総 説

日本の花崗岩：2017年における総括

Granites of Japan: A review at 2017

中島 隆*

Takashi Nakajima*

2017年12月28日受付.

2018年5月9日受理.

* 産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba,
Ibaraki 305-5867, Japan

Corresponding author: T. Nakajima.,

Abstract

All the granitoids in the Japanese Islands are Phanerozoic and of arc-type. They are part of the Late Mesozoic Circum-Pacific granite superprovince. Most of the Japanese granitoids were formed when the Japanese Islands belonged to the Eurasian continent, as the growing front of the continent. They are mostly of I-type, and S-type granitoids are very small in amount. The origin of these granitoids is mostly partial melt of mantle-derived mafic lower crust of arc without an involvement of ancient cratons or their derivatives.

The granitic magmatism was quite episodic. 80% of their surface exposure area is occupied with 50–130 Ma, Paleogene to Cretaceous granitoids. In Southwest Japan, they constitute three arc-parallel granitic provinces called Ryoke, San-yo and San-in belts. A transect from the Ryoke to San-yo belt represents the hypothetical crustal cross section of the Cretaceous Eurasian continental margin. The Hidaka belt in Hokkaido is another example of a crustal cross section, exposing the deep Kuril arc at Miocene. On the fore-arc side of the Southwest Japan, 13–15 Ma, Middle Miocene granitic rocks are exposed sporadically but widely. The magmatism was very short-lived, supposed to be generated in an unusual tectonic setting related to back-arc opening and incipient subduction of the Philippine Sea plate. Middle Miocene and still younger granitoids are exposed in the Izu Collision Zone. The Quaternary granitoids of ~1 Ma are exposed at the Central Highlands in central Japan. Jurassic and Triassic granitoids occur in the Hida belt, which is the most back-arc side unit of the Japanese Islands. Paleozoic granitoids are rare. They are exposed as geologically isolated small bodies or tectonic blocks.

Keywords: Granites, Japan, review, U–Pb ages, arc crust, Sr isotopes

1. はじめに

1993年に地質学会100周年を記念して出版された「日本の地質学100年」には、諸分野の研究発展の歴史と総括が各分野の専門家によって執筆されているが、その中に花崗岩の章はない。今回、地質学会が125周年を記念して、地質学雑誌上で各分野の研究特集号を制作するにあたり、岩石部会による特集号では日本の花崗岩についての研究のこれまでと現状について、総説を掲載することになった。

筆者はほぼ2年前にGeological Society of Londonから出版された外国人向けの“Geology of Japan” (Moreno, et al., 2016)の中で花崗岩の章を執筆しており、そのことから本編でもこの総説の執筆を勧められたと思われる。本論は“Geology of Japan”後に公表された新しいデータやそれを含めた議論を加え、国内向けに再編・加筆して全面的に書き下ろしたものであるが、その記述内容が“Geology of Japan”と重複する部分もあることをお許しいただきたい。

2. 概 観

日本列島の地質図では、全国土の約30%が花崗岩類として塗色されている。そしてそのうち面積にして90%以上が中新世以前すなわち日本海拡大前の、日本列島がアジア大陸の一部だった頃に形成された花崗岩類である。したがって日本の花崗岩類の大部分はアジア大陸の花崗岩類と連続している。

アジア大陸の東縁には、北はベーリング海に面するチュコト半島からコリマ山塊、シホテアリン、中国東北部、韓半島、華南、インドシナ半島と続く大規模な中生代後期の花崗岩地帯があり、日本の花崗岩類もその一部をなしている。この花崗岩地帯は太平洋をはさんで南北アメリカの西岸にも続いており、現在の活火山が分布する“Circum-Pacific Ring of Fire”（環太平洋火山帯）になぞらえて“Circum-Pacific Granitic Provinces”（環太平洋花崗岩地帯）とよぶこともある。これらは大陸縁辺において海洋プレートの沈み込みを受ける場所に発達したいわゆる太平洋型造山帯（コルディレラ

Fig. 1. A histogram of surface exposure area of granitoids in Japanese Islands in terms of 10 Ma duration. Modified after Takagi (2004).

型造山帯ともいう)の主要な構成物である。日本列島の基盤は古生代後期から新生代に至る付加体で構成されており、その間ずっと海洋プレートの沈み込みを受けていたと考えられている。花崗岩類は基本的にこれらの付加体堆積岩類に貫入している。これらのことから、日本の大部分の花崗岩類はアジア大陸の東縁で形成された陸弧型の花崗岩類であると言える。

かつて、先カンブリア時代の花崗岩が日本列島に存在するかどうかは日本の地質学の重要なテーマであった時代があった。その一環として先カンブリア時代の花崗岩が熱心に探されたが、今に至るまで日本列島からは見つかっていない。その問題はやがて地向斜基盤という概念が見直されると共に自然消滅していった。一方アジア大陸本体においては、韓半島の嶺南地塊 (Yongnam massif), 京畿地塊 (Kyeonggi massif), 中国北部の中朝地塊 (Sino-Korean block), 南部の揚子地塊 (Yangtze block) などかなり大きな先カンブリア時代の地質体が知られているが、それらは多様な地質体ブロックがコラージュのように集合癒着して成立しているアジア大陸内部の構成要素と位置づけられている。

3. 日本列島の花崗岩類の時空分布と花崗岩区

3.1. 花崗岩の年代分布

これまで日本列島で確認されている最古の花崗岩類はカンブリア紀のもので、他にいくつか古生代の花崗岩が報告されているが、これらはいずれも小規模な点在岩体で周囲の地質体との関係はよくわからないものが多く、かつそれらを全部合わせた露出面積も全花崗岩の中ではごく小さい。Fig. 1 は日本列島に産する花崗岩の地表露出面積を 10 Ma 区切りの年代ごとに比較したものであるが、260 Ma すなわちペルム紀後期より古い花崗岩は露出面積としてはほとんどないに

等しいことがわかる。

Fig. 1 にはほかにも重要なことがいくつか示されている。まず、花崗岩の活動がきわめてエピソードであることである。もし花崗岩の活動が地質時代を通して一定のペースだったら、若い花崗岩は多く残っているはずであるが、年代分布からは 50–130 Ma に強い集中が見られ、全データの 80% 以上がこのピークに属している。他には、それよりはるかに小さいが明瞭なピークが 10–20 Ma に認められる。10 Ma より若い、第四紀の花崗岩まで存在するのは日本の特徴だが、露出面積は全体の 1% 以下で量はさほど多くない。一方 130 Ma より古い花崗岩は、これも量的にはきわめて少ないが、その中で 190 Ma 付近と 240 Ma 付近に小さなピークがある。

3.2. 年代測定法の進歩

1990 年代以前、日本の花崗岩類の年代データは、ごくわずかな例外を除くと K–Ar 年代と Rb–Sr 年代がほとんどで、外国ではすでに主流になっていた信頼性の高い U–Pb 年代は国内で測定できる環境がなかった。1990 年代にはいって、大型イオンマイクロプローブ (SHRIMP など) が国立極地研究所など国内いくつかの研究機関に導入され、イオンビームによる鉱物の微小領域の U–Pb 年代が測定可能となった。さらに 2000 年以降、レーザービームを用いた誘導結合プラズマ質量分析計 (ICP–MS) によって同様の微小領域年代測定が実用化された。これは SHRIMP などのように高価ではなく小型で比較的容易に運転が可能であったこともあり、今では全国各地の機関に導入され、主にジルコンの U–Pb 年代データを生産している。

一方、SHRIMP が導入される少し前から、日本では試料の同位体比測定を行わず電子線マイクロプローブ (EPMA) による微小領域の U, Th, Pb の定量分析値から

Fig. 2. Spatial distribution of U-Th-Pb age data on the granitoids of Japanese Islands shown in 10/ 20/ 50/ 80/ 100/ 120/ 150/ 300 Ma symbols with granitic provinces. Data from Watanabe et al. (1995), Nakajima (1996), Sakashima et al. (2003), Nakajima et al. (2004), Saito et al. (2007), Kemp et al. (2007), Tani et al. (2010), Shinjoe et al. (2010), Shimojo et al. (2010), Takahashi et al. (2010, 2012, 2016, 2017), Tagiri et al. (2011), Kon et al. (2012, 2015), Zhao et al. (2013), Ito et al. (2013a), Maki et al. (2014), Jahn et al. (2014), Tsutsumi et al. (2014), Tsuchiya et al. (2014, 2015), Osanai et al. (2014), Iida et al. (2015), Skrzypek et al. (2016a), Takehara et al. (2017), Takatsuka et al. (2017), Ejima et al. (2017), etc. MTL; Median Tectonic Line, ISTL; Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, IZU C.Z.; Izu Collision Zone.

U-Pb 年代や Th-Pb 年代を測定する方法が開発された。これにはモナザイトやジルコンの微量な U, Th, Pb を数多くの分析点について求め、アイソクロンをひいて年代を求める方法 (CHIME 年代, Suzuki and Adachi, 1991 など) と、閃ウラン鉱やトール石といった U, Th 含有量の多い鉱物を分析して単独の分析点から年代を計算する方法 (MPB 年代, Yokoyama et al., 2010) がある。後者のデータは最近までごく一部しか公表されていなかったが、一昨年日本列島全域にわたる花崗岩類の年代データ約 400 件が一気に公表された (Yokoyama et al., 2016)。

花崗岩類におけるジルコンの U-Pb 年代はマグマからジルコンが晶出した時期すなわち岩体の固結時を表わすと考えられており、岩体の冷却年代を示すと考えられてきたこれまでの K-Ar 年代や Rb-Sr 鉱物年代と合わせて貫入冷却史を議論することができる場合もあるが、一方データ自体に自己検証能力がないこれら K-Ar 年代や Rb-Sr 年代の検証も可能になった。その結果、それまで信じられてきた年代に基づく地史の見直しに至る場合もあった。本論では可能な限り新しく得られた U-Pb 年代に基づいて記述し、U-Pb 年代が得られていない場合についてのみ、従来の K-Ar 年代、Rb-Sr 年代を個々吟味の上で参考にする。以下の記述では、特にことわらない限り U-Pb 年代とは SHRIMP または ICP-MS によるジルコンの年代、Th-Pb 年代はモナザイトの CHIME 年代とする。

Fig. 2 に 2017 年 9 月の時点で公表されている花崗岩類の U-Pb 年代および Th-Pb 年代の概略を示す。

3.3. 白亜紀以前の花崗岩

日本列島でこれまで見つかった最も古い花崗岩類はカンブリア紀の 500 Ma 前後の点在岩体で、日立高原 (Tagiri et al., 2011) と九州西部 (Sakashima et al., 2003)、さらに東北地方中央部の 2 地点から 490–500 Ma の U-Pb 年代をもつ小岩体が報告されている (Isozaki et al., 2015)。これらはいずれも露出域のサイズが 1 km 以下で、周囲の地質との関係はよくわかっていない。

次に古いのがいわゆる黒瀬川構造帯に伴う花崗閃緑岩で、高知県三滝山を模式地とし「三滝花崗岩」として古くから知られている。九州から四国、紀伊半島まで数カ所に露出するが、いずれもサイズは長径 1～数 km で蛇紋岩メランジ中の構造岩塊と考えられている。模式地の三滝山から 440 Ma 前後の従来のジルコン酸分解法による U-Pb 年代が (Hada et al., 2000)、また紀伊半島の黒瀬川帯から ICP-MS による同様の U-Pb 年代がいくつか報告されている (小山内ほか, 2014)。

古生代で比較的大きい花崗岩体は南部北上帯にある 8 km × 6 km の氷上花崗岩である。この岩体は昔からよく知られており、300–440 Ma の K-Ar 年代や Rb-Sr 年代が報告されてきた。U-Pb 年代としては、Watanabe et al. (1995) による 442 ± 3.5 Ma、下條ほか (2010) による 410–430 Ma がある。氷上花崗岩と周囲の堆積岩との間は貫入関係という説もあるが詳細は確定していない。

もう一つは西南日本の舞鶴帯に露出する舞鶴花崗岩であ

る。東西に細長い形の複合岩体で、西岩体が 405–444 Ma、東岩体が 243–292 Ma という U-Pb 年代が報告されている (Fujii et al., 2008; Tsutsumi et al., 2014)。

400 Ma 以降の古生代花崗岩類としては、夜久野オフィオライト中の斜長花崗岩が 280–285 Ma という従来の酸分解法による U-Pb 年代 (Herzig et al., 1997) のほか、九州東部で約 290 Ma (Sakashima et al., 2003) などの報告があったが、最近阿武隈帯の東縁である双葉断層の東側の狭長な花崗閃緑岩体から 293–308 Ma の ICP-MS による U-Pb 年代が報告されている (Tsuchiya et al., 2014; Tsutsumi et al., 2010)。

舞鶴花崗岩東岩体と同じ 240–250 Ma の年代をもつ点在花崗岩体は関東山地の金勝山岩体など他にも何カ所か知られている。この年代は大陸において北中国ブロックと南中国ブロックが衝突した時期であり、中国大陸や韓半島でこの年代の岩石が重要な意味をもっていると考えられている。日本列島の地史においても何らかの意味があると考えている研究者は多い。

240–250 Ma の花崗岩類の最大分布域は飛騨帯である。飛騨帯は、昔は日本に産する先カンブリア界の候補と考えられたこともあったが、現在は中生代前期に形成された地質体であることが明らかになっている。それでも日本列島で一番古い深成変成帯 (plutono-metamorphic belt) であり、花崗岩類はミグマタイトを含む高変成度の変成岩と相伴って産する。花崗岩類の U-Pb 年代は 240–250 Ma と 190–200 Ma の 2 つのグループがあり、前者は主に比較的日本海に近い背弧側、後者が日本海から遠い前弧側に分布する (Takahashi et al., 2010, 2017; Zhao et al., 2013)。Fig. 1 にみられる 190 Ma, 240 Ma の小さなピークは主にこの飛騨帯の花崗岩による。花崗岩に伴って産する変成岩類の年代はほぼ 240–250 Ma の前後なので (Horie et al., 2009; Zhao et al., 2013; Takahashi et al., 2017)、深成変成帯を形成するのは 240–250 Ma の花崗岩である。

3.4. 白亜紀の花崗岩

Fig. 1 で示されるように、50–130 Ma の花崗岩類は地表露出面積において日本の全花崗岩類の 80% 以上を占める。文字通り日本の地質史上最大の花崗岩活動期である。その露出域は中国、近畿、中部地方が中心であるが、九州から東北、そして北海道西部までおよび、日本列島の全域に及んでいる (Fig. 2)。中でも中国・近畿・中部地方では、中央構造線に近い前弧側にいわゆる領家変成岩類と花崗岩類が密接に伴った深成変成帯である領家帯が、それよりも背弧側にはほぼ同時代の珪長質火山岩類を伴った浅部貫入型の花崗岩類が島弧の伸長方向に帯状に露出し、山陽帯・山陰帯とよばれる。最も日本海側に位置する山陰帯は、花崗岩に磁鉄鉱が多く含まれることや活動年代の中心が古第三紀にあることなどで山陽帯と区別されている。

本論では同一の花崗岩活動で形成された花崗岩類の分布域を花崗岩区とよぶ。領家帯・山陽帯・山陰帯はそれぞれが花崗岩区であり、同様に日本列島にはいくつかの花崗岩区が存在することになる。一般的に使われている花崗岩区の分布を

Table 1. Granitic provinces in Japanese Islands.

