低温領域の熱年代学的手法に基づいた 赤石山脈の隆起・削剥史の解明

末 岡 茂* Barry P. KOHN** 池 田 安 隆***
狩 野 謙 一**** 堤 浩 之* 田 上 高 広*

Uplift and Denudation History of the Akaishi Range Based on Low-temperature Thermochronologic Methods

Shigeru SUEOKA*, Barry P. KOHN**, Yasutaka IKEDA***,
Ken-ichi KANO****, Hiroyuki TSUTSUMI* and Takahiro TAGAMI*

Abstract

The applicability of low-temperature thermochronology has been extended considerably over the past decade and the successful application of (U-Th)/He (He) thermochronometry is one of the most noteworthy advances. In this study, a zircon He analysis is used to identify the denudational history and pattern of the Akaishi Range, which has been uplifted since the late Pliocene. Zircon He grain ages from nine samples range from 21.5 to 3.0 Ma, while the ages are systematically younger to the east. These ages are interpreted to reflect the uplifting of the Akaishi Range because the youngest ages are consistent with the age at which uplifting was initiated according to the depositional ages of gravel. The decreasing ages to the east can be explained by subsequent denudation of the uplifted Akaishi Range, assuming a westerly tilting uplift of the region west of the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line (ISTL). Although denudation cannot be identified exactly because of a lack of precise estimates of the paleo-geothermal gradient of the study area, it is certain that the entire area between the Median Tectonic Line and ISTL has been denuded by a few kilometers since the onset of the range uplift. This implies that the topography of the Akaishi Range reflects post-uplift factors, *e.g.*, spatial distribution of bedrock uplift rates and various denudation processes, rather than inherited geometry from the pre-uplift topography.

Key words : low-temperature thermochronology, (U-Th)/He method, zircon, denudation, Akaishi Range

キーワード : 低温領域の熱年代学, (U-Th)/He 法, ジルコン, 削剥, 赤石山脈

* 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

** メルボルン大学地球科学部

*** 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

**** 静岡大学理学部地球科学科

* Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

** School of Earth Sciences, University of Melbourne, Carlton, Victoria 3010, Australia

*** Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

**** Institute of Geosciences, Faculty of Science, Shizuoka University, Shizuoka 422-8529, Japan

I. はじめに

熱年代学的手法は、地表の隆起・剝削に伴って地下深部から地表へ露出した岩石の昇・冷却量を放射年代値の若返りとして検出することが可能で、過去 30 年以上にわたり世界各地の造山帯で剝削史解明のために用いられてきた（例えば、Wagner *et al.*, 1977; Tippet and Kamp, 1993; Fitzgerald *et al.*, 1995）。この手法の利点として、(1) 測定地点ごとに剝削史の推定が可能なこと、(2) 変位・年代指標となる特定の地形や地層を必要とせず岩石試料の分析のみから剝削史が議論可能なこと、(3) 花崗岩や砂岩など一般的な岩石に適用可能なこと、などがあげられる。しかし、熱年代学の分野でおもに用いられてきたアパタイトフィッシュン・トラック (FT) 法の閉鎖温度は 90 ~ 120℃であり、一般的な地温勾配 (約 30℃/km) の場合、約 3 km 未満の剝削量の検出は困難であった。また約 1 Ma 以内の若い年代についてはアパタイト FT 法の適用限界を超えていたため、鮮新世～第四紀に隆起を開始した若く小起伏な日本の山地に対しては、おおまかな剝削史の解明しか期待できなかった。

一方、最近約 10 年間で、低温領域の熱年代学が急速に発展を遂げてきた。なかでも最大の進歩のひとつが、(U-Th)/He 法 (または (U-Th-Sm)/He 法; 以下 He 法) の実用化である。He 法は、 ^{238}U ・ ^{235}U ・ ^{232}Th ・ ^{147}Sm などが α 壊変する際に生じる α 粒子、すなわち ^4He の原子核を娘核種とした放射年代測定法である。FT 法と比べ、閉鎖温度が低く (アパタイトで約 50 ~ 80℃, ジルコンで約 160 ~ 200℃) また娘核種の生成速度が大きいため、より温度変化の少ない加熱・冷却イベントや数 Ma 以内の若い加熱・冷却イベントに対しても十分な精度をもつ (例えば、Yamada and Tagami, 2008)。本研究では、赤石山脈においてジルコン He 法を適用した結果、鮮新世以降の隆起・剝削に起因した年代値の若返りを検出でき、中央構造線 (MTL) と糸魚川-静岡構造線 (ISTL) に挟まれた地塊の西への傾動や、隆起開始以降の総剝削量を推定することができた。

め、これらについて報告する。なお、He 法の詳細については、Farley (2002), Reiners (2005), 山田 (2010) などを参照されたい。

