紀伊半島, 中新世火成岩類のアパタイトのフィッション・トラック年代

Fission track ages on apatite from Miocene igneous rocks in the Kii Peninsula, Japan

岩野英樹* 檀原 徹* 星 博幸**

Hideki Iwano*, Tohru Danhara* and
Hiroyuki Hoshi**

2009年5月8日受付.

2009年5月22日受理.

* (株) 京都フィッション・トラック

Kyoto Fission-Track Co., Ltd, Kita-ku, Kyoto 603-8832, Japan

** 愛知教育大学理科学教育講座地学領域

Department of Earth Sciences, Aichi University of Education,
Kariya, Aichi 448-8542, Japan

Corresponding author; H. Iawano, kyoto-ft@ac.auone-net.jp

Abstract: This paper reports fission track (FT) ages on apatite from Miocene igneous rocks of the Kii Peninsula. A total of twelve ages was determined, of which nine data passed a statistical test. Ages of around 15 Ma were obtained for the Muro Pyroclastic Flow Deposit, the Sekibutsu Tuff, and the granite porphyry of the Kumano Acidic Rocks, and were indistinguishable from the zircon FT ages we reported previously (Iwano et al., 2007, Jour. Geol. Soc. Japan, 113, 326-339), indicating instantaneous cooling. On the other hand, two plutonic bodies of the Omine Granitic Rocks yielded apatite FT ages of about 13 Ma that were significantly younger than the zircon FT ages (approximately 15 Ma), suggesting relatively slow cooling.

Key words: fission track dating, apatite, Kii Peninsula, Miocene igneous rocks

はじめに

岩野ほか (2007) は紀伊半島の中新世火成岩類 (Fig. 1) について系統的なジルコンのフィッション・トラック (FT) 年代測定を実施した。その中で、紀伊半島北部の室生火砕流堆積物とその周辺の凝灰岩 (玉手山凝灰岩や石仏凝灰岩), 同半島中部~南東部の大峯花崗岩類および熊野酸性岩類のジルコン FT 年代はすべて 15 Ma に集中すること, すなわちこれらの活動の同時性を指摘した。

本論は, 上記の研究と並行して測定した火成岩類のアパタイトの FT 年代結果を報告する。放射年代測定法 (U-Pb 法, K-Ar 法, FT 法) は, それぞれの手法および測定対象鉱物によって閉鎖温度が異なる。ジルコン FT より閉鎖温度の低いアパタイト FT 年代は, 年代情報だけでなく温度情報もあわ

Fig. 1. Map showing the distribution of Miocene igneous rocks in the Kii Peninsula and sample localities for fission track dating. Abbreviations: PFD, Pyroclastic Flow Deposit; IC, Igneous Complex; NTD, Nakaoku Tuffite Dike; OTD, Omine Tuffite Dike; NU, North unit; SU, South unit; KD, Kozagawa Dike; MTL, Median Tectonic Line.

せて検討できる重要な基礎データになると考えられる。

なお, 本論で扱う放射年代は, 特に断りがない限り誤差を 1σ で表記する。

地質概説および試料

ここではアパタイト FT 年代を測定した火成岩体の地質と年代情報について概説する。筆者らがこれまでに測定したジルコン FT 年代, およびそれ以外に公表されている放射年代の詳細については, それぞれ岩野ほか (2007) の Table 1 と Table A1 を参照されたい。

1. 室生火砕流堆積物

室生火砕流堆積物は奈良県中東部~三重県中西部に東西約 28 km, 南北約 15 km の範囲に分布する大規模な流紋岩~デイサイト質火砕流堆積物であり (基底の一部に降下火山灰層を伴う), 層厚は最大 400 m 以上, 体積は 100 km³ 以上に達する (西岡ほか, 1998)。下部は黒色ガラス質溶結火山礫凝灰岩を主体とし, 上部は灰白色~淡青灰色隠微晶質の石基を

もつ脱ガラス化作用を受けた溶結火山礫凝灰岩からなる（西岡ほか, 1998, 2001; 室生団体研究グループ・八尾, 2008）. 本堆積物は複数の火砕フローユニットからなるが、それらが総体として1つの冷却ユニットをなしていると考えられている（西岡ほか, 1998, 2001）. この火砕流の給源については、熊野酸性岩類であるとする見方（星, 2002; 星ほか, 2004; 岩野ほか, 2007; 山下ほか, 2007）と、大台コールドロンとする見方（室生団体研究グループ・八尾, 2008）がある.

