33



日本の珪長質深成岩体の噴火能力

佐藤 博明^{1)*}•田結庄 良昭²⁾•金丸 龍夫³⁾•新井 敏夫⁴⁾

この小論は日本の珪長質深成岩体の噴火能力(eruptibility)に関するものである. Scaillet et al. 要 旨 (1998)とTakeuchi (2011)は噴火したマグマのマグマ溜り内での粘性係数は多くの場合10⁶ Pa s以下である ことを示した. Glazner (2014)は珪長質ミニマムメルトの粘性係数を温度-圧力図の中で示し、より高温高 圧条件では粘性係数は低いが,0.1 GPaの圧力(深さ3-4 kmに相当)で780℃以下では粘性係数は10⁶ Pa s を越えることを示した. 今回, 例として屋久島花崗岩 YMG (Anma et al., 1998; SiO₂ = 70.92 wt. %) につ いて, rhyolite-MELTS (Gualda et al., 2012)を用いて水飽和における相平衡関係を求め, バルクと液の粘 性係数 (Giordano et al., 2008), 密度 (Ochs and Lange, 1999) を求めたが, 0.1 GPaの圧力で結晶作用と 発泡・脱ガスにより, 820 ℃以下では粘性係数は10⁶ Pa sを越えることが示された.日本の多くの珪長質深 成岩体は浅所貫入の特徴を示し、浅所ではマグマは発泡・脱ガスし、リキダス温度の上昇に伴って結晶作用 が生じ粘性係数が増大するため噴火能力を失う可能性が考えられる。日本の活火山の幾つかでは過剰脱ガス が観測されており、マグマ溜りから火道が浅所に達してその内部でマグマの対流脱ガスが生じ、その結果脱 ガスしたマグマはマグマ溜りの底に噴火能力を失って沈積することが考えられている (Shinohara, 2008). 日本の珪長質深成岩体では、(a) 掘削で浅所に高温花崗岩体が見出される、(b) 同時代の火山噴出物に貫入 している, (c) 細粒斑状組織を呈する, (d) 晶洞, ペグマタイト, アプライト等が存在する, 等, 浅所貫入 を示す場合が多くみられる.これらのことから、日本列島の珪長質深成岩体のかなり多くのものは浅所貫入 で噴火能力を失ったマグマが固化したものである可能性が考えられる.

キーワード:珪長質深成岩体,噴火能力,粘性,浅所貫入,脱ガス・結晶作用

1. はじめに

深成岩体は通常,火山の下にあるマグマ溜りを代表する と考えられる.しかし,実際の深成岩体が噴火可能なマグ マが存在した溜りであったことは必ずしも論証されていな い.近年の複成火山体やカルデラ火山の地殻構造探査によ ると,多くの場合その主要なマグマ溜りの上面は5-10 km にある.一方,かなり多くの深成岩体が同時代の火山岩層 に貫入しているのが知られ,浅所貫入であった可能性が考 えられ,少なくとも現在の活火山の主要なマグマ溜りより も浅所に貫入したものを見ている可能性が考えられる.ま た,近年多くの活火山(薩摩硫黄岳,伊豆大島, ^{全宅に書}) で過剰脱ガスが生じており,マグマ溜まり上方へ通じる火 道内での対流脱ガスが生じていることが考えられており, そのようなマグマ溜りの下部には脱ガスし粘性の大きくな った噴火能力の乏しいマグマが沈積している可能性が指摘 されている(Kazahaya *et al.*, 1994; Shinohara, 2008).マ グマが数km以浅に達すると,含まれる水が過飽和になり 発泡・脱ガスが生じることでリキダス温度が上昇し,それ に伴ってマグマが結晶作用を行うために粘性率が上昇し噴 火能力を失う. Scaillet *et al.* (1998), Takeuchi (2011)は 噴火マグマの溜まり内での粘性係数を復元し,その値が多 くの場合10⁶ Pa s以下であることを示した.この噴火マグ マの粘性の上限は溜まりの過剰圧で地殻を割ってマグマが

Engineering Geology of Japan, No.12, 33-51 (2022)
Eruptibility of Japanese felsic plutons
Hiroaki Sato ^{1)*} , Yoshiaki Tainosho ²⁾ , Tatsuo Kanamaru ³⁾ and Toshio Arai ⁴⁾

* Corresponding author : H. Sato, hsato47@gmail.com

¹⁾ Graduate School of Science, Kobe University, 1-1, Rokko-dai, Nada-ku, Kobe, 657-8501, Japan

²⁾ Graduate School of Human Development and Environment, Kobe University, 3-11, Tsurukabuto, Nada-ku, Kobe, 657-8501, Japan

³⁾ Department of Earth and Environmental Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40, Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo, 156-8550, Japan

⁴⁾ 1-2-18-803, Ikuta-cho, Chuo-ku, Kobe, 651-0092, Japan

2022年6月29日受付, 2022年11月21日受理. © 2022 Hiruzen Institute for Geology and Chronology. All rights reserved.

 ¹⁾神戸大学大学院理学研究科 〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1
²⁾神戸大学大学院人間発達環境学研究科 〒 657-8501 神戸市灘区鶴甲 3-11
³⁾日本大学文理学部地球科学科
〒 156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

4) 〒 651-0092 神戸市中央区生田町 1-2-18-803

上昇し地表に達するために必要な条件であると考えられる (Rubin, 1995; Takeuchi and Nakamura, 2001). この小論 では、マグマ溜り内での粘性係数10⁶ Pa s以下を噴火能力 (eruptibility)の指標として考え、特に浅所ではこの条件が 達成されないことから、珪長質深成岩体の貫入・定置深度 に注目して、それらの噴火能力を判定する試みをした.

火山体と深成岩体の関係についてBachmann et al. (2007)は多様な観点から検討しているが、必ずしも噴火の 有無の具体的な条件等を提示してはいない。むしろ、深成 岩体全体が一つの液状溜りを代表するよりも液の濃集部は 限定された分布をしていることを議論している。近年しば しば取り上げられる,深成岩体の逐次的成長 (incremental growth) については、ジルコンU-Pb年代測定により実証 的な検討が進められ (Coleman et al., 2004; Leuthold et al., 2012),一定厚さの貫入が逐次的に生じる場合のモデル化 が行われている(Annen, 2009). 高橋ほか (2021)は金峰 山岩体において, 珪長質包有物の濃集層が数10 m ~ 数100 mの間隔で分布することから逐次的貫入が生じたことを議 論している. Cashman and Giordano (2014) はカルデラと マグマ溜りについてのレビューを行い、カルデラの下のマ グマ溜りが従来の単一の巨大なマグマ溜りであるよりも, 複数のメルトレンズの集合体であると理解した方が良いこ とを主張している.カルデラ噴火のマグマ溜りは巨大であ る可能性が考えられるが、一度に形成されるものではなく 少量ずつの貫入でマッシュ状の溜りが形成される考え方は、 Jellinek and DePaolo (2003), Coleman et al. (2004)等か ら指摘されている.

この小論では,最初に日本の活火山のマグマ溜り探査や, 浅所貫入に関する知見をまとめる.次に,屋久島花崗岩を 例にマグマの噴火能力をバルク粘性の温度・圧力依存性か ら検討した結果について述べる。続いて日本で見られる具 体的な珪長質深成岩体の貫入・定置深度の情報を検討した 結果を述べ、複成火山体の成長とマグマ浅所貫入の関係に ついてモデルを検討する.

2. 活火山のマグマ溜りや浅所貫入に関する情報

深成岩体の生成過程を考えるのに,現在の活火山につい ての観測や調査結果は参考になると考え、日本の活火山の マグマ溜りに関する情報や浅所貫入活動について知られて いることを取りまとめる.

表1には、日本の活火山のマグマ溜りの深さに関する情報 をまとめた.マグマ溜り位置の情報は、高圧溶融実験によ る斑晶晶出条件の決定(1,2;表1の番号,以下同じ),地震 波速度トモグラフィ(3,5,6,7,8),地震波散乱解析(4), GNSS等測地観測による膨張・収縮源位置の推定(9,10), 等がある.これらを見ると、多くの活火山では主なマグマ 溜り(主要なマグマ噴火が生じた時にマグマを供給したマ グマ溜り)は深さ5-10 kmに位置することが判る. これは 圧力にすると0.13-0.27 GPaに相当する. Annen (2009)に よる逐次的貫入によるマグマ溜りのモデル化では貫入深さ の上限を5 km としており、表1での観測結果と調和的であ る. また, Huber et al. (2019)は含水マグマ溜りが定常的 に噴火と成長を継続する条件を熱的・力学的シミュレーシ ョンで求め、0.15-0.25 GPaの圧力条件(深さで5.5-9.5 km) を導いている、これは、周囲母岩の応力緩和が小さいため に過剰圧が発生しやすく,また,発泡による過剰噴火が生 じないため噴火を継続しながらマグマ溜りの成長に最適で あることを示しており、表1の結果とも整合的である.

表2には、近年の日本の活火山で見られた浅所貫入事件に ついてまとめた. 玄武岩質のものが多いが, 安山岩~流紋 岩質のものも少なくない.三宅島2000年の活動では6月末 から8月にかけて三宅島から北西に30 km以上, 深さ0.1-2.2 kmに1.1 km³の玄武岩マグマが貫入し、同時に山頂の陥没 が生じた (Ito and Yoshioka, 2002). 有珠山2000年噴火で は極めて浅所に貫入したマグマによって地盤の隆起とマグ マ水蒸気爆発を生じたが、山体全体のGPS測量から深さ 0.4-3.3 km に0.2 km³規模のマグマの貫入があったと考えら れた (Jousett et al., 2003). 葛根田は地熱掘削井で深さ

推定事例. lepth of magma Japanese active		火山名 volcano	深さ(km) depth	観測手法 method	文献 reference
	1	有珠 Usu	8-10	高圧溶融実験 high-pressure melting experiment	Tomiya <i>et al.</i> (2010)
	2	十和田 Towada	5-7	高圧溶融実験 high-pressure melting experiment	Nakatani <i>et al.</i> (2022)
	3	浅間 Asama	5-10	地震波トモグラフイ seismic tomography	Aoki <i>et al.</i> (2013)
	4	伊豆大島 Izu-Oshima	8-10	地震波散乱解析 seismic scattering analysis	Mikada <i>et al.</i> (1997)
	5	富士 Fuji	15-20	地震波トモグラフィ seismic tomography	Nakamichi <i>et al.</i> (2007)
	6	箱根 Hakone	>9	地震波トモグラフィ seismic tomography	Yukutake <i>et al.</i> (2021)
	7	阿蘇 Aso	8-15	地震波トモグラフィ seismic tomography	Abe <i>et al.</i> (2017)
	8	雲仙 Unzen	10-15	地震波トモグラフィ seismic tomography	Miyano <i>et al.</i> (2021)
	9	霧島 Kirishima	7.5-13.7	衛星測位 GNSS	Nakao <i>et al.</i> (2013)
	10	桜島 Sakurajima	10	衛星測位 GNSS	Iguchi (2013)

表1 日本の活火山のマグマ 溜まりの深さ Table 1 D reservoirs for volcanoes.

表2 日本の活火山でのマグマの浅 所貫入の事例.

Table 2Shallow intrusive events inJapanese active volcanoes.

	火山名 volcano	貫入年 event age (A.D.)	深さ depth (km)	体積 volume (km ³)	観測手法 method	岩質 rock type	文献 reference
1	有珠 Usu	2000	0.4-3.3	0.2	衛星測位 GNSS	流紋岩 rhyolite	Jousett <i>et al.</i> (2003)
2	葛根田 Kakkonda	-	1.5-3	>10	掘削 Drilling	花崗岩 granite	Doi <i>et al.</i> (1998)
3	岩手 Iwate	1998	2-4	0.012	衛星測位 GNSS	安山岩- 玄武岩? andesite- basalt?	Sato & Hamaguchi (2006)
4	三宅島 Miyakejima	2000	<2.2	1.1	衛星測位 GNSS	玄武岩 basalt	Ito & Yoshioka (2002)
5	東伊豆 Higashi-Izu	1976-1998	3–8	0.3	衛星測位 GNSS	玄武岩? basalt?	Murase <i>et al.</i> (2010)
6	桜島 Sakurajima	2015	0.4-1.2	0.0027	衛星測位他 GNSS etc.	安山岩 andesite	Hotta <i>et al.</i> (2016)

35

1.5-3 km に新鮮な花崗岩コアが見出されたものである。 岩 手前1998年活動は2月頃から山体西側で地震活動と地殻変 動が観測され9月3日の地震(M = 6.1)まで継続し,深さ 2-4 km に0.012 km³のマグマが貫入したと考えられる(Sato and Hamaguchi, 2006).東伊豆ではしばしば地震活動に引 き続いて地盤隆起が観測されている。Murase *et al.* (2010) は衛星測位等の観測から、より深部から約15 kmの深さの マグマ溜りヘマグマが供給されていること、さらに15 km 深のマグマ溜りから3-8 kmの地殻上部にマグマの貫入が数 年おきに生じ、その量が1976–1998年の間に約0.3 km³に達 したことを示した。桜島2015年のイベントはマグマが噴火 せずに、深さ0.4-1.2 km に体積約0.0027 km³が貫入するの が観測された(Hotta *et al.*, 2016).

このように,活火山の比較的浅所にマグマが貫入し噴火 を生じない場合は比較的頻繁に観測されている.Menand (2011)はマグマの貫入深さを決めている要因として,(1)浮 力中立点,(2)母岩のレオロジー,(3)母岩の剛性率の変化, (4)応力状態,を挙げている.活火山付近の地表から数100 m~2km程度までは比較的密度が小さく強度の小さい不均 質な火砕物・溶岩が多く堆積しているため,下方からマグ マが上昇すると地表に達するまでに側方に貫入し易いもの と考えられる.