II. 地形・地質

赤石山脈は、東西 40 km, 南北 120 km に及び、3000 m 峰が連なる日本最大級の山脈である (図 1)。本稿では MTL と ISTL に挟まれた範囲を赤石山脈とし、MTL 以西を伊那山地、ISTL 以東を巨摩山地、三者をあわせた伊那盆地～甲府盆地間の山地全体を赤石山地と表現する (図 1)。赤石山脈は三波川帯・秩父帯・四万十帯などのジュラ紀～古第三紀の付加体複合岩体から構成され、伊那山地は領家帯の花崗岩類・変成岩類、巨摩山地は新第三紀の玄武岩～安山岩質火砕岩などからなる巨摩層群から構成される (図 2a)。また上記に加え、赤石山脈北東部の甲斐駒ヶ岳周辺には甲斐駒花崗岩体、巨摩山地北東縁部には円井花崗閃緑岩体が、中期中新世に貫入していることが知られている (図 2a; 例えば、脇田ほか, 2009)。甲斐駒花崗岩体の形成時期を示すデータとしては、16.2 ~ 10.3 Ma の K-Ar 年代が知られている (瀬野ほか, 1987; 佐藤ほか, 1989)。

赤石山地は、東西に非対称な地形を示す (図 2b)。東縁は下円井断層などの活断層に限られ、山頂から甲府盆地まで比高 2000 m 超の急崖をなす。一方西斜面では、MTL 沿いの縦谷を除き、山頂から伊那盆地まで連続的かつなだらかに高度が低下している (森山・光野, 1989)。また山頂は定高性を示し、山稜上には平坦面が点在する (上田, 1936)。

1) 山脈の形成時期と総隆起量

赤石山脈の形成過程は、おもに周辺地域の堆積層 (富士川流域の曙礫層、天竜川下流域の掛川層群、伊那盆地の伊那層など) 中の赤石山脈起源の砂岩・チャートなどの礫の堆積年代から解明されてきた (森山・光野, 1989; 松島, 1995; 狩野, 2002; 菅沼ほか, 2003)。文献により推定年代はやや前後するが、赤石山脈は鮮新世に隆起を開始し、前期更新世の後期には周辺に多量の礫を供給可能な起伏を有していたという点でほぼ一致している。

図 1 研究地域の概要。陰影図の作成には、国土地理院発行の数値地図 50 m メッシュ（標高）および数値地図 25000（行政界・海岸線）を用いた。断層線は、中田・今泉（2002）による。試料採取地点を示した既存研究の引用は図 2c を参照。

Fig. 1 Index map of the study area. Shaded relief maps are from 50-m DEM and digital map 25000 (administrative boundaries, coastal lines) of the Geospatial Information Authority of Japan. Fault lines are after Nakata and Imaizumi (2002). References of sampling sites are shown in Fig. 2c.

（本稿では、狩野ほか（1985）、Akimoto（1991）、狩野（2002）などに従い、曙礫層の堆積開始時期である約 3.3 Ma を赤石山脈の隆起開始時期とする）。一方、山脈の総隆起量の見積りに関しては、隆起開始前の原地形と現在の地形との関係の解釈によって大きな誤差が生じる可能性がある。山頂の定高性や西斜面の平滑性・連続性を、隆起

開始前の小起伏地形の直接的または間接的な痕跡と考えた場合（第四紀地殻変動研究グループ、1968；森山・光野、1989；松島、1995；狩野、2008）、山脈の総隆起量は、現在の山頂から平野部までの比高を大きく超えることはない。これに対し、侵食小起伏面あるいは山頂の定高性は、周水河作用（吉川、1985；須貝、1990）・隆起と剝削の平衡

図 2 (a) 研究地域の地質図と試料採取地点 (脇田ほか, 2009 を簡略化). 試料採取地点と活断層の凡例は図 1 と共通. 点線は図 2b の地形断面の測線を示す. (b) 地形断面図. 横軸は図 2a, 2c と共通. STF は下関井断層. (c) 本地域のおもな熱年代. FT 年代 ($\pm 1\sigma$) は Tagami *et al.* (1988), Ito *et al.* (1989), Tagami and Shibata (1993), Yamagiwa (1998) による. ただし, Yamagiwa (1998) のアパタイト FT 年代のうち, 0 Ma の 3 地点はプロットしていない. ジルコン He 年代は本研究による (表 1 参照). ジルコン He 年代は, 試料 #10 は各粒子年代 ($\pm 1\sigma$), それ以外の試料は加重平均年代 ($\pm 95\%$ CI) で示した.

Fig. 2 (a) Geologic map of study area and sampling locations (simplified after Wakita *et al.*, 2009). Legends of sampling sites and active fault traces are after Fig. 1. Dashed lines indicate traverse lines of Fig. 2b. (b) Topographic profiles. The horizontal axis is the same as those in Figs. 2a and 2c. The Shimotsuburai fault is abbreviated to STF. (c) FT and He ages reported in the study area. The FT ages ($\pm 1\sigma$) are after Tagami *et al.* (1988), Ito *et al.* (1989), Tagami and Shibata (1993) and Yamagiwa (1998). Three apatite FT ages of 0 Ma reported by Yamagiwa (1998) are not plotted. Zircon He ages are obtained in this study (see Table 1). Zircon He ages are shown as grain ages ($\pm 1\sigma$) for #10 and in weighted mean ages ($\pm 95\%$ CI) for the other samples.