本堆積物からは前期中新世末～中期中新世初頭（約 14 ～ 16 Ma）を示す多数の放射年代（K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, FT）が報告されている（Hirooka and Kawai, 1967; Matsuda et al., 1986; 宇都ほか, 1996; Uto et al., 1997; Tatsumi et al., 2001）. 筆者らが測定したジルコン FT 年代も 15 Ma 前後に集中し、 χ^2 検定（Galbraith, 1981）に合格した 8 試料の年代の加重平均は 14.9 ± 0.2 Ma である（岩野ほか, 2007）.

今回測定したのは、本堆積物下部の黒色ガラス質溶結火山礫凝灰岩から採取した 2 試料（MR1-FI, MR70）である.

2. 石仏凝灰岩（室生火砕流堆積物の相当層）

石仏凝灰岩は奈良盆地東縁に分布する中新統地獄谷層の一部層であり、灰色～白色を呈する層厚 20 ～ 35 m の溶結（一部非溶結）凝灰岩からなる（尾崎ほか, 2000）. 下部は軽石火山礫凝灰岩および凝灰岩、上部は淘汰のよい細粒凝灰岩および凝灰質シルト岩（平行層理や斜交層理が発達）からなり、単一または複数の火砕流堆積物とみられる. 本凝灰岩は室生火砕流堆積物に対比される（例えば、山下ほか, 2007）.

本凝灰岩からは西田（1990）、尾崎ほか（2000）および岩野ほか（2007）が前期中新世末～中期中新世のジルコン FT 年代を報告している.

今回測定したのは、奈良市鬼ヶ辻付近に分布する流紋岩質凝灰岩 1 試料（SKB2）である.

3. 大峯花崗岩類

大峯花崗岩類は紀伊半島の脊梁地帯に沿って南北約 45 km の範囲に直径約 2 ～ 5 km の複数の独立した花崗岩質岩体として産する. 化学組成と苦鉄質鉱物組み合わせから、北部に分布する洞川岩体と白倉岩体は I タイプであり、中～南部に分布する川迫岩体、旭岩体、天狗山岩体、白谷岩体、片川—棕呂岩体は S タイプである（村田, 1982）. これらの岩体はすべて地下浅所で固結したと推定されている（村田, 1982）. 中～南部岩体と後述の熊野酸性岩類はパーアルミナスな S タイプ花崗岩質岩という点で似ており（村田, 1982; 新正ほか, 2002）, また両者は深部で大規模な高比抵抗体に連続する可能性が高いことが比抵抗探査によって示されている（梅田ほか, 2003）.

本花崗岩類からは前期中新世～中期中新世を示す多くの K-Ar, FT 年代が報告されている（Shibata and Nozawa, 1967; Itaya et al., 1982; Hasebe et al., 2000; Sumii and Shinjoe, 2003）. 筆者らが測定したジルコン FT 年代は 15 Ma 前後を示し（岩野ほか, 2007）, 岩体間に有意な年代差は認められない.

今回測定したのは 3 試料であり、川迫岩体の黒雲母花崗斑岩 1 試料（KSSP）、旭岩体の黒雲母花崗岩 1 試料（AS01）、

天狗山岩体の黒雲母花崗岩 1 試料（TG02）である.

