

博士論文要旨

題目：東北日本弧における熱年代学的研究

地球テクトニクス講座： 福田 将真

地形の時間変化や形成過程の理解は、変動地形学あるいは地質学にとって主要な研究課題の一つである。特に、山地は地表に幅広く分布する地形であり、隆起・削剥といった地球表層の現象の相互作用によって形成される。地殻変動の上下変位を推定する手法にはいくつかあり、測地学から地形学、地質学に至るまで幅広い分野に基づく。これらの手法は、適用可能な地域や推定する変動の時間スケールなどの点で異なっており、検出対象とする現象に応じて適した手法を選定する必要がある。本研究で取り扱う山地形成過程は 10^6 年の地質時間スケールで進行する現象であり、さらに侵食場で消失過程を伴うため、従来法での適用には限界があった。本研究で採用した熱年代学は、 10^6 年スケールの削剥が推定可能かつ、侵食地域で有効な手法であり、山地形成過程を検出する手法として妥当であると考えた。ヒマラヤ山脈などの世界の大規模な造山帯において数多くの成果を取ってきた (e.g., Wagner et al., 1977) 一方で、若い変動帯における山地に対しては、その起伏の小ささや熱年代学的手法的限界のために、これまで適用例が限られた (Herman et al., 2013)。

東北日本弧は、日本列島を構成する地形学的に典型的な弧―海溝系の一つであり、従来から東北日本弧の構造発達史は地形学あるいは地質学的見地から研究が進められてきた。大規模な変遷を遂げてきた東北日本弧の構造発達史は、大まかに 3 ステージ存在する。21 Ma 以前のアジア大陸縁辺部の時代から、13 Ma ごろまでの日本海拡大による背弧海盆の形成を経て、以降は現在の島弧の姿となった (e.g., Sato, 1994)。島弧以降のテクトニクスは東西圧縮応力で特徴づけられ、フィリピン海プレートおよび太平洋プレートの沈み込みが起因していると考えられる (高橋, 2006; Takahashi, 2017)。その後、鮮新世から第四紀にかけて、強圧縮応力場へと発展し、これに伴って陸域に分布する山地や断層などの地形配列が形成されてきたと考えられている (米倉ほか 2001)。最近 20 年での熱年代学的発展により、日本の山地においても熱年代学的手法の適用可能性が近年確認され (末岡ほか, 2015; Sueoka et al., 2016)、日本アルプスでの研究を中心に応用研究が進展しつつある (e.g., Sueoka et al., 2012)。その一方で、これまでに東北日本の山地形成過程を定量的に推定した研究はほとんどなかった。

本研究では東北日本弧に分布する基盤岩類である白亜紀―古第三紀花崗岩類に対して、フィッショソ・トラック法および(U-Th)/He 法 (順に、FT 法, He 法) といった閉鎖温度が比較的低温である熱年代学的手法を用いて研究を実施した。東北日本弧の山地への熱年代学的手法の最初の適用例は、Sueoka et al. (2017a) であり、前弧―火山弧―背弧といった島弧構成单元ごとに He 法を適用して熱年代学的考察を行った。この研究では、島弧構成单元ごとの熱史および削剥史の対照性を初めて示したが、見かけ He 年代に基づいて削剥史を議論しており、信頼性に若干の議論が残っていた。そこで、東北日本弧を東西に横断する 2 つの測線を基軸とした熱年代学的検討から、主に以下の 3 点を目的として研究を実施した；①Sueoka et al. (2017a) と同一サンプルを用いた東北日本弧

南部での AFT 熱年代学による熱史・削剥史の高精度化（第 2 章）、②新たに実施した東北日本弧北部での He 熱年代学の結果との比較による、東北日本弧南部で推定された熱史・削剥史の対照性に関する再現性の検証（第 3 章）、③稠密な AHe 熱年代学マッピングと地形方程式を用いた数値計算による火山弧の隆起形態の定量的な制約（第 4 章）。これにより、東北日本弧の東西方向の熱史および削剥史の特徴の抽出を行い、さらに南北方向の熱史と削剥史に共通性が見られることから、地形配列がプレートの沈み込みに関連する可能性を熱年代学的データから定量的に示唆した。また、東北日本弧における火山列の既存隆起モデルの制約を目的に、熱年代学的データを利用して地質学的スケールの隆起形態を世界で初めて推定に成功した。

以上の事例研究を通じて、東北日本弧で実施した東西方向の 2 本の測線における熱年代学的検討により、火山フロントである奥羽脊梁山地の前縁部を境界として、東側の削剥は古第三紀を通じて安定的かつ比較的小さいのに対し、西部では第四紀の急激な圧縮応力に対応する削剥が観測された。さらに、東北日本弧における島弧平行方向の地形配列の熱史・削剥史には連続性があることを定量的に見出だし、地形形成がプレートの沈み込みに規制される可能性を示唆した。また、東北日本弧の火山列がドーム状に隆起してきた可能性を熱年代学的手法によって初めて定量的に示し、同一島弧内の山地であっても隆起形態はその地点固有の地質学的背景に大きく依存することを示した。これらのことから、日本アルプスのような 2000 m 以上の標高を持つ大規模な山地でなくとも、東北日本弧に分布する比較的地形的起伏の小さい山地においても熱年代学的手法が有効であることが実証された。また、東北日本弧のような典型的な弧―海溝系で推定された地質学的知見に基づき、ほかの島弧においてもプレートの沈み込みが陸域の地形発達を支配している可能性を示した。さらに、弧―海溝系に一般的に見られる火山列が地質時間スケールを通じてドーム状に隆起してきた可能性を示唆した。このように本研究は島弧山地における熱年代学的研究のフレームワークを形成し、弧―海溝系の若い造山帯における熱年代学的研究成果から地質学的あるいは変動地形学的に有用なデータを提供できることを実証した。