(Ohmori, 1987)・山体重力変形(目代・千木良, 2004)など他の原因によって形成されており, 隆起前の地形の痕跡は削剥によって失われていると解釈した場合, 真の隆起量は現在みられる起伏量より遥かに大きくなる可能性がある。

2) 既報 FT 年代

赤石山地では, いくつかの FT 年代が報告されている(図 1, 2c)。Ito *et al.* (1989) は, 甲斐駒花崗岩および円井花崗閃緑岩でジルコン FT 年代を測定し, それぞれ 10.9 ~ 7.8 Ma と 15.3 ~ 14.5 Ma の値を得た。さらに, 岩体内における年代値の分布傾向や瀬野ほか(1987)の K-Ar 年代(全岩年代: 16.2 ± 4.4 Ma, 黒雲母年代: 11.8 ± 0.6 Ma)との不一致から, とくに甲斐駒花崗岩のジルコン FT 年代を岩体の上昇削剥による年代の若返りと解釈した。Tagami *et al.* (1988) は, 伊那山地でジルコンおよびアパタイト FT 年代を測定し, アパタイト FT 年代が MTL 近傍で 59 ~ 54.3 Ma から 12.5 ~ 9.0 Ma に若返ることを示し, これを MTL の活動と関連づけた。Yamagiwa (1998) は, 赤石山脈の四万十帯で FT 年代を測定し, ジルコン FT 年代が ISTL 近傍で 11.6 Ma まで若返ることと, アパタイト FT 年代が 3.5 ~ 0.0 Ma と非常に若い値を示すことを報告した。加えて, これらの若返りは伊豆-ボニン弧の本州への多重衝突イベントに起因する山地の上昇削剥を表していると考え, ジルコン FT 年代が橢円山衝突(約 12 Ma), アパタイト FT 年代が伊豆衝突(約 1 Ma)にそれぞれ対応していると解釈した。なお Yamagiwa (1998) は, 上記に加えて 9.1 Ma のジルコン FT 年代を報告し, これを甲斐駒岩体の貫入による若返りと解釈した。ただし, この解釈は Ito *et al.* (1989) のジルコン FT 年代を甲斐駒岩体の貫入年代とみなしており, 甲斐駒岩体のジルコン FT 年代は隆起・削剥による若返りを示しているという Ito *et al.* (1989) の解釈に則っていない。

ジルコン FT 法では閉鎖温度が高すぎるため, 赤石山脈の既報 FT 年代では, ISTL 近傍を除いて, 山地の隆起に伴う削剥が十分に捉えられていない。一方アパタイト FT 法では, ゼロ年代が含

まれているように, 削剥量に対して閉鎖温度が逆に低すぎる。また四万十帯砂岩におけるアパタイトの産出量の少なさや粒子の質, アパタイト FT 法の適用限界年代の問題もあり, データの量・質ともに十分とは言い難い。

III. 試料採取・He 年代分析

本研究では, アパタイト FT 法とジルコン FT 法の中間の閉鎖温度をもち, 若い試料に対しても精度の高いジルコン He 法を用いた。試料採取は, 甲斐駒ヶ岳を中心に, 赤石山脈・巨摩山地を横断する東西方向に行った(図 2a)。採取した試料は全 23 点で, 岩種は, 円井花崗閃緑岩, 甲斐駒花崗岩, 巨摩層群の玄武岩質火砕岩, 四万十帯赤石層群の砂岩, 秩父帯戸台層の砂岩, 三波川帯の砂質泥質片岩互層である。試料は粉碎したのち, 粒径・比重・磁性により鉱物分離し, ジルコンの濃集したフラクションを得た。これに Yamagiwa (1998) が FT 分析に用いた四万十帯赤石層群の砂岩試料 1 点 (AKS-03; アパタイト FT 年代: 3.5 ± 0.7 Ma, ジルコン FT 年代: 40.5 ± 1.7 Ma (誤差 2σ)) を加えた計 24 試料から, ジルコン含有量や採取地点の位置などを考慮して選んだ 9 試料について He 年代測定を行った(表 1)。なお, 本研究試料のうち, 三波川帯の 3 試料中 2 試料と巨摩層群の試料からはジルコンが得られなかった。また円井花崗閃緑岩の 4 試料では, ジルコンが非常に細粒で, He 分析に適した結晶(粒径約 75 ~ 150 μm ; Reiners, 2005)は得られなかった。

He 年代測定は, Melbourne 大学にて行った。ジルコン粒子は, 包有物の有無を確認するためにエタノールに浸して偏光顕微鏡で観察し, α 校正因子 F_T (Farley *et al.*, 1996; Hourigan *et al.*, 2005)を計算するためにデジタル画像を記録した。以降の分析には, 包有物の少ない良質の自形粒子のみを用いた。各粒子は, 白金製カプセルに封入し, 波長 820 nm の光ファイバー結合半導体レーザーを用いて真空中で加熱・脱ガスした。 ^4He 濃度は, ^4He 標準試料によって校正した純粋な ^3He スパイクを用いた同位体希釈法によって

表 1 本研究の試料採取地点および He 年代パラメータ概要.
Table 1 Summary of zircon He parameters obtained in this study.