浅所マグマの粘性係数とマグマ噴火能力: 屋久島花崗岩を例に

Harris (1977)は、含水花崗岩質マグマが上昇した場合、 浅所でマグマは水に飽和して発泡・結晶化し、地表に到達 する前に固化して噴出できないことを簡単な系で示した. Scaillet *et al.* (1998), Takeuchi (2011)は火山噴出物から噴 火前のマグマ溜まり内でのバルク粘性係数を見積もり、噴 火可能な条件としてマグマのバルク粘性係数が10⁶ Pa s以 下であることを提案している。図1には、Scaillet *et al.* (1998)のFigure 4を示しているが、これはマグマ溜りでの バルク粘性係数を火山噴出物の液組成、温度、含水量、結 晶量から求めて温度に対してプロットしたもので、多くの 火山噴出物のマグマ溜りでのバルク粘性係数が10⁶ Pa sよ り小さいことが示されている. バルク粘性係数が高くなる と、マグマ溜まりから割れ目を作りながらマグマが上昇す る途中で固化して噴火に至らない(Takeuchi, 2004). 天然 のマグマ系について, Glazner (2014)は、低圧・低温の条 件では含水量低下と液組成がシリカに富むためマグマの粘 性係数が大きくなり、Reynolds数(慣性力と粘性力の比) が小さくなり容易には結晶沈降が生じない点を指摘してい る. この論文のFigure 1 (図2)には、花崗岩質マグマの温 度-圧力図にメルト粘性係数が示されている. 液組成は Brugger *et al.* (2003)の最低温度のもの (SiO₂ = 75.7-76.9 wt.%)が、含水量、ソリダスはJohannes and Holtz (1996) が用いられている. 高温高圧では液の含水量が高く粘性は 低いが、低圧では粘性係数が大きくなることが示されてい る. 0.1 GPa (深さ3-4 km)で見ると、780℃以下では粘性 係数は10⁶ Pa sを越える.

ここでは花崗岩質マグマ組成について, rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012)を用いて熱力学的平衡を保ちながら 含水マグマが上昇した場合のマグマの粘性の変化を推定し てみることにする. 試料として屋久島花崗岩の代表的なも のであるYMG (SiO₂ = 70.92 wt. %; Anma *et al.*, 1998)を 用いた.水に飽和した条件(ガス相は0.0–0.1 wt.%になる ように調整した)で,酸素雰囲気はNNO+1として各温度・



図1 Scaillet *et al.* (1998)のFigure 4. マグマ溜り内でのバル ク粘性係数と温度の関係.

白丸は火山岩について,黒丸は深成岩について求められたもの. 多くの噴火マグマはマグマ溜りでのバルク粘性が10⁶ Pa s以下 であることが示されている.

Fig. 1 Bulk viscosity vs. temperature in magma reservoirs. Figure 4 of Scaillet *et al.* (1998).



図2 珪長質マグマのメルト粘性係数と温度・圧力の関係 (Glazner, 2014の Figure 1による).

噴火可能マグマは高圧,高温条件が必要であることを示す.低 圧低温側ではメルトの粘性は10⁶ Pasを越えるので噴火能力を失う. Fig. 2 Viscosity of felsic melts in pressure-temperature space after Figure 1 of Glazner (2014).

At low temperature and low pressure conditions, melt viscosity is over 10⁶ Pa s, and the melt loses eruptibility.

圧力での平衡相の量,化学組成を求め,メルト組成から Giordano *et al.* (2008) とOchs and Lange (1999)を用いて メルトの粘性係数 (η_m),メルトとバルクの密度を求めた. バルク粘性係数 (η_b) はEinstein-Roscoe equation ($\eta_b = \eta_m (1-\phi/0.6)^{-2.5}$:但し、 ϕ は結晶分率)を用いて計算 した. それらの結果を図3に示す.今回の検討ではマグマは 水に飽和しているという仮定を置いているが、これは沈み 込み帯の火山岩中の斑晶メルト包有物の分析等から,玄武 岩や安山岩マグマでも4 wt.%以上の含水量が報告されてい ることから第一近似的には妥当な仮定と考えている(例え ば,Bartley et al., 2020).また,最近,斑晶のメルト包有 物の分析から指摘されている,マグマ溜りでのCO₂フラク シング(吉村,2011)が生じると,気泡にH₂Oが吸われて メルトの含水量が低下し,結晶化が促進されるのでマグマ のバルク粘性係数は増加すると考えられる.

図3(a)には、上記のようにして計算した屋久島花崗岩 (YMG)の液とバルクの粘性係数を温度に対して示してい る. 圧力は0.08, 0.10, 0.15, 0.20 GPaについて計算した. 900℃では結晶量が少ないのでほぼバルクと液の粘性係数 は一致する. 温度低下に伴って, 各圧力での粘性係数は液 とバルクとで離れていくが、これは結晶の量の増加によっ ている. 0.1 GPa でのバルク粘性係数は約820℃で10⁶ Pa s に達するが、図2で見られるより分化した組成のものより高 温になっている. 今回はYMG (SiO₂ = 70.92 wt. %) につ いての計算を行ったが、より苦鉄質な組成について、同一 温度・圧力では、むしろ結晶量が増えることもありバルク 粘性係数は大きくなると考えられる。図3 (b)には屋久島花 崗岩(YMG)の液とバルクの密度を温度に対して示した. メルトの密度は2,200-2,300 kg/m³でそれ程変化しないが, バルク密度は温度低下に伴い結晶量が増加するために急激 に大きくなる.

屋久島の花崗岩はカリ長石巨晶で特徴づけられる(佐藤・



図3 rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012)を用いて計算したバルクとメルトの(a)粘性係数,(b)密度の温度・圧力依存性. 屋久島花崗岩のYMG組成(SiO₂ = 70.92 wt. %: Anma *et al.*,1998)を用い,水に飽和し,ΔNNO = 1として平衡共存相の量・組成 を求め,それらからGiordano *et al.* (2008)とOchs and Lange (1999)でメルト粘性係数,密度,バルク密度を求め,さらにEinstein-Roscoeの式でバルク粘性係数を求めた.カリ長石はこの計算では800°C以下で晶出する.低圧ではバルクの粘性係数が10⁶ Pas以上と なり噴火できないと考えられる.また,密度もほぼバルクマグマとカリ長石は等しく,沈積が生じ難かった可能性が考えられる. Fig. 3 Calculated bulk/melt viscosity and density for Yakushima granite (YMG), using rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012). Water-saturation is assumed with gas content 0–0.1 wt. %. (a) Bulk/melt viscosities, utilizing equation of Giordano *et al.* (2008). (b) Bulk/melt densities, utilizing equation of Ochs and Lange (1999).

長浜, 1979; Anma et al., 1998). カリ長石は水に飽和し た条件では800℃以下で安定である(MELTSの計算結果). 粘性係数の計算結果を見ると、0.15 GPa以上ではバルクの 粘性係数は760°C以下で10⁶ Pas以上であるが, 0.10 GPaで はバルクの粘性係数は820°C以下で10⁶ Pa s以上となってい る. つまり、この岩体が0.1 GPa以下の圧力(3.5 km以浅) で貫入したとしたら、粘性係数が高くて、噴火能力を失っ ていた可能性が考えられる.メルトの密度は2,250 kg/m³付 近であり, 800℃でのカリ長石の密度 (2,520 kg/m³: Robie et al., 1966; Skinner, 1966) よりも小さく, カリ長石は沈 積する筈である.しかし800℃では結晶が多く晶出してお りバルクの密度はカリ長石と密度差が小さく、またバルク の粘性係数も10⁶ Pa s以上と高く,カリ長石は身動きがと れず,沈積し難いことになる.ストークスの沈降式(v= $D^2 \cdot \Delta \rho g/(18 \eta))$ でメルトの密度 ($\rho = 2,250 \text{ kg/m}^3$) を用いて計算すると、粘性(η)が10⁶ Pa s, カリ長石の直 径(D)を5 cmとして沈降速度(v)はおよそ12 m/年とな り, 直径20 kmの岩体の冷却に必要な時間(数万年; 例え ば, Koyaguchi and Kaneko, 1998; Nabelek et al., 2012) で は十分沈降可能である.実際,一部(永田浜等)でカリ長 石の濃集が認められる(佐藤・長浜, 1979)ものの,カリ 長石巨晶は岩体全体に分布しており(佐藤・長浜, 1979; Anma et al., 1998), カリ長石の沈積・移動が困難であった ことを示唆している。Kawachi and Sato (1978)では当時の 高温高圧溶融実験結果からカリ長石巨晶は高圧・高温で晶 出したと考えたが、カリ長石巨晶には黒雲母、斜長石結晶 などが包有されており、カリ長石が晶出した時にはかなり の結晶度であったと考えられる. Vernon (1986), Johnson and Glazner (2010)等もカリ長石巨晶の形成はマグマ結晶 化の後期に生じたと考えている。また、カリ長石巨晶を含 む噴出岩は殆ど知られておらず, 屋久島花崗岩が浅所で脱 ガス・結晶化が進行し高粘度で噴火能力を失った状態で貫 入・定置したことが示唆される.

深成岩体の噴火能力に関連するより具体的な証拠として は次のようなものを挙げることができる.これらはマグマ の浅所貫入を示しており、その場合、屋久島花崗岩の場合 について述べたようにマグマの発泡・脱ガス・結晶化によ りマグマのバルク粘性係数が高くなり、噴火能力が乏しく なる可能性が大きいと考えられる.

- (i) 葛根田岩体のように現在高温の岩体が地表から数km 以浅の位置に貫入している場合がある.
- (ii) 同時代の噴出岩に深成岩体が貫入している場合が認め られる.
- (iii) 深成岩体とされるもので岩石の基質が細粒で斑状の半 深成岩の組織を持つものが認められる。
- (iv) 岩体中に晶洞やペグマタイト等,気相濃集部等が認め られ,低圧での固結を示すと考えられる場合がある.
- (v) 苦鉄質包有物や巨晶などが岩体全体に分布し,母マグ マのバルク粘性係数が高い可能性が考えられる.

4. 具体例に関する知見

ここでは,第四紀花崗岩類,新第三紀花崗岩類,白亜紀 花崗岩~古第三紀花崗岩類に分けて(Nakajima *et al.*, 2016),日本各地の珪長質深成岩体の噴火能力に関連して, 特に定置深さについての情報を取りまとめる.

4.1. 第四紀花崗岩類

4.1.1. 葛根田花崗岩

葛根田花崗岩は地熱開発で行われた掘削で見いだされた. 孔内に花崗岩が見出された地点は, 第四紀火山(岩手山, | 八幡平,秋田焼山,秋田駒ヶ岳) が分布する地域の中心に 北西-南東に分布する10地点で、花崗岩は地表からの深さ 1.5-3 kmに出現する.周囲の岩石に熱変成を与えており, その分布から花崗岩体の拡がりは数10平方kmの規模と推 定されている (Doi et al., 1998). ボーリング孔の温度測定 で,浅所では熱水循環が推定される低い地温勾配を示し, より深部で熱伝導による高い地温勾配が観測され最高温度 は500℃に達する。蟹澤ほか (1994) はボーリングコア中の 花崗岩類の記載を行い、それらがきわめて新鮮で、黒雲母 - 直方輝石石英閃緑岩,黒雲母-角閃石トーナル岩,優白 色黒雲母角閃石花崗閃緑岩等からなり, SiO₂ = 66-75 wt. %にわたることを示した。斜長石コアはAn90前後の組成を 示す. また, 掘削コアにはミアロリティック空隙や微文象 組織が認められる. K-Ar年代測定結果では角閃石, 黒雲母 およびカリ長石で0.1-0.2 Maの年代が得られている(Doi et al., 1998). 一方, 伊藤 (2016) によるジルコン U-Pb 年代 測定では0.09 ± 0.01 Maの値が得られ, 葛根田花崗岩がこ の地域の熱源であることを裏付けている. 花崗岩中の共存 する2輝石からの平衡温度は820-870℃,角閃石-斜長石温 度計では650-780℃,石英中のメルト包有物から710-750℃ が得られている(蟹澤ほか, 1994; Sasaki et al., 2003). 花 崗岩の化学組成は地表に分布する第四紀火山岩に全体とし て類似しているものの、花崗岩類の方がややAl₂O₃, P₂O₅ に乏しく, MgOに富む, 等の違いがみられる (蟹澤ほか, 1994).以上のように葛根田花崗岩は1.5-3 km程度の浅所 に貫入した花崗岩で、発泡・脱ガス・結晶化により噴火能 力はほぼ失っていた可能性が高い.

4.1.2. 滝谷花崗閃緑岩

滝谷花崗閃緑岩は北アルプス穂高滝谷を中心に主稜の主 に西側に貫入した南北13 km,東西4 kmの貫入岩体で,同 時期の穂高安山岩類に貫入している.ジルコンU-Pb年代 は、1.58 ± 0.09 Maが得られており(Ito *et al.*, 2017),フ ィッショントラック法やK-Ar法ではより若い年代が報告さ れている(Harayama, 1992).貫入後,わずか100万年間で 2,000 m以上も隆起した地帯に貫入した第四紀の花崗閃緑 岩で,Harayama (1992) により斑状細粒基質等の浅所貫入 相が記載されている.Hartung *et al.* (2021)はこの花崗岩 類とほぼ同時期の大規模火砕流堆積物(丹生川火砕流,恵 比寿峠火砕流)の記載も行い,それらや穂高安山岩類・滝 谷花崗閃緑岩が組成的に共通のマグマに由来すること,火 砕流基質ガラス組成の平衡条件から結晶分化作用はより深 い圧力で生じ, 滝谷花崗閃緑岩は後から浅所に貫入したこ とを示している.またこの滝谷花崗閃緑岩からの噴出相は 知られていない.これらのことから滝谷花崗閃緑岩は噴火 能力を失った浅所貫入相を代表すると考えられる.

4.1.3. 黒部川花崗岩

黒部川花崗岩は,北アルプス北部の後立山脊梁から黒部 川にかけて南北約15 km, 東西3-6 km, 面積約100 km²に 拡がる比較的大きな第四紀岩体である. 第四紀の爺ヶ岳火 山岩類に貫入しており、この爺ヶ岳火山岩類は主に2回の大 規模火砕流堆積物で構成され厚さ最大3,500 m, 体積300 km³に達するとされている (原山ほか, 2010; Ito et al., 2021). 岩体は東側に傾動していると考えられ(原山, 2015), 西側下位の中粒等粒状~斑状花崗岩 (SiO₂ = 70-74 wt.%)から、東側上位の細粒斑状花崗岩(SiO₂ = 72-77 wt.%) で構成される (Wada et al., 2004). この岩体の特 徴の一つは,多量のMME (Mafic Magmatic Enclave: 苦鉄 質包有物)が含まれることで、岩体の下位で35%、上位で 55%を占める。MMEは急冷周縁相を持っており、重積す ることは殆どなく、苦鉄質マグマの貫入時に低温の珪長質 マグマにより急冷して形成されたと考えられる。ジルコン U-Pb年代はIto et al. (2013, 2021)で報告されており、爺ヶ 岳火山岩類で1.55 ± 0.09 Ma, 黒部川花崗岩については東 端付近で2.2, 2.1 Maの年代が2点あり,西側の中央~北部 で最も若い0.67-0.86 Ma, その他の部分では1.1 Ma前後の 値が得られている. これらのデータから Ito et al. (2021)は, 黒部川花崗岩体は1.5 Ma頃の爺ヶ岳カルデラ噴火の後,浅 所に再生貫入して北アルプスの隆起をもたらしたものと考 えた. この場合, 岩体の厚みを考えると一部は噴火能力を 残した可能性が考えられるが、全体にマグマの温度は低く 見積もられており(ジルコン飽和温度と角閃石-斜長石温 度計で700-850℃: Ito et al., 2021; ジルコン中のTiO2量か ら700-850°C: Yuguchi et al., 2022), マグマのバルク粘性 係数は高かった可能性が考えられる。MMEについては結 晶作用による二次発泡により浮上・濃集した可能性が示唆 されている (Wada et al., 2004). その量は上部では平均55 体積%に達しており,通常の苦鉄質マグマと珪長質マグマ の混合でMMEが生じる条件(苦鉄質マグマが30-50重量% 以下: Sparks and Marshall, 1986) 以上となっており, 深 部のマグマ溜りでMMEが形成され、運搬・貫入した可能 性も併せ今後も検討が必要と考えられる.以上のように, 黒部川花崗岩体は厚みがあるが頂部は浅所に貫入しており, 噴火能力は乏しかった可能性が強いと思われる.