Province	Age (Ma)	I / S types	Magnetite/Ilmenite series	Occurrences	Famous bodies
Hida	190 - 250	I	Ilmenite	plutono-metamorphic	Funatsu
Ryoke	70 - 100	I	Ilmenite	plutono-metamorphic	Busetsu, Tenryukyo
San-yo	70 - 105	I	Ilmenite	volcano-plutonic	Naegi, Hiroshima
San-in	30 - 70	I	Magnetite	volcano-plutonic	Tamagawa
Abukuma	95 - 110	I	Ilmenite	plutono-metamorphic	Ishikawa, Tabito
Kitakami	110 - 125	I	Magnetite	volcano-plutonic	Tono, Miyako
Ashio	60 - 100	I	Ilmenite	volcano-plutonic	Sori
Hidaka	19 - 37	I & S	Ilmenite	plutono-metamorphic	Nissho, Tottabetsu
Gaitai	13 - 15	I & S	Ilmenite	volcano-plutonic	Kumano, Okue
Izu C.Z.	4 - 15	I	Ilmenite & Magnetite	volcano-plutonic	Kofu, Tanzawa

Fig. 3. Schematic crustal section of the Cretaceous orogen at the Eurasian continental margin, now exposed in SW Japan as the Ryoke and San-yo zone. Not to scale. Modified after Nakajima (1994, 1996). 'Cretaceous felsic volcanic rocks' denotes Nohi-Takada rhyolites.

Fig. 2 に、それぞれの花崗岩区の花崗岩類の特徴を Table 1 に示す。花崗岩区の名称をここでは〇〇帯とよぶが、地質構造単元の意味はない。

山陽帯に伴う珪長質火山岩類は中部地方の濃飛流紋岩、中国地方の高田流紋岩などがよく知られているが、特にその噴出量が膨大で、これまで数千万年にわたって削剥されてきたにもかかわらず、濃飛流紋岩では現在残っている層厚だけでも 5,000m 以上、総体積 7,000 km³ を超えると推定されており (Sonehara and Harayama, 2007)、世界の火山噴火史でも第一級の活動規模であったと考えられる。その活動期間は、かつては 20 Ma に及ぶと言われていたが (Koido, 1991)、最近 U-Pb 年代で詳しく検証され実際は 1–2 Ma 程度のきわめて短い期間に起こったことがわかってきた (星ほか, 2016; 早坂・田島, 2016)。

山陽帯と領家帯の花崗岩類、およびそれらに伴う領家変成岩や珪長質火山岩類はすべて 70–100 Ma 白亜紀後半の年代を示すことから、この地表露出した両帯は連続した同時断面とみなされ、大陸地殻成長の最前線である白亜紀アジア大陸東縁の仮想的地殻断面と考えられている (Nakajima, 1994, 1996)。 (Fig. 3)

かつて領家帯の斑禰岩が Sm-Nd 全岩-鉱物アイソクロン年代から 190–220 Ma に形成されたと主張されたことがあ

り (Kagami et al., 1995; Okano et al., 2000 など)、地質調査所の 5 万分の 1 地質図幅も一時期それを踏襲したものが出版されたが (『大阪東南部』 (1998), 『奈良』 (2000) など)、その後 U-Pb 年代によって検証され、それらの斑禰岩も白亜紀後期の岩体であることが確認された (Nakajima et al., 2004)。その後出版された地質図幅 (『御油』 (2008) など) や 20 万分の 1 シームレス地質図では領家帯の斑禰岩はすべて白亜紀とされている。

同様のことは領家帯の西方延長部である肥後深成変成帯でもみられ、一時当地の花崗岩類が Sm-Nd と Rb-Sr による全岩アイソクロン年代で 200–250 Ma と報告されたが (Osanai et al., 1998; Hamamoto et al., 1999; Kamei et al., 2000 など)、その後 U-Pb 年代により再検討され (Sakashima et al., 2003; Maki et al., 2012)、現在はすべて白亜紀の花崗岩であることが確認されている。最近、肥後深成帯最高温度のグラニュライトから 115–120 Ma の U-Pb 年代を示すジルコンの中に 250 Ma のコアを持つものが報告され (小山内ほか, 2017)、低温帯の変成岩同様 250 Ma の原岩を含んでいることが示された。

領家帯の花崗岩類は、母岩である変成岩の構造にそって貫入しそれ自身も片麻状構造をもつ古期領家花崗岩類と、片麻状構造をもたず塊状で母岩の構造を切って貫入する新期領家

花崗岩類に分類され、両者が接する所では新期領家花崗岩が古期領家花崗岩に貫入するとされている(山田ほか, 1974 など)。そして、山陽帯花崗岩は新期領家花崗岩に貫入する。しかし新期領家花崗岩とされている岩体にも弱い片麻状構造をもつものがあったり、塊状のものは山陽帯花崗岩と区別するのが難しい場合もあり、新期領家花崗岩の意味づけやこの区分にそろそろ見直しが必要という意見もある。

領家帯と山陽帯の花崗岩類について、Suzuki and Adachi (1998)は CHIME 年代を系統的に測定し、中国地方柳井地域では山陽帯花崗岩が 85–87 Ma、領家帯花崗岩が 89–95 Ma、中部地方では山陽帯花崗岩が 67–68 Ma、領家帯花崗岩が 75–95 Ma といずれも領家帯花崗岩の方が山陽帯花崗岩より古いこと、かつ領家帯花崗岩と山陽帯花崗岩の年代差が柳井地域では最大 10 Ma なのに対して中部地方では最大 28 Ma にひろがることを示した。その後 Iida et al. (2015)は鳥取～香川の本州四国を横断する地域で ICP-MS を用いた 92 個の U–Pb 年代測定を行ない、山陽帯花崗岩が 74–93 Ma、領家帯花崗岩が 80–93 Ma という結果を報告した。また Skrzypek et al. (2016a)は柳井地域において ICP-MS による U–Pb 年代測定の結果が山陽帯花崗岩 96–105 Ma、領家帯花崗岩 95–105 Ma で、Suzuki and Adachi (1998)の結果とは異なって両帯の年代はほぼ同じ範囲であり、山陽帯花崗岩の方が領家帯花崗岩より古い年代を与えるケースもあることを示した。彼らは独自に同じ試料を用いて CHIME 年代を測定し、やはり U–Pb 年代と有意に違う年代値が得られることを確認しており、その原因が検討されている (Skrzypek et al., 2016b)。

西南日本の白亜紀花崗岩類の年代が西から東に向かって系統的に若くなる問題は、Nakajima et al. (1990)、木下・伊藤 (1986) らによってとりあげられ、Engelbreton et al. (1985)のプレート運動復元にに基づくクラ太平洋海嶺の沈み込みとそれに伴う RTT 三重会合点の移動によると解釈されて、プレート造山論を花崗岩成因論に適用した仕事として反響をよんだ。また、それらに伴う領家変成岩の年代 (Suzuki and Adachi, 1989; Nakajima, 1994; 中島ほか, 2013)を含めた深成変成帯形成の問題としても議論されてきた。少し遅れてアラスカ南海岸でも花崗岩の年代が西から東に向かって若くなることが報告され、やはり海嶺沈み込みによる RTT 三重会合点の移動があったと解釈された (Bradley et al., 1993 など)。

しかし、近畿地方の山陽帯の 90–100 Ma の K–Ar 年代をもつ比叡岩体や行者山花崗閃緑岩 (大谷鉦山) (Nakajima et al., 1990)、中部地方の古期領家花崗岩の 86 Ma の SHRIMP U–Pb 年代をもつ天竜峡花崗閃緑岩 (Nakajima, 1996)、98–99 Ma の ICP-MS U–Pb 年代をもつ神原トール岩 (Nakajima et al., 2009; Takatsuka et al., 2017) など東西年代変化トレンドからはずれた古い U–Pb 年代を示す花崗岩類が見られることも事実で、これらを重視して西南日本の西部 (九州、柳井地域) より東部 (中部地方) の方が年代値の範囲が若い方にひろがっているという見方もできる。

ただし領家帯に産する斑禰岩の U–Pb 年代 (Sakashima

et al., 2003; Nakajima et al., 2004; Tiepolo et al., 2012) や最近発表された山陽帯花崗岩に伴う大規模珪長質火山岩類の U–Pb 年代 (Sato et al., 2014; 星ほか, 2016; 早坂・田島, 2016) は西から東に向かって若くなっているように見える (中島, 2017)。さらに、最近発表された Yokoyama et al. (2016) では、領家帯–山陽帯の花崗岩類約 200 個の閃ウラン鉱およびトール石による U–Th–Pb 年代が、北九州の 110–95 Ma から中国地方 95–85 Ma、近畿地方 85–75 Ma、中部地方 75–70 Ma と、大局的には東西変化していくことが示されている。

一方、最近 Tani et al. (2014, 2015b) により、この問題に対する新しい解釈が発表された。それによると花崗岩の年代の東西変化はなく、したがって海嶺沈み込みもなく、85 Ma、60 Ma、30 Ma の 3 回のパルス的な花崗岩形成活動があったという。この説は彼自身が SHRIMP を用いて西南日本白亜紀～古第三紀花崗岩を測定した大量の U–Pb 年代データに基づいており、説得力があって大変魅力的である。今後この問題は彼の研究を中心に大きな展開があると予想される。

日本列島の地質構造区分では、糸魚川静岡構造線を西南日本と東北日本の境とするのが常識だが、花崗岩の世界ではそれより東方の棚倉構造線をその境とすることが多かった。それは、西南日本の花崗岩区である領家帯 / 山陽帯の延長部と考えられる花崗岩類が関東山地や筑波山塊に現われるから、というのが理由である。

糸魚川静岡構造線と棚倉構造線に挟まれた部分のうち、領家帯 / 山陽帯の延長部より北の、北関東から日本海までの地域を足尾帯と呼んでいる。この帯の花崗岩類は、多くは小岩体として点在しているが、そのうちのいくつかについては U–Pb 年代が報告されており、日本国地域 (Takahashi et al., 2012) など 60–70 Ma の岩体と、沢入地域 (Ogasawara et al., 2013)、八溝地域 (Ejima et al., 2017) など 90–110 Ma の岩体がある。

東北日本には、棚倉構造線の東側に阿武隈帯、その北側に北上帯と、いずれも NNW–SSE 方向に伸びる 2 つの花崗岩区が考えられており、北上帯の北方延長は北海道西部の樺戸帯に続くと考えられている。阿武隈帯は低圧型変成岩と花崗岩類から構成される深成変成帯で、花崗岩類から 100–118 Ma の U–Pb 年代 (Takahashi et al., 2010, 2016, 2017; Kon and Takagi, 2012; Ishihara and Orihashi., 2015; Kon et al., 2015) が得られている。北上帯は火山岩に伴う浅所型の花崗岩類で 116–128 Ma の U–Pb 年代 (土谷ほか, 2016) が報告されている。これらの年代は西南日本の領家帯・山陽帯の花崗岩の年代範囲よりやや古いこと、東北日本では西南日本とは逆に背弧側に深成変成帯、前弧側に火山深成変成帯という配置になっていることなどの特徴があり、西南日本の花崗岩区との連続関係はまだ十分に解明されていない。

3.5. 古第三紀の花崗岩

白亜紀の花崗岩類の量と広範な分布に比べ、日本列島における古第三紀の花崗岩の分布は限られており、西南日本では中国地方から中部地方北西部にかけての山陰帯に限られる。

山陰帯とされている地域の中にも白亜紀の花崗岩は露出しており、古第三紀花崗岩との関係は複雑である。山陰帯の花崗岩類は U-Pb 年代がまだ一部の地域についてしか公表されていないが、Iida et al. (2015) による鳥取-岡山地域における集中的な U-Pb 年代測定の結果では白亜紀から連続する古第三紀最初期の活動と古第三紀末期の活動の間に 10–15 Ma 程度の休止期 (46–60 Ma) があったように見える。この休止期の前と後では花崗岩類の化学組成が系統的に異なる (Iida et al., 2015)。中国地方西部における花崗岩類の K-Ar 年代分布 (Imaoka et al., 2011) においても、ほぼ同様の時期に空白期間がある。この空白期間の後に形成された花崗岩類は珪長質火山岩を伴った数多くのコールドロンが確認されており、この時期を境に西南日本の背弧側が伸長テクトニクス場に転換した可能性が指摘されている (Imaoka et al., 2011)。

東日本では、古第三紀の花崗岩としては北海道中軸帯に 35–40 Ma の U-Pb 年代をもつ花崗岩が点在することが報告されており (Jahn et al., 2014)、日高帯の延長と考えられている。

3.6. 中新世の花崗岩

Fig. 1 における 10–20 Ma の小さな、しかし明瞭なピークは、中新世の花崗岩類によって作られている。それらは北海道の日高帯、西南日本外帯のほぼ全域、伊豆衝突帯に産する花崗岩類で、いずれもきわめて特徴のある地質環境下で形成されたものである。

日高帯：北海道中軸帯を構成する日高帯は、日本列島で最も若い深成変成帯である。非変成の中の川層群やその弱変成部に貫入する浅所型花崗岩からグラニュライト帯に貫入する深所型花崗岩までを含み、推定深度 20–25 km までの連続地殻断面と考えられている (Komatsu et al., 1989; Osanai et al., 1991; Shimura et al., 2004)。浅所貫入の花崗岩類は花崗岩～花崗閃緑岩、深部はトータル岩が主体で、どちらもホルンブレンドを含むメタルミナスな花崗岩類から一部マグマ起源の堇青石を含む典型的な S タイプ花崗岩類までが存在する (Shimura et al., 2004)。日高深成変成帯は白亜紀西南日本の領家-山陽深成変成帯と違って珪長質火山岩を伴わない。

日高帯の深成変成作用の時期は、変成岩と花崗岩の Rb-Sr 全岩アイソクロン年代から 51–55 Ma とされ (Owada et al., 1991, 1997)、それに基づいた地殻変動史が構築されてきたが、最近の U-Pb 年代では 19 Ma と 37 Ma に年代値の集中があり、51–55 Ma の年代は存在しないことが明らかになった (Kemp et al., 2007)。また変成岩の U-Pb 年代から、日高深成変成作用の時期は 18–20 Ma と考えられており (Usuki et al., 2006; Kemp et al., 2007)、仮想島弧地殻断面のいろいろな深度に貫入している深成岩類は U-Pb 年代 19 Ma のものと 37 Ma のものが混在している (Nakajima et al., 2016)。