Sample Code	Geological Unit	E-lon. in WGS84	N-lat. in WGS84	Elev. (m)	Lab. ID No.	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	Mean F _T	Corr. He (ncc)	Mass (mg)	Age $\pm 1\sigma$ (Ma)	Weighted mean age $\pm 95\%$ CI (Ma)
#5	Kaikoma Granite	138.2352	35.7557	2740	5857	909.2	745.8	0.82	0.79	9.695	0.0076	9.7 $\pm$ 0.6	
#5					5858	818.0	413.3	0.51	0.84	21.049	0.0205	9.2 $\pm$ 0.6	
#5					5859	747.2	411.4	0.55	0.81	11.875	0.0145	8.0 $\pm$ 0.5	8.8 $\pm$ 2.2
#9	Sandstone - Chichibu Belt (Todai Fm)	138.1310	35.7788	975	5851	457.2	148.1	0.32	0.80	7.893	0.0088	15.0 $\pm$ 0.9	
#9					5852	264.9	150.4	0.57	0.78	3.032	0.0059	14.0 $\pm$ 0.9	
#9					5853	295.8	78.5	0.27	0.77	7.110	0.0052	35.7 $\pm$ 2.2	14.5 $\pm$ 1.2
#10	Psammitic schist - Sambagawa Belt	138.0856	35.7677	856	5848	300.3	189.7	0.63	0.80	8.164	0.0104	18.6 $\pm$ 1.2	
#10					5849	473.0	115.9	0.25	0.85	23.076	0.0176	21.5 $\pm$ 1.3	
#10					5850	616.2	246.5	0.40	0.81	7.487	0.0090	10.2 $\pm$ 0.6	
AKS-03	Sandstone - Shimanto Belt (Akaishi Gp)	138.1703	35.7365	1750	5854	711.7	435.4	0.61	0.80	10.295	0.0102	10.2 $\pm$ 0.6	
AKS-03					5855	552.0	237.0	0.43	0.81	7.807	0.0100	10.6 $\pm$ 0.7	
AKS-03					5856	647.2	154.9	0.24	0.83	12.237	0.0134	10.9 $\pm$ 0.7	10.6 $\pm$ 0.7
Ohm1	Kaikoma Granite	138.2927	35.7472	995	5866	715.0	304.8	0.43	0.85	11.240	0.0220	5.3 $\pm$ 0.3	
Ohm1					5867	1008.5	346.6	0.34	0.83	8.123	0.0153	4.0 $\pm$ 0.2	
Ohm1					5868	965.4	351.3	0.36	0.82	7.049	0.0134	4.1 $\pm$ 0.3	4.4 $\pm$ 1.6
Ohm2	Kaikoma Granite	138.3029	35.7625	823	5869	745.3	421.3	0.57	0.82	8.453	0.0176	4.7 $\pm$ 0.3	
Ohm2					5870	1086.6	417.9	0.38	0.82	16.546	0.0179	6.4 $\pm$ 0.4	
Ohm2					5871	610.7	312.7	0.51	0.83	5.516	0.0156	4.3 $\pm$ 0.3	4.8 $\pm$ 2.4
Ojr1	Kaikoma Granite	138.2704	35.7968	1278	5875	632.9	333.6	0.53	0.82	9.726	0.0162	6.9 $\pm$ 0.4	
Ojr1					5876	855.7	555.1	0.65	0.82	8.940	0.0132	5.6 $\pm$ 0.3	
Ojr1					5877	816.1	521.4	0.64	0.79	5.939	0.0094	5.5 $\pm$ 0.3	5.9 $\pm$ 1.8
Ojr2	Kaikoma Granite	138.2875	35.7986	1164	5878	960.4	508.4	0.53	0.81	6.438	0.0107	4.6 $\pm$ 0.3	
Ojr2					5879	1718.3	594.4	0.35	0.80	8.921	0.0093	4.2 $\pm$ 0.3	
Ojr2					5880	544.7	199.1	0.37	0.78	5.877	0.0065	12.6 $\pm$ 0.8	4.4 $\pm$ 0.4
Ojr3	Kaikoma Granite	138.2936	35.7951	772	5881	387.2	206.8	0.53	0.78	1.179	0.0073	3.0 $\pm$ 0.2	
Ojr3					5882	441.4	298.3	0.68	0.76	1.253	0.0051	4.0 $\pm$ 0.2	
Ojr3					5883	882.0	474.5	0.54	0.77	2.213	0.0054	3.4 $\pm$ 0.2	3.4 $\pm$ 1.1

F_Tは α 校正因子 (Farley *et al.*, 1996). Corr. He は, F_T で校正した ⁴He 濃度である. 加重平均年代は, IsoPlot (Ludwig, 2003) を用いて計算した. なお, 斜体で示した 2 粒子 (5853 と 5880) の年代は, 加重平均年代の計算には用いていない.
F_T is the α -ejection correction after Farley *et al.* (1996). Corr. He is ⁴He concentration corrected by F_T. Weighted mean ages are calculated using IsoPlot (Ludwig, 2003). Note that the two grain ages shown in italics (5853 and 5880) were not used to calculate weighted mean ages.