4.2. 新第三紀花崗岩類

4.2.1. 丹沢複合深成岩体

丹祝複合深成岩体は、外縁部の斑れい岩体、および露出 面積の主要部分をなすトーナル岩・石英閃緑岩からなる複 数の岩体から構成される.これらの主要な岩相は、中粒等 粒状組織を示し、末期に活動した小岩体は半深成岩様の組 織を示す(滝田,1974;1980).比較的苦鉄質な岩石は集積 組織を示し、珪長質な岩石は石英による斑状の組織を示す (滝田,1974; Kawate and Arima, 1998).これらの全岩化 学組成は, SiO2含有量43-75 wt. %におよぶ幅広い組成幅 を示し、岩石組織や全岩化学組成の特徴から、SiO₂ = 62 wt.%程度の親マグマからの結晶の分別と集積により形成 されたと考えられている (Kawate and Arima, 1998). 金 丸・高橋 (2005)は、丹沢複合深成岩体の主要な活動期であ るトーナル岩・石英閃緑岩について帯磁率異方性を用いた 検討を行い、それらを4つの貫入ユニットに区分している。 丹沢複合深成岩体のジルコンU-Pb年代(Tani et al., 2010) は、これらのうち最も西に位置し道志川断層によりその他 のユニットと境されるユニット(約9 Ma)を除いて4-5 Ma を示している.この年代および全岩とジルコン中のTh/Nb 比の特徴から, Tani et al. (2010)は, 丹沢複合深成岩体が 丹沢地塊と本州弧の衝突と同時期の火成活動により形成さ れたと考えている. また, 斑れい岩体や, 金丸・高橋 (2005) が区分したユニットはそれぞれ数十万年程度異なる年代を 示し、丹沢複合深成岩体が複数の深成岩体の集合体である ことを示している. 丹沢複合深成岩体には, 多くの同時性 岩脈が認められる(金丸・高橋,2005;2011). それらと母 岩であるトーナル岩・石英閃緑岩との境界が鋸歯状を示す, 逆入脈が認められる,など互いに液 – 液の関係があったこ とは間違いないが、全体としては岩脈や包有岩岩脈状の形 態を示し、母岩が結晶度の高いクリスタルマッシュの状態 で貫入した岩脈であると考えられる. 丹沢複合深成岩体は, 主に伊豆小笠原弧の火山活動により形成された火砕岩類・ 砕屑岩類(約17–11 Ma)および衝突時の前面に存在したト ラフ充填堆積物(8-3.7 Ma)からなる丹沢層群などに貫入 している (Mikami, 1962; 杉山, 1976; 有馬ほか, 1999; 石川 ほか, 2016). このように、丹沢複合深成岩体と、それが 貫入する丹沢層群などの火成活動は全く異なる年代および 場において形成されたものであると言える。また、丹沢層 群の一部は緑色片岩相から角閃岩相に至る変成作用を被っ ている(相馬・吉田, 1968; Seki et al., 1969; 鳥海・荒井, 1986; 荒井, 1987). これらの変成岩類の鉱物共生から Toriumi and Arai (1989)は、丹沢岩体の北東部で0.1 GPa, 南西部で0.2-0.3 GPaの圧力を見積もっており、貫入の深さ は全体としては10 km程度に深かったが北東部では3-4 km であったと推定された.その後,Gibbs法によるP-T変化 の検討がなされている(桑谷・鳥海, 2013)が, 最大圧力 の見積もりは有用と考えられる.ただ、金丸・高橋(2005) による岩体内の同時性岩脈の古地磁気方位からは岩体の傾 動の可能性には否定的であり、さらなる検討が必要と思わ れる. Schmidt (1992)の角閃石圧力計により得られたトー ナル岩中の普通角閃石により得られる圧力は約0.2 GPaを 示す(金丸私信). 丹沢複合深成岩体と母岩の貫入境界で は、細粒化などの急冷組織が見られないことから、本岩体 は比較的深所に貫入した可能性がある(石川ほか, 2016) 一方, アパタイトおよびジルコンの(U-Th)/He年代 (Yamada and Tagami, 2008) との比較により得られた丹沢 複合深成岩体の冷却速度は世界最速の部類に入る最大658 ℃/百万年に達し (Tani et al., 2010),本岩体は,丹沢地塊 の本州弧への衝突に伴い急速に隆起し冷却されたようであ る.また,地震波屈折法による地殻上部の速度分布から, 丹沢複合深成岩体はVp = 6.3-6.7 km/sの部分に相当し,深

さ7 km以上まで連続している(Arai *et al.*, 2013).以上の ような議論からは,丹沢複合深成岩体は噴火能力を持った マグマ溜りであった可能性があるものの,現時点では噴火 能力の判定は難しい.

4.2.2. 東山梨火山深成複合岩体など

甲府盆地の東側の山地には広く新第三紀花崗岩類が分布 する. Sawaki et al. (2020)はこれらの花崗岩類のジルコン U-Pb年代を求め、4つの時期に区分している。第1期(15-16 Ma)は瑞牆(金峰山)岩体,昇仙峡岩体,第2期(13 Ma) は笹子岩体, 藤野木岩体, 芦川岩体, 第3期 (11 Ma) は三宝岩体,広瀬(徳和)岩体,塩平岩体,第4期(4-5 Ma)は小鳥(東山梨)岩体. これらの中では第1期の金峰 山岩体について、上部は斑状細粒黒雲母花崗岩〜黒雲母花 **崗斑岩からなり、ミアロリティック空隙、アプライト、ペ** グマタイトが見られる等,浅所貫入の特徴を持ち(高橋ほ か,2021),噴火能力を失ったものである可能性が強い.ま た, 高橋ほか (2021)は, 金峰山岩体について, 層状に苦鉄 質包有物が分布する産状から逐次的貫入が生じたことを示 した. 一方, 第3期の広瀬岩体について, Saito et al. (2007) は接触変成岩の解析から約0.3 GPaの平衡圧力を求めてい る. さらに, 第4期の東山梨火山深成複合岩体では同時代の 火山岩層に深成岩が貫入しており浅所貫入と考えられ、11 Maから5 Maの間に10 km程の隆起がこの地域に生じたこ とになる.

東山梨火山深成複合岩体は, 主に流紋岩質からデイサイ ト質の溶結凝灰岩からなる小楢山火山岩類と、花崗閃緑岩 からトーナル岩からなる小鳥山花崗閃緑岩から構成され(三 村ほか, 1984), 後者は前者に熱変成を与えている。小楢山 火山岩類からは、約4.6から6 Ma、小島山花崗閃緑岩から は、約4.3 MaのK-Ar年代が得られている(柴田ほか、 1984).本岩体は南北25 km以上,東西5 kmの南北に伸張 した細長い火成岩体で,高低差1,500 m以上にわたり露出 している.小鳥山花崗閃緑岩は、東山梨火山深成複合岩体 の中心部に分布し、安山岩質から流紋岩質の化学組成を示 す(金丸・高橋, 2008). 主成分鉱物は黒雲母, 普通角閃 石, 単斜輝石, 直方輝石, 不透明鉱物, 石英, 斜長石, カ リ長石である. 副成分鉱物はアパタイト, チタン石である. 普通角閃石,黒雲母はポイキリティックに斜長石や不透明 鉱物を包有している。輝石はしばしば普通角閃石中の残晶 として出現し, 普通角閃石, 不透明鉱物と集合して出現す ることもある。およそ標高1,500m以上の地域の岩石は顕 微鏡下で文象構造を示し,この付近の岩石は変質し有色鉱 物がしばしば緑泥石化している(金丸・高橋,2008). 岩体 北部の高標高域の接触部付近の小楢山火山岩類の一部は鉱 化作用を被っており、小烏山花崗閃緑に伴う熱水活動が示 唆される. 金丸・高橋 (2009)は, 小楢山火山岩類の分布や 小烏山花崗閃緑岩内部のアプライト脈の特徴などから、一 連のコールドロン形成活動の最末期にNNW-SSE方向の右 横ずれせん断運動に伴うプルアパート開口割れ目をマグマ が満たすことにより小烏山花崗閃緑岩が形成されたと考え ている. Takahashi (1990)は、急冷組織が見られ、岩体の 規模が小さいことなどから,噴出時の揮発性成分の急激な

減少による急速な結晶化により小烏山花崗閃緑岩の全岩主 成分組成が高度変化を示さない要因となったとしている. 以上のように,東山梨火山深成複合岩体は浅所貫入岩を伴 う一連の火成活動により形成された火山-深成岩体の特徴 をよく示しており,小烏山花崗閃緑岩は噴火能力を失った 状態で貫入したものと思われる.

4.2.3. 甲斐駒ヶ岳花崗岩体

甲斐駒ケ岳花崗岩体は、南アルプス北部の脊梁に分布し、 N20°Wに伸びた15 km×5 kmの範囲に分布しており、周 囲の四万十帯の堆積岩に幅5 kmを越える接触変成帯を形成 している(佐藤ほか, 1989; Saito et al., 2012)。 岩体周縁の 北西から西側、南側により珪長質な花崗岩が分布し、中央 部は花崗閃緑岩が占めている. 岩体中央部の試料について, 鉱物のK-Ar年代が測定され、角閃石で13.7 ± 0.8 Ma,黒 雲母11.7 ± 0.4 Ma, カリ長石10.3 ± 0.4 Ma, と閉鎖温度 (それぞれ510 ± 25°C, 300 ± 50°C, 150 ± 30°C: Dodson and McClelland-Brown, 1985) を考えると岩体が比較的時 間を掛けて冷却したものと考えられている(佐藤ほか, 1989). Watanabe et al. (2020) は角閃石組成を用いた固化 圧力を推定しており、0.22-0.24 GPa(深さ8-9 km)とい う値を求めている.この値に基づくと、甲斐駒ヶ岳花崗岩 体は現在見られる第四紀火山のマグマ溜りとほぼ同じ深さ にあり噴火能力を持ったマグマ溜りを代表する可能性が考 えられる.ただ、マグマの温度の情報や、10万年以上の活 動を行う複成火山のマグマ溜りに対応するかどうか、現時 点では不明である. Sato (1991)は、伊豆衝突帯の丹沢複合 深成岩体, 東山梨火山深成複合岩体, 甲斐駒ケ岳花崗岩体 等の地球化学的、岩石学的な検討を行い、母岩が塩基性火 山岩である丹沢複合深成岩体と,母岩が堆積岩起源の東山 梨火山深成複合岩体、甲斐駒ケ岳花崗岩体とでは、深成岩 の同位体組成や微量元素組成が対照的になっていることを 指摘しているが、母岩の性質と噴火能力の関係については 良く判らない.

4.2.4. 熊野酸性岩類など

熊野酸性岩類は、中期中新世に紀伊半島南東部で広く活 動した珪長質の火山深成複合岩体である(荒牧・羽田, 1965). これらは20×60 kmの地域に分布し、古いものか ら、神ジネ流紋岩、凝灰岩、花崗斑岩、弧状岩脈から構成 されている。U-Pb放射年代は、神ノ木流紋岩で14.78 ± 0.25 Ma, 凝灰岩15.02 ± 0.16 Ma, 花崗斑岩は14.48, 14.76, 15.51 Maの値が得られており (Shinjoe et al., 2019), これらは従来のK-Ar年代やフィッショントラック年代 (Miura, 1999) と誤算範囲で一致しており、岩体が短時間 で冷却したことを示す。神ノ木流紋岩は全体の中央部に分 布する. 層厚300 mの溶岩流で, 流理構造が顕著で斑状組 織を示す、凝灰岩類は花崗斑岩の縁辺部にみられ、花崗斑 岩が凝灰岩中に岩脈として明瞭に貫入している場合と漸移 する場合がある.両者の境界面は地表付近では,花崗斑岩 の下へ緩く傾斜する.また,凝灰岩は神ノ木流紋岩を整合 的に覆い、流紋岩は中期中新世の熊野層群を不整合に覆う (中島ほか, 2010). 花崗斑岩は, 熊野酸性岩中で面積の

85%を占め、最も多量に分布し、500-600 km³の体積が見 積もられている. 尾鷲市から熊野市に分布する北岩体と紀 和町から勝浦にかけて分布する南岩体がある. さらに,本 岩体周辺には石英斑岩の岩脈が分布する. 花崗斑岩は明瞭 な斑状組織を示し、斑晶は石英、斜長石、カリ長石、黒雲 母のほか、直方輝石やざくろ石などが含まれることがある。 花崗斑岩の石基は岩体周辺から中心部へ細粒の急冷相から 粗粒なものへと変化し、これら石基の特徴から、細粒岩相 が岩体縁辺部に、マイクログラニティック組織の岩相が岩 体中に最も広く分布し,マイクロペグマティティック組織 の岩相が岩体中心部に分布する(荒牧, 1965; 荒牧・羽田, 1965). 花崗斑岩と凝灰岩類の化学組成をみると、パーア ルミナスな特徴を有する(通産省資源エネルギー庁,1979). また,FeO/CaO比が1以上で,近隣の大峯Sタイプ花崗岩 の特徴に一致する(村田, 1982). 古地磁気学的研究による と、凝灰岩と花崗斑岩は逆帯磁であるが、古期の黒雲母流 紋岩は正帯磁で、時計回りに偏向した古地磁気方位を有す る(田上, 1982; 星, 2002). これらから, 熊野酸性岩の偏 向を西南日本の回転後に速やかに冷却していく過程での地 磁気逆転と解釈した(星,2002).熊野酸性岩や大峯花崗岩 をあわせ、紀伊半島地域の地下探査からはこの地域の地殻 中・下部は高比抵抗,低ブーゲ重力異常になっており(Fujita et al., 1997; 梅田ほか, 2003), 中新世の火成活動は短時 間の多量の熱量供給で生じ、その後は低温スラブの沈み込 みが継続して冷却したことが伺える。熊野酸性岩の大量の 花崗斑岩の成因として、ピースミール型カルデラ陥没で天 井が抜けた大型の溶岩湖(荒牧,1965)との提案があった が、その後の調査でカルデラ底が平面であることが指摘さ れ、バイアス型カルデラの再生(リサージェント)活動に よるラコリス (Miura, 1999; Kawakami et al., 2007)との 解釈がされている. 熊野酸性岩の花崗斑岩は極めて浅所に 貫入した半深成岩体であり、貫入時に発泡・脱ガス・結晶 化が生じ、それらは噴火能力を殆ど持たなかったと考えら れる.