4. 熊野酸性岩類

熊野酸性岩類は紀伊半島南東部に広く分布し、現存するだけでも約 300 km³ の体積をもつ膨大な珪長質火山—深成複合岩体である（荒牧・羽田, 1965）. 本岩類は最下部の流紋岩溶岩・火砕岩（神ノ木流紋岩）とそれを覆う流紋岩質火砕岩（尾鷲白浜火砕岩類）、およびそれらに貫入する花崗斑岩（熊野花崗斑岩）と細粒花崗岩（不動谷花崗岩）からなる（川上・星, 2007）. このうち最も分布面積が広いのは花崗斑岩であり、それは主に北岩体、南岩体、古座川弧状岩脈に分かれて分布している（荒牧・羽田, 1965）. 本岩類の形成様式として、最近の研究（Miura, 1999; Kawakami et al., 2007）はピストンシリンダー型の陥没カルデラ形成を伴う火成活動を主張しており、花崗斑岩はカルデラ火砕噴火によって生じた火砕岩（尾鷲白浜火砕岩類や古座川弧状岩脈の凝灰岩部）の中に浅所貫入した岩体であると解釈されている. 北岩体、南岩体、古座川弧状岩脈（花崗斑岩部）の古地磁気方位が類似することから、これらはほぼ同時に定置したと考えられている（星ほか, 2004）. また、本岩類形成時の火砕噴火によって発生した火砕流（アウトフロー）の残存堆積物が室生火砕流堆積物やその相当層（石仏凝灰岩など）であるという指摘があり（星, 2002; 星ほか, 2004）, それを支持する研究結果が岩野ほか（2007）、山下ほか（2007）によって報告されている.

本岩類の K-Ar, FT 年代は約 14 ～ 16 Ma である（河野・植田, 1964; Hirooka and Kawai, 1967; Shibata and Nozawa, 1967; 田上, 1982; 通商産業省資源エネルギー庁, 1989; Hasebe et al., 1993; 角井ほか, 1998）. 筆者らのジルコン FT 年代も同様の年代を示す（岩野ほか, 2007）.

今回測定したのは花崗斑岩 4 試料（北岩体の粗粒石基部 KAR-N3、南岩体の細粒石基部 KAR4e と粗粒石基部 KAR5、古座川弧状岩脈の細粒石基部 KOZA2）である.

測定方法

アパタイトは、岩石試料 0.2 ～ 0.5 kg を粉砕、水洗、60 メッシュによる篩い分け後、細粒分について腕かけにより重鉱物を濃集し、乾燥後磁選およびヨウ化メチレンによる重液分離を行った. 次に、結晶の自然面（外部面）が露出するように 100 ～ 150 粒子をエポキシ樹脂に埋め込みマウントを作成し、その後研磨紙とダイヤモンドペーストを用いて結晶内部研磨面を露出させた. アパタイト中の自発トラックのエッチングは 0.7 % HNO₃ 水溶液（20℃）で 4.5 分間行った. 年代測定方法は外部ディテクター法（Gleadow, 1981）で、誘導トラックの外部ディテクターには diallyl phthalate（DAP）樹脂を用いた. 熱中性子照射は日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の JRR-4 号炉気送管（Au に対する Cd 比は 3.6）で行った. その際、熱中性子線量測定用の標準ガラスは NIST-SRM612 を用いた. 年代較正はゼータ法（Hurford and Green, 1983）で行い、ゼータ値は製作方法の異なる 2 種類の DAP 樹脂ごとに決定、公表されている（Danbara et al., 2003, 2007）.

Table 1. Sample summary and results of fission track dating on apatite.