外帯花崗岩：西南日本外帯には、西は屋久島から九州南大隅、高隈山、尾鈴山、大崩山、四国足摺岬、宇和島、石鎚、紀伊半島では室生、大峰、潮岬、熊野など各地にさまざまな

規模で花崗岩類が露出する。多くは火山深成岩複合岩体で、火山岩が主体の岩体も少なくないので、それらを含めて外帯酸性岩ということもある。例えば大崩山 (Takahashi, 1986) や石鎚 (Yoshida, 1984)、熊野 (Miura, 1999; Kawakami et al., 2007; 中島ほか, 2010) などは珪長質火山岩類を伴ったコールドロンの構造をもつ。一方、高隈山、宇和島などのような数 km 以下のストック状独立岩体、南大隅のような巨大バソリスなどいろいろな産状があるが、いずれも浅所貫入型の花崗岩である。また四国室戸岬先端部には斑縞岩、紀伊半島南端の潮岬にはドレライト～グラノファイアーの小岩体が露出する。

これら外帯花崗岩の大きな特徴は、すべて中新世中期の中の非常に限られた期間に形成されたもので、U-Pb 年代の範囲は 13–15 Ma である (例えば、折橋ほか, 2015)。非常に限られた時間の中でおこった同時多発的マグマティズムであったことがわかる。

伊豆衝突帯：海洋性島弧である伊豆小笠原弧の地下にはトータル岩質の中部地殻があると言われている (Suyehiro et al., 1996)。Saito et al. (2007) や Tani et al. (2010) などによって 4–14 Ma の U-Pb 年代が報告された甲府・甲斐駒・丹沢など伊豆半島の北側のいわゆる伊豆衝突帯に露出する深成岩体が、伊豆小笠原弧が日本列島に衝突した後に形成されたのか、あるいは海洋性中部地殻として伊豆弧下で形成されていた花崗岩質岩が衝突によって陸上露出したものか、が大きな問題となっている。

3.7. 第四紀の花崗岩

日本列島は大陸地域の花崗岩地帯と違って非常に新しい、第四紀の花崗岩がみられることが特徴で、現在も活動的なプレート境界の造山帯であることを物語っている。

その代表が中部山岳地帯のネオプルトンとよばれる滝谷花崗岩 (Harayama, 1992) や黒部花崗岩 (Wada et al., 2004) で、滝谷花崗岩は 1.36 ± 0.23 Ma (Sano et al., 2002)、黒部花崗岩は 0.5–0.6 Ma (Ito et al., 2013a, b) の U-Pb 年代が報告されている。いずれも日本列島で最も隆起速度が大きい地帯にある。

東北地方葛根田の地熱地帯では、まだ地表露出していない高温の花崗岩体をボーリング調査によって掘削し、深度 2,800 m で岩体に到達している (Fig. 4) (加藤ほか, 1993; Sasaki et al., 2003)。その U-Pb 年代は約 0.1 Ma と測定されている (Ito et al., 2013a)。おそらく世界で一番新しい花崗岩体であろう。

4. 花崗岩の分類：タイプと系列

4.1. I/S タイプ

花崗岩の化学的性格を表わすのに、Chappell and White (1974) が提唱したパーアルミナスな S タイプに対してメタルミナスな I タイプという分類がよく使われる。化学組成は構成鉱物に反映するので、I タイプ花崗岩は黒雲母の他にホルンブレンドや単斜輝石、S タイプ花崗岩は白雲母やざくろ石、堇青石などが含まれる。これらは花崗岩マグマの起源物質が I タイプは火成岩 (Igneous rock)、S タイプは堆積岩

Fig. 4. Cross section of the Kakkonda geothermal field, NE Japan (Kato et al., 1993). 1. Neogene andesite to dacite tuffs, 2. Conglomerates, 3. pre-Paleogene formations, 4. Dacite intrusion, 5. old intrusion, 6. Kakkonda granite, LaU; upper limit of laumontite, LaL; lower limit of laumontite, Wa; lower limit of wairakaite, Bi; biotite isograd in the contact aureole, Co; cordierite isograd.

(Sedimentary rock)であるという成因的な意味をもつが、現実には起源物質は両者がいろいろな割合で寄与していることが多く、また I/S タイプの記載的分類の定義がきわめて非論理的かつ曖昧であるため(中島, 2000), 判別を厳密にすることは難しい。例えば、岩石のアルミナ飽和度 $ASI = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ <モル比計算>が 1.1 より高いのが S タイプ、低いのが I タイプとと思っている人がいまだに多い。それはかつて報告された I/S 両タイプの花崗岩が近接して露出しているオーストラリア東南部の Kosciusko Batholith で両タイプの花崗岩の境が $ASI = 1.1$ であった(Hine et al., 1978)ことがもともになっていると思われるが、一般的な意味はほとんどなく、分化の進んだ I タイプ花崗岩はしばしば $ASI > 1.1$ となる。

I タイプと S タイプの構成鉱物の違いは変成岩でかつてよく用いられた ACF 図を使うと簡単に理解できる(Fig. 5)。ACF 図では石英は過剰成分、カリ長石は K 成分の投影原点、斜長石は曹長石成分が Na の固定相として非表示になるので Ab 成分の如何に拘らず AC 辺上の A : C = 2 : 1 の点に表示される。F 頂点近くに表示される黒雲母と斜長石の共存線より Al_2O_3 成分に富むざくろ石、堇青石や白雲母が A 頂点の側に、 Al_2O_3 成分に乏しいホルンブレンドや単斜輝石が C 頂点の側に表示され、それぞれ S タイプ花崗岩と I タイプ花崗岩の鉱物に相当する。この図上では斜長石の点と F 頂点を結ぶ直線が $ASI = 1.0$ になる。I タイプマグマが結晶分化の過程でホルンブレンドや単斜輝石を分別すると、マグマ組成は $ASI = 1.0$ のラインを越えて A 頂点側の領域に移動していく。I タイプ花崗岩が、 SiO_2 量が多くなるに伴って ASI が増加し、1.1 を超えることも多いのはこのためで、例えば Fig. 6 にもそれは見られる。なので、むしろ SiO_2 と ASI が正の相関をもつことの方が I タイプの本質的な性質であると言える。S タイプ花崗岩マグマは結晶分化しても ASI を増加させる鉱物がないので、当然 SiO_2 と ASI の相

Fig. 5. ACF diagram showing constituent minerals of granitoids. Plagioclase-Fe+Mg line means $ASI = 1$, dividing peraluminous (Al-apex side) and metaluminous (Ca-apex side) fields. Strongly peraluminous S-type granitoids contain garnet and/or cordierite as well as plagioclase and biotite, while metaluminous I-type granitoids have hornblende and/or clinopyroxene.

関は見られない。

その後、斜長花崗岩などマントル物質から直接生成したと考えられる M タイプ(White, 1979), アルカリに富む A タイプ(Loiselle and Wones, 1979; Whalen, 1987)が加わったがいずれも量的には少なく、特に島弧型・陸弧型花崗岩では I タイプと S タイプが圧倒的である。日本列島では、伊豆衝突帯の丹沢岩体と甲府岩体の一部が M タイプ(Kawate and Arima, 1998; Saito et al., 2004), 中新世足摺岬岩体の一部(Murakami et al., 1983; Ishihara et al.,

Fig. 6. Cretaceous–Paleogene granitoids from SW Japan on the SiO_2 –ASI diagram. Note that they show a trend of positive correlation. Data from Czamanske et al. (1981), Imaoka et al. (2011), Nishida et al. (2013), etc. (after Nakajima et al., 2016).

1990; Shinjoe et al., 2010) や中部地方の白亜紀青木花崗岩 (植木・原山, 2012) などが A タイプと言われている。Table 2 に世界の代表的な I タイプ、S タイプ、A タイプ、M タイプ花崗岩と日本の花崗岩類の平均化学組成を示す。

日本列島は S タイプ花崗岩も量的に少なく、大部分が I タイプである。S タイプ的な特徴をもっているのは、日高帯の深部トータル岩のほか、中新世外帯花崗岩の熊野酸性岩、四国柏島・沖の島、九州南大隅など外帯の中でも太平洋に面している岩体で、泥質変成岩の包有物やそれらに由来する堇青石、紅柱石など変成鉱物のゼノクリストを含む。一方、白亜紀・古第三紀の花崗岩類はそのほとんどが I タイプであり、その中では三河地方の武節花崗岩が最も S タイプに近い。

4.2. 磁鉄鉱系 / チタン鉄鉱系

I/S タイプとは全く異なる花崗岩の分類法として、含まれる不透明鉱物に着目し、通常すべての花崗岩に含まれるチタン鉄鉱の他に磁鉄鉱をある程度の量含むかどうかによって磁鉄鉱系 (Magnetite series) とチタン鉄鉱系 (Ilmenite series) に分類する方法 (Ishihara, 1977) が使われている。この方法は白亜紀～古第三紀の西南日本の花崗岩区が模式地になっており、山陰帯の花崗岩類が磁鉄鉱系、山陽帯～領家帯の花崗岩類がチタン鉄鉱系である。東北日本では阿武隈帯の花崗岩類がチタン鉄鉱系、北上帯の花崗岩類が磁鉄鉱系である。白亜紀～古第三紀花崗岩以外では、飛騨帯の花崗岩が磁鉄鉱系、中新世外帯花崗岩と日高帯の花崗岩がチタン鉄鉱系である。伊豆衝突帯の花崗岩類は磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系の両方がある。

磁鉄鉱系 / チタン鉄鉱系の実践的な定義としては、岩石の帯磁率 (magnetic susceptibility) が用いられる。帯磁率 10^{-4} emu/g 以上は磁鉄鉱系、以下はチタン鉄鉱系となる (Ishi-

Table 2 Average major element chemical composition of granitic rocks from Japan (Hattori et al., 1960), I-type and S-type granitoids from Lachlan Fold Belt, Australia (Chappell and White, 1992), M-type and A-type granitoids by Whalen (1987).

	Japan (n = 440)	Lachlan I-type (n = 1074)	Lachlan S-type (n = 704)	A-type (n = 148)	M-type (n = 17)
SiO_2	69.17	69.50	70.91	73.81	67.24
TiO_2	0.39	0.41	0.44	0.26	0.49
Al_2O_3	15.00	14.21	14.00	12.4	15.18
Fe_2O_3	1.05	1.01	0.52	1.24	1.94
FeO	2.48	2.22	2.59	1.58	2.35
MnO	0.10	0.07	0.06	0.06	0.11
MgO	1.15	1.38	1.24	0.20	1.73
CaO	3.15	3.07	1.88	0.75	4.27
Na_2O	3.45	3.16	2.51	4.07	3.97
K_2O	3.01	3.48	4.09	4.65	1.26
P_2O_5	0.13	0.11	0.15	0.04	0.09
total	99.08	98.62	98.39	99.06	98.63

hara, 1981)。

磁鉄鉱系 / チタン鉄鉱系は磁鉄鉱の存否あるいは含有量による分類なので、基本的にマグマの酸化程度を反映しており、全岩化学組成とは関係がない。したがって全岩化学組成がもともになる I/S タイプとの対応はなくても不思議ではないが、実際には S タイプ、A タイプと I タイプの一部がチタン鉄鉱系、I タイプの残り M タイプがほぼ磁鉄鉱系になる (Takahashi et al., 1980)。日本の花崗岩類の大部分は I/S タイプ区分では I タイプになってしまうので、日本の花崗岩記載にはこの磁鉄鉱系 / チタン鉄鉱系は有用である。

I, S, A, M タイプと磁鉄鉱系 / チタン鉄鉱系については高橋 (1985) による詳しい解説があるので参照されたい。

5. 化学的性質

5.1. 主成分化学組成

日本の花崗岩類の SiO_2 量は、Aramaki et al. (1972) や Aramaki and Nozawa (1978) による統計では 70–72% にピークがあると言われている。石英閃緑岩にほぼ相当するとして基準にされる SiO_2 量 64% を超える花崗岩類の割合は全体の約 75% で、これは環太平洋花崗岩区を構成する韓半島南部、マレー半島、シホテアリン、アラスカ中央部、シエラネヴァダの白亜紀花崗岩類も同様である。南部カリフォルニアやペルーでは、それより全体的にやや SiO_2 が少なく、 SiO_2 量が 64% に満たない花崗岩類が 35% を超える (Aramaki et al., 1972)。

日本列島の中でも花崗岩区や時代によって SiO_2 量の違いがある。最大の花崗岩区である白亜紀～古第三紀の西南日本では、上記の SiO_2 量 64% を超える花崗岩類の割合が前弧側の領家帯花崗岩で約 75%、それに並行する山陽帯が約 85%、背弧側の山陰帯 90% まで島弧横断方向に SiO_2 に富むようになるが、Fig. 3 示されるように領家帯～山陽帯が地殻断面であることを考えると、この組成の変化は前弧から

Fig. 7. Chemical compositions of the granitoids of Japan on the SiO_2 - K_2O diagram by Peccerillo and Taylor (1976). Data from Murakami and Imaoka (1987), Czamanske et al. (1981), Imaoka et al. (2014), etc. (after Nakajima et al., 2016).