熊野酸性岩とほぼ同じ時期に隣接して活動した大峯花崗 岩類については、微文象連晶や細粒斑状でミアロリティッ ク組織を呈す場合があり、低ノルムAn組成のものは0.05– 0.1 GPaの最低溶融点組成を示すなど低圧条件で定置・固 化したと考えられ(村田, 1982; 1984)、噴火能力は乏しか ったと考えられる.熊野酸性岩の花崗斑岩と類似の産状を 呈する同時代の花崗岩体として、尾鈴山の花崗斑岩や石鎚 道の深成岩体がある.尾鈴山の場合、岩体の伸びに沿って 25×3–5 kmの範囲に花崗斑岩が分布しており、周囲の厚い 溶結凝灰岩層に、北東側に位置する火道から側方に貫入し たことが指摘されている(中田, 1978).石鎚山についても 直径約8 kmの石鎚コールドロン内部の天狗岳火砕流堆積物 中に薄い板状に貫入した坂瀬川斑状花崗閃緑岩や面河渓細 粒アダメライトが見出され(Yoshida, 1984),熊野酸性岩 同様に噴火能力は失っていた可能性が考えられる.

熊野酸性岩のような巨大な浅所貫入岩体がどのような機構で形成されたのか、という問題がある。例えば、火山噴火の爆発/非爆発的噴火の境界の噴出率(10² m²/sec; Kozono *et al.*, 2013)と同じ貫入率が継続したとすると、

600 km³の体積が貫入するためには,約200年が必要となる. 一回の火山噴火の場合でもマグマ供給率は多様に変動する ことが知られており(東宮・小屋口,1997),浅所マグマ貫 入についての貫入率の推定の検討は興味が持たれる.

4.2.5. 足摺岬花崗岩

足摺輝花崗岩は四万十帯付加体に貫入した5×3 km程度 の比較的小規模な複合深成岩体で,U-Pb年代として13–14 Maの年代が得られている(Shinjoe et al., 2019; Matsumoto et al., 2020).構成する岩石は,斑れい岩から花崗岩まで, SiO₂で50–76 wt.%にわたる.特に花崗岩類は本邦唯一の Aタイプとされ,F,Ga,REE等に富む(今岡ほか,1991). 斑れい岩と花崗岩の様々な混合・混交現象が見られる(村 上・今岡,1985).花崗岩ではラパキビ組織が特徴的にみら れ,これはカリ長石の周囲を斜長石微晶が取り囲んだもの で,一旦晶出したカリ長石の周囲がマグマ混合で溶融し, その後周囲に斜長石が晶出して形成されたと考えられてい る(村上・今岡,1985;吉倉,2012).これまでの研究で, この岩体の深さに関する情報は殆どなく,噴火能力につい ても不明である.

4.2.6. 大崩山花崗岩類

大崩山花崗岩体は,K-Ar年代が13.8 Ma (柴田, 1978), 中新世中期の花崗岩体で,火山-深成複合岩体をなす.ま ず,流紋岩質火砕流堆積物が噴出して大崩山コールドロン が沈降し,次に,環状複合岩脈が形成され,最後に大崩山 花崗岩体が貫入定置した.その貫入定置の位置は地表から 3 km ほどであったとされている (Takahashi, 1986).

大崩山花崗岩体は花崗岩~花崗閃緑岩からなり,高度差 による顕著な岩相変化を示す.花崗岩体の下部は花崗閃緑 岩,上部は花崗岩質で,最上部はアプライトおよびペグマ タイト(脈状や晶洞状)となっている.U-Pb年代では上部 花崗岩は14.3–14.1 Maの年代を示すのに対し,下部は 13.9–13.2 Maの年代が得られ,この岩体は少なくとも2回 のマグマ貫入によって形成された(谷ほか,2021).斜長石 –角閃石温度計で鉱物のコア組成を用い結晶化温度として約 700℃が求められている(Yuguchi and Nishiyama, 2007).

大崩山花崗岩体は秩父帯の中・古生界,四万十層群ばか りでなく,同時期の祖母山火山岩類まで広く接触変成作用 を与えており,同時代の噴出岩に深成岩体が貫入している. また,大崩山花崗岩体をとりまくように,花崗斑岩の岩脈 が弧状をなして分布する.この環状岩脈は延長40 km に達 する特異な形状を示し,コールドロンを形成している.大 崩山コールドロンを形成した珪長質マグマは,化学組成が 同時期の火山岩類と同じ傾向を示すことから同じマグマか ら形成された可能性が高い.また,大崩山花崗岩体におい て,最上部でルーフ状に四万十層群と接する付近では,花 崗岩の上にアプライトおよびペグマタイト(脈状・晶洞状) が厚さ約20-30 cm で産し,気相濃集が形成されるなど浅所 貫入の特徴を示している.

大崩山花崗岩体中には苦鉄質包有岩が多く含まれる(高橋ほか,2022).標高1,000 m以上では長径10 cm以上の包 有岩は1 m² あたり1個以下と少ないが,標高800 m以下で は包有岩は、1 m²あたり4個と増えるなど、苦鉄質包有岩 の産状が花崗岩体の垂直方向に系統的に変化している.こ のように大崩山花崗岩体には苦鉄質包有物が多く含まれる が、重積することは殆どなく、浅所貫入時に下方から母マ グマと伴に供給され高粘性のため沈積濃集することなく分 布した可能性が考えられる.

以上のように大崩山花崗岩体は浅所貫入・定置の特徴を 有し,噴火能力を失った岩体である可能性が高い.

4.2.7. 屋久島花崗岩体

屋久島花崗岩については、3章で述べたように、浅所貫入 でメルト・バルク粘性係数が大きくなり、噴火能力を失っ た可能性が大きい.この岩体の特徴の一つであるカリ長石 巨晶が全体に分布している点については、高いバルク粘性 係数のため巨晶の移動が困難である可能性について上に述 べた.Kawachi and Sato (1978)は、カリ長石巨晶にBaの 幅100 μ m程度の顕著な反復累帯構造を記載している.カ リ長石中のBaの元素拡散係数はかなり小さく (800°C, dry で10⁻²³ m²/s程度: Cherniak, 2002), 10万年で平均拡散距 離は6 μ m程度であり、巨大岩体の冷却を考えてもカリ長 石中のBaの累帯構造は残ると考えられる.

屋久島花崗岩中には,稀にミアロリティック空隙等にホ ウ素を含む電気石が産することが記載されているが (Anma *et al.*, 1998),新第三紀外帯花崗岩類では,金峰山花崗岩 (松原, 1966),大峯花崗岩 (Kawasaki, 1980),宇和島花崗 岩 (寺岡ほか, 1986),大崩山花崗岩 (Takahashi, 1986), 答(き** 高隈山花崗岩 (Ishihara and Chappell, 2010),等でも記載 され,これも浅所貫入の特徴の一つと考えられる.

4.2.8. 戸蔦別深成岩体

日高山脈東部に位置する戸蔦別深成岩体は、千島弧の西 進により日高帯が圧縮・傾動して、西側に深部が露出し東 に60-80度傾いたマグマ溜り断面が南北8 km, 東西12 km にわたり露出している (Kamiyama et al., 2007). 岩体の実 質の厚さは10 km近くに達するが、液体のマグマは各時点 でその一部を占めて存在したと考えられた。Rb-Sr全岩ア イソクロン年代は約20 Maである。全体は3つのゾーンに区 分され,西側の斑れい岩からなるゾーン I (SiO₂ = 49-56 wt.%)から、閃緑岩のゾーンII (SiO₂ = 57-70 wt.%), 東側の花崗岩からなるゾーンⅢ(SiO₂ = 71–75 wt. %)が 分布する.ゾーンⅠ, Ⅱでは優白色岩は主に斜長石の沈積 で生じたもので,苦鉄質マグマの溜り床へのシート貫入, 壁岩のストーピング,マグマ混合,結晶沈積,等が記録さ れている. ゾーンII, IIIでは, YやZrに富む組成変化が認 められ、含水量が低く高温のマグマの混入が生じてジルコ ンの晶出が遅れたことが指摘されており、このような条件 では溜り内マグマの噴火能力は高かったと考えられる. Kamiyama et al. (2007)は、結晶分化・マグマ混合で生じ た岩相が残った閉じた系でのモデル作成に成功しているこ とから、この溜りからの噴火が無かった可能性について述 べている.ただ,長期間マグマ溜りが維持されており繰り 返し新たなマグマの貫入が生じており、噴火能力に関して はさらに検討が必要と思われる.

4.2.9. 日高帯の花崗岩類

日高帯には、高T/Pタイプの変成岩に伴って、斑れい岩, トーナル岩,花崗閃緑岩等が産する.これらは、37 Maと 19 Maの二つの時代に活動したものであるが、上記の戸蔦 別深成岩体は最も低変成度地域で若い時期を代表する. Shimura *et al.* (2004)によると、日高帯中軸に貫入してい る深成岩体の生成条件は0.3–0.9 GPa、750–1,000℃であり、 噴火能力は有していたと思われるが、実際にこれらの溜り からマグマが上昇・噴火したかどうかは判明していない.

4.2.10. その他の新第三紀花崗岩類

谷川岳花崗岩類は新第三紀末にフォッサマグナ東部の基 盤の構造境界付近に貫入した比較的規模の大きな岩体で, 磁鉄鉱系列,比較的低い⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比で特徴づけられる(佐 藤,2016;川野,2017).ジルコンU-Pb年代は東側の巻機 山岩体で3.18±0.13 Ma,中央の谷川岳岩体で3.32± 0.15 Maが得られている(Minami et al.,2021).貫入深度 に関する情報は乏しいが,斑状細粒組織を呈する部分が多 く,基質部に文象組織が認められ半深成岩的な性格を持つ ことが相馬・吉田(1964)に記されている.川野ほか(1992) はミアロリティック空隙が認められないことから浅所貫入 の可能性は少ない,としている.従って,興味深い岩体で あるが,噴火能力の判定は現状では困難である.

4.3. 白亜紀~古第三紀花崗岩類

4.3.1. 濃飛地方の白亜紀花崗岩類

濃飛流紋岩は西南日本の白亜紀火山活動を代表するもの の一つで、分布面積3,500 km²、厚さ1,500-2,000 m、総体 積5,000-7,000 km³に達する. K-Ar法等の放射年代は86-69 Maが得られており、これらに貫入する花崗岩類は、伊奈川 花崗岩 (82 Ma), 苗木・上松花崗岩 (67-71 Ma), 花崗閃 緑斑岩の小岩体,花崗斑岩の岩脈がある (Sonehara and Harayama, 2007). ジルコンU-Pb年代は,約70 Maが星ほ か (2016) により報告されている. Sonehara and Harayama (2007)はその78頁, 12-13行目に, 理由は書かれていないも $\mathcal{O}\mathcal{O}$, 'the granitoids were derived from the Nohi magma that was not able to erupt', と書かれている. 恐らくこの小 論の論考と類似の考え方から、地殻中・下部のマグマ溜り から上昇し浅所貫入した花崗岩マグマは噴火能力を失った と判断されたものと思われる. Sonehara and Harayama (2007)によると、苗木花崗岩には晶洞型ペグマタイトが含 まれる。また、濃飛流紋岩自体はその多くが結晶に富んで おり、かなり花崗岩的であることが指摘されている.

4.3.2. 領家帯,三橋花崗岩

中央構造線沿いの領家広域変成帯には多くの花崗岩が広 域変成岩に伴って産出する. 葉理組織を持つ古期領家花崗 岩類と等粒状の新期領家花崗岩類に区分されるが,ここで は新期領家花崗岩類の三橋花崗岩体について簡単に記す. 愛知県の三橋花崗岩は,領家変成岩中に直径5-6 kmの半円 弧状に産出し,領家変成岩とのコンタクトから10 m程は周 縁相としてざくろ石黒雲母花崗閃緑岩,内側の主体は角閃 石黒雲母トーナル岩から構成される. Kutsukake (1997)は これらの岩石について,斜長石・黒雲母・ざくろ石・白雲 母地質温度圧力計を用い660°C,0.42 GPaの平衡温度圧力 を求めている.これらは地殻中部の15 km深に相当し,貫 入当時は噴火能力を保ったマグマ溜りであったと考えられ る.Wallis and Okudaira (2016)のまとめによると領家変成 作用の温度・圧力は650-800°C,0.4-0.6 GPaに達していた. 新期領家花崗岩は変成作用のピーク後に活動を行っている が,三橋花崗岩のように,ほぼ類似の温度-圧力勾配に沿 っているとすると花崗岩の定置深さは地殻中部にあり,噴 火可能なマグマ溜りを形成した可能性が考えられる.

4.3.3. 土岐花崗岩体

土岐花崗岩体は岐阜県南東部に位置し,南北14 km,東 西12 kmに分布する. これは美濃帯の堆積岩類や濃飛流紋 岩に貫入し接触変成を与え、中新世の瑞浪層群と鮮新世の 瀬戸層群に被覆される(湯口ほか, 2010). 年代はRb-Sr法 で72.3 ± 3.9 Ma, CHIME法で68.3 ± 1.8 Ma, ジルコン U-Pb法で74.7-70.4 Maが得られている (Yuguchi et al., 2016).ウラン鉱床の基盤となっており希土類元素にも富む ことから約20本の1,000 m級の掘削が行われてその立体構 造が調べられ、近年、湯口等により論文が多数公表されて いる. 花崗岩のSiO2量は 72-78 wt. %, ASI (molar Al/ (Ca+Na+K))は0.88-1.14で、岩体の西側周縁でよりSiO₂が 多く,ASIが高く,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初生値が高いものが分布し,周 囲の美濃帯堆積岩の混成が生じたと考えられた. 湯口ほか (2010)は分化した組成のQz-Or-Ab系での位置からP_{H20} = 0.4-0.7 GPaの圧力を見積もっている. Ishihara and Murakami (2006)も、その場で結晶分別が生じたマグマ溜 りであるとしている.この岩体には特徴的にペグマタイト や二次変質が豊富に見られ、浅所貫入で噴火能力が乏しい マグマの可能性も考えられ、より厳密な貫入定置深さの検 討が望まれる.