求めた。 ^4He の測定誤差は1%未満と推定される。ウラン・トリウム濃度は、Varian社製四重極ICP-MSを用いて同位体希釈法により求めた。ヘリウムを抽出したジルコン粒子は、白金製カプセルからパールポンプに移し、 ^{233}U と ^{229}Th のスパイクを添加したのち、240℃のフッ酸中で40時間融解した。続いて200℃の塩酸中で24時間、フッ酸塩を完全に溶解し、7%硝酸で希釈して測定溶液とした。また、試料溶液と同量のスパイクを添加した標準溶液および、スパイクを添加していない試薬ブランクについても同様の手順で溶液を作成し、試料溶液とともに測定し検量線を決定した。なお、少量(0.3~0.5 ml)の各測定溶液について、ウラン・トリウム同位体比の測定精度は2%以下である(ウラン・トリウム測定の詳細はEvans *et al.* (2005)を参照)。Melbourne大学のジルコンHe年代測定システム全体の測定精度は約±6%である。また、一連の測定と並行して、年代標準試料であるFish Canyon Tuff ジルコンを内部標準として同様の方法で測定し、分析の信頼性を保証している。

IV. 結果・解釈

1) 測定結果の概要

本研究で得られたジルコンHe年代の概要を表1と図2cに示す。He年代は、合計9試料27粒子について得られた。ただし、粒子番号5853と5880については、ウラン・トリウム測定の際に粒子が酸に完全に融解しておらず、ウラン・トリウム濃度の過小評価、すなわち年代値の過大評価が起こっていると考えられるため棄却した。この2粒子を除くと、粒子年代は21.5~3.0 Maとなった。概して各試料の粒子年代は再現性が高く、#10を除く8試料について統計的に有意な加重平均年代が得られた。また全体の傾向として、MTL側からISTL側に向かって系統的な年代の若返りがみられた。

2) 加熱・冷却イベント時期と解釈

ISTLに最も近い試料(Ojr-3)では、最も若い年代が得られ、加重平均年代は 3.4 ± 1.1 Maであった。先述のように、周辺地域への礫の供給開

始年代から、赤石山脈の隆起開始時期は後期鮮新世の約3.3 Maと見積もられているが、この年代値はそれと調和的である。したがって、この地点の年代の若返りは、赤石山脈の隆起・剝削に伴う岩石の上昇・冷却を反映していると考えられる。また、東斜面の残りの4試料(Ojr-1, 2, Ohm-1, 2)についても、(1)加重平均年代が誤差の範囲でOjr-3と一致する、(2)標高が高くなるほど年代値が古くなる傾向がみられる、という理由から、Ojr-3と同様に赤石山脈の隆起・剝削を反映しているが、剝削量の差により年代が完全にリセットされていないと解釈できる。一方、西側4試料(#5, #9, #10, AKS-03)の年代値はこれらより有意に古い。この原因として、東の5地点とは異なる熱イベントを反映している可能性と、東西での上昇・冷却量の差を反映している可能性が考えられる。西側4地点の年代値は、試料間のばらつきが大きく一定の値に収束しないことや、Yamagiwa (1998)やIto *et al.* (1989)のFT年代でも西から東への若返りがみられることを考慮すると、今回得られた9地点の年代は共通のイベント内における冷却量の違いを示している可能性が高い。すなわち、これらの年代の若返りは、すべて後期鮮新世に開始した隆起・剝削イベントに関連しており、年代値の東への若返りは赤石山脈の西への傾動を表していると解釈できる。これは、山地の直接的・間接的隆起要因と考えられるISTLなどの断層や伊豆-ボニン弧が山地の東側に分布していることや、山地の西斜面より東斜面の方が急傾斜であることから、山地東部の方がより大きな隆起・剝削速度をもつと予測されることと整合的である。

3) 総剝削量の見積りと地形学的意味

Closure Program (Brandon *et al.*, 1998)の計算結果によると、加熱時間1~10 Myrの場合、ジルコンHe法の90%保持温度が134.9~154.7℃、10%保持温度が183.4~208.2℃である。隆起開始直前の温度条件として、一般的な地温勾配である30℃/kmと10~20℃の地表温度を仮定すると、これらの保持温度から地表温度までの冷却はそれぞれ3.8~4.8 kmと5.4~6.6 kmの剝削量

に相当する。Ojr-3 以外の 8 地点では年代値が完全にリセットされていないことから、削剥量は両者の間である 3.8 ~ 6.6 km と推定できる。同様に、Ojr-3 では年代値がほぼ完全にリセットされていると考えられるので、後者の 5.4 ~ 6.6 km が削剥量の下限となる。