No. Sample	Rock type	Lat (N), Long (E)	Method	n	Spontaneous P_s (cm^{-2})	N_s	Induced P_i (cm^{-2})	N_i	Dosimeter P_d ($\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$)	N_d	r	Pr(χ^2) (%)	U (ppm)	Age $\pm 1\sigma$ (Ma)	Zeta calib.
Muro Pyroclastic Flow Deposit and Sekibutsu Tuff															
1 MR1-F(Ap)	Rhyolitic welded tuff	34°35'02", 136°07'43"	ED1	117	1.19×10^{-5}	627	9.10×10^{-5}	4792	6.867	4395	0.44	10	15	14.4 ± 0.7	A
2 MR70(Ap)	Rhyolitic welded tuff	34°30'56", 136°06'37"	ED1	132	1.16×10^{-5}	612	8.19×10^{-5}	4310	6.643	4252	0.34	43	14	15.1 ± 0.7	A
3 SKB2(Ap)	Rhyolitic tuff	34°41'56", 135°52'20"	ED1	120	1.14×10^{-5}	875	8.69×10^{-5}	6679	6.877	4401	0.22	5	15	14.4 ± 0.6	A
<i>ditto</i>			ED1	83	1.13×10^{-5}	528	9.91×10^{-5}	4621	9.334	5600	0.49	83	12	16.0 ± 0.8	B
<i>ditto</i>			ED1	60	1.17×10^{-5}	337	7.42×10^{-5}	2144	5.908	4254	0.17	3	15	13.9 ± 0.9	B
Omine Granitic Rocks															
4 KSSP(Ap)	Granite porphyry	34°12'28", 135°54'58"	ED1	30	6.71×10^{-5}	944	4.03×10^{-6}	5665	5.890	4241	0.70	2	80	14.7 ± 0.6	B
5 AS01(Ap)	Granite	34°07'09", 135°52'38"	ED1	26	7.23×10^{-5}	606	4.86×10^{-6}	4070	5.881	4234	0.95	48	96	13.1 ± 0.6	B
6 TG02(Ap)	Granite	34°03'43", 135°52'37"	ED1	30	6.35×10^{-5}	1105	4.22×10^{-6}	7350	5.872	4228	0.88	11	84	13.2 ± 0.5	B
Kumano Acidic Rocks															
7 KAR-N3(Ap)	Granite porphyry	33°59'29", 136°07'21"	ED1	28	2.42×10^{-5}	489	1.44×10^{-6}	2906	5.864	4222	0.96	2	29	14.8 ± 0.8	B
8 KAR4e(Ap)	Granite porphyry*	33°38'58", 135°57'21"	ED1	30	1.25×10^{-5}	260	7.00×10^{-5}	1459	5.855	4215	0.08	36	14	15.6 ± 1.1	B
9 KAR5(Ap)	Granite porphyry	33°43'48", 135°57'09"	ED1	30	1.60×10^{-5}	268	9.58×10^{-5}	1604	5.846	4209	0.59	5	19	14.6 ± 1.0	B
10 KOZA2(Ap)	Granite porphyry*	33°32'10", 135°48'38"	ED1	30	1.22×10^{-5}	210	7.31×10^{-5}	1263	5.837	4203	0.36	9	15	14.5 ± 1.1	B

(1) Method : external detector method that applies to internal surface (ED1)

(2) n: number of grains counted

(3) ρ and N: density and total number of counted tracks, respectively

(4) neutron dosimeter glass: NIST-SRM612

(5) irradiation site : pneumatic tube of JRR-4 reactor of Japan Atomic Energy Agency

(6) r : correlation coefficient between p_s and p_i .(7) $\text{Pr}(\chi^2)$: probability of obtaining the χ^2 value for ν degrees of freedom (ν =number of crystals - 1)(8) Age: $T = (1/\lambda_D) \ln[1 + \lambda_D \zeta g (\rho_s/\rho_i) p_d]$ (9) geometry factor: $g=0.5$ for ED1(10) error: $\sigma_T = \zeta \times [1/\Sigma N_s + 1/\Sigma N_i + 1/\Sigma N_d + (\sigma_{\zeta}/\zeta)^2]^{1/2}$; σ_{ζ} , 1σ error of ζ value(11) total decay constant of ^{238}U : $\lambda_D = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ (12) Zeta calibration: A, ζ_{ED1} value: 321 ± 4 for Q-DAP detector (Danhara et al., 2007)B, ζ_{ED1} value: 300 ± 4 for S-DAP detector (Danhara et al., 2007)

(13) *: relatively fine-grained groundmass

Fig. 2. Plots of apatite fission track ages determined for the Miocene igneous rocks in the Kii Peninsula. Closed and open circles indicate data that passed and failed the χ^2 -test, respectively. Shaded zone represents zircon fission track age of 15.0 ± 0.1 Ma for the Miocene igneous rocks activity proposed by Iwano et al. (2007). Numbers in parentheses indicate samples: (1) MR1-FI, (2) MR70, (3) SKB2, (4) KSSP, (5) AS01, (6) TG02, (7) KAR-N3, (8) KAR4e, (9) KAR5 and (10) KOZA2.