4.3.4. 琵琶湖周辺の白亜紀花崗岩

琵琶湖の周囲には70 Ma前後の白亜紀花崗岩類とほぼ同 時期の大規模火砕流堆積物である湖東流紋岩が分布する (沢田・板谷, 1993). 琵琶湖南部に分布する田上花崗岩体 は, 主岩相である中~粗粒黒雲母花崗岩の周縁に不均質な 細~中粒斑状黒雲母花崗岩が分布しており、比較的高所に ある細粒黒雲母花崗岩はペグマタイトやアプライト脈を伴 うなど、垂直岩相変化が認められ、化学組成も細~中粒斑 状黒雲母花崗岩が中〜細粒黒雲母花崗岩よりも珪長質な特 徴を示す(周琵琶湖花崗岩研究グループ,2000).また,田 上花崗岩体の北部に分布する野洲花崗岩体も,岩体上部に 細粒等粒状〜細粒斑状黒雲母花崗岩が分布し、岩体下部に 粗粒等粒状〜粗粒斑状黒雲母花崗岩が分布しており、粒度 の垂直変化を呈する。化学組成も標高の高い方が珪長質と なる(細野・牧野,2002). これらの岩体の岩相や組織の変 化は,浅所での発泡・脱ガスによる結晶核生成によると考 えられる.野洲岩体や田上花崗岩体にはペグマタイトやア プライトが多くみられる (中野ほか, 2021). これらのこと から,田上岩体,野洲岩体は比較的浅所貫入で噴火能力に 乏しかった可能性が考えられる.

一方,琵琶湖北東に位置する頁月山花崗岩体は年代が 95–96 Maと他の周琵琶湖花崗岩体よりも古く,周囲から 中心へ,また標高と伴により珪長質な組成を示す(杉井・ 沢田,1999),周囲に熱変成を与えており,その変成作用の 温度圧力条件として465–595℃,0.26–0.35 GPaが見積もら れており(Suzuki,1977),この岩体はやや深く噴火能力を 持っていた可能性が考えられる.

4.3.5. 茨木複合花崗岩体および付近の花崗岩体

茨木複合花崗岩体は大阪北部の二畳紀とジュラ紀の付加 体に貫入する花崗岩体で,南東側の能勢岩体(長径10 km, 短径5.5 km)と北西側のほぼN30°Wに伸びた妙見岩体(5 ×1.5 km)からなる. 能勢岩体は顕著な累帯深成岩体をな すのが特徴である. 岩体周縁部に中粒石英閃緑岩, 中間部 に粗粒花崗閃緑岩が広く分布し,核部に細粒斑状花崗岩が 分布する(田結庄, 1971). 野外において, 粗粒花崗閃緑岩 は中粒石英閃緑岩に明瞭に貫入し、細粒斑状花崗岩は粗粒 花崗閃緑岩と貫入・漸移関係にあることから、茨木複合花 崗岩体ではある程度固化しつつあるマグマに新たなマグマ 貫入が生じた記録が残されている。年代測定結果(Rb-Sr: 田結庄ほか, 1999; 黒雲母K-Ar: 田結庄, 2001; ジルコン フィッショントラック:田結庄,2001)から、約100万年か ら数100万年間に冷却・固化したことが示されている。周 囲の堆積岩には最大で輝石ホルンフェルス相の接触変成を 与えている(Tainosho, 1991)が, 圧力の見積もりはされ ていない、重力ブーゲ異常は岩体内で弱い負の値になって おり、現在の堆積岩よりも花崗岩類の密度がやや小さいこ とと調和的である(鍋谷ほか,1972). 岩体の北東部と南西 部で重力の負異常が異なり,南西部の地下に軽い物質が存 在することを示している. 重力データから能勢岩体断面の 形態は、南西に緩やかで北東に急傾斜をなす構造が認めら れ,野外での内部構造データと調和的である.能勢岩体の 形は、内部構造、基盤岩との接触角度、重力データから判 断して, 南西に傾斜していると判断される (宮地ほか, 2005). 能勢岩体には、苦鉄質包有物が含まれ、それらの 全岩組成や鉱物組成から初期晶出鉱物の濃集相であると考 えられ、一旦深部溜りで生じた濃集相がマグマの浅所貫入 時に取り込まれて上昇・貫入した、と考えられた(田結庄、 1984). 岩体内部にはペグマタイトやアプライト脈を伴っ ている. 斑状細粒花崗岩の組成から見積もった平衡圧力は 0.05 GPa程度となり比較的低圧の条件を示唆する(田結庄, 1971). このように茨木複合花崗岩体は浅所にマグマが貫 入・固化を繰り返して生じており, 複成火山体を生じる代 わりに浅所に複合貫入岩体を形成したものと考えることが できるかも知れない.

近畿地方中北部では同時代の流紋岩質溶結凝灰岩に貫入 した珪長質深成岩体が幾つか知られており、いずれも浅所 貫入の特徴を示しており、噴火能力の乏しい貫入岩であっ た可能性が考えられる。例えば、三草山複合深成岩体(田 結庄ほか、1977)は、文象斑岩や文象質構造を持つ石英斑 れい岩からなり、同時代の溶結凝灰岩層を貫くなど、浅所 貫入の岩体である。一方、近畿地方中部では、白亜紀花崗 岩が80-70 Maに活動している(Morioka *et al.*, 2000)が、 記載を見る限り定置深さに関する情報は殆ど見られない(政 岡,1982).また,淡路島では後期白亜紀の泉南流紋岩は花 崗岩に貫入され不整合で上部白亜系の和泉層群に覆われて いる.泉南流紋岩のジルコンU-Pb年代は94.0±1.1 Ma, フィッショントラック年代は72.3±2.6 Maが得られてお り,後者は浅所貫入の花崗岩の熱で若返ったものと考えら れた(佐藤ほか,2020).

4.3.6. 兵庫県の白亜紀~古第三紀花崗岩体

ここでは,六甲花崗岩体, 沖山花崗岩体,赤穂斑状花崗 岩をとりあげる.

六甲花崗岩体は,N60°E方向に伸びた20×6 kmの岩体 で、同時代の噴出岩である流紋岩質溶結凝灰岩からなる有 馬層群に貫入している. 有馬層群の累積層厚は約2,000 m と見積もられている(田結庄, 2001). 六甲花崗岩は中~粗 粒相,細粒相,微文象相に区分される(新井・田結庄, 2004). 細粒相は半自形等粒状の組織をなすほか, 他形粒 状のアプライト組織をなす.また、微文象相は多くが小さ な晶洞を有する.分化の進んだ岩石の全岩化学組成から Qz-Or-Ab系で圧力見積もりをすると、0.05-0.1 GPaの低 圧での融点 Minimum の組成を示す(新井, 2005). 六甲花 崗岩体が丹波層群などの基盤岩に接するところでは,基盤 岩中には多くのアプライト質脈やペグマタイト質脈が見ら れる。六甲花崗岩体の細粒相や微文象相はSiO₂やK₂Oに富 むのに対し、中~粗粒相ではMgOやCaOに富む. 六甲花 崗岩は、地形的高地に細粒相が、低地に粗粒相が、そして 中間に中粒相が分布するなど,垂直に岩相が変化する.微 文象相は岩脈状にこれらの相を貫き, 岩体上部や周辺部に 多く分布する傾向がある.このように,六甲花崗岩は浅所 貫入で、噴火能力を失ったものの可能性が大きい。

沖山花崗岩は、鳥取県東部から一部兵庫県にわたって分 布する径12 kmの山陰帯に属する磁鉄鉱系の花崗岩体であ る. 年代をみると, K-Ar年代が68.3 Ma(柴田, 1979)と 山陰帯の特徴である白亜紀最末期-古第三紀を示す。沖山 花崗岩体は、4つの主要な岩相よりなる複合岩体で、岩体周 縁部から核部にむけて珪長質になるように分布している(田 結庄, 1985). トーナル岩は細粒で, 岩体周縁部をとりまく ように分布し、花崗閃緑岩は本岩体の中間部に分布し岩相 変化がみられる、アダメロ岩はより細粒で岩体核部に分布 し,角閃石黒雲母アダメロ岩と含角閃石黒雲母アダメロ岩 に亜区分され,前者は花崗閃緑岩との境界部に分布する. これら岩相はそれぞれ貫入関係,一部漸移関係にある.ま ず、岩体周縁部のトーナル岩が貫入し、続いて花崗閃緑岩、 最後にアダメロ岩が貫入している. このように, 岩体周縁 部から核部にむけて珪長質となり、しかも、核部ほど後期 貫入する特徴は、多くの累帯深成岩と同じである、沖山花 崗岩の各岩相は化学組成が類似し, Rayleighの分布則によ る同一マグマの分化作用の産物であることを示す。このこ とは、各岩相が同一のRb-Srアイソクロン上にのることと 調和的である (Shibata and Ishihara, 1979).また,沖山花 崗岩体東部には,小規模であるが流紋岩質凝灰角礫岩,凝 灰岩, 安山岩などからなる白亜紀矢田川層群が分布し, 沖 山花崗岩による熱変成を受けている. このように, 沖山花 崗岩は周辺岩石の関係から,浅所に貫入した花崗岩体で噴 火能力に乏しかったと思われる.また,貫入活動がある程 度の時間を置いて繰り返し生じており,茨木複合花崗岩体 のように複成火山の浅所貫入体を見ている可能性もあると 思われる.

沖山岩体南東に位置する波賀複合深成岩体は、磁鉄鉱系 の山陰帯の花崗岩で、外側にトーナル岩~花崗閃緑岩、内 側に文象斑岩等が分布する累帯構造を示す.同時期の流紋 岩質火砕岩(矢田川層群)に貫入しており(田結庄,1986), 浅所貫入で噴火能力に乏しかったと考えられる.

兵庫県南西の相生地域には白亜紀のコールドロンである 赤穂コールドロン(21×14 km)を埋積する火砕流堆積物 からなる赤穂層に貫入する微文象花崗閃緑岩体(塩屋岩体 :7×1.8 km)が分布し,それは中粒で斑晶として斜長石と 石英を含む(佐藤ほか,2016)。同時代と考えられる火砕流 堆積物に貫入しており浅所貫入で噴火能力には乏しかった ものと思われる。同様な同時代流紋岩質火砕流堆積物へ貫 入した深成岩類は山崎地域や生野地域でも認められ(山元 ほか,2002),浅所貫入で噴火能力に乏しい深成岩体と考え られる。

4.3.7. 中国地方,広島花崗岩体など

中国地方には白亜紀花崗岩類が広く分布しており,同時 期の流紋岩質大規模火砕流堆積物に貫入している場合が多 く浅所貫入岩体であると思われる.

東中国, 三朝・奥津・湯原地域については笹田ほか (1979)によって取りまとめられている.最大規模の鳥取花 崗岩体は連続的に露出する部分で25×10 kmの広さを持ち K-Ar年代は61-63 Maが得られている.鳥取花崗岩体は同 時代の流紋岩からなる打吹山火山岩類に貫入し熱変成を与 えている.古第三紀の鉛山文象斑岩や湯原文象斑岩は同時 期の火山岩類に貫入している.岩相も浅所相を呈しており, これらは噴火能力に乏しかったと思われる.

中国地方中央部には白亜紀の広島花崗岩が広く分布し, 同時代の大規模流紋岩質火砕流堆積物に貫入した浅所貫入 岩体で噴火能力は乏しいものであった可能性が大きい. 吉 田 (1961)はそのような産状を記載しており,花崗岩類は接 触部で細粒になる場合が多いが,粗粒状態の花崗岩が壁岩 に直接接する場合もある.大規模なペグマタイト脈の多く は細粒相中にある.細粒相部には岩脈状に閃長岩が生じて いる場合があり,母岩の花崗閃緑岩が粗粒になると閃長岩 はアプライトやペグマタイトを伴う不規則レンズ状を呈し, 時に巨晶閃長岩となる場合がある.

中国地方中西部の白亜紀~古第三紀火成活動は,今岡・ 飯泉 (2009)の総括によると,5つの活動期に区分され,各 期には火山岩と深成岩が存在する。110-103 Maの関門期 から,44-30 Maの田方川期まで火成活動が断続的に続い た.田万川地域には7×14 kmのコールドロン構造が認めら れ,何回かの火山活動と深成岩貫入が生じたことが示され ている.深成岩の貫入は大きく2回に分けられ,それぞれ火 山岩(デイサイト質~流紋岩質)に貫入しており,再生(リ サージェント)活動として浅所に併入したとされ(村上, 1973),噴火能力に乏しかったと思われる.

4.3.8.北上山地の白亜紀花崗岩類

北上山地には北から階上、笛野畑、宮古、遠野、栗橋、 五葉山、人首、千廐、金華山等のかなり規模の大きな白亜 紀花崗岩体が分布する.基盤は、北東部はジュラ紀の付加 体で, 南西部は小大陸塊付加ブロックである. 花崗岩体の 年代は108-125 Maにわたる. 多くのものは累帯構造を呈 し、周囲から中心部にかけてよりアダカイト質のマグマが 貫入している (Tsuchiya et al., 2007). 基盤の違いで北上 北東部の岩体の方がMg/(Mg + Fe)比が低い傾向が認めら れる. Tsuchiya et al. (2007)はFig. 14に模式断面を描いて おり、貫入岩体のマグマはその深さで留まって噴火は生じ ていない、と考えていることが伺える. Okuyama-Kusunose et al. (2003)は田野畑岩体,遠野岩体,千厩岩体の接触変成 岩の変成条件の見積もりを行い、田野畑岩体、遠野岩体に ついては, 550-600℃, 0.22-0.27 GPa, 千厩岩体について は、700-750°C、0.03-0.07 GPaの温度・圧力条件が求めら れた. これに従えば,田野畑,遠野岩体は地殻中部の深さ に貫入したものでマグマは噴火能力を有していた.一方, 千厩岩体は浅所貫入で噴火能力を持たなかった可能性が考 えられる. 千厩岩体の東部にはほぼ同時期のひん岩岩脈の 濃集地帯が記載されており(竹内・御子柴,2002),浅所貫 入を示す可能性が考えられる.

