Arc: implications for the long-term inelastic deformation. *Earth, Planets Sp.* 1–18.
- Sueoka, S., et al., 2016. New approach to resolve the amount of Quaternary uplift and associated denudation of the mountain ranges in the Japanese Islands. *Geosci. Front.* 7, 197–210.
- 末岡茂ほか, 2015. 低温領域の熱年代学の発展と日本の山地の隆起・削剥史研究への応用. *地球科学*. 69, 47–70.
- Suzuki T., 1989. Late Quaternary crustal movements deduced from marine terraces and active faults, Joban coastal region, northeast Japan. *Geograph. Rep. Tokyo Metro. Univ.* 24, 31–42.
- 田力 正好, 池田 安隆, 2005. 段丘面の高度分布から見た東北日本弧中部の地殻変動と山地・盆地の形成. *第四紀研究*. 44, 229–245.
- 田中 明子ほか, 2004. 全国地熱ポテンシャルマップ. 数値地質図. DGM P-5.