結 果

結果を Table 1 にまとめた。ここで、10 試料 12 測定のうち 3 測定が χ^2 検定に失格したのでこれらは参考値とする。なお全 12 測定結果について、それぞれ 6 つの FT データ分析図 (a, 粒子年代ヒストグラム; b, 自発 FT 計数—誘導 FT 計数相関図; c, 自発 FT 密度—誘導 FT 密度相関図; d, 粒子年代の確率密度分布; e, ラディアルプロット (radial plot); f, ウラン濃度ヒストグラム) をオープンファイルに載せた。これらの図の見方は檀原ほか (2004) に詳しく説明されているので参照されたい。

室生火砕流堆積物、石仏凝灰岩、熊野酸性岩試料では、平均ウラン濃度が 10 ~ 20 ppm と低く、測定粒子 1 粒子当たりの平均自発 FT 計数は 10 本以下と非常に少なかった。その結果、粒子年代ヒストグラムは 0 ~ 40 Ma の間でばらつきが見られ、粒子年代の確率密度分布は典型的なポアソン分布になった。室生火砕流や石仏凝灰岩試料で測定粒子数を 100 粒子以上に増やしても同様な結果が得られた。大峯花崗岩類では平均ウラン濃度が 80 ~ 90 ppm と高かったことから、測定粒子 1 粒子当たりの平均自発 FT 計数は約 30 本と多くなり、粒子年代分布は正規分布に近くなった。これらの FT データのばらつきやふるまいは、檀原ほか (2004) が示した数値計算実験 (シミュレーション) とよく合っている。

Fig. 2 に、今回得られたアパタイト FT 年代値と既報ジルコン FT 年代 (約 15 Ma) との比較を示す。以下に室生火砕流堆積物、石仏凝灰岩、大峯花崗岩類、熊野酸性岩類の岩体

ごとに結果をまとめる。

1. 室生火砕流堆積物

溶結凝灰岩 2 試料からそれぞれ 14.4 ± 0.7 Ma (MR1-FI), 15.1 ± 0.7 Ma (MR70) という年代を得た。いずれも χ^2 検定に合格した。ウラン濃度は 14 ~ 15 ppm であった。2 つのアパタイト年代の加重平均は 14.8 ± 0.5 Ma であるが、これは岩野ほか (2007) による同火砕流堆積物のジルコン FT 年代の加重平均 (14.9 ± 0.2 Ma: χ^2 検定に合格した 8 試料の年代の平均) と 1 σ レベルで区別できない。このことは本岩体が単一の冷却ユニットからなるという地質学的解釈 (西岡ほか, 1998, 2001) と整合する。またジルコンの FT 閉鎖温度 (約 250 °C: Hurford, 1986; Tagami et al., 1995) とアパタイトの FT 閉鎖温度 (約 100 °C: Wagner and Van den haute, 1992) の違いによる年代差が検出できない程度に本岩体の冷却が急速であったことを示す。

2. 石仏凝灰岩 (室生火砕流堆積物の相当層)

流紋岩質凝灰岩 1 試料 (SKB2) から 3 つの年代を得た。そのうち 2 測定 (14.4 ± 0.6 Ma, 16.0 ± 0.8 Ma) は χ^2 検定に合格し、1 測定 (13.9 ± 0.9 Ma) は失格した。ウラン濃度は 12 ~ 15 ppm であり、室生火砕流堆積物の 2 試料と同程度であった。これらの年代は、同一試料に対するものであるにもかかわらず比較的大きな分散を示し、 χ^2 検定に合格した 2 測定は 1 σ レベルで有意に異なっている (2 σ レベルでは約 15 Ma で重なる)。しかしながらアパタイト年代のほうがジルコン年代よりも若いといった傾向は認められない。