背弧の水平方向の変化と言うより地殻深部から上部への垂直方向の変化とみることもできる。

全岩化学組成によって花崗岩類を分類する試みは、多くの例がある。4.1. で取り上げた I, S, M, A タイプもその 1 つである。他にも $\text{Na}+\text{K}-\text{Ca}$ (Modified Alumina-Lime Index) や $\text{FeO}^{\text{tot}}/(\text{FeO}^{\text{tot}}+\text{MgO})$ をパラメーターにしてアルカリ花崗岩や A タイプ花崗岩と島弧・陸弧型花崗岩を判別するのにある程度有効な Frost et al. (2001) や Frost and Frost (2008) の方法があるが、そのほとんどが島弧・陸弧型花崗岩である日本の花崗岩類にはあまり用いられていない。

花崗岩類はしばしば累帯岩体の一部や暗色包有物の形で閃緑岩～斑輝岩を伴うことがある。それらを含めた化学組成の変化を用いて花崗岩マグマの結晶分化を議論している場合があるが、これらの苦鉄質岩の中には集積岩であるものが多く、その場合は全岩化学組成がマグマの組成を表わさないのので、Kawate and Arima (1998) や Nakajima et al. (2004) のようにハーカー図などを使ってどこからがマグマの組成かの判別をする必要がある。

日本の花崗岩類はそのほとんどが Peccerillo and Taylor (1976) の SiO_2 - K_2O 図では medium-K から high-K の領域にプロットされる (Fig. 7)。シエラネヴァダ (Bateman and Dodge, 1970) で見られるような K_2O 量の背弧側から前弧側への帯状分布は、白亜紀西南日本の領家帯～山陽帯にも東北日本の阿武隈帯～北上帯にも認められないが、中新世外帯花崗岩類では背弧側から前弧側に向かって 2.5% から 3.2% と増加する傾向が報告されている (中田・高橋, 1979)。

5.2. 微量元素

1980 年代後半頃から機器分析の装置や技術がめざましく向上し、大量の化学分析値が発表されるようになった。火成岩の全岩化学分析においては特に XRF や ICP-MS などを用いた微量元素のデータが量産され、Pearce et al. (1984)

などによるさまざまな判別図 (discrimination diagram) が考案されて、それらを用いたマグマの起源物質や形成場の議論が盛んになった。それらの中には原理的な根拠をもたない empirical なものもあるが、いつしか微量元素の含有量や存在度パターンが火成岩研究の中心になり、それを火成岩岩石学とよぶケースもでてきた。それらは新種の情報にはそれに適した料理法という意味もあるが、岩石学的な知識や情報を必要とせずにマグマ成因論やテクトニクスの議論に直行することも人気を博した一因かもしれない。

それらの中で最も一般的に使われるのが、不適合度などの順に元素をならべて初生マンタルの値で規格化したいわゆる spidergram で、島弧・陸弧の花崗岩類は Nb や Hf など HFS 元素が他の元素と比べて乏しいことが特徴とされている。Fig. 8 に日本の花崗岩の spidergram を示す。

微量元素の中でも希土類元素 (REE) は、コンドライトで規格化したその存在度パターンがマグマの起源物質についての議論に使われる。REE はすべて周期律表ではランタニド系列の元素として扱われ基本的に挙動が似ているが、それでも La, Ce などのいわゆる軽希土 (LREE) と Yb, Lu などの重希土 (HREE) では取り込みやすい鉱物が違うので、その特徴が存在度パターンの勾配や絶対量に表われる。勾配をパラメーターとして表わすのに La/Yb 比を用いることもある。日本を代表する白亜紀西南日本の花崗岩類の多くは、世界の島弧花崗岩と同様 LREE にやや富み HREE はフラットなパターンを示す。

微量元素を用いて判別される例としてアダカイト質花崗岩がある。アダカイト質花崗岩は Na, LREE や Sr に富み HREE や Y に乏しいのが特徴で (Martin et al., 2005), $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ 図において一般の島弧花崗岩と区別されることが多い。このような全岩化学組成の特徴はざくろ石を残留相とする部分溶融が想定され、始生代の TTG (Tonalite-Trondjemite-Granodiorite) のモダンアナログとして、沈み込む海洋地殻の部分溶融によって生成したと解釈された (Defant and Drummond, 1990)。一方、ざくろ石を残留相とするには、沈み込み帯深部の低温高压条件下で形成されるエクログャイトである必要はなく、下部地殻のざくろ石グラニュライトが部分溶融しても可能という議論もある (Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996)。Qian and Hermann (2013) は Rudnick and Gao (2003) によって提唱された下部地殻の化学組成をもつ試料を 10–15 kb, 800–1050°C の条件下で部分溶融させ、残留相にざくろ石をもちアダカイト/TTG と同じ特徴をもつメルトが形成されることを示した。また、島弧マグマが高压下で結晶分化すればアダカイト質マグマができるとも言われている (Macpherson et al., 2006; Ribeiro et al., 2016)。したがって全岩化学組成がアダカイトの特徴を持つことが直接スラブメルティングの証拠となるという議論には疑問符がついている。

日本では、アダカイト質花崗岩類は白亜紀東北日本の北上帯に数多く存在することが報告されており (Tsuchiya and Kanisawa, 1994; 土谷ほか, 2015), ほかに北関東の八溝山地 (Takahashi, 2005) や中部九州 (Kamei, 2004), 近畿

Fig. 8. Spidergram of representative granitoids in Japan. Data from Tsuchiya and Kanisawa (1984), Imaoka et al. (2014), Tsuchiya et al. (2007), etc. The shaded bands show the compositional range of the felsic to intermediate rocks from representative arcs in the world including Aleutian, Mariana, Solomon, Sangihe, South Sandwich, Kermadec and Lesser Antile arcs (after Saito, 2014). Normalizing values are from Sun and McDonough (1989). (after Nakajima et al., 2016).

(Imaoka et al., 2013) などからも報告されている。成因についての解釈はアダカイト質花崗岩体によって、また研究者によってまちまちであり、北上帯はスラブの部分熔融、八溝山地は島弧マグマの結晶分化、中部九州は下部地殻の部分熔融で説明されている。

5.3. 同位体的性質

花崗岩類は通常ある程度分化した岩石なので、元素濃度と違って結晶分化の影響を受けない同位体の情報がマグマの起源を推定するのに有効なことは古くから知られていた。特に花崗岩類では Sr と Nd の同位体比 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ がよく測定され、測定値を形成年代で補正したそれらの初生値 SrI 、 NdI (ϵNd) が議論に用いられる。火山岩によく用いられる Pb 同位体は、日本の花崗岩類ではまだほとんど測定されていない。Hf 同位体比 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ は最近東北日本の花崗岩について測定され、初生値 HfI は SrI 、 NdI と同様北上帯・阿武隈帯・足尾帯など花崗岩区によって特徴的な同位体比をもつことが示された(平原ほか, 2015)。

Sr と Nd の同位体比は 1970 年代から日本の多くの花崗岩体について測定され、同位体比の広域的な分布が明らかになってきた (Shibata and Ishihara, 1979; 加々美ほか, 1999 など)。Sr と Nd の同位体比を横軸と縦軸にとった $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 図において、CHUR を原点とすると、島弧の花崗岩は原点を含んで第 2 象限から第 4 象限に伸びるトレンドを形成することが知られている (Fig. 9)。すなわち SrI と NdI は逆相関する。日本列島の花崗岩類はそのほとんどが島弧型花崗岩なので、 SrI だけを用いても全体的な傾向を見るのに十分有効であると言える。平原ほか (2015) の東北日本で花崗岩類の SrI と NdI の分布を面的に示した図でも、 SrI と NdI の塗色分布はほとんど同じである。

また花崗岩類においてはマグマの起源物質にいろいろな時

Fig. 9. Representative Japanese granitoids in the $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ – ϵNd systematics, showing their negative correlation. (after Nakajima et al., 2016).

代の珪長質大陸地殻が含まれることがあるのを反映して、このトレンドは玄武岩の場合よりも第 4 象限に長く伸びた分布を示す。その場合、長く伸びた部分では NdI よりも SrI の方に変化が敏感に現われる (Fig. 9)。古い時代のクラトンの岩石は Rb が壊変してできた ^{87}Sr が蓄積して $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高くなっているため、花崗岩マグマがそれらを起源物質として取り込んでいけば SrI の高い花崗岩になる。古い時代のクラトンでなくても、堆積岩や変成岩類は一般的に初生的なマグマよりいくぶん $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が高いので、 SrI は花崗岩マグマがそういった堆積岩類などをどの程度同化しているかの目安になる。したがって、本論では以下の議論に主として Sr 同位体比を使い、必要に応じて Nd 同位体など他の同位体データを使うことにする。

SrI は現在の Sr 同位体比測定値に年代補正をして得られるので、正しい年代が得られていることが前提条件である。また、Rb/Sr 比が大きい岩石については、その補正幅が大きくなるので注意が必要である。

日本の花崗岩類の SrI は地域や花崗岩区ごとに違いがある。例えば日本の花崗岩の 7 割以上を占める白亜紀～古第三紀の花崗岩類は、全体としては 0.704–0.712 の SrI をもつが、その大部分は 0.706–0.709 である。中部地方や近畿地方、関東地方の一部に“hot spot”的に突出して高い値を示す地域がある (Shibata and Ishihara, 1979; Arakawa and Takahashi, 1989; 田結庄ほか, 1999)。

Kagami et al. (1992) は中国地方を SrI の異なる 2 つのセグメントに分け、それぞれ North Zone、South Zone とし、その後この区分はしばしば他の地域にも用いられているようである。しかし実際は両 zone の間で SrI に不連続なジャンプは認めにくく、そのため彼ら自身も両者の間に Transitional Zone というセグメントを作っているほどなので、そのようなドメイン構造を考えず緩やかな勾配をもつ不均質があると考えの方が無理がない。さらに彼らの SrI は岩体ごとの年代で補正をした値なので、それらの地図上での分布はそ

Fig. 10. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ distribution map of the ca. 80 Ma granitoids in the Kinki and eastern Chugoku districts of the Japanese Islands. The two digit numbers besides the measured sample points (solid circle) were calculated via $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - 0.7000) \times 10,000$. (after Nakajima et al., 2016).

もそも同時断面になっておらず、何を意味しているのかわからない図になっている。例えば、古第三紀の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を示す地点と 90 Ma の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ を示す地点の間で値の大小を比較してドメイン境界をひいても意味がない。ある時期の地下構造を示す情報として意味を持つためには、まず同じ形成年代の岩体の SrI 値の分布を見なければならぬはずであり、実際にはそれが可能な地域は少ない。Fig. 10 にそれがある程度可能な例として、80 Ma の近畿地方における SrI 分布図を示す。

西南日本の白亜紀花崗岩類には苦鉄質岩の孤立岩体や包有岩がしばしば伴われるが、それらの SrI は 0.706–0.710 と周囲の花崗岩類と同等の値を示す (Iizumi et al., 2000; Ka-

gami et al., 2000; Nakajima et al., 2004; Koizumi et al., 2016)。これらの苦鉄質岩は、かつて領家帯では変輝緑岩やコートランダイトとよばれていたもので (山田ほか, 1974 など)、最近はその実体が粗粒斑輝岩のブロックないし小岩体と細粒玄武岩～玄武岩質安山岩の同時性岩脈や珪長質マグマとの混交からできたいわゆる MME であることがわかってきている (吉倉・熱田, 2000; Nakajima et al., 2004 など)。これらは実測値から当時 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.706\text{--}0.710$ の初生マグマから形成されたと思われる、これがマントルの部分溶融でできるとすると、当時のアジア大陸東縁のウェッジマントルがスラブ由来の流体の影響などで Sr 同位体に関して enrich した、シエラネヴァダで推定されているような沈み込み型 lithospheric mantle (Mukopadhyay and Manton, 1994; Ducea and Saleeby, 1998) になっていた可能性がある。

東北日本の白亜紀花崗岩の SrI は、阿武隈帯・北上帯ともに 0.7042–0.7055 と西南日本の領家・山陽帯より有意に低く、形成時期が西南日本の花崗岩類より 20–30 Ma 古いことを考えると、ソースマントルの状態が違った可能性もある。

Fig. 11 に西南日本における白亜紀、古第三紀および新第三紀の深成岩類の SrI 値を示す。古第三紀の花崗岩は山陰帯に限られ、その量も白亜紀花崗岩に比べると少なく、SrI は 0.704–0.7052 と低い。中新世外帯花崗岩類は、I タイプ的な大峯、大崩山などの岩体では SrI が 0.7054–0.7056、S タイプ的な熊野、尾鈴、南大隅などでは 0.7079–0.7096 (Terakado et al., 1988; Shibata and Ishihara, 1979) と系統的な違いが見られる。I タイプの花崗岩と S タイプの花崗岩は中央構造線側から太平洋側へと帯状配列しているので (中田・高橋, 1979)、SrI も大局的にはその方向すなわち背弧側から前弧側に向かって上昇している。その中で、前弧側に突き出した潮岬や室戸岬の苦鉄質岩体だけは 0.703–0.704 と低い SrI を示す (Shibata and Ishihara, 1979; Terakado et al., 1988)。S タイプ的な熊野酸性岩は片麻岩の包

Fig. 11. Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio vs. SiO_2 plot of the Cretaceous, Paleogene and Neogene granitoids from SW Japan. Data from Terakado and Nakamura (1984), Terakado et al. (1988), Nakajima et al. (1990), Kagami et al. (1992), Nakajima (1996), Nakajima et al. (2004), Saito et al. (2004, 2007, 2012), Imaoka et al. (2011), Koizumi et al. (2016) and the author's unpublished data.

有岩を多数伴い、その中には部分溶融組織をもつものもある(中島ほか, 2010, 2014). SrI は 0.708 前後で、周囲の四万十帯堆積岩類($SrI=0.710-0.714$)と、潮岬の苦鉄質岩($SrI=0.7035-0.7040$)の中間の値を示すことから、起源物質としてこの両者が関与した可能性が示唆される(中島ほか, 2014).

伊豆衝突帯の花崗岩体は、10–14 Ma の甲府岩体・甲斐駒岩体と 4–8 Ma の丹沢岩体に代表される。どちらも複合岩体で、 SrI は前者が 0.7038–0.7057、後者は 0.7033–0.7037 と低い(Ishizaka and Yanagi, 1977; Shibata and Ishihara, 1979; Saito et al., 2007, 2012). 中部山岳地域に露出する第四紀花崗岩では、U–Pb 年代 1.36 ± 0.23 Ma の滝谷花崗岩について Sr 同位体比 0.7076 と報告されている(原山, 1994).

日高帯では、19–20 Ma の浅所型花崗岩体は SrI が 0.7041–0.7042、それらに伴う塩基性岩類は MORB にほぼ近い 0.7025 である(Maeda and Kagami, 1996). 島弧地殻断面である日高深成変成帯の、地殻中部～上部に相当する深さにその深度方向に伸びた形で貫入し、岩体深部の斑縞岩から浅部の花崗岩質岩まで垂直累帯深成岩体とも言うべき形状と岩相構造を示すトッタベツ岩体では、岩体最深部の斑縞岩部分では 0.7026 の Sr 同位体比が深度が浅くなるにつれて上昇し、岩体最上部の花崗岩質岩部分では Sr 同位体比初生値 0.7041、年代 19.8 ± 0.9 Ma の見事なアイソクロンを形成する(Kamiyama et al., 2007). 地殻中部以下に貫入するトータル岩類は SrI が 0.7043–0.7065 である(Shimura et al., 2004; 小島・志村, 2014).

白亜紀以前の花崗岩区としては飛騨帯がある。飛騨帯では花崗岩類は 240–250 Ma と 190–200 Ma の列と 2 つのグループからなる。 SrI もその年代グループごとに異なり、240–250 Ma の花崗岩は 0.7044–0.7053、190–200 Ma の花崗岩では 0.7057–0.7105 である(Arakawa, 1990).

これら放射性同位体のほかに、安定同位体も花崗岩の起源物質の研究、特に上部地殻物質をどの程度同化しているかを調べるのに用いられている。西南日本内帯の白亜紀～古第三紀の花崗岩では、 $SiO_2=70\%$ に規格化した時、酸素同位体比 $\delta^{18}O$ が山陰帯から領家帯にかけて 6‰ から 11‰ まで上昇し、帯磁率がこの方向に減少するのに対応している(Ishihara and Matsuhisa, 2002). この $\delta^{18}O$ 値の範囲は北米西岸の Peninsular Range Batholith の花崗岩とほぼ等しい(Taylor and Silver, 1978). 同様の背弧側から前弧側への $\delta^{18}O$ の変化は中新世の外帯花崗岩にも見られる(Ishihara and Matsuhisa, 1999). 伊豆衝突帯の花崗岩では、 SrI が最も低い花崗岩が $\delta^{18}O$ も一番低くて 5.0–5.5‰ であった(Ishihara and Matsuhisa, 2005).

イオウの同位体比も花崗岩の帯磁率と相関する。磁鉄鉱系の花崗岩はイオウ同位体比 $\delta^{34}S$ がほぼ正の値をとるが、チタン鉄鉱系の花崗岩はおおむね負の値になる(Sasaki and Ishihara, 1979; Ishihara and Sasaki, 2002).