約 30°C/km という古地温勾配値の妥当性を直接検討するのは困難であるが、以下のような理由から一般的な値より高い地温勾配を仮定する積極的な理由は乏しいと思われる：(1) 甲府盆地～伊那盆地間の地温勾配は 20 ~ 40°C/km の範囲に収まっており（田中ほか, 2004）、少なくとも現在の地温勾配値は一般的な値と矛盾しない、(2) 伊那山地北端部に分布する塩嶺火山岩類（牧本ほか, 1996）を除き、中期中新世の甲斐駒岩体・円井岩体の貫入以降、赤石山脈内部に火成活動の証拠は知られていない、(3) 日本列島では、火山周辺で地温勾配が増加する範囲は、噴出中心から高々 10 ~ 20 km である（梅田ほか, 1999）のに対し、今回の分析に用いた試料の採取地点から最も近い火山と思われる八ヶ岳・茅ヶ岳、あるいは前述の塩嶺火山岩類の分布地域までの最短距離は約 20 km である。また、本研究で採取した試料のうち、甲斐駒ヶ岳山頂付近で採取した試料（#5）と、その東の 4 試料（Ojr-1, 2, Ohm-1, 2）では、2000 m 近い標高差があるが（図 2b, 表 1）、両者間の推定古温度の差は、10% 保持温度と 90% 保持温度の差から、30 ~ 75°C に収まると考えられる。赤石山脈が巨視的には剛体として隆起・傾動していると仮定すると、この温度差は 15 ~ 40°C/km の古地温勾配に相当し、30°C/km という値と矛盾しない。

以上は推論であり、削剥量を定量的に議論するためには追加データが必要であるが、本研究で得られたジルコン He 年代データをもとにすると、赤石山脈北部では、MTL から ISTL までほぼ全域にわたって、隆起開始以降の数 Myr で km オーダーの削剥が起こった可能性が高い。したがって、現在みられる山頂の定高性や山頂から伊那盆地へ緩やかに連続するように見える地形は、隆起開始前の小起伏地形の名残というよりは、周氷河作用

（須貝, 1990）や山体重力変形（目代・千木良, 2004）などを含めた多様な削剥プロセスと、東へ向かって増加する隆起速度分布の釣り合いによって形成されたものである可能性が示唆される（ただし、山地の隆起開始以前の小起伏地形の存在そのものを否定するわけではないことに注意）。これはすなわち、赤石山脈の真の隆起量が、現在の起伏量に基づいた推定値より数 km オーダー大きい可能性があることを示している。

V. まとめと今後の課題

本研究では、赤石山脈においてジルコン He 年代測定を行い、21.5 ~ 3.0 Ma の粒子年代を得た。年代値は、MTL から ISTL に向かって東方へ系統的な若返りを示した。年代値の若返りは、赤石山脈の鮮新世以降の隆起・削剥による岩体の上昇・冷却に起因している可能性が高く、東方への若返りは赤石山脈が東方から西方へ傾動しながら隆起していることを反映していると考えられる。また、赤石山脈北部の MTL ~ ISTL 間では、山脈の形成以降、ほぼ全域で km オーダーの削剥が起こっている可能性が高い（30°C/km の古地温勾配を仮定すると、MTL ~ ISTL 間のほぼ全域で 3.8 ~ 6.6 km, ISTL 近傍では > 5.4 ~ 6.6 km）。これは、現在みられる山頂の定高性や侵食小起伏面の分布、あるいは山頂から伊那盆地へ連続するように見える緩やかな傾斜が、隆起開始前の地形の痕跡というよりは、山脈形成後の隆起と削剥の結果形成された二次的なものである可能性を示しており、赤石山脈の真の隆起量が、現在の山頂～盆地間の比高より数 km 大きい可能性を示唆する。

今後の課題として、まず本研究試料におけるジルコンおよびアパタイト FT 分析と、これらの追加分析結果に本研究結果・既報年代をあわせたより詳細かつ定量的な隆起・削剥史の解明があげられる。また、これらの熱年代データの解釈の信頼性向上のために、古地温勾配のより正確な推定や、ジルコン U-Pb 年代測定による各岩体の形成年代の正確な見積りも要求される。地形学・地質学的な課題としては、赤石山脈の東西非対称地形および山頂の定高性の形成メカニズムの推定、赤

石山脈の隆起様式と地下構造・周辺テクトニクスとの関係の考察, 山脈形成以前の時代における有意な隆起・剝離イベントの有無の確認などがあげられる。

謝 辞

He 年代測定の実験費用として, 平成 22 年度東京地学協会研究・助成金「低温領域の熱年代学的手法に基づいた赤石山脈の隆起・剝離史の解明」(申請者: 末岡茂)を用いた。現地調査費用の一部には, 科学研究費補助金挑戦的萌芽研究(研究課題名: 日本の山地地形研究への熱年代学の適用, 研究代表者: 堤 浩之)を用いた。また成果の一部は, 第 35 回フィッショントラック研究会(於: 京都市北区ホテル然林房, 2011 年 1 月), 日本地球惑星連合 2011 年大会(於: 幕張メッセ国際会議場, 2011 年 5 月), 日本地質学会第 118 年学術大会(於: 茨城大学水戸キャンパス, 2011 年 9 月)にて公表した。環境省関東地方環境事務所には, 南アルプス国立公園特別保護地区内における土石の採取許可をいただいた。東京大学の白濱吉起氏には, 現地調査・試料採取にあたってご助力いただいた。また, 調査の一部で南アルプス世界自然遺産登録推進協議会・総合学術検討委員会からのご援助を得た。