3. 大峯花崗岩類

川迫 旭、天狗山の各花崗岩質岩体から 1 つずつ年代を得た。そのうち川迫岩体の年代 (試料 KSSP: 14.7 ± 0.6 Ma) は χ^2 検定に失格し、旭岩体 (試料 AS01: 13.1 ± 0.6 Ma) と天狗山岩体 (試料 TG02: 13.2 ± 0.5 Ma) は合格した。ウラン濃度は 80 ~ 96 ppm と、今回測定した中では高い値を示した。

χ^2 検定に合格した 2 つの年代に注目すると、旭、天狗山の両岩体とも約 13 Ma であり、同一試料の FT ジルコン年代 (約 15 Ma: 岩野ほか, 2007) よりも 1 σ レベルで有意に若い (Fig. 2)。この事実は両岩体が比較的ゆっくり冷却したこと、すなわち両岩体とも約 15 Ma にはジルコン FT の閉鎖温度程度 (約 250 °C) であったが、そこからアパタイトの FT 閉鎖温度程度 (約 100 °C) まで冷えるのに約 150 ~ 200 万年程度かかったことを示唆している。

4. 熊野酸性岩類

花崗斑岩の 4 試料に対して年代を求めた。北岩体中心部の 1 試料から得た年代 (試料 KAR-N3: 14.8 ± 0.8 Ma) は χ^2 検定に失格したが、南岩体の 2 試料の年代 (岩体縁辺部の試料 KAR4e: 15.6 ± 1.1 Ma; 岩体中心部の試料 KAR5: 14.6 ± 1.0 Ma) および古座川弧状岩脈の 1 試料から得た年代 (KOZA2: 14.5 ± 1.1 Ma) は合格した。これら 4 つの年代は、各岩体における位置 (中心部/縁辺部) が異なるにもかかわらず、1 σ レベルで区別できない。検定に合格した 3 つの年代の加重平均は 14.9 ± 0.6 Ma である。ウラン濃度は、北岩体の試料が 29 ppm、南岩体と古座川弧状岩脈の試料が 14 ~ 19

ppm であった。

北・南岩体のジルコン FT 年代の加重平均は 15.1 ± 0.2 Ma (検定に合格した 5 試料の年代の平均), 古座川弧状岩脈のジルコン年代は 14.7 ± 0.4 Ma (試料 KOZA2 の χ^2 検定合格年代) であり (岩野ほか, 2007), それらの年代と今回得たアパタイト加重平均年代 (14.9 ± 0.6 Ma) との間に有意な違いはない (Fig. 2)。この事実は上記の室生火砕流堆積物の場合と同様, 花崗斑岩の冷却がアパタイトとジルコンの両年代に違いが出ない程度に急速であったことを示す。Hasebe et al. (1993) も, 花崗斑岩の細粒石基部と粗粒石基部との間でジルコンとアパタイトで FT 年代に有意な差がないことを示している。

謝 辞

産業技術総合研究所の角井朝昭氏と東京経済大学の新正裕尚氏には大峯花崗岩類試料を提供していただいた。日本原子力研究開発機構原子力科学研究所の市村茂樹氏, 堀直彦氏, 広瀬彰氏には熱中性子照射の際に大変お世話になった。(株)京都フィッション・トラックの山下暢子氏には図面作成にご協力頂いた。査読者の九州大学の渡辺公一郎教授と編集担当の金沢大学の長谷部徳子氏には本稿の不備を指摘していただいた。ここに記して御礼申し上げる。