5. マグマ供給系の進化と浅所貫入珪長質深成岩体

守屋 (1978)は日本の第四紀火山の地形発達を検討し,複 成火山には一定のパターンが認められることを指摘してい る.すなわち,より苦鉄質マグマが活動して生じる成層火 山体形成期,軽石噴火とカルデラ形成期,より珪長質マグ マによる溶岩ドーム形成等,後カルデラ活動期の順に活動 が推移する場合が多い.もし深成岩体が複成火山のマグマ 溜りを代表するものなら,これらの地表での火山活動に対 応するマグマ貫入・混合・噴出過程が溜りの化石である深 成岩体に残されていると思われる.白亜紀末の茨木複合花 崗岩体では,浅所にマグマが貫入・固化を繰り返して生じ た産状を呈しており,地表で複成火山体を生じる代わりに 浅所での複合貫入岩体を形成したものかも知れない.

Kagiyama (1983)は熱放出様式によって日本の活火山を 3種類に分類した.火山のマグマ噴出量に対する熱放出の割 合が通常のものをA,高いものをB,低いものをCとし、こ の違いは火山体の形成時間の経過に伴い浅所へのマグマの 貫入が生じるためであると考えた.複成火山の末期にはマ グマ溜りの組成はより分化したものになり、それらが浅所 に貫入したり溶岩ドームを形成する場合が多くなり、浅所 の地温勾配を上げて熱放出の割合が増加することが考えら れる.マグマ溜りから浅所へ火道が繋がり一定の条件が満 たされると、火道内対流脱ガス活動が生じ、それに伴って マグマ溜りが脱ガスする過程が提案されている (Shinohara,



図4 火道内対流による脱ガスマグマの溜り底への沈積モデル (Shinohara, 2008の図13).

(a) 火道・マグマ溜りの全体図.(b) 火道上端部で減圧発泡したマグマから気泡が脱ガスし,残りのマグマは重くなり沈降する.破線 は気相飽和を示す.(c) バルクマグマの密度と深さの関係を示したもの.含水マグマが火道を上昇し飽和深度に達すると発泡し密度が 小さく上昇し浅所で脱ガスする.脱ガスしたマグマは密度が大きいために沈降してマグマ溜りの下部に沈積し脱水しているため噴火能 力は失っている.

Fig. 4 Convective degassing of magmas in a conduit after Figure 13 of Shinohara (2008).

(a) Whole picture of magma reservoir, conduit and crater of active volcano. (b) Close-up view of shallower part of the conduit, showing vesiculation of magma at volatile saturation level promoting upward move of vesicular magma, which degasses at the surface, and residual degassed magma descends in the conduit due to high density. (c) Density vs. depth relation of magma, showing pristine volatile-rich magma is lower in density compared with the degassed magma. The degassed magma, ponding on the floor of the magma reservoir as shown in (a), may not be eruptible.



図5 複成火山のマグマ供給系の進化(概念図).

(a) 火山体形成前期には苦鉄質マグマが10 km付近に溜りを作り,下からの新たなマグマの供給で噴火が生じ火山体が形成される. (b) 火山体形成後期には周囲の母岩の混成やマグマ供給率の低下でより分化したマグマが生じ,一部は噴火し,一部は浅所貫入を生じる. 浅所貫入マグマは脱ガスし結晶化するため粘性が高く噴火能力を失う.地表浅部の地熱が上昇し温泉・熱水変質が発達する. Fig. 5 An evolutionary model for polygenetic volcano system.

(a) In early phase activity of polygenetic volcanoes, mafic magma may construct stratovolcano. Magma reservoir is located at ca. 10 km depth. (b) In later phase, felsic melt generates due to fractional crystallization of mafic magma and mixing of felsic melt generated by partial melting of the surroundings. Slowly ascending felsic magma may intrude near the base of the volcanic body due to similar density and soft nature of the volcanic deposits. Shallow intrusive magma may be degassed and crystal-rich, inhibiting eruption due to high viscosity. Abundant groundwater is heated by shallow intrusions and geothermal system may develop with hot springs.

2008のFigure 13; 図4). 日本の火山では,三宅島,大島, 浅間山,桜島,薩摩硫黄島,等で多量のSO₂ガスの放出が 観測されている(Shinohara, 2013)が,これらは複成火山 体の発達段階の比較的初期~中期に相当している.地熱活 動や温泉活動は複成火山の活動の末期により盛んになる. 現在,浅所貫入が活発に生じ温泉活動が盛んな霧島火山, 蕓仙火山, 善妻火山等はKagiyama (1983)の分類Bに対応 している.一方,活火山でありながら浅所での地熱活動が 乏しい,富士火山,浅間火山,岩手山等はKagiyama (1983) の分類Cに相当しており,複成火山の発達史の初期を代表 していると考えられる.

図5には簡単に、この総説でイメージした沈み込み帯の火 山体と深成岩体の関係を模式的に2つの図に示した. 沈み込 み帯では、沈み込みスラブにより供給された水等の揮発性 成分がウエッジマントルの部分溶融を引き起こしマントル ダイアピルの形で上昇して複成火山を形成する(Sakuyama, 1983). 複成火山の寿命は通常数万〜数10万年であり、マ ントルダイアピルがモホ面付近で停止してその熱がマグマ を生み続ける期間に対応する(東宮,1991). 初期には玄武 岩質のマグマが供給され、地殻中部で密度の釣り合いによ るマグマ溜りが形成され,地表に苦鉄質なマグマを供給し 成層火山体が形成される.地殻下部やマグマ溜り周辺は地 温が上昇してそのような母岩は部分溶融してより珪長質な マグマを生成し,一部は苦鉄質マグマと混合して安山岩質 なマグマを火山体に供給する.それらがマグマ溜りで大き くなりカルデラ噴火を生じる.その後,地表浅部は変動に より破砕され,熱水活動が盛んになり強度や密度は小さく なる.この時期になるとマグマが上昇してきても噴火せず に浅所貫入し易い条件が整ってくる.図5と同様なモデル断 面はLipman (1984)の大規模コールドロンのFigure 3に描 かれており,浅所貫入岩体の多くがコールドロンの再生 (resurgent)活動に対応する可能性が考えられる.

6. まとめ

1)現在の日本の活火山ではマグマ溜まりの深さは5km以上のものが多く、また、浅所貫入イベントがしばしば観測されている。一方、深成岩体で同時代の火山岩等に貫入しているものが多く認められそれらは浅所貫入であ

り,火山のマグマ溜まりを代表するか疑問がもたれる.

- マグマ溜りでの噴火可能マグマの条件として粘性係数が 10⁶ Pa s以下,という条件が考えられているが,0.1 GPa (3-4 km)で水に飽和した条件で830°C以上の温度が必 要となる。
- 3) 3-4 km以浅にマグマが貫入した場合、マグマは水に飽 和発泡し結晶作用が進行する.浅所では含水量が低下 し、結晶量が50%を超えるとバルク粘性係数が1桁以上 増加し、マグマの噴火能力は低下する.マグマ溜りから 火道が浅所に達する場合も火道内対流によりマグマ溜ま りの脱ガスが促進され、結晶量が増加した低含水量マグ マが溜まりの底に集積する.
- 4)浅所貫入岩体では斑状組織を呈するものが多くあり、それらは脱ガスによる強い過冷却で細粒基質を持つようになったことが考えられる。この場合、深成岩体は噴火し損なったものと考えられる。
- 5)一部の岩体では苦鉄質包有物やカリ長石巨晶が比較的均 質に分布しているのが見られ、これは脱ガス・結晶化に よってマグマのバルク粘性率が高くなったため流動が困 難になったと考えることができる。

謝辞

村田 守鳴門教育大学名誉教授,土谷信高元岩手大学教 授には丁寧な査読コメントを頂きました. 佐藤興平博士, 三浦大助大阪公立大学教授,湯口貴史山形大学准教授のコ メントも原稿の改訂に有用でした. 元神戸大学院生の森岡 幸三郎氏には始終ご協力頂きました. 編集委員会の曽根原 崇文博士には重要な誤りの指摘等を頂きました. これらの 方々に厚く感謝致します.

引用文献

- Abe, Y., Ohkura, T., Shibutani, T., Hirahara, K., Yoshikawa, S. and Inoue, H. (2017) Low-velocity zones in the crust beneath Aso caldera, Kyushu, Japan, derived from receiver function analyses. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, **122**, 2013–2033.
- Anma, R., Kawano, Y. and Yuhara, M. (1998) Compositional zoning and its implication in a toroidal circulation inside the Yakushima pluton, SW Japan. *Memoirs of National Institute* of Polar Research, Special Issue, 53, 157–176.
- Annen, C. (2009) From plutons to magma chambers: Thermal constraints on the accumulation of eruptible silicic magma in the upper crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 284, 409–416.
- Aoki, Y., Takeo, M., Ohminato, T., Nagaoka, Y. and Nishida, K. (2013) Magma pathway and its structural controls of Asama Volcano, Japan. *Geological Society of London, Special Publications*, 380, 67–84.
- Arai, R., Iwasaki, T., Sato, H., Abe, S. and Hirata, N. (2013) Crustal structure of the Izu collision zone in central Japan from seismic refraction data. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 118, 6258–6268.

- 荒井 融 (1987) 丹沢山地のテクトニクス:変成岩類の相解析によ る考察. 地質学雑誌, 93, 185–200.
- 新井敏夫 (2005) 六甲山地における中生代・白亜紀花崗岩類の地質 学的・岩石学的研究. 神戸大学博士学位論文, 105p.
- 新井敏夫・田結庄良昭 (2004) 兵庫県南東部, 六甲山地の白亜紀後 期花崗岩類の岩体・岩相区分と火成活動史. 地質学雑誌, 110, 452-462.
- 荒牧重雄 (1965) 熊野酸性火成岩類の噴出様式. 地質学雑誌, 71, 525-540.
- 荒牧重雄・羽田 忍 (1965) 熊野酸性火成岩類の中部および南部の 地質. 地質学雑誌, 71, 494–512.
- 有馬 眞・青池 寛・川手新一 (1999) 丹沢山地の構造発達史. 神 奈川県立博物館調査研究報告(自然科学), 9, 57–77.
- Bachmann, O., Miller, C.F. and de Silva, S.L. (2007) The volcanic-plutonic connection as a stage for understanding crustal magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 1–23.
- Bartley, J.M., Glazner, A.F., Stearns, M.A. and Coleman, D.S. (2020) The granite aqueduct and autometamorphism of plutons. *Geosciences*, **10**, 136.
- Brugger, C.R., Johnston, A.D. and Cashman, K.V. (2003) Phase relations in silicic systems at one-atmosphere pressure. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 146, 356–369.
- Cashman, K.V. and Giordano, G. (2014) Calderas and magma reservoirs. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 288, 28–45.
- Cherniak, D.J. (2002) Ba diffusion in feldspar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66, 1641–1650.
- Coleman, D.S., Gray, W. and Glazner, A.F. (2004) Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: geochronologic evidence for incremental assembly of the Toulumne Intrusive Suite, California. *Geology*, **32**, 433–436.
- Dodson, M.H. and McClelland-Brown, E. (1985) Isotopic and palaeomagnetic evidence for rates of cooling, uplift and erosion. *Geological Society of London, Memoirs*, 10, 315–325.
- Doi N., Kato, O., Ikeuchi, K., Komatsu, R., Miyazaki, S-I., Akaku, K. and Uchida, T. (1998) Genesis of the plutonichydrothermal system around Quaternary granite in the Kakkonda geothermal system, Japan. *Geothermics*, 27, 663– 690.
- Fuji-ta, K., Ogawa, Y., Yamaguchi, S. and Yaskawa, K. (1997) Magnetotelluric imaging of the SW Japan forearc - a lost paleoland revealed? *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **102**, 231–238.
- Giordano, D., Russell, J.K. and Dingwell, D.B. (2008) Viscosity of magmatic liquids: a model. *Earth and Planetary Science Letters*, 271, 123–134.
- Glazner, A.F. (2014) Magmatic life at low Reynolds number. Geology, 42, 935–938.
- Gualda, G.A.R., Ghiorso, M.S., Lemons, R.V. and Carley, T.L. (2012) Rhyolite-MELTS: a modified calibration of MELTS optimized for silica-rich, fluid-bearing magmatic systems. *Journal of Petrology*, 53, 875–890.
- Harayama, S. (1992) Youngest exposed granitoid pluton on Earth: Cooling and rapid uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani granodiorite in the Japan Alps, central Japan.

Geology, 20, 657-660.

- 原山 智 (2015) 北アルプス鹿島槍ヶ岳一爺ヶ岳に露出する, 直立 した第四紀陥没カルデラ―黒部川花崗岩コンプレックス:短縮 テクトニクスによる傾動山脈隆起の典型例. 地質学雑誌, 121, 293–308.
- 原山 智・高橋正明・宿輪隆太・板谷徹丸・八木公史 (2010) 黒部 川沿いの高温泉と第四紀黒部川花崗岩. 地質学雑誌, 116, 補遺, S63-S81.
- Harris, D.M. (1977) Ascent and crystallization of albite and granitic melts saturated with H₂O. *The Journal of Geology*, 85, 451–459.
- Hartung, E., Caricchi, L., Floess, D., Wallis, S. and Harayama, S. (2021) Establishing genetic relationships between the Takidani Pluton and two large silicic eruptions in the northern Japan Alps. *Journal of Petrology*, 62, 1–23.
- 星 博幸 (2002) 熊野酸性火成岩類の古地磁気方位. 地質調査所研 究報告, 53, 43–50.
- 星 博幸・岩野英樹・壇原 徹・酒向和希 (2016) 濃飛流紋岩のジ ルコンU-Pb年代:約70Maの急速形成.日本地質学会第123年 学術大会講演要旨, R5-O-7.
- 細野高啓・牧野州明 (2002) 琵琶湖南部,後期白亜紀野州花崗岩体 の岩相変化. 地質学雑誌, 108, 1–15.
- Hotta, K., Iguchi, M. and Tameguri, T. (2016) Rapid dike intrusion into Sakurajima volcano on August 15, 2015, as detected by multi-parameter ground deformation observations. *Earth, Planets and Space*, 68, 1–9.
- Huber, C., Townsend, M., Degruyter, W. and Bachmann, O. (2019) Optimal depth of subvolcanic magma chamber growth controlled by volatiles and crust rheology. *Nature Geoscience*, 12, 762–768.
- Iguchi, M. (2013) Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **58**, 1–18.
- 今岡照喜・飯泉 滋 (2009) 白亜紀-古第三紀の火山-深成活動. 日本地質学会編,日本地方地質誌6,中国地方,朝倉書店,15-21.
- 今岡照喜・中島和夫・村上允英 (1991) 高知県足摺岬 Aタイプ花崗 岩中のガリウム. 岩鉱, 86, 354–363.
- Ishihara, S. and Chappell, B.W. (2010) Chemical compositions of the Miocene granitoids of the Okueyama, Hoei mine and Takakumayama plutons, Outer Zone of SW Japan. *Bulletin* of the Geological Survey of Japan, **61**, 17–38.
- Ishihara, S. and Murakami, H. (2006) Fractionated ilmeniteseries granites in sourthwest Japan: Source magma for REE-Sn-W mineralizations. *Resource Geology*, 56, 245–256.
- 石川正弘・谷 健一郎・桑谷 立・金丸龍夫・小林健太 (2016) 丹 沢山地の地質:伊豆衝突帯のジオダイナミクス.地質学雑誌, 122, 291–304.
- 伊藤久敏 (2016) ジルコンのU-Pb年代から推定される八幡平地熱 地域とガイザーズ地熱地域の熱源の比較.日本地熱学会誌, 38, 53-60.
- Ito, H., Adachi, Y., Cambeses, A., Bea, F., Fukuyama, M., Fukuma, K., Yamada, R., Kubo, T., Takehara, M. and Horie, K. (2021) The Quaternary Kurobegawa granite: an example of a deeply dissected resurgent pluton. *Scientific Reports*, **11**, 22059.