Abstract

Title: Thermochronometric investigations of the northeast Japan Arc

Shoma Fukuda

To comprehend how the development and formation of landforms occur is a principal issue, and plays a key role to estimate the geomorphic and geologic evolutions. In particular, mountains, widely distribute on the Earth's surfaces, are one of the major topographic expressions, which should be formed by the interactions between vertical crustal movements, such as uplift and denudation. There exist some of methodologies and markers to detect vertical crustal movements, and they are based on several geoscientific regimes, e.g., geodesy, geomorphology, and geology. The targeting areas and timescales vary depending on the methods. Hence the appropriate methods should be selected for target phenomena to be detected. The mountain building, studied in this PhD study, is thought to occur on the geologic timescales ($>10^6$ yr), and proceed accompanied with losing surface materials where erosion is dominant. Therefore, it is difficult to approach by using conventional methods mainly because of methodologic limitations. Thermochronology is capable to estimate a long-term denudation history in erosional regions, which has been successfully applied to major mountain belts in the world, for instance the Europe Alps (Wagner et al., 1977). Thus, thermochronometric approaches are considered to be as reasonable indicators for reconstructing the mountain building process. In contrast, few thermochronometric studies of mountains in young orogens has been carried out (Herman et al., 2013) because of low-reliefs and methodologic limitations.

The northeast (NE) Japan Arc is one of the island arcs, comprised of Japan Islands,

which has a typical topographic alignment of an arc-trench system. Tectonic histories of the NE Japan Arc are supposed to change drastically through geologic timescales, and have so far been investigated in terms of geology and geomorphology. Three tectonic stages were roughly proposed (e.g., Sato, 1994); (1) the margin of Asian continents prior to 21 Ma; (2) the formation of back-arc basins by the opening the Sea of Japan until ~13 Ma, and (3) the formation of the NE Japan Arc after 13 Ma. The tectonics since the initiation of the NE Japan arc is characterized as the E-W compressive stress field, derived from the subduction of the Philippine Sea and Pacific plates (Takahashi, 2006; 2017). From the Pliocene to Quaternary, the strong compressive stress field has been developing, which probably contributed to the formation of inland topographic alignments, such as mountains and faults (Yonekura et al., 2001). In recent two decades, the applicability of thermochronology for Japanese mountains has been confirmed as an effective tool for mountain building process (Sueoka et al., 2015; 2016), based on the studies of Japanese Alps (e.g., Sueoka et al., 2012). However, few quantitative investigations about the mountain building process in the NE Japan Arc have been performed so far.

This PhD study has applied low-temperature thermochronometers, such as fission-track and (U-Th)/He methods (namely, FT and He methods, respectively), to the Cretaceous–Paleogene granitic rocks regarded as the bedrocks of mountains in the NE Japan Arc. Sueoka et al. (2017a) firstly attempted to estimate the mountain building process across the southern part of NE Japan Arc by using He thermochronology. This study uncovered the contrasts of thermal and denudation histories between island arc components, i.e., a fore-arc, volcanic arc, and back-arc. However, the reconstructed thermal and denudation histories were discussed relying on the apparent He ages, inferring the issues about these reliabilities still remained. Based on low-temperature thermochronometers for two E-W transects

(i.e., the N- and S-traverses) across the NE Japan Arc, this PhD study therefore aimed; (1) to reconstruct high-accurate thermal/denudation histories based on AFT thermochronology using the same samples reported He data by Sueoka et al. (2017a) along the S-traverse (Chapter 2); (2) to verify the reproducibility of the contrasts of suggested thermal/denudation histories along the S-traverse, by compared with the newly He thermochronometric results across the N-traverse (Chapter 2); and (3) to quantitatively constrain the uplift style of the volcanic arc based on the denser AHe thermochronometric mapping and numerical calculations using the simple slope developing function (Chapter 4). Consequently, the contrasts of thermal/histories between island arc components were revealed from two traverses across the NE Japan Arc. The common features of thermal/denudation histories were also estimated in parallel to arc-trench (i.e., N-S) direction, implying the formation of the N-S topographic alignments is possibly caused by the plate subduction. Moreover, in order to constrain the previously suggested uplift models of the volcanic arc along the NE Japan Arc, the uplift style of the volcanic arc over geologic time was successfully reconstructed from thermochronometric approaches.

Integrating these case studies, the contrasts of denudation histories were observed across the NE Japan Arc, namely, denudation rates at eastern side of the Ou Backbone Range (OBR) showed slow and stable through the Paleogene, while these rates at western side of the OBR showed rapid caused by the intense compressive stress field since the Quaternary. Spatial continuities of thermal and denudation histories along the NE Japan Arc were revealed, inferring that the N-S topographic alignment of landforms is probably controlled by the plate subduction. Moreover, the uplift style of volcanic chain in the NE Japan, the OBR, was quantitatively estimated as a doming style based on thermochronometry, which implied the uplift styles vary strongly depending on the local geologic setting even

inner the same island arc. Therefore, the applicability of low-temperature thermochronology in the NE Japan Arc are verified, and expanded to even relatively lower relief mountains, as thermochronologically confirmed by previous studies in Japan Alps having >2000 m elevations. Geological implications from thermochronometric studies of a typical arc-trench system possibly provide the insights into general island-arc, inferring that the plate subduction controls the landform developments in island arcs. In addition, the volcanic arc, which commonly are observed on arc-trench systems, have probably been uplifted in doming style through geologic timescales. This PhD study created a thermochronological framework for mountains in young orogens like arc-trench systems, and verified thermochronometric studies in the island arc setting can effectively offer geologic and geomorphic implications.