文 献

- Akimoto, K. (1991): Paleoenvironmental studies of the Nishiyatsushiro and Shizukawa Groups, South Fossa-Magna region. *Science Reports of the Tohoku University. 2nd Series, Geology*, **61**, 1-102.
- Brandon, M.T., Roden-Tice, M.K. and Garver, J.I. (1998): Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, northwest Washington State. *Geological Society of America Bulletin*, **110**, 985-1009.
- 第四紀地殻変動研究グループ (1968): 第四紀地殻変動量図。第四紀研究, **7**, 182-187. [Research Group for Quaternary Tectonic Map (1968): Quaternary tectonic map of Japan. *The Quaternary Research*, **7**, 182-187.]
- Evans, N.J., Byrne, J.P., Keegan, J.T. and Dotter, L.E. (2005): Determination of uranium and thorium in zircon, apatite and fluorite: Application to laser (U-Th)/He thermochronology. *Journal of Analytical Chemistry*, **60**, 1159-1165.
- Farley, K.A. (2002): (U-Th)/He dating; techniques, calibrations, and applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **47**, 819-843.
- Farley, K.A., Wolf, R.A. and Silver, L.T. (1996): The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, 4223-4229.
- Fitzgerald, P.G., Sorkhabi, R.B., Redfield, T.F. and Stump, E. (1995): Uplift and denudation of the central Alaska Range: A case study in the use of apatite fission track thermochronology to determine absolute uplift parameters. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 20175-20191.
- Hourigan, J.K., Reiners, P.W. and Brandon, M.T. (2005): U-Th zonation dependent alpha-ejection in (U-Th)/He chronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 3349-3365.
- Ito, H., Sorkhabi, R.B., Tagami, T. and Nishimura, S. (1989): Tectonic history of granitic bodies in the South Fossa magna region, central Japan: New evidence from fission-track analysis of zircon. *Tectonophysics*, **166**, 331-344.
- 狩野謙一 (2002): 伊豆弧衝突に伴う西南日本弧の地殻構造変化。地震研究所彙報, **77**, 231-248. [Kano, K. (2002): Re-arrangement of the shallow-level structure of Southwest Japan Arc due to the collision of the Izu-Bonin Arc. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **77**, 231-248.]
- 狩野謙一 (2008): 南アルプス世界自然遺産登録予備調査, 地質・地形概況把握調査報告(静岡市委託調査)。
- 狩野謙一・鈴木勇也・北里 洋 (1985): 富士川上流中富地域の静川層群の古地理。静岡大学地球科学研究報告, **11**, 135-153. [Kano, K., Suzuki, I. and Kitazato H. (1985): Paleogeography of the Shizukawa Group in the Nakatomi area in the upper reaches of Fuji River, South Fossa-Magna region. *Geoscience Reports of Shizuoka University*, **11**, 135-153.]
- Ludwig, K.R. (2003): User's manual for isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, **4**.
- 牧本 博・高木秀雄・宮地良典・中野 俊・加藤碩一・吉岡敏和 (1996): 高遠地域の地質。地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所。[Makimoto, H., Takagi, H., Miyachi, Y., Nakano, S., Kato, H. and Yoshioka, T. (1996): *Geology of the Takato District*. With Geological Sheet Map at 1:50,000, Geological Survey of Japan.]
- 松島信幸 (1995): 伊那谷の造地形史。飯田市美術博物館調査報告書, **3**. [Matsushima, N. (1995): Morphogenetic history of the Ina basin. *Research Report of the Iida City Museum*, **3**, Iida City Museum.]
- 目代邦康・千木良雅弘 (2004): 赤石山脈南部, 大谷崩から山伏にかけての山体重力変形地形。地理学評論, **77**, 55-76. [Mokudai, K. and Chigira, M. (2004): Geomorphic features and processes of gravitational mountain deformation in the area from Mt. Yamabushi to Oya-Kuzure, central Japan. *Geographical Review of Japan*, **77**, 55-76.]
- 森山昭雄・光野克彦 (1989): 伊那谷南部, 伊那層の堆積構造から見た木曾・赤石両山脈の隆起時期。地理学評論, **62A**, 691-707. [Moriyama, A. and Mitsuno, K. (1989): The uplifting of the Kiso and Akaishi