- Ito, H., Spencer, C.J., Danišík, M., Hoiland, C.W. (2017) Magmatic tempo of Earth's youngest exposed plutons as revealed by detrital zircon U-Pb geochronology. *Scientific Reports*, 7, 12457.
- Ito, H., Yamada, R., Tamura, A., Arai, S., Horie, K. and Hokada, T. (2013) Earth's youngest exposed granite and its tectonic implications: the 10–0.8 Ma Kurobegawa Granite. *Scientific Reports*, 3, 1306.
- Ito, T. and Yoshioka, S. (2002) A dike intrusion model in and around Miyakejima, Niijima and Kozushima in 2000. *Tectonophysics*, 359, 171–187.
- Jellinek, A.M. and DePaolo, D.J. (2003) A model for the origin of large silicic magma chambers: precursors of caldera-forming eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 65, 363–381.
- Johannes, W. and Holtz, F. (1996) *Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks*. Springer-Verlag, Berlin, 335p.
- Johnson, B.R. and Glazner, A.F. (2010) Formation of K-feldspar megacrysts in granodioritic plutons by thermal cycling and late-stage textural coarsening. *Contributions to Mineralogy* and Petrology, 159, 599–619.
- Jousett, P., Mori, H. and Okada, H. (2003) Elastic models for the magma intrusion associated with the 2000 eruption of Usu Volcano, Hokkaido, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **125**, 81–106.
- Kagiyama, T. (1983) Thermal activities of volcanoes in the Japan Arc-A nature and geological meanings. *In Shimozuru*, D. and Yokoyama, I. eds., *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*, Terra Scientific Publishing Company, Tokyo,13–27.
- Kamiyama, H., Nakajima, T. and Kamioka, H. (2007) Magmatic stratigraphy of the tilted Tottabetsu plutonic complex, Hokkaido, North Japan: magma chamber dynamics and pluton construction. *The Journal of Geology*, **115**, 295–314.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (2005) 帯磁率異方性からみた丹沢トーナル岩 体の貫入・定置機構. 地質学雑誌, 111, 458–475.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (2008) 東山梨火山深成複合岩体の全岩主化学 組成.日本大学文理学部自然科学研究所紀要, 43, 155-165.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (2009) 東山梨火山深成複合岩体を構成する火 砕岩類の地質および構造とコールドロンの形成プロセス.日本 大学文理学部自然科学研究所紀要,44,121–137.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (2011) 丹沢トーナル岩複合岩体中の同時性岩 脈と苦鉄質包有岩一産状と全岩希土類元素組成.日本大学文 理学部自然科学研究所紀要, 45, 151–169.
- 蟹澤聡史・土井宣夫・加藤 修・石川賢一 (1994) 岩手県, 葛根田 地熱地域に伏在する第四紀葛根田花崗岩. 岩石鉱物鉱床学会誌, 89, 390-407.
- Kawachi, Y. and Sato, T. (1978) Orthoclase megacrysts in the Yakushima Granite, southern Kyushu, Japan. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen*, **132**, 136–152.
- 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. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 263–281.
- 川野良信 (2017) 北部フォッサマグナ新第三紀深成岩類の地球化学 的多様性.地球科学, 71, 75–86.
- 川野良信・柴田 賢・内海 茂・大平寛人 (1992) 谷川岳鮮新世深

成岩体のK-Ar年代. 岩石鉱物鉱床学会誌, 87, 221-225.

- Kawasaki, M. (1980) Omine acid rocks, Kii Peninsula Geology and major element chemistry. Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, 75, 86–102.
- Kawate, S. and Arima, M. (1998) Petrogenesis of the Tanzawa plutonic complex, central Japan: exposed felsic middle crust of the Izu-Bonin-Mariana arc. *Island Arc*, 7, 342–358.
- Kazahaya, K., Shinohara, H. and Saito, G. (1994) Excessive degassing of Izu-Oshima volcano: magma convection in a conduit. *Bulletin of Volcanology*, 56, 207–216.
- Koyaguchi, T. and Kaneko, K. (1999) A two stage thermal evolution model of magmas in continental crust. *Journal of Petrology*, 40, 241–254.
- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E., Tomiya, A. and Suzuki, Y.J. (2013) Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bulletin of Volcanology*, **75**, 1–13.
- Kutsukake, T. (1997) The depth of emplacement of the Mitsuhashi Granite pluton in the Ryoke Belt, central Japan – as inferred from some geobarometric calibrations. *Journal of* the Geological Society of Japan, 103, 604–607.
- 桑谷 立・鳥海光弘 (2013) 丹沢変成岩の沈み込み及び上昇期の温 度圧力履歴.日本地質学会関東支部伊豆衝突帯地質研究サミ ット講演要旨,52-53.
- Leuthold, J., Müntener, O., Baumgartner, L.P., Putlitz, B., Ovtcharova, M. and Schaltegger, U. (2012) Time resolved construction of a bimodal laccolith (Thorres del Paine, Patagonia). *Earth and Planetary Science Letters*, **325–326**, 85–92.
- Lipman, P.W. (1984) The roots of ash flow calderas in western North America: Windows into the tops of granitic batholith. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 89, 8801–8841.
- 政岡邦夫 (1982) 近畿地方金剛山地およびその周辺の領家花崗岩類. 地質学雑誌, 88, 483–497.
- 松原秀樹 (1966) 山梨県金峯山地域の花崗岩類とペグマタイト. 地 質調査所月報, 17, 543–554.
- Matsumoto, T., Aoki, K., Windley, B.F. and Aoki, S. (2020) The Ashizuri granite-alkaline gabbro complex in the forearc of a Paleogene accretionary complex, Shikoku, Japan: Constraints on evolution by zircon U-Pb age and trace element composition. *Geochemical Journal*, 54, 411–420.
- Menand, T. (2011) Physical controls and depth of emplacement of igneous bodies: A review. *Tectonophysics*, **500**, 11–19.
- Mikada H., Watanabe, H. and Sakashita, S. (1997) Evidence for subsurface magma bodies beneath Izu-Oshima volcano inferred from a seismic scattering analysis and possible interpretation of the magma plumbing system of the 1986 eruptive activity. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 104, 257–269.
- Mikami, K. (1962) Geological and petrographical studies on the Tanzawa Mountainland, Part 1. Science Reports of the Yokohama National University, Section II, Biological and Geological Sciences, 8, 57–114.

三村弘二・加藤祐三・片山正人 (1984) 御岳昇仙峡地域の地質. 地

域地質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,61p.

- Minami, S., Nagata, M., Sueoka, S., Fukuda, S., Kajita, Y., Ogita, Y., Kagami, S., Yokoyama, T. and Tagami, T. (2021) Two pulse intrusive events of the Pliocene Tanigawa-dake granites revealed from zircon U-Pb dating. *Earth, Planets* and Space, 73, 231.
- Miura, D. (1999) Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 271– 294.
- 宮地良典・楠 利夫・武蔵野 實・田結庄良昭・井本伸広 (2005) 京都西南部の地質.地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター,90p.
- Miyano, K., Aizawa, K., Matsushima, T., Shito, A. and Shimizu, H. (2021) Seismic velocity structure of Unzen volcano, Japan, and relationship to the magma ascent route during eruptions in 1990–1995. *Scientific Reports*, **11**, 22407.
- Morioka, K., Tainosho, Y. and Kagami, H. (2000) Rb-Sr isochron ages of the Cretaceous granitoids in the Ryoke belt, Kinki district, Southwest Japan. *Island Arc*, 9, 46–54.
- 守屋以智雄 (1979) 日本の第四紀火山の地形発達と分類. 地理学評 論, 52, 479-501.
- 村上允英(1973)古第三紀田万川陥没体の形成機構に関する一考察. 地質学論集,9,93–105.
- 村上允英・今岡照喜 (1985) 高知県足摺岬のラパキビ花崗岩. 地質 学雑誌, 91, 179–194.
- Murase, M., Ito, T., Hayashi, Y., Sagiya, T., Kimata, F. and Watanabe, H. (2010) Spatio-temporal distribution of magma intrusions inducing repeated earthquake swarms off the east coast of the Izu peninsula, central Japan, for 1973–1998. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 193, 25–36.
- 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. 岩石鉱物鉱床学会誌, 77, 267–277.
- 村田 守 (1984) 紀伊半島中部,大峯地域の中新世Iタイプおよび Sタイプ花崗岩質岩の岩石学.岩石鉱物鉱床学会誌, **79**, 351– 369.
- Nabelek, P.I., Hofmeister, A.M. and Whittington, A.G. (2012) The influence of temperature-dependent thermal diffusivity on the conductive cooling rates of plutons and temperaturetime paths in contact aureoles. *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318, 157–164.
- 鍋谷祐夫・鈴木正芳・野沢 保・田結庄良昭 (1972) 花崗岩地域に おける重力異常:大阪府茨木・能勢地区.測地学会誌, 18, 76-88.
- 中田節也 (1978) 尾鈴山酸性岩の地質. 地質学雑誌, 84, 243-256.
- 中島 隆・小泉尚嗣・下司信夫・及川輝樹・新正裕尚・三浦大助・ 角井朝昭・重松紀生・北川有一 (2010) 熊野井内浦掘削コアか ら推測する中期中新世熊野酸性岩北岩体の垂直構造と定置過 程. 地質学雑誌, 116, 374–387.
- Nakajima, T., Takahashi, M., Imaoka, T. and Shimura, T. (2016) 4. Granitic rocks. *In* Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T., and Gibbons, W. eds., *The Geology of Japan*. Geological Society, London, 251–272.
- Nakamichi, H., Watanabe, H. and Ohminato, T. (2007) Threedimensional velocity structures of Mount Fuji and the south Fossa Magna, central Japan. *Journal of Geophysical*

Research, Solid Earth, 112, B03310.

- 中野聡志・西村貞浩・多賀 優・花田遥平・澤田和彦・横井(西村) 彰子 (2021) 田上ペグマタイトの産状. 琵琶湖博物館研究 調査報告, 33, 18–95.
- Nakao, S., Morita, Y., Yakiwara, H., Oikawa, J., Ueda, H., Takahashi, H., Ohta, Y., Matsushima, T. and Iguchi, M. (2013) Volume change of the magma reservoir relating to the 2011 Kirishima Shinmoe-dake eruption – Charging, discharging and recharging process inferred from GPS measurements. *Earth, Planets and Space*, 65, 3.
- Nakatani, T., Kudo, T. and Suzuki, T. (2022) Experimental constraints on magma storage conditions of two calderaforming eruptions at Towada volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, B023665.
- Ochs, F.A. and Lange, R.A. (1999) The density of hydrous magmatic liquid. *Science*, **283**, 1314–1317.
- Okuyama-Kusunose, Y., Morikiyo, T., Kawabata, A. and Uyeda, A. (2003) Carbon isotopic thermometry and geobarometry of sillimanite isograd in thermal aureoles: the depth of emplacement of upper crustal granitic bodies. *Contributions* to *Mineralogy and Petrology*, 145, 534–549.
- Robie, R.A., Bethke, P.M., Toulmin, M.S. and Edwards, J.L. (1966) X-ray crystallographic data, densities, and molar volumes of minerals. In Clark, Jr., S.P. ed., Handbook of physical constants. The Geological Society of America, Memoir, 97, 27–73.
- Rubin, A.M. (1995) Getting granite dikes out of the source region. Journal of Geophysical Research, Solid Earth, 100, 5911–5929.
- Saito, S., Arima, M. and Nakajima, T. (2007) Hybridization of a shallow 'I-type' granitoid pluton and its host migmatite by magma-chamber wall collapse: The Tokuwa Pluton, central Japan. *Journal of Petrology*, 48, 79–111.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T., Tani, K., Miyazaki, T., Senda, R., Chang, Q., Takahashi, T., Hirahara, Y. and Kimura, J-I. (2012) Petrogenesis of Kaikomagatake granitoids in the Izu collision zone, central Japan: implications for transformation of juvenile oceanic arc into mature continental crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163, 611–629.
- Sakuyama, M. (1983) Petrology of arc volcanic rocks and their origin by mantle diapirs. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 18, 297–320.
- 笹田政克・山田直利・先山 徹・上田 薫 (1979) 東中国, 三朝・ 奥津・湯原地域の白亜紀後期~古第三紀火成岩類. 地質学論集, 17, 19–34.
- Sasaki, M., Fujimoto, K., Sawaki, T., Tsukamoto, H., Kato, O., Komatsu, R., Doi, N. and Sasada, M. (2003) Petrographic features of a high-temperature granite just newly solidified magma at the Kakkonda geothermal field, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **121**, 247–269.
- 佐藤大介・高橋 浩・岩野英樹・檀原 徹・平田岳史 (2020) 兵庫 県淡路島,白亜紀泉南流紋岩類のジルコンU-Pb及びFT年代. 地質学雑誌, **126**, 137–148.
- 佐藤大介・山元孝広・高木哲一 (2016) 播州赤穂地域の地質.地域 地質研究報告(5万分の1地質図幅),産総研地質調査総合セン ター,68p.