6. 花崗岩類の起源物質

Fig. 11 に見られるように、日本列島に産する花崗岩類の SrI の範囲は 0.703–0.712 で、中でも 0.710 を超えるものは少ない。韓半島や中国大陆に存在する始生代～原生代のクラトン物質の中生代・新生代に予想される $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比が 0.75–0.8 にも及ぶことを考えると、日本列島の基盤に Jahn (2010) や Charvet (2013) が主張するようなクラトン様の地塊やそれに由来する enriched source が存在するとは考えにくい。日本列島の基盤は古生代末期から海洋地殻が沈み込む大陸縁辺部で形成された付加体によって構成されていることが野外地質や付加体層序から証明されており(Isozaki et al., 1996; Taira et al., 2016 など)、上記の同位体的性質はそのことを反映していると思われる。

日本の花崗岩は、そのほとんどが I タイプであることや同位体的性質から、基本的にマントルが部分溶融して地殻最下部に underplate した玄武岩質物質が主なソースになっていると思われる。そのような下部地殻物質が部分溶融して生成した初生マグマがより浅所の花崗岩マグマになるまでに反応、同化する可能性があるのは、付加体堆積岩とそれがもともになった変成岩とそれ以前に貫入した深成岩類である。付加体は下付け機構で成長し、古い時代のものほど構造的上位になるので、現在地表露出している地層より古いものが地殻深部を構成していることはあまり考えられない。現在日本列島で地質体として露出しているのは古生代後期以降の地層と深成岩体であり、それ以前の岩石は小ブロック・小岩体としてしか地表には残っておらず、それが地下深部を広く占有しているとは考えにくい。したがってマントル源の初生マグマが地殻物質をある程度混合同化したとしても、地殻内にマグマの $^{87}Sr/^{86}Sr$ を大幅に上昇させるような物質はないため、 SrI は 0.710–0.712 程度までしか上がらないのであろう。

7. 花崗岩形成のテクトニクス

7.1. 花崗岩形成場の変遷

花崗岩のタイプ分類で A タイプは Anorogenic, Alkalinity, Anhydrous の A からとっているが(Loiselle and Wones, 1979), 実際はリフト帯やプレート内部など、プレート境界の造山帯以外で形成されている。すべての花崗岩は orogeny (造山運動) で作られるので、anorogenic (非造山性) な花崗岩というのは存在しない。日本列島に露出するなどの花崗岩類も、それを形成する造山運動とテクトニックセッティングがあったはずで、それこそ日本列島の地史を解明する手がかりになるであろう。そうした観点から、本章では日本の花崗岩類のうち主要なもの、情報の多いものについて、それらが形成されたテクトニックな環境を考察する。

日本列島は古生代後半以来ずっと、ユーラシア大陸東縁のプレート収斂境界に位置してきた。したがってそこでの火成活動は基本的に島弧・陸弧型のものであるが、沈み込む海洋プレートの年齢や相対速度、リフトや背弧海盆の拡大、島弧や海嶺の衝突など、大陸と海洋プレートの状況や周辺の事件に大きく影響されたものとなっている。

日本列島で花崗岩類が形成された中生代以降のユーラシア東縁のテクトニックセッティングは、

- (1) 三畳紀～ジュラ紀：比較的遅い速度でのプレート沈み込み
- (2) 白亜紀～古第三紀前期：異常に速いプレート沈み込みあるいは海嶺の接近と衝突
- (3) 古第三紀後期：大陸東縁での背弧リフトの活動
- (4) 中期中新世：四国海盆の拡大と停止，日本海および千島海盆の拡大
- (5) 中新世～鮮新世：フィリピン海プレートの沈み込み開始と伊豆小笠原弧の衝突
- (6) 第四紀：東北日本では比較的速い太平洋プレートの沈み込み，西南日本では比較的遅いフィリピン海プレートの沈み込み

とまとめることができる。これらの中で特に現在の日本列島の骨格形成において重要な白亜紀～古第三紀前期と中期中新世の活動について以下に述べる。

7.2. 白亜紀～古第三紀前期

地球全体でマンツルの活動が盛んだった時期で，プレートの速度も速く世界中で造山運動が活発に起こった。いわゆる Pitman のパルス (Pitman, 1978) にあたる。環太平洋をカバーする広域的な花崗岩地帯が形成され，ユーラシア大陸東縁でも太平洋プレートの沈み込み速度が非常に速かった (Mueller, 2008) ために，日本列島全体にわたる大量の花崗岩類が形成された。その造山帯としての構造は，花崗岩類の分布が最も顕著な西南日本で，領家帯～山陽帯がその模式的な地殻断面として観察される (Fig. 3)。Fig. 3 では，大陸縁で形成され累重する付加体堆積岩が地下深部では高温条件で変成され，一部は部分熔融してマグマタイトを生じ，そこに下部地殻由来の花崗岩マグマがさまざまな深度に貫入して，深部では深成変成帯を，浅部ではマグマが大量に地表噴出して火山深成複合地帯を形成する姿が描述されている。3.4. で述べたように，白亜紀西南日本における花崗岩類の形成が海嶺の衝突によって起こったなら，それは Fig. 3 のような地殻断面を形成する場所が西から東に移動して行ったことになる。

他の深成変成帯，例えば阿武隈帯や飛騨帯は，Fig. 3 の浅部が剝削や構造運動等で消失している姿と見ることもできる。日高帯では貫入岩は浅部まで残っているが同時期の火山岩が見られないのは，中の川層群上部の非変成部の上に噴出したのが剝削されたか，最上部がテクトニックに失われたか，あるいはそもそもマグマが地表まで達せず噴出なかったのかのいずれかであろう。

Fig. 3 は白亜紀西南日本の深成変成帯を形成した当時のユーラシア大陸東縁の模式的な地殻断面であるが，同時に太平洋型 (コルディレラ型) 造山帯の一般的な姿でもある。同様の仮想地殻断面は，北米西岸の Skagit Methow (Kriens and Wernicke, 1990) や Southern Sierra Nevada (Saleeby, 1990) などについても描かれている。しかしアジア大陸東縁や北米・南米西岸など環太平洋花崗岩地帯の多くは火山深成複合岩体型の産状で，地殻の比較的浅い部分が露出してお

り，日本の山陽～領家帯のように地殻深部までが連続して観察できる地域はあまり多くない。

7.3. 中期中新世

中期中新世には，日本列島周辺の 2 カ所で背弧海盆が形成された。一つは日本海で，もう一つは千島海盆である。千島海盆の拡大によって北海道の西半分すなわち東北日本の延長部と東半分である千島弧の現在の位置関係が定まり，北海道の現在の輪郭が決まった。この変動に伴う火成変成作用によって日高深成変成帯が形成されたと考えられ，花崗岩やグラニュライトの U-Pb 年代 19 Ma (Usuki et al., 2006; Kemp et al., 2007) がその時期を表わしていると解釈されている。日高深成岩類でもう一つの U-Pb 年代 37 Ma については，Kemp et al. (2007) は arc マグマティズムと述べているが，十分な根拠が示されておらず，またその arc についての地質構造発達史的な説明もなされていない。

一方この時期，日本海の誕生により日本はアジア大陸から分離して日本列島となった。それとほぼ時を同じくして四国海盆の拡大が終了し，それによって形成された海洋リソスフェアがフィリピン海プレートとして日本列島の下に沈み込みを始めるが，それに先がけて日本海拡大によって大陸から分離した西南日本弧が，できたてのフィリピン海プレートの上に衝突したことで疑似沈み込み帯の位置関係ができ上がり，一過性の珪長質火成活動をひき起こした。外帯酸性岩の成因はこのように考えられている。火成活動は中部地方から九州までの広い範囲で同時多発的に起こったが，非常に短命で 13–15 Ma の間にすべて終了した。この火成活動によって形成された熊野，石鎚，尾鈴山などの珪長質火山岩類は，衝突してきた西南日本弧スリパーの上に噴出しているため，Fig. 12 のように衝突は 13–15 Ma より前に完了していなければならない。したがってこの解釈は日本海拡大の時期も制約する。この衝突は，これにより白亜紀の arc-trench gap を解消して西南日本内帯と外帯が接合した (Maruyama et al., 1997; Kimura et al., 2005 など) と考えてよいが，日本列島地質構造の根幹にかかわる大きな事件である。

最近，Kimura, et al. (2014) によって，足摺，室戸，潮岬などの岩体が伊豆小笠原弧の東進による RTT 三重点の移動によって形成されたと議論されているが，年代データからは支持されない。

8. 日本列島の大陸地殻形成史

8.1. 大陸地殻の更新

地球の歴史を通してみると，大陸地殻すなわち花崗岩類が生産されるのは決して一定の速度ではなく，何度か花崗岩質大陸地殻を作る大きなイベントがあったことがわかっている (Condie, 1989; Windley, 1995)。それはその時期に地球規模でマンツルの活動が活発になり，地殻に玄武岩質マグマを大量に供給したためであると考えられている。その結果として地殻上部で花崗岩の形成がきわめてエピソードに起こる。それらの中で顕生代を代表する大きなイベントが白亜紀のパルスである。Fig. 1 でみられるように，日本列島の花崗岩類も大部分がこのイベントに関連して形成されてい

Fig. 12. Presumable tectonic setting of Middle Miocene SW Japan, including the generation of granitic rocks (Kimura et al., 2005).

る。このイベントによって日本列島の地殻は、新しく供給されたマントル起源の玄武岩質岩とそれが分化したり堆積岩類を同化することでできた岩石によって作り直されたと思われる。日本の白亜紀花崗岩類は、その大部分がIタイプでSタイプ花崗岩が少ないことから、堆積岩類の同化は限定的であったと推定される。

Fig. 11によると、日本列島の花崗岩類のSr同位体比初生値は、その大部分が0.704–0.712の範囲にあるが、そのうち白亜紀花崗岩類(0.7050–0.7114, 古第三紀の時の値は0.7051–0.7120)より古第三紀の花崗岩類(0.7037–0.7052)の方が明らかに低い値を示す。これは古第三紀にそれまでと異なる、よりjuvenileなマグマソースからのインプットがあったことを意味し、マントル由来のマグマの上昇が考えられる(Imaoka et al., 2011)。ただし古第三紀の花崗岩類が存在するのは山陰帯の日本海寄りの地域に限られており、白亜紀花崗岩のように西南日本内帯全域に分布してはいないので、地殻の改変・更新は局所的であったと思われる。

飛騨帯の中生代花崗岩類でも、同様の関係が報告されている。飛騨帯では190–200 Maと240–250 Maの2回、花崗岩の活動があったことがU–Pb年代から明らかにされており、それら花崗岩のSrIは190–200 Maが0.7044–0.7053, 240–250 Maは0.7057–0.7105である。かつ190–200 Maの花崗岩類と240–250 Maの花崗岩の間は貫入関係が確認されている。つまり2回の花崗岩活動はほぼ同じ場所であり、190–200 Maの活動の時は240–250 Maよりもjuvenileなマグマがインプットしていて、この約50 Maの間に地殻が改変されていたことがわかる。飛騨帯は、240–250 Maは深成変成帯の比較的深部のみ、190–200 Maについては浅部のみしか露出していないので、この時代の地殻全体についての情報が少なく、改変の実像はよくわからないが、時期的には北中国地塊と南中国地塊の衝突イベントに関連したものかも知れない。

新第三紀の花崗岩類(SrI=0.7035–0.7096)は、U–Pb年代13–15 Maの外帯花崗岩類と4–14 Maの伊豆衝突帯の花崗岩類である。伊豆衝突帯の花崗岩はMタイプの丹沢岩体を筆頭に、そのほとんどが0.7033–0.7050と低い値で、海洋性島弧である伊豆弧のリソスフェアが本州弧に衝突し、

それが加わって衝突帯の地殻が新たに作られていったことを示していると思われる。

外帯花崗岩はU–Pb年代が13–15 Ma, SrI=0.7054–0.7096で、14 Maの時の白亜紀花崗岩類(0.7052–0.7126)とほぼ同じ範囲になる。外帯花崗岩の中にはミグマタイトの包有岩をもつものも多いことから、その起源物質は、室戸や潮岬にみられる苦鉄質岩(SrI=0.7032–0.7040)を作ったマグマと四万十堆積岩あるいはその部分溶融したメルトとの混合と考えられる(Shinjoe, 1997; 中島ほか, 2014)。SrIのバリエーションは初生マグマと堆積岩源成分の混合比であると解釈できる。

東北日本の白亜紀花崗岩類と西南日本の白亜紀花崗岩類の地殻の連続関係はよくわかっていない。東北日本の白亜紀花崗岩類については、最近U–Pb年代が数多く報告されるようになったが、本論3.4.でも述べたように北上帯と阿武隈帯の花崗岩類は両者の間でも少し年代が異なること、また両者の年代とともに西南日本の白亜紀花崗岩類の年代より20–30 Ma古いこと、またSr同位体比初生値が西南日本の白亜紀花崗岩類よりかなり低く(5.3.参照)、起源物質の性質が異なる可能性もある。この問題は東北日本と西南日本の地質構造的な関係に不可避的にかかわってくるが、その関係はまだ十分に解明されておらず、むしろこのような両側地域の花崗岩の性質から制約条件を与えていなくてはならない段階かもしれない。

このように、東北日本の地殻形成史は未確定な部分が多いが、陸弧・島弧としての日本列島の地殻物質の形成史・進化史は西南日本をモデルとして以下のようにまとめられよう。

- ・三畳紀～ジュラ紀：古生代末期から古太平洋プレートの沈み込みを受ける活動的縁辺として島弧火成作用の場であったと考えられる。三畳紀には中朝地塊/揚子地塊の衝突の影響があったと思われるが詳細は不明である。

- ・白亜紀：汎地球的活発期の中で、太平洋型造山帯の最前線として異常に速い太平洋プレートの沈み込み速度あるいはクラ–太平洋海嶺の接近と衝突に起因すると思われる大規模珓長質火成活動により、地殻構造は全面的に再構成された。

- ・古第三紀：沈み込み帯にそって小規模な背弧リフトの活動があり、アセノスフェアの上昇により背弧側の地殻物質が一

部更新された。

・新第三紀中新世：日本海の拡大に伴う西南日本内帯スリパーの外帯への衝上による疑似沈み込み帯テクトニクスにより、形成されたばかりの付加体の地域で短期間の前弧火成活動がおこった。ユーラシア大陸東縁に限定されたローカルなイベントで、地殻物質の生産についても上記白亜紀の活動に比べると小規模である。