- mountain ranges deduced from the sedimentary deposits and the Ryuto surface in the southern Ina valley, central Japan. *Geographical Review of Japan*, **62A**, 691-707.]
- 中田 高・今泉俊文編 (2002): 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会. [Nakata, T. and Imaizumi, T. eds. (2002): *Digital Active Fault Map of Japan*. University of Tokyo Press.]
- Ohmori, H. (1987): Mean Quaternary uplift rates in the central Japanese mountains estimated by means of geomorphological analysis. *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, **19**, 29-36.
- Reiners, P.W. (2005): Zircon (U-Th)/He thermochronometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **58**, 151-179.
- 佐藤興平・柴田 賢・内海 茂 (1989): 甲斐駒ヶ岳花崗岩質岩体の K-Ar 年代と岩体冷却史—赤石山地の地質構造形成史における意義—. 地質学雑誌, **95**, 33-44. [Sato, K., Shibata, K. and Uchimi, S. (1989): K-Ar ages and cooling history of the Kaikomagatake granitoid pluton, and their bearing on tectonic evolution of the Akaishi Mountains, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **95**, 33-44.]
- 瀬野徹三・高橋正樹・小林洋二 (1987): 基盤構造・ネオテクトニクスと地震活動との関係 2.6 関東地方における中新世火成岩の年代測定. 宇佐美龍夫編: 関東平野直下の地震活動及び地震動予測についての基礎的研究・文部省科学研究費自然災害科学特別研究成果自然災害科学総合研究班, **No.A-61-2**, 81-85. [Seno, T., Takahashi, M. and Kobayashi, Y. (1987): K-Ar dating of Miocene igneous rocks at Kanto district. in *Fundamental Investigations of Seismic Activity and Pre-estimation of Seismicity Ministry of Education, Japan* edited by Usami, T., **No.A-61-2**, 81-85.]
- 須貝俊彦 (1990): 赤石山地・三河高原南部の浸食小起伏面の性質と起源. 地理学評論, **63A**, 793-813. [Sugai, T. (1990): The origin and geomorphic characteristics of the erosional low-relief surfaces in the Akaishi Mountains and the southern part of the Mikawa plateau, central Japan. *Geographical Review of Japan*, **63A**, 793-813.]
- 菅沼裕介・鈴木毅彦・山崎晴雄・菊池隆男 (2003): 長野県南部, 伊那層群のテフラとその対比. 第四紀研究, **42**, 321-334. [Suganuma, Y., Suzuki, T., Yamazaki, H. and Kikuchi, T. (2003): Chronostratigraphy of the Ina Group, central Japan, based on correlation of volcanic ash layers with Pleistocene widespread tephra. *The Quaternary Research*, **42**, 321-334.]
- Tagami, T. and Shibata, K. (1993): Fission track ages on some Ryoke granitic rocks along the Median Tectonic Line, Southwest Japan. *Geochemical Journal*, **27**, 403-406.
- Tagami, T., Lal, N., Sorkhabi, R.B. and Nishimura, S. (1988): Fission track thermochronologic analysis of the Ryoke Belt and the Median Tectonic Line, southwest Japan. *Journal of Geophysical Research*, **93**, 13705-13715.
- 田中明子・矢野雄策・笹田政克 (2004): 日本列島及びその周辺域の地温勾配データベース, 数値地質図 DGM P-5. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. [Tanaka, A., Yano, Y. and Sasada, M. (2004): *Geothermal Gradient Data in and around Japan. Digital Geoscience Map DGM P-5*. Geological Survey of Japan.]
- Tippett, J.M. and Kamp, P.J.J. (1993): Fission track analysis of the late Cenozoic vertical kinematics of continental Pacific Crust, South Island, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 16119-16148.
- 梅田浩司・小松 亮・中司 昇 (1999): 坑井データによる地下温度構造の推定. サイクル機構技報, **2**, 29-36. [Umeda, K., Komatsu, R. and Nakatsuka, N. (1999): Geothermal structure based on temperature logging data of boreholes in Japan. *JNC Technical Review*, **2**, 29-36.]
- 上田信三 (1936): 山稜の高さと平面形から観た赤石山地. 地理学評論, **12**, 504-526. [Uyeda, S. (1936): Geomorphology of the Akaishi Mountains. *Geographical Review of Japan*, **12**, 504-526.]
- Wagner, G.A., Reimer, G.M. and Jäger, E. (1977): Cooling ages derived by apatite fission-track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: The uplift and cooling history of the Central Alps. *University of Padova, Memoir of the Institute of Geology and Mineralogy*, **30**, 1-27.
- 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治編 (2009): 20 万分の 1 日本シームレス地質図 DVD 版. 数値地質図 G-16, 産業技術総合研究所地質調査総合センター. [Wakita, K., Igawa, T. and Takarada, S. eds. (2009): *Seamless Geological Map of Japan at a Scale of 1:200,000 DVD Edition. Digital Geoscience Map G-16*. Geological Survey of Japan.]
- 山田国見 (2010): 三重県多気地域嶺家花崗岩中のシュードタキライトの (U-Th)/He 年代測定. 月刊地球, **32**, 30-39. [Yamada, K. (2010): (U-Th)/He dating of a pseudotachylyte collected from the Ryoke Granite, Taki area, Mie Pref. *Chikyu Monthly (Gekkan Chikyu)*, **32**, 30-39.]
- 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.
- Yamagiwa, A. (1998): *Uplift-cooling History of Akaishi Mountainland: FT Thermochronological Study*. Master Thesis of Graduate School of Science, Kyoto University.
- 吉川虎雄 (1985): 湿潤変動帯の地形学. 東京大学出版会. [Yoshikawa, T. (1985): *Shitsujun Hendotai No Chikeigaku*. Tokyo University Press.]

(2011 年 8 月 3 日受付, 2011 年 8 月 19 日受理)