文 献

- 荒牧重雄・羽田 忍, 1965, 熊野酸性岩類の中部および南部の地質。地質雑, **71**, 494-512。
- 檀原 徹・岩野英樹・加藤 進・松井良一, 2004, ジルコン FT 年代測定における試料評価と測定値の解釈。石技誌, **69**, 200-213。
- Danhara, T., Iwano, H., Kobayashi, H. and Tsuruta, T., 2007, A report on fission-track data of zircon and apatite age-standards for age calibration using diallyl phthalate (DAP) resin detectors and a minor revision of zeta values by Danhara et al. (2003). *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 77-81。
- Danhara, T., Iwano, H., Yoshioka, T. and Tsuruta, T., 2003, Zeta calibration values for fission track dating with a diallyl phthalate detector. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **109**, 665-668。
- Galbraith, R. F., 1981, On statistical models for fission track counts. *Jour. Math. Geol.*, **13**, 471-478。
- Gleadow, A. J. W., 1981, Fission-track dating method: What are the real alternatives? *Nucl. Tracks*, **5**, 3-14。
- Hasebe, N., Bambang, W. S. and Nishimura, S., 2000, Fission track ages of the Omine Acidic Rocks, Kii Peninsula, Southwest Japan. *Geochem. Jour.*, **34**, 229-235。
- Hasebe, N., Tagami, T. and Nishimura, S., 1993, The evidence of along-arc differential uplift of the Shimanto accretionary complex: Fission track thermochronology of the Kumano Acidic Rocks, Southwest Japan. *Tectonophysics*, **244**, 327-335。
- Hirooka, K. and Kawai, N., 1967, Results of age determination of some Late Cenozoic rocks in southwestern Japan. *1967 Ann. Progr. Rep. Paleogeophys. Res. Japan*, 69-73。
- 星 博幸, 2002, 熊野酸性火成岩類の古地磁気方位。地質調査研報, **53**, 43-50。
- 星 博幸・三輪健治・川上 裕, 2004, 古地磁気方位の比較からみた熊野酸性岩類北部と南部及び室生火砕流堆積物の時間関係。地質雑, **110**, 103-118。
- Hurford, A. J., 1986, Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **92**, 413-427。
- Hurford, A. J. and Green, P. F., 1983, The zeta age calibration of fission-track dating. *Isotope Geosci.*, **1**, 285-317。