8.2. 構造侵食と花崗岩のサバイバル

近年、沈み込み帯における地殻物質の構造侵食が注目されており、沈み込み帯は大陸地殻を成長させる場とは限らず、むしろ構造侵食によって付加体堆積物や大陸側の上部地殻物質が沈み込みによってマントルに消えて行く場にもなっていると言われている(von Huene et al., 2004; Yamamoto et al., 2009)。実は、変成岩研究者の間ではかなり前からそのことに対する予見があった。それは、高压変成岩をテーマとした1983年のPenrose ConferenceでフランスのChristian Chopinが石英の高压相であるcoesiteを含む超高压変成岩の実物を会場に持参し、参加者たちを驚かせた時からである。驚きは、石英を含むおそらく上部地殻起源の石が地下100 kmの深さまで持ち込まれていることで(詳細はChopin, 1987)、花崗岩質大陸地殻は軽いからひとたび形成されたら地表近くにとどまり続けるというそれまでの常識に鉄槌を下され、参加者は皆一瞬言葉を失った。それ以降、超高压変成岩は世界の変成岩研究者に注目され、世界各地から報告が相次いだ。少なくとも地下100 kmまでは地殻物質の循環システムの範囲であることは今では常識だが、その具体的な物質移動プロセスについては十分描述されていなかった。構造侵食はその花崗岩質大陸地殻物質をマントルの深さまで持ち込むプロセスであると言ってよい。

このように大陸地殻が形成されても構造侵食によって失われてしまうことがあるので、花崗岩の形成年代分布に空白期があっても、その期間実際に火成活動が休止していたのか構造侵食によってその期間の花崗岩が地表から失われたのか、両方の可能性があることになる。それを解決するには、堆積岩に含まれる碎屑性ジルコンのU-Pb年代の分布を調べることが有効で、近年その手法を用いて堆積岩の後背地や古地理、地質構造発達史を探る研究が盛んである(中間ほか, 2010; 鈴木ほか, 2010; 中畑ほか, 2016など)。

中間ほか(2010)は碎屑性ジルコンの年代頻度分布から、日本列島周辺で花崗岩類が生産されたのは、顕生代では520–400 Ma, 280–210 Ma, 190–160 Ma, 110–90 Ma, 80–60 Maの5回で、これらのうち初めの4回に形成された花崗岩は構造侵食によってその多くが失われたと述べた。しかしFig. 1によれば、日本列島では50–130 Maの花崗岩の露出面積が最も大きく、その中でも特に彼らが休止期とした80–90 Maこそマグマ活動が最大ピークの時期である。また、同じく休止期とされている190–210 Maは飛騨帯の後期の花崗岩が形成された時期であり、また韓半島にはジュラ紀の花崗岩類が広く露出することが知られているので(例えば, Chough et al., 2000)、これも観察事実と合わない。日本列島の花崗岩類のほとんどを占める中生代および新生代

の花崗岩類については、構造侵食の影響を免れてサバイバルしていると考えてよさそうである。

9. 日本の花崗岩研究の現状と今後の展望

～まとめにかえて

花崗岩研究のオリンピックとも言うべき4年に一度の国際学会ハットン・シンポジウム(川野・中島, 2004)が日本の豊橋で開かれてから15年になる。この2003年の大会では、日本から口頭・ポスター合わせて約100件の発表があり(有馬ほか, 2004)、翌年出版されたこの大会のProceedings Volume(Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Science, vol.95, Part 1&2, 同時にGeological Society of America, Special Paper no.339としても刊行)では、掲載された全28報の論文のうち日本人の論文が6報を占めた。

この大会の日本開催が決まった1999年頃に当時の大学院生やポストドク世代は花崗岩研究若手の会を作り、所属機関の垣根を超えて自主的にゼミや巡検を行なうなど日本大会に向けて力をつけていった。そのメンバーたちは、本大会において自発的にさまざまな形で大会の進行を助け、手薄な大会運営本部を支えてくれた(中島・石原, 2004)。その彼らがその後日本の花崗岩研究の中心となって現在活躍している。

現在、世界の花崗岩研究は、タイプ分類や古い年代学の時代を過ぎ、主要なトピックは1)貫入機構とダイナミクス 2)マグマだまりプロセス 3)大陸地殻形成 4)熱モデルなどである。ハットン・シンポジウム日本大会以降、日本ではこれらの分野の研究においても、当時花崗岩研究若手の会の中心だった世代が活躍している。1)では帯磁率異方性を用いた金丸・高橋(2005)、2)ではWada et al.(2004)による黒部川岩体、Kamiyama et al.(2007)によるトツタベツ岩体の研究、Simura and Ozawa(2011)による納沙布岬分化岩体の研究、3)ではSaito et al.(2007)やTani et al.(2010)による伊豆衝突帯から伊豆弧の海丘(Tani et al., 2015a)の新生代花崗岩の研究、さらに世界の全大陸で主要河川の川砂ジルコンの膨大な数のU-Pb年代測定を行ない、地球全体の大陸地殻成長史に挑んだ東工大グループの野心的な研究(Rino et al., 2004, Iizuka et al., 2005など)、4)ではMiyazaki(2004, 2010)の地殻内における花崗岩マグマ生成と移動濃集モデル、Nishimura(2012)による分化と同化によるマグマだまり中の組成変化モデル、Yuguchi and Nishiyama(2007)による花崗岩体冷却過程におけるサブソリダス反応の研究、など国際的なレベルの仕事が続々と発表されている。

これらの他にも特筆すべき成果として、SHRIMPやICP-MSを用いた数Maの若い花崗岩のU-Pb年代測定や、極微量のジルコンの年代測定など、他の国に例のない技術の開発に成功しており、それらを生かした研究(Tani et al., 2010, 2015aなど)や、精密年代測定によるマグマだまりの噴火履歴解析(Takehara et al., 2017)など、世界の最先端にチャレンジする研究も行なわれている。しかしながら、世界はこれら1)~4)を含めた花崗岩関連のさまざまな分野で、

さらに質量ともに充実した研究が展開されており、日本でもよりいっそうの奮闘が望まれる。

特に上記 2)、4) の分野については、花崗岩研究だけでなく火山の研究との連携や研究協力が必要であると思われる。日本の花崗岩類の半分以上は濃飛流紋岩に代表されるような珪長質火山岩類を伴ったいわゆる火山深成複合岩体なので、同じマグマだまりから火山岩も生産されている。白亜紀や新第三紀の火山深成複合岩体においては第四紀の火山とは桁違いの大規模な活動の実像を見ることができる。また、Wiebe (1994) や Weinberg (1997) が示すように花崗岩はマグマだまりの中がどのような状態であったかの実物を可視化できる言わば貴重なマグマだまりの化石であり、火山研究者にとっても重要な情報が得られると思われる。これからは花崗岩研究者が火山の研究にも進出して、お互いに協力して研究できることが望ましい。また火山研究者がどんどん中新世や古第三紀～白亜紀の火山深成複合岩体の研究に進出してくれたら、それも大歓迎である。

謝 辞

本論を執筆するにあたり、産総研地質調査総合センター地質情報研究部門の宮崎一博副部門長、高橋 浩博士、国立科学博物館の谷 健一郎博士、東京経済大学の正新裕尚教授、山口大学の志村俊昭教授、日本大学の高橋正樹教授、愛媛大学の齊藤 哲博士に有益な議論や情報を賜った。山口大学の今岡照喜教授は *Geology of Japan* 掲載用に作成されたいくつかの図を使用することを許可してくださった。産総研地質調査総合センターの小松原純子博士と中村佳博博士は作画ソフトの使用法を指導してくださった。また、本総説は大阪市立大学の奥平敬元教授および匿名の査読者による丁寧な査読によって改善された。岩石部会 125 周年特集号担当委員で現在名古屋大学の道林克禎教授はこの総説の執筆を勧めてくださり、本特集号に加えてくださった。これらの方々に心からお礼申し上げたい。

文 献

- Arakawa, Y., 1990, Two types of granitic intrusions in the Hida belt, Japan: Sr isotopic and chemical characteristics of the Mesozoic Funatsu granitic rocks. *Chem. Geol.*, **85**, 101–117.
- Arakawa, Y. and Takahashi, Y., 1989, Strontium isotopic and chemical variations of the granitic rocks in the Tsukuba district, Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **101**, 46–56.
- Aramaki, S., Hirayama, K. and Nozawa, T., 1972, Chemical composition of Japanese granites, Part 2. Variation trends and average composition of 1200 analyses. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **78**, 39–49.
- Aramaki, S. and Nozawa, T., 1978, A reference book of chemical data for Japanese granitoids. *Contribution from Geodynamic Project of Japan*, 78-1, 88p.
- 有馬 眞・石原舜三・中島 隆 (Arima, M., Ishihara, S. and Nakajima, T.), 2004, 第 5 回ハットンシンポジウム：(1) 講演内容 (The Fifth Hutton Symposium: (1) Scientific sessions). 地質ニュース (*Chishitsu News*), **593**, 20–25.
- Atherton, M. P. and Petford, N., 1993, Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, **362**, 144–146.
- Bateman, P. C. and Dodge, F. C. W., 1970, Variations of major chemical constituents across the Central Sierra Nevada Batholith. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **81**, 409–420.
- Bradley, D. C., Haeussler, P. and Kusky, T. M., 1993, Timing of Early Tertiary ridge subduction in southern Alaska. *U. S. G. S. Bull.*, **2068**, 163–177.
- Chappell, B. W. and White, A. J. R., 1974, Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, **8**, 173–174.
- Chappell, B. W. and White, A. J. R., 1992, I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt. *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **83**, 1–26.
- Charvet, J., 2013, Late Paleozoic-Mesozoic tectonic evolution of SW Japan: A review: Reappraisal of the accretionary orogeny and revalidation of the collisional model. *Jour. Asian Earth Sci.*, **72**, 88–101.
- Chopin, C., 1987, Very high-pressure metamorphism in the western Alps: Implication for subduction of the continental crust. *Phil. Tran. R. Soc. London, Ser. A*, **321**, 183–197.
- Chough, S. K., Kwon, S.-T., Ree, J.-H. and Choi, D. K., 2000, Tectonic and sedimentary evolution of the Korean Peninsula: a review and new view. *Earth Sci. Rev.*, **52**, 175–235.
- Condie, K. C., 1989, *Plate Tectonics and Crustal Evolution, Third Edition*. Pergamon press. 476p.
- Czamanske, G. K., Ishihara, S. and Atkin, S. A., 1981, Chemistry of rock-forming minerals of the Cretaceous-Paleogene batholith in southwestern Japan and implications for magma genesis. *Jour. Geophys. Res.*, **86**, 10431–10469.
- Defant, M. J. and Drummond, M. S., 1990, Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, **347**, 662–665.
- Ducea, M. N. and Saleeby, J. B., 1998, The age and origin of a thick mafic-ultramafic keel from beneath the Sierra Nevada batholith. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **133**, 169–185.
- Ejima, T., Kon, Y., Kawano, S. and Araoka, D., 2017, Zircon U–Pb dating of gabbro and diorite from the Bato pluton, northeast Japan. *Island Arc*, **27**, e12222.
- Engelbreton, D. C., Cox, A. and Gordon, R. G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, **206**, 59p.
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J. and Frost, C. D., 2001, A geochemical classification for granitic rocks. *Jour. Petrol.*, **42**, 2033–2048.
- Frost, B. R. and Frost, C. D., 2008, A geochemical classification for feldspathic igneous rocks. *Jour. Petrol.*, **49**, 1955–1969.
- Fujii, M., Hayasaka, Y. and Terada, K., 2008, SHRIMP zircon and EPMA monazite dating of granitic rocks from the Maizuru terrane, southwest Japan: Correlation with East Asian Paleozoic terranes and geological implications. *Island Arc*, **17**, 322–341.
- Hada, S., Yoshikura, S. and Gabites, E. J., 2000, U–Pb zircon ages for the Mitaki igneous rocks, Siluro-Devonian tuff, and granitic boulders in the Kurosegawa Terrane, Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **56**, 183–198.
- Hamamoto, T., Osanai, Y. and Kagami, H., 1999, Sm–Nd, Rb–Sr and K–Ar geochronology of the Higo metamorphic terrane, west central Kyushu, Japan. *Island Arc*, **8**, 323–334.
- Harayama, S., 1992, Youngest exposed granitoid pluton on Earth: Cooling and uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani granodiorite in the Japan Alps, central Japan. *Geology*, **20**, 657–660.
- 原山 智 (Harayama, S.), 1994, 世界一若い露出ブルトンの冷却史—北アルプス、滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル— (Cooling history of the youngest exposed pluton in the world: The Plio-Pleistocene Takidani Granodiorite (Japan Alps, central Japan)). 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), **43**, 87–97.
- Hattori, H., Nozawa, T. and Saito, M., 1960, On chemical composition of granitic rocks of Japan. *Rept. Int. Geol. Cong., XXI Session, Norden, Part XIV*, 40–46.
- 早坂康隆・田島詩織 (Hayasaka, Y. and Tashima, S.), 2016, ジルコ