- Sato, K. (1991) Miocene granitoid magmatism at the island-arc junction, central Japan. *Modern Geology*, **15**, 367–399.
- 佐藤興平 (2016) 谷川岳花崗岩体の年代とフォッサマグマ地域にお ける新第三紀の珪長質火成活動. 群馬県立自然史博物館研究 報告, 20, 85–104.
- 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, M. and Hamaguchi, H. (2006) Weak long-lived ground deformation related to Iwate volcanism revealed by Bayesian decomposition of strain, tilt and positioning data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 244–262.
- 佐藤岱生・長浜春夫 (1979) 屋久島南西部地域の地質.地域地質研 究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,47p.
- 沢田順弘・板谷徹丸 (1993) 琵琶湖南部後期白亜紀環状花崗岩体の K-Ar年代一巨大コールドロンにおける冷却史. 地質学雑誌, 99, 975–990.
- Sawaki, Y., Asanuma, H., Abe, M. and Hirata, T. (2020) U-Pb ages of granitoids around the Kofu basin: Implications for the Neogene geotectonic evolution of the south Fossa Magna region, central Japan. *Island Arc*, 29, e12361.
- Scaillet, B., Holtz, F. and Pichavant, M. (1998) Phase equilibrium constraints on the viscosity of silicic magmas, 1. Volcanicplutonic comparison. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 103, 27257–27266.
- Schmidt, M.W. (1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **110**, 304–3110.
- Seki, Y., Oki, Y., Matsuda, T., Mikami, K. and Okumura, K. (1969) Metamorphism in the Tanzawa Mountains, Central Japan. Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists, 61, 50–75.
- 柴田 賢 (1978) 西南日本外帯における第三紀花崗岩貫入の同時性. 地質調査所月報, 21, 551–554.
- 柴田 賢 (1979) 東中国における花崗岩類のK-Ar年代. 地質学論集, 17, 69–72.
- Shibata, K. and Ishihara, S. (1979) Initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios of plutonic rocks from Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 381–390.
- 柴田 賢・加藤祐三・三村弘二 (1984) 甲府市北部の花崗岩類とその関連岩のK-Ar年代. 地質調査所月報, 35, 19–24.
- Shimura, T., Owada, M., Osanai, Y., Komatsu, M. and Kagami, H. (2004) Variety and genesis of the pyroxene-bearing S- and I-type granitoids from the Hidaka Metamorphic Belt, Hokkaido, northern Japan. *Transactions of The Royal Society* of Edingburgh, Earth and Environmental Science, 95, 161– 179.
- Shinjoe, H., Orihashi, Y. and Anma, R. (2019) U-Pb ages of Miocene near-trench granitic rocks of the southwest Japan arc: implications for magmatism related to hot subduction. *Geological Magazine*, 158, 47–71.
- Shinohara, H. (2008) Excess degassing from volcanoes and its role on eruptive and intrusive activity. *Reviews of Geophysics*, 46, 1–31.
- Shinohara, H. (2013) Volatile flux from subduction zone

volcanoes: Insights from a detailed evaluation of the fluxes from volcanoes in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **268**, 46–63.

- 周琵琶湖花崗岩団体研究グループ (2000) 琵琶湖周辺の花こう岩質 岩体一その5. 田上地域の花こう岩類. 地球科学, 54, 380–392.
- Skinner, B.J. (1966) Thermal expansion. In Clark, Jr., S.P. ed., Handbook of physical constants. The Geological Society of America, Memoir, 97, 75–96.
- 相馬恒雄・吉田 勝 (1964) 谷川岳附近の深成岩類. 岩石鉱物鉱床 学会誌, **51**, 39–52.
- 相馬恒雄・吉田 勝 (1968) 丹沢山地の岩石と構造(4) 深成活動 と変成作用. 岩石鉱物鉱床学会誌, **60**, 102–117.
- Sonehara, T. and Harayama, S. (2007) Petrology of the Nohi Rhyolite and its related granitoids: A late Cretaceous large silicic igneous field in central Japan. *Journal of Volcanology* and Geothermal Research, 167, 57–80.
- Sparks, R.S.J. and Marshall, L.A. (1986) Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 99–124.
- 杉井完治・沢田順弘 (1999) 琵琶湖北東部,後期白亜紀貝月山花崗 岩体.島根大学地球資源環境学研究報告,18,69-84.
- 杉山 明 (1976) 丹沢山地の地質構造発達史(1) 層序および構造. 地質学雑誌, 82, 699–712.
- Suzuki, K. (1977) Local equilibrium during the contact metamorphism of siliceous dolomites in Kasuga-mura, Gifuken, Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 61, 79–89.
- 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, 9, 23-32.
- 田結庄良昭 (1971) 大阪府北部,茨木複合花崗岩体の岩石学的研究. 地質学雑誌, 77, 57–70.
- 田結庄良昭 (1984) 茨木複合花崗岩体の暗色包有物. 岩石鉱物鉱床 学会誌, **79**, 133–145.
- 田結庄良昭 (1985) 鳥取県東部智頭町,沖山累帯深成岩体の地質および岩石.岩石鉱物鉱床学会誌, 80, 337-351.
- 田結庄良昭 (1986) 兵庫県北西部,波賀累帯深成岩体の地質および 岩石. 岩石鉱物鉱床学会誌, 81, 32–45.
- Tainosho, Y. (1991) Late Cretaceous Ibaragi zoned granitic complex, Osaka Prefecture, southwestern Kyoto. 29th IGC field trip B04 guide book, 263–271.
- 田結庄良昭 (2001) 兵庫県,三田市付近の有馬層群および岩脈のフ ィッション・トラックおよびK-Ar年代.神戸大学発達科学部 研究紀要, 9, 85–109.
- 田結庄良昭・加々美寛雄・柚原雅樹・松本一郎・杉井完治・中野聡 志・久田義之・沓掛俊夫・西橋秀海・西村貞浩・沢田一彦・竹 本健一・天白俊馬・吉田源市 (1999) 高 Sr 同位体比初生値を有 する近畿地方の白亜紀~古第三紀花崗岩類. 地質学論集, 53, 309-321.
- 田結庄良昭・中島和一・池垣憲二 (1977) 兵庫・大阪県境, 三草山 付近の石英はんれい岩一文象斑岩複合岩体について. 岩石鉱物 鉱床学会誌, 72, 263–276.
- Takahashi, M. (1986) Anatomy of a middle Miocene Valles-type caldera cluster: Geology of the Okueyama volcano-plutonic complex, southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29, 33–70.

- Takahashi, M. (1990) Subvolcanic vertically zoned and unzoned granitic pluton. The University Museum, The University of Tokyo, Nature and Culture, 2, 35–48.
- 高橋正樹・金丸龍夫・大畑 聡 (2022) 大崩山花崗岩質バソリス包 有岩類の全岩化学組成とその成因.日本大学文理学部自然科学 研究所紀要, 57, 19–40.
- 高橋正樹・二平 聡・金丸龍夫 (2021) 金峰山花崗岩体の地質と貫 入定置メカニズム.日本大学文理学部自然科学研究所紀要, 56, 39-68.
- 竹内 誠・御子柴(氏家) 真澄(2002)千厩地域の地質.地域地質 研究報告(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 76p.
- Takeuchi, S. (2004) Precursory dike propagation control of viscous magma eruptions. *Geology*, **32**, 1001–1004.
- Takeuchi, S. (2011) Preeruptive magma viscosity: an important measure of magma eruptibility. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, 116, B20301.
- Takeuchi, S. and Nakamura, M. (2001) Role of precursory lessviscous mixed magma in the eruption of phenocryst-rich magma: Evidence from the Hokkaido-Komagatake 1929 eruption. *Bulletin of Volcanology*, **63**, 365–376.
- 滝田良基 (1974) 丹沢トーナル岩複合岩体の岩石記載と岩体形成史. 地質学雑誌, 80, 505–523.
- 滝田良基(1980)丹沢山地の斑れい岩質岩類の岩石学的研究:特に トーナル岩との成因的関係について.地質学雑誌,86,369-387.
- Tani, K., Dunkley, D.J., Kimura, J-I., Wysoczanski, R.J., Yamada, K. and Tatsumi, Y. (2010) Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone. Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan. *Geology*, 38, 215–218.
- 谷 健一郎・堤 之恭・大村一希・高橋正樹・金丸龍夫 (2021) ジ ルコンU-Pb年代による大崩山火山深成複合岩体形成活動史の 制約.日本地質学会128年大会講演要旨, R1-O-5.
- 寺岡易司・池田幸雄・鹿島愛彦 (1986) 宇和島地域の地質.地域地 質研究報告(5万分の1地質図幅),地質調査所,91p.
- 東宮昭彦 (1991) 島弧火山の寿命に対応するマントルダイアピール の大きさ.火山, 36, 211–221.
- 東宮昭彦・小屋口剛博(1997)噴火の多様性―噴出率の時間変動デ ータのコンパイル.津久井雅志編,平成9年度後期東京大学地震 研究所共同利用・研究集会報告書「南関東におけるフィリピン 海プレートとその沈み込みに関係した玄武岩質火山の多様性と その変遷に関する研究」,169–182.
- Tomiya, A., Takahashi, E., Furukawa, N. and Suzuki, T. (2010) Depth and evolution of a silicic magma chamber: melting experiments on a low-K rhyolite from Usu volcano, Japan. *Journal of Petrology*, **51**, 1333–1354.
- 鳥海光弘・荒井 融 (1986) 変成作用から見た伊豆・マリアナ弧の 衝突.月刊地球, 8, 612-616.
- Toriumi, M. and Arai, T. (1989) Metamorphism of the Izu-Tanzawa collision zone. *Tectonophysics*, **160**, 293–303.
- Tsuchiya, N., Kimura, J-I. and Kagami, H. (2007) Petrogenesis of Early Cretaceous adakitic granites from Kitakami Mountains, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 134–159.
- 通産省資源エネルギー庁 (1979) 昭和53年度広域調査報告書, 那智 地域, 56p.
- 梅田浩二・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.

- Vernon, R.H. (1986) K-feldspar megacrysts in granitesphenocrysts, not porphyroblasts. *Earth Science Review*, 23, 1–63.
- Wada, H., Harayama, S. and Yamaguchi, Y. (2004) Mafic enclaves densely concentrated in the upper part of a vertically zoned felsic magma chamber: The Kurobegawa granitic pluton, Hida Mountain range, central Japan. *Geological Society of America Bulletin*, 116, 788–801.
- Wallis, S.R. and Okudaira, T. (2016) Paired metamorphic belts of SW Japan: the geology of the Sanbagawa and Ryoke metamorphic belts and the Median Tectonic Line. *In* Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T. and Gibbons, W. eds., *The Geology of Japan*, Geological Society, London, 101–124.
- Watanabe, S., Saito, S. and Tani, K. (2020) Estimation of emplacement depth for the Miocene Kaikomagatake granitoid pluton: constraints on crustal denudation history of the Izu collision zone. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 115, 276–285.
- 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, Solid Earth, 113, B03402.
- 山元孝広・栗本史雄・吉岡敏和 (2002) 山崎地域の地質.地域地質 研究報告 (5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 48p.
- 吉田博直 (1961) 中国地方中部の後期中生代の火成活動. 広島大学 地学研究報告, 8, 1–39.
- Yoshida, T. (1984) Tertiary Ishizuchi Cauldron, southwestern Japan arc, formation by ring fracture subsidence. *Journal of*

Geophysical Research, Solid Earth, 89, 8502-8510.

吉倉紳一 (2012) 足摺岬のラパキビ花崗岩. 鈴木堯士・吉倉紳一編, 大地が動く物語:最新・高知の地質, 南の風社, 高知, 174–199.

- 吉村俊平 (2011) マグマ供給系における深部二酸化炭素の輸送現象. 岩石鉱物科学, 40, 101–114.
- Yuguchi, T., Iwano, H., Kato, T., Sakata, S., Hattori, K., Hirata, T., Sueoka, S., Danhara, T., Ishibashi, M., Sasao, E. and Nishiyama, T. (2016) Zircon growth in a granitic pluton with specific mechanisms, crystallization temperatures and U-Pb ages: Implication to the 'spatiotemporal' formation process of the Toki granite, central Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 111, 9–34.
- Yuguchi, T. and Nishiyama, T. (2007) Cooling process of a granitic body deduced from the extents of exsolution and deuteric sub-solidus reactions: Case study of the Okueyama granitic body, Kyushu, Japan. *Lithos*, **97**, 395–421.
- 湯口貴史・鶴田忠彦・西山忠男 (2010) 中部日本土岐花崗岩体の岩 相と化学組成の累帯変化. 岩石鉱物科学, 39, 50-70.
- Yuguchi, T., Yamazaki, H., Ishibashi, K., Sakata, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., Ogita, Y., Sando, K., Imura, T. and Ohno, T. (2022) Simultaneous determination of zircon crystallization age and temperature: Common thermal evolution of mafic magmatic enclaves and host granites in the Kurobegawa granite, central Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 226, 105075.
- Yukutake, Y., Abe, Y., Honda, R. and Sakai, S. (2021) Magma reservoir and magmatic feeding system beneath Hakone volcano, central Japan, revealed by highly resolved velocity structure. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, **126**, e2020JB021236.

Sato, H., Tainosho, Y., Kanamaru, T. and Arai, T. (2022) Eruptibility of Japanese felsic plutons

Engineering Geology of Japan, No. 12, 33-51.

Abstract This review is concerned with the eruptibility of felsic plutons in Japan. Scaillet *et al.* (1998) and Takeuchi (2011) showed that viscosities of erupted magmas are generally less than 10^6 Pa s in the magma reservoirs. Viscosity of water-saturated 'minima' melts in P-T space is presented by Glazner (2014), where less viscous magma is present in high P and T conditions, and viscosity of more than 10^6 Pa s is observed at less than 780° C and 0.1 GPa (corresponding to 3–4 km depth). Our calculations of bulk viscosity and density for typical Yakushima granite (YMG of Anma *et al.*, 1998, SiO₂ = 70.92 wt. %) by using rhyolite-MELTS (Gualda *et al.*, 2012), viscosity equation of Giordano *et al.* (2008) and density equation of Ochs and Lang (1997) yielded more than 10^6 Pa s of bulk viscosity of water-saturated granitic magma at less than 820° C and 0.1 GPa. Many felsic plutons show evidence of shallow intrusions, where vesiculation and concomitant degassing cause crystallization and increase of viscosity leading to less eruptible conditions. Excess degassing observed in active volcanoes may occur where conduits reach shallower levels from the magma reservoirs, also causing convective degassing and crystallization, eventually forming degassed viscous piles in the bottom of magma reservoirs as suggested by Shinohara (2008). Among plutons in Japanese islands, many are thought to have emplaced in shallow levels (less than 3-4 km) according to a) drill holes penetrating hot felsic plutons, b) plutons intruding into contemporaneous volcanic strata, c) porphyritic texture with fine grained matrix, d) presence of druses, aplites, and pegmatites. From these pieces of evidence, we propose many of Japanese shallow felsic plutons are not eruptible after the final emplacement.

Keywords: felsic pluton, eruptibility, viscosity, shallow intrusion, degassing and crystallization