- Itaya, T., Nagao, K., Murata, M. and Ogata, K., 1982, Rare gas composition and K-Ar ages of I- and S-types in the Ohmine granitic rocks, central Kii Peninsula, Japan. *Abstr. 5th Int. Conf. Geochronol. Cosmochronol. Isotope Geol.*, 164-165。
- 岩野英樹・檀原 徹・星 博幸・川上 裕・角井朝昭・新正裕尚・和田穰隆, 2007, ジルコンのフィッション・トラック年代と特徴からみた室生火砕流堆積物と熊野酸性岩類の同時性と類似性。地質雑, **113**, 326-339。
- 川上 裕・星 博幸, 2007, 火山-深成複合岩体にみられる環状岩脈とシート状貫入岩: 紀伊半島, 尾鷲-熊野地域の熊野酸性火成岩類の地質。地質雑, **113**, 296-309。
- Kawakami, Y., Hoshi, H. and Yamaguchi, Y., 2007, Mechanism of caldera collapse and resurgence: Observations from the northern part of the Kumano Acidic Rocks, Kii Peninsula, southwest Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 263-281。
- 河野義礼・植田良夫, 1964, 本邦産火成岩の K-A dating (I)。岩鉱, **51**, 127-148。
- Matsuda, T., Torii, M., Tatsumi, Y., Ishizaka, K. and Yokoyama, T., 1986, Fission-track and K-Ar ages of the Muro Volcanic Rocks, Southwest Japan. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, **38**, 529-535。
- Miura, D., 1999, Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **92**, 271-294。
- 村田 守, 1982, 紀伊半島中部, 大峯地域の S タイプおよび I タイプ花崗岩質岩。岩鉱, **77**, 267-277。
- 室生団体研究グループ・八尾 昭, 2008, 室生火砕流堆積物の給源火山。地球科学, **62**, 97-108。
- 西田史朗, 1990, 御蓋山とその周辺の地形と地質。(財)春日顕彰会「史跡春日大社境内地実態調査報告及び修景整備基本構想策定報告」, 109-127。
- 西岡芳晴・尾崎正紀・寒川 旭・山元孝広・宮地良典, 2001, 桜井地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 141p。
- 西岡芳晴・尾崎正紀・山元孝広・川辺孝幸, 1998, 名張地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 72p。
- 尾崎正紀・寒川 旭・宮崎一博・西岡芳晴・宮地良典・竹内圭史・田口雄作, 2000, 奈良地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 162p。
- Shibata, K. and Nozawa, T., 1967, K-Ar ages of granitic rocks from Outer Zone of Southwest Japan. *Geochem. Jour.*, **1**, 131-137。
- 新正裕尚・折橋裕二・角井朝昭・中井俊一, 2002, 室生火砕流堆積物の全岩化学組成: その給源の手掛り。岩鉱, **31**, 307-317。
- Sumii, T. and Shinjoe, H., 2003, K-Ar ages of the Ohmine Granitic Rocks, south-west Japan. *Island Arc*, **12**, 335-347。
- 角井朝昭・内海 茂・新正裕尚・下田 玄, 1998, K-Ar 法による熊野酸性火成岩類の年代の再検討。地質雑, **104**, 387-394。
- 田上高広, 1982, 熊野酸性岩類の古地磁気とフィッション・トラック年代。大阪微化石研究会誌, no.9, 23-32。
- Tagami, T., Hasebe, N. and Shimada, C., 1995, Episodic exhumation of accretionary complexes: Fission-track thermochronologic evidence from the Shimanto Belt and its vicinities, southwest Japan. *Island Arc*, **4**, 209-230。
- Tatsumi, Y., Ishikawa, N., Anno, K., Ishizaka, K. and Itaya, T., 2001, Tectonic setting of high-Mg andesite magmatism in the SW Japan arc: K-Ar chronology of the Setouchi volcanic belt. *Geophys. Jour. Int.*, **144**, 625-631。
- 通商産業省資源エネルギー庁 (MITI), 1989, 昭和 63 年度広域地質構造調査報告書「那智地域」, 164p。
- 梅田浩司・上原大二郎・小川康雄・工藤 健・角田地文, 2003, 広帯域 MT 法による紀伊半島の中新世珪長質火成岩体の深部構造。火山, **48**, 461-470。
- 宇都浩三・阿武 賢・周藤正史・内海 茂, 1996, 西南日本, 中期中新世室生火山岩の K-Ar 年代。火山, **41**, 257-261。
- Uto, K., Ishizaka, O., Matsumoto, A., Kamioka, H. and Togashi, S., 1997, Laser-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating system of the Geological Survey of Japan: System outline and preliminary results. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **48**, 23-46。
- Wagner, G. A. and Van den haute, P., 1992, *Fission-Track Dating*. Enke, Stuttgart, 285p。

山下 透・檀原 徹・岩野英樹・星 博幸・川上 裕・角井朝昭・新正裕尚・和田穰隆, 2007, 紀伊半島北部の室生火砕流堆積物と周辺に分布する凝灰岩の対比およびそれらの給源: 軽鉱物屈折率を用いたモード分析によるアプローチ. 地質雑, **113**, 340-352.

以下の付図（オープンファイル）は、学会ホームページ上で公開しています、< <http://www.geosociety.jp/publication/content0006.html> >

Fig. A1. Analytical results of the sample MR1-F1 (Ap).

Fig. A2. Analytical results of the sample MR70 (Ap).

Fig. A3. Analytical results of the sample SKB2 (Ap).

Fig. A4. Analytical results of the sample SKB2 (Ap)_2.

Fig. A5. Analytical results of the sample SKB2 (Ap)_3.

Fig. A6. Analytical results of the sample KSSP (Ap).

Fig. A7. Analytical results of the sample AS01 (Ap).

Fig. A8. Analytical results of the sample TG02 (Ap).

Fig. A9. Analytical results of the sample KAR-N3 (Ap).

Fig. A10. Analytical results of the sample KAR4e (Ap).

Fig. A11. Analytical results of the sample KAR5 (Ap).

Fig. A12. Analytical results of the sample KOZA2 (Ap).