- ンの U-Pb 年代にもとづく山陽帯一領家帯の白亜紀火成活動史および剝削史 (Late Cretaceous igneous activity and erosion history of Sanyo-Ryoke Province constrained by zircon U-Pb chronology, SW Japan). 日本地質学会第 123 年学術大会講演要旨 (123rd Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 61.
- Herzig, C. T., Kimbrough, D. L. and Hayasaka, Y., 1997, Early Permian zircon uranium-lead ages for plagiogranites in the Yakuno ophiolite, Asago district, Southwest Japan. *Island Arc*, **6**, 396–403.
- Hine, R., Williams, I. S., Chappell, B. W. and White, A. J. R., 1978, Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciuszko Batholith. *Jour. Geol. Soc. Australia*, **25**, 219–234.
- 平原由香・仙田量子・高橋俊郎・土谷信高・加々島慎一・吉田武義……木村純一 (Hirahara, Y., Senda, R., Takahashi, T., Tsuchiya, N., Kagashima, S., Yoshida, T., … Kimura J.-I.), 2015, 東北日本弧に分布する白亜紀～古第三紀の花崗岩類の Sr・Nd・Hf 同位体組成の空間分布 (Spatial variation of Sr-Nd-Hf isotopic compositions in from Cretaceous to Paleogene granitoids from Northeast Japan Arc). 岩石鉱物科学 (*Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **44**, 91–111.
- Horie, K., Tsutsumi, Y., Cho, M., Hidaka, H. and Morishita, Y., 2009, Rapid process of kyanite-sillimanite grade metamorphism in the Unazuki area, southwest Japan. *Geoch. Cosmoch. Acta*, **73**, A549.
- 星 博幸・岩野英樹・檀原 徹・酒向和希 (Hoshi, H., Iwano, H., Danhara, T. and Sako, K.), 2016, 濃飛流紋岩のジルコン U-Pb 年代: 約 70 Ma の急速形成 (U-Pb evidence for rapid formation of the Nohi Rhyolite at about 70 Ma). 日本地質学会第 123 年学術大会講演要旨 (123rd Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 81.
- Iida, K., Iwamori, H., Orihashi, Y., Park, T., Jwa, Y.-J., Kwon, S.-T., … Iwano, H., 2015, Tectonic reconstruction of batholith formation based on the spatiotemporal distribution of Cretaceous-Paleogene granitic rocks in Southwest Japan. *Island Arc*, **24**, 205–220.
- Iizuka, T., Hirata, T., Komiya, T., Rino, S., Katayama, I., Motoki, A. and Maruyama, S., 2005, U-Pb and Lu-Hf isotopic systematics of zircons from the Mississippi River sand: Implications for reworking and growth of continental crust. *Geology*, **33**, 485–488.
- Iizumi, S., Imaoka, T. and Kagami, H., 2000, Sr-Nd isotope ratios of gabbroic and dioritic rocks in a Cretaceous-Paleogene granite terrane, Southwest Japan. *Island Arc*, **9**, 113–127.
- Imaoka, T., Kiminami, K., Nishida, K., Takemoto, M., Ikawa, T., Itaya, T., … Iizumi, S., 2011, K-Ar ages and geochemistry of the SW Japan Paleogene cauldron cluster: Implication for Eocene-Oligocene thermo-tectonic reactivation. *Jour. Asian Earth Sci.*, **40**, 509–533.
- Imaoka, T., Nakashima, K., Kamei, A., Hayasaka, Y., Ogita, Y., Ikawa, T., … Kagami, H., 2014, Anatomy of the Cretaceous Hobenzan pluton, SW Japan: internal structure of a small zoned pluton, and its genesis. *Lithos*, **208–209**, 81–103.
- Imaoka, T., Nakashima, K., Kamei, A., Itaya, T., Ohira, T., Nagashima, M., … Kiji, M., 2013, Episodic magmatism at 105Ma in the Kinki district, SW Japan: petrogenesis of Nb-rich lamprophyres and adakites, and geodynamic implications. *Lithos*, **184–187**, 105–131.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Min. Geol.*, **27**, 293–305.
- Ishihara, S., 1981, The granitoid series and mineralization. *Econ. Geol.*, 75th Anniversary volume, 458–484.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y., 1999, Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Miocene Outer Zone granitoids in Japan. *Lithos*, **46**, 523–534.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y., 2002, Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Cretaceous-Paleogene granitoids in the Inner Zone of Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **53**, 421–438.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y., 2005, Oxygen isotopic constraints on the geneses of the Late Cenozoic plutonic rocks of the Green Tuff Belt, Northeast Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **56**, 315–324.
- Ishihara, S. and Orihashi, Y., 2015, Cretaceous granitoids and their zircon U-Pb ages across the south-central part of the Abukuma highland, Japan. *Island Arc*, **24**, 159–168.
- Ishihara, S. and Sasaki, A., 2002, Paired sulfur isotopic belts: Late Cretaceous-Paleogene ore deposits of Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **53**, 461–477.
- Ishihara, S., Stephens, W. E., Harley, S. L., Arima, M. and Nakajima, T., eds., 2004, *The Fifth Hutton Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks*. Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci., **95**, part 182, 390p.
- Ishihara, S., Tanaka, T., Terashima, S., Togashi, S., Murao, S. and Kamioka, H., 1990, Peralkaline rhyolite dikes at the Cape Ashizuri: A new type of REE and rare metal mineral resources. *Min. Geol.*, **40**, 107–115.
- Ishizaka, K. and Yanagi, T., 1977, K, Rb and Sr abundances and Sr isotopic compositions of the Tanzawa granitic and associated gabbroic rocks, Japan: low-potash island arc plutonic complex. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **33**, 345–352.
- Isozaki, Y., 1996, Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: reappraisal of geotectonic subdivision and evolution of the Japanese Islands. *Island Arc*, **5**, 289–320.
- Isozaki, Y., Ehiro, M., Nakahata, H., Aoki, K., Sakata, S. and Hirata, T., 2015, Cambrian plutonism in Northeast Japan and its significance for the earliest arc-trench system of Proto-Japan: New U-Pb zircon ages of the oldest granitoids in the Kitakami and Ou Mountains. *Jour. Asian Earth Sci.*, **108**, 136–149.
- Ito, H., Tamura, A., Morishita, T., Arai, S., Arai, F. and Kato, O., 2013a, Quaternary plutonic magma activities in the southern Hachimantai geothermal area (Japan) inferred from zircon LA-ICP-MS U-Th-Pb dating method. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **265**, 1–8.
- Ito, H., Yamada, R., Tamura, A., Arai, S., Horie, K. and Hokada, T., 2013b, Earth's youngest exposed granite and its tectonic implications: the 1.0–0.8Ma Kurobegawa Granite. *Nat. Sci. Rept.*, **3**, 1306.
- Jahn, B.-M., 2010, Accretionary orogen and evolution of the Japanese Islands: Implications from a Sr-Nd isotopic study of the Phanerozoic granitoids from SW Japan. *Am. Jour. Sci.*, **310**, 1210–1240.
- Jahn, B.-M., Usuki, M., Usuki, T. and Chung, S.-L., 2014, Generation of Cenozoic granitoids in Hokkaido (Japan): constraints from zircon geochronology, Sr-Nd-Hf isotopic and geochemical analyses, and implications for crustal growth. *Am. Jour. Sci.*, **314**, 704–750.
- Kagami, H., Iizumi, S., Tainosho, Y. and Owada, M., 1992, Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous-Paleogene granitoid rocks, Southwest Japan arc. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **112**, 165–177.
- 加々美寛雄・川野良信・井川寿之・石岡 純・加々島慎一・柚原雅樹……田結庄良昭 (Kagami, H., Kawano, Y., Igawa, H., Ishioka, J., Kagashima, S., … Tainosho, Y.), 1999, 本州弧に産する白亜紀～古第三紀酸性火成岩の起源と時空変遷と下部地殻-Rb-Sr 全岩アイソクロン年代と Sr, Nd 同位体比初生値からの検討ー (Transition of space and time of Cretaceous to Tertiary igneous activity and lower crust of Honshu Arc: Examination based on Rb-Sr whole rock isochron ages and Sr and Nd isotopes). 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), **53**, 1–19.
- Kagami, H., Yuhara, M., Iizumi, S., Tainosho, Y., Owada, M., Ikeda, Y., … Nureki, T., 2000, Continental basalts in the accretionary complexes of the Southwest Japan Arc: constraints from geochemical and Sr and Nd isotopic data of

- metadiabase. *Island Arc*, **9**, 3–20.
- Kagami, H., Yuhara, M., Tainosho, Y., Owada, M. and Hayama, Y., 1995, Sm–Nd isochron ages of mafic igneous rocks from the Ryoke Belt, Southwest Japan: remains of Jurassic igneous activity in a late Cretaceous granitic terrane. *Geochem. Jour.*, **29**, 123–135.
- Kamei, A., 2004, An adakitic pluton on Kyushu Island, southwest Japan arc. *Jour. Asian Earth Sci.*, **24**, 43–58.
- Kamei, A., Owada, M., Hamamoto, T., Osanai, Y., Yuhara, M. and Kagami, H., 2000, Isotopic equilibration ages for the Miyano-hara tonalite from the Higo metamorphic belt in central Kyushu, Southwest Japan: implications for the tectonic setting during the Triassic. *Island Arc*, **9**, 97–112.
- 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. *Jour. Geol.*, **115**, 295–314.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (Kanamaru, T. and Takahashi, M.), 2005, 帯磁率異方性からみた丹沢トータル岩の貫入・位置機構 (Anisotropy of magnetic susceptibility of tonalite in the Tanzawa plutonic complex and its implications for emplacement mechanism). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **111**, 458–475.
- 加藤 修・土井宣夫・村松容一 (Kato, O., Doi, N. and Muramatsu, Y.), 1993, 岩手県葛根田地熱地域における新期花崗岩類と地熱貯留層 (Neo-granitic pluton and geothermal reservoir at the Kakkonda geothermal field, Iwate prefecture, Japan). *地熱学会誌 (Jour. Geotherm. Res. Soc. Japan)*, **15**, 41–57.
- 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.
- 川野良信・中島 隆 (Kawano, Y. and Nakajima, T.), 2004, ハットン シンポジウムについて (On the Hutton Symposium). *地質ニュース (Chishitsu News)*, **593**, 12–19.
- Kawate, S. and Arima, M., 1998, Tanzawa plutonic complex, central Japan: exposed felsic middle crust of Izu-Bonin-Mariana arc. *Island Arc*, **7**, 342–358.
- Kemp, A. I. S., Shimura, T., Hawkesworth, C. J. and EIMF, 2007, Linking granulites, silicic magmatism, and crustal growth in arcs: Ion microprobe (zircon) U–Pb ages from the Hidaka metamorphic belt, Japan. *Geology*, **35**, 807–810.
- Kimura, G., Hashimoto, Y., Kitamura, Y., Yamaguchi, A. and Koge, H., 2014, Middle Miocene swift migration of the TTT triple junction and rapid crustal growth in southwest Japan: A review. *Tectonics*, **33**, 1219–1238.
- Kimura, J.-I., Stern, R. J. and Yoshida, T., 2005, Reinitiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **117**, 969–986.
- 木下 修・伊藤英文 (Kinoshita, O. and Ito, H.), 1986, 西南日本の白亜紀火成活動の移動と海嶺のもぐり込み (Migration of Cretaceous igneous activity in southwest Japan related to ridge subduction). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **92**, 723–725.
- 小島 萌・志村俊昭 (Kojima, M. and Shimura, T.), 2014, 日高変成帯, 札内川七ノ沢における I タイプ・S タイプトータル岩マグマの起源: Sr・Nd 同位体比からの検討 (Origin of the I- and S-type tonalite magma in the Satsunai-gawa Shichino-sawa river region of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, northern Japan: Inferences from Sr and Nd isotopic compositions). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **120**, 393–412.
- Koido, Y., 1991, A Late Cretaceous–Paleogene cauldron cluster: the Nohi Rhyolite, central Japan. *Bull. Volcanol.*, **53**, 132–146.
- Koizumi, N., Okudaira, T., Ogawa, D., Yamashita, K. and Suda, Y., 2016, Geochemical characteristics of hydrous basaltic magmas due to assimilation and fractional crystallization: the Ikoma gabbroic complex, southwest Japan. *Mineral. Petrol.*, **110**, 639–662.
- Komatsu, M., Osanai, Y., Toyoshima, T. and Miyashita, S., 1989, Evolution of the Hidaka metamorphic belt, Northern Japan. In Daly, J. S., et. al., eds, *Evolution of Metamorphic Belts*. Geol. Soc. Spec. Publ., **43**, 487–493.
- Kon, Y., Ejima, T., Morita, S. and Takagi, T., 2015, Spatial U–Pb age distribution of plutonic rocks in the central Abukuma Plateau, northeast Japan Arc. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **110**, 145–149.
- Kon, Y. and Takagi, T., 2012, U–Pb zircon ages of Abukuma granitic rocks in the western Abukuma plateau, northeastern Japan Arc. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **107**, 183–191.
- Kriens, B. and Wernicke, B., 1990, Characteristics of a continental margin magmatic arc as a function of depth: The Skagit-Methow crustal section. In Salisbury, M. H. and Fountain, D. M., eds., *Exposed Cross-Sections of the Continental Crust*. NATO ASI Ser., Kluwer, **C317**, 137–158.
- Loiselle, M. C. and Wones, D. R., 1979, Characteristics and origin of anorogenic granites. *Geol. Soc. Am., Abstr. Program*, **11**, 468.
- Macpherson, C. G., Scott, T. D. and Thirlwall, M. F., 2006, Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, Philippines. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **243**, 581–593.
- Maeda, J. and Kagami, H., 1996, Interaction of a spreading ridge and an accretionary prism: Implications from MORB magmatism in the Hidaka metamorphic zone, Hokkaido, Japan. *Geology*, **24**, 31–34.
- Maki, K., Yui, T.-F., Miyazaki, K., Fukuyama, M., Wang, K.-L., Martens, U., ... Liou, J. G., 2014, Petrogenesis of metatexite and diatexite migmatites determined using zircon U–Pb age, trace element and Hf isotope data, Higo metamorphic terrane, central Kyushu, Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **32**, 301–323.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J.-F. and Champion, D., 2005, An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, **79**, 1–24.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese Islands: plate tectonic synthesis from 750 Ma to present. *Island Arc*, **6**, 121–142.
- Miura, D., 1999, Arcuate pyroclastic conduits, ring faults, and coherent floor at Kumano caldera, southwest Honshu, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **92**, 271–294.
- Miyazaki, K., 2004, Low-P–high-T metamorphism and the role of heat transport by melt migration in the Higo Metamorphic Complex, Kyushu, Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **22**, 793–809.
- Miyazaki, K., 2010, Development of migmatites and the role of viscous segregation in high-T metamorphic complexes: example from the Ryoke Metamorphic Complex, Mikawa Plateau, Central Japan. *Lithos*, **116**, 287–299.
- Moreno, T., Wallis, S. R., Kojima, T. and Gibbons, W., ed., 2016, *The Geology of Japan*. Geol. Soc. London, 536p.
- Mueller, R. D., Sdrolias, M., Gaina, C., Steinberger, B., Heine, C., 2008, Long-term sea-level fluctuations driven by ocean basin dynamics. *Science*, **319**, 1357–1362.
- 村上允英・今岡照喜 (Murakami, N. and Imaoka, T.), 1987, 西中国および周辺地域の酸性～中性火成活動 (Acidic to intermediate magmatism in western Chugoku district and the surrounding area). 山口大学教養部紀要, 村上允英教授記念号 (*Prof. N. Murakami special volume, Sci. Rep., Faculty of Liberal Arts, Yamaguchi Univ.*), 1–409.
- Murakami, N., Kanisawa, S. and Ishikawa, K., 1983, High fluorine content of Tertiary igneous rocks from the Cape Ashizuri, Hoshi Prefecture, Southwest Japan. *Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **78**, 497–504.

- 中田節也・高橋正樹(Nakada, S. and Takahashi, M.), 1979, 西南日本外帯、瀬戸内区における中新世の中性～珪長質マグマの化学組成広域的变化(Regional variation in chemistry of the Miocene intermediate to felsic magmas in the Outer Zone and Setouchi Province of Southwest Japan). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **85**, 571–582.
- 中畑浩基・磯崎行雄・堤之恭(Nakahata, H., Isozaki, Y. and Tsutsumi, Y.), 2016, 四国西部の3種の浅海成白亜系と碎屑性ジルコン U–Pb 年代スペクトル—白亜紀日本の前弧・背弧砂岩の識別—(Three distinct shallow marine Cretaceous units in western Shikoku and the U–Pb age spectra of their detrital zircons: Identifying fore-arc and back-arc sandstones in Cretaceous Japan). 地学雑(Jour. Tokyo, Geogr. Soc.), **125**, 717–745.
- Nakajima, T., 1994, The Ryoke plutonometamorphic belt: Cretaceous crustal section of the Eurasian continental margin. *Lithos*, **33**, 51–66.
- Nakajima, T., 1996, Cretaceous granitoids in SW Japan and their bearing on the crust-forming process in the eastern Eurasian margin. *Trans. Royal Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **87**, 183–191.
- 中島 隆(Nakajima, T.), 2000, Peraluminous / metaluminous 花崗岩と I/S タイプ—領家—山陽帯とラクラン褶曲帯の例—(Peraluminous / metaluminous granite and I/S type with special reference to the Ryoke-San-yo Belt and Lachlan Fold Belt). 月刊地球(*Chikyu Monthly*), **30**, 90–95.
- 中島 隆(Nakajima, T.), 2017, 西南日本内帯の白亜紀火成岩・変成岩の U–Pb 年代の東西変化(Along-arc younging polarity of U–Pb ages of the Cretaceous granitic, volcanic and metamorphic rocks of SW Japan). 日本地質学会第 124 年学術大会講演要旨(124th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 52.
- 中島 隆・下司信夫・及川輝樹・三浦大助・新庄裕尚・小泉尚嗣(Nakajima, T., Geshi, N., Oikawa, T., Miura, D., Shinjoe, N. and Koizumi, N.), 2014, ボーリングコア試料から見た熊野酸性岩の構造と形成条件(Structure and origin of the Kumano Acidic Rock, Southwest Japan—A drill-core study). 月刊地球(*Chikyu Monthly*), **36**, 175–180.
- 中島 隆・堀江憲治・宮崎一博・足立達朗・Dunkley, D. J.・外田智千(Nakajima, T., Horie, K., Miyazaki, K., Adachi, T., Dunkley, D. J. and Hokada, T.), 2013, 領家変成岩類の SHRIMP によるジルコン U–Pb 年代(SHRIMP zircon U–Pb ages of the Ryoke metamorphic rocks). 日本地質学会第 120 年学術大会講演要旨(120th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 51.
- 中島 隆・石原舜三(Nakajima, T. and Ishihara, S.), 2004, 第 5 回ハットンシンポジウム: (3) 日本招致から大会終了まで(The Fifth Hutton Symposium: (3) Planning, Organizing and Performing), 地質ニュース(*Chishitsu News*), **593**, 36–48.
- Nakajima, T., Kamiyama, H., Williams, I. S. and Tani, K., 2004, Mafic rocks from the Ryoke Belt, Southwest Japan; implications for Cretaceous Ryoke/San-yo granitic magma genesis. *Trans. Royal Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **95**, 249–263.
- 中島 隆・小泉尚嗣・下司信夫・及川輝樹・新庄裕尚・三浦大助……北川有一(Nakajima, T., Koizumi, N., Geshi, N., Oikawa, T., Shinjoe, N., Miura, D., … Kitagawa, Y.), 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(Vertical structure and emplacement process of the North Unit of the Middle Miocene Kumano Acidic Rocks, Southwest Japan, inferred from the GSJ Kumano-Ichiura drill core). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **116**, 374–387.
- Nakajima, T. and Orihashi, Y., 2009, Geochronology and tectonics of the Ryoke plutono-metamorphic belt. *116th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 22.
- Nakajima, T., Shirahase, T. and Shibata, K., 1990, Along-arc variation of Rb–Sr and K–Ar ages of Cretaceous granitic rocks in Southwest Japan. *Contr. Mineral. Petrol.*, **104**, 381–389.
- Nakajima, T., Takahashi, M., Imaoka, T. and Shimura, T., 2016, Granitic rocks. In Moreno, T. et al., eds., *The Geology of Japan*. Geol. Soci. London, 251–272.
- 中間隆晃・平田岳史・大藤 茂・青木一勝・柳井修一・丸山茂徳(Nakama, K., Hirata, T., Ohto, S., Aoki, K., Yanai, S. and Maruyama, S.), 2010, 日本列島の古地理学—碎屑性ジルコン年代頻度分布と造山帯後背地の変遷(Paleogeography of the Japanese Islands: Age spectra of detrital zircon and provenance history of the orogen), 地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.), **119**, 1161–1172.
- 西田和浩・今岡照喜・君波和雄・長松 雄・飯泉 滋(Nishida, K., Imaoka, T., Kiminami, K., Nagamatsu, Y. and Ilzumi, S.), 2013, 西南日本山陰帯と韓国慶尚盆地の花崗岩類における白亜紀最末期の Sr–Nd 同位体組成変化とその意義(Marked change of Sr–Nd isotopic compositions of granitoids in Sanin Belt of SW Japan and Gyeongsang Basin of Korea during the latest Cretaceous, and geologic significance). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **119**, 229–248.
- Nishimura, K., 2012, A mathematical model of trace element and isotopic behavior during simultaneous assimilation and imperfect fractional crystallization. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **164**, 427–440.
- Ogasawara, M., Fukuyama, M., Horie, K., Sumii, T., Takehara, M. and Sudo, M., 2013, SHRIMP U–Pb ages of SoriZ93 zircon from the Sori Granodiorite, Northeast Japan: a potential reference zircon of Late Cretaceous age. *Island Arc*, **22**, 306–317.
- Okano, O., Sato, T. and Kagami, H., 2000, Rb–Sr and Sm–Nd isotopic studies of mafic igneous rocks from the Ryoke plutono-metamorphic belt in the Setouchi area, Southwest Japan: implications for the genesis and thermal history. *Island Arc*, **9**, 21–36.
- 折橋裕二・新正裕尚・安間 了(Orihashi, Y., Shinjoe, H. and Anma, R.), 2015, 九州地方における、西南日本外帯、中期中新世花崗岩類のマグマ活動史の全容解明: LA-ICPMS U–Pb 年代測定による制約(Elucidation of whole Mid-Miocene granitic magmatism of the outer zone of southwestern Japan, Kyushu province: Constraint from LA-ICPMS U–Pb age determination). 日本地球化学会第 62 回年会講演要旨(*Abstr. 62th Annu. Meet. Geochem. Soc. Japan*), 1B17.
- Osanaï, Y., Hamamoto, T., Maishima, O. and Kagami, H., 1998, Sapphirine-bearing granulites and related high-temperature metamorphic rocks from the Higo metamorphic terrane, west-central Kyushu, Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **16**, 53–66.
- Osanaï, Y., Komatsu, M. and Owada, M., 1991, Metamorphism and granite genesis of the Hidaka Metamorphic belt, Hokkaido, Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **9**, 111–124.
- 小山内康人・中野伸彦・足立達朗(Osanaï, Y., Nakano, N. and Adachi, T.), 2017, 島弧—大陸地殻深部現象の研究進展: 超高温変成作用の精密解析[総説] (Recent progress in lower crustal process: precise analyses on ultrahigh-temperature metamorphism, a review), 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **123**, 879–906.
- 小山内康人・吉本 紋・中野伸彦・足立達朗・北野一平・米村和紘……石塚英男(Osanaï, Y., Yoshimoto, A., Nakano, N., Adachi, T., Kitano, I., Yonemura, K., … Ishizuka, H.), 2014, 九州・黒瀬川構造帯における古生代花崗岩類および関連火成岩類の LA-ICP-MS ジルコン U–Pb 年代(LA-ICP-MS zircon U–Pb geochronology of Paleozoic granitic rocks and related igneous rocks from the Kurosegawa tectonic belt in Kyushu, Southwest Japan). 岩石鉱物科学(*Japan Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **43**, 71–99.
- Owada, M., Osanaï, Y. and Kagami, H., 1991, Timing of anatexis in the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **97**, 751–754.
- Owada, M., Osanaï, Y. and Kagami, H., 1997, Rb–Sr isochron ages for hornblende tonalite from the southern part of the Hidaka metamorphic belt, Hokkaido, Japan: implication for

- timing of peak metamorphism. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **47**, 21–17.
- Pearce, J. A., Harris, N. V. W. and Tindle, A. G., 1984, Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Jour. Petrol.*, **25**, 956–983.
- Peccerillo, A. and Taylor, S. R., 1976, Geochemistry of the Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **58**, 63–81.
- Petford, N. and Atherton, M., 1996, Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Jour. Petrol.*, **37**, 1491–1521.
- Pitman, W. C. III, 1978, Relationship between eustasy and stratigraphic sequences of passive margins. *Geol. Soc. Am. Bul.*, **89**, 1389–1403.
- Qian, Q. and Hermann, J., 2013, Partial melting of lower crust at 10–15 kbar: constraints on adakite and TTG formation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **165**, 1195–1224.
- Ribeiro, J. M., Maury, R. C. and Gregoire, M., 2016, Are adakites slab melts or high-pressure fractionated mantle melts? *Jour. Petrol.*, **57**, 839–862.
- Rino, S., Komiya, T., Windley, B. F., Katayama, I., Motoki, A. and Hirata, T., 2004, Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands: Implications for mantle overturns in the Early Precambrian. *Phys. Earth Planet Inter.*, **146**, 360–394.
- Rudnick, R. L. and Gao, S., 2003, Composition of the continental crust. In Rudnick, R. L. et al., eds., *Treatise on Geochemistry, Vol. 3, The Crust*. Elsevier, 1–64.
- 齊藤 哲 (Saito, S.), 2014, 伊豆衝突帯に分布する新第三紀花崗岩質岩体の地球化学的多様性とその意義: 未成熟海洋性島弧から成熟大陸地殻へ (Geochemical diversity of Neogene granitoid plutons in the Izu Collision Zone: Implications for transformation of juvenile oceanic arc into mature continental crust). *岩石鉱物科学 (Japan Mag. Mineral. Petrol. Sci.)*, **43**, 115–130.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T. and Kimura, J.-I., 2004, Petrogenesis of Ashigawa and Tonogi granitic intrusions, southern part of the Miocene Kofu Granitic Complex central Japan: M-type granite in the Izu arc collision zone. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **99**, 104–117.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T., Misawa, K., Kimura, J., 2007, Formation of distinct granitic magma chamber batches by partial melting of hybrid lower crust in the Izu arc collision zone, central Japan. *Jour. Petrol.*, **48**, 1761–1791.
- Saito, S., Arima, M., Nakajima, T., Tani, K., Miyazaki, T., Senda, R., ... Kimura, J.-I., 2011, Petrogenesis of the Kaikomagatake granitoid pluton in the Izu Collision Zone, central Japan: implications for transformation of juvenile oceanic arc into mature continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **163**, 611–629.
- Sakashima, T., Terada, K., Takeshita, T. and Sano, Y., 2003, Large-scale displacement along the Median Tectonic Line, Japan: evidence from SHRIMP zircon U–Pb dating of granites and gneisses from the South Kitakami and paleo-Ryoke belts. *Jour. Asian Earth Sci.*, **21**, 1019–1039.
- Saleeby, J. B., 1990, Progress in tectonic and petrogenetic studies in an exposed cross-section of young (~100 Ma) continental crust, Southern Sierra Nevada, California. In Salisbury, M. H. and Fountain, D. M., eds., *Exposed Cross-Sections of the Continental Crust*. NATO ASI Ser., Kluwer. **C317**, 137–158.
- 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 2009, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 (1: 200,000 Seamless Geologic Map of Japan).
- Sasaki, A. and Ishihara, S., 1979, Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **68**, 107–115.
- Sasaki, M., Fujimoto, K., Sawaki, T., Tsukamoto, H., Kato, O., Komatsu, R., ... Sasada, M., 2003, Petrographic features of a high-temperature granite just newly solidified magma at the Kakkonda geothermal field, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **121**, 247–269.
- Sato, D., Matsuura, H. and Yamamoto, T., 2016, Timing of the Late Cretaceous ignimbrite flare-up at the eastern margin of the Eurasian Plate: New zircon U–Pb ages from the Aioi-Arima-Koto region of SW Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **310**, 89–97.
- Shibata, K. and Ishihara, S., 1979, Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plutonic rocks from Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 381–390.
- 下條将徳・大藤 茂・柳井修一・平田岳史・丸山茂徳 (Shimojo, M., Otoh, S., Yanai, S., Hirata, T. and Maruyama, S.), 2010, 南部北上帯古期岩類の LA-ICP-MS U–Pb 年代 (LA-ICP-MS U–Pb age of some older rocks of the South Kitakami Belt, Northeast Japan). *地学雑 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **119**, 257–269.
- Shimura, T., Komatsu, M. and Iiyama, J. T., 1992, Genesis of the lower crustal Grt–Opx tonalite (S-type) in the Hidaka Metamorphic Belt, northern Japan. *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **83**, 259–268.
- 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. *Trans. R. Soc. Edinburgh, Earth Sci.*, **95**, 161–179.
- Simura, R. and Ozawa, K., 2011, Magmatic fractionation by compositional convection in a sheet-like magma body: Constraints from the Nosappumisaki intrusion, Northern Japan. *Jour. Petrol.*, **52**, 1887–1925.
- Shinjoe, H., 1997, Origin of the granodiorite in the forearc region of southwest Japan: Melting of the Shimanto accretionary prism. *Chem. Geol.*, **134**, 237–255.
- Shinjoe, H., Orihashi, Y. and Sumii, T., 2010, U–Pb zircon ages of syenitic and granitic rocks in the Ashizuri igneous complex, southwestern Shikoku: Constraint for the origin of forearc alkaline magmatism. *Geochem. Jour.*, **44**, 275–283.
- Skrzypek, E., Kawakami, T., Hirajima, T., Sakata, S., Hirata, T. and Ikeda, T., 2016a, Revisiting the high temperature metamorphic field gradient of the Ryoke Belt (SW Japan): New constraints from the Iwakuni–Yanai area. *Lithos*, **260**, 9–27.
- Skrzypek, E., Kawakami, T., Sakata, S., Hattori, K. and Hirata, T., 2016b, Discrepancy between U–Pb zircon and monazite dates in granitoids from the Ryoke Belt (Iwakuni–Yanai area, Southwest Japan). *123rd Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*, 68.
- 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. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 57–80.
- Sun, S.-S. and McDonough, W. F., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 313–345.
- Suyehiro, K., Takahashi, N., Arie, Y., Yokoi, Y., Hino, R., Shinohara, M., ... Taira, A., 1996, Continental crust, crustal underplating, and low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc. *Science*, **272**, 390–392.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1991, Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th–U–total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geoch. Jour.*, **25**, 357–376.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1998, Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Jour. Metamorph. Geol.*, **16**, 23–37.
- 鈴木和恵・丸山茂徳・山本伸次・大森聡一 (Suzuki, K., Maruyama,

- S., Yamamoto, S. and Omori, S.), 2010, 日本列島の大陸地殻は成長したのか?—5つの日本が生まれ、4つの日本が沈み込み消失した—(Have the Japanese Islands grown?: Five “Japan”s were born, and four “Japan”subducted into the mantle), 地学雑誌 (*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **119**, 1173–1196.
- Tagiri, M., Dunkley, D. J., Adachi, T., Hiroi, Y. and Fanning, M., 2011, SHRIMP dating of magmatism in the Hitachi metamorphic terrane, Abukuma Belt, Japan: Evidence for a Cambrian volcanic arc. *Island Arc*, **20**, 259–279.
- 田結庄良昭・加々美寛雄・柚原雅樹・中野 聡・澤田一彦・森岡幸三郎 (Taninosho, Y., Kagami, H., Yuhara, M., Nakano, S., Sawada, K. and Morioka, K.), 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 (High Initial Sr isotopic ratios of Cretaceous to Early Paleogene granitic rocks in Kinki district, Southwest Japan). 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), **53**, 309–321.
- Taira, A., Ohara, Y., Wallis, S. R., Ishiwatari, A. and Iryu, Y., 2016, Geological evolution of Japan: an overview. In Moreno, T. et al., eds., *The Geology of Japan*. Geol. Soci. London, 1–24.
- Takagi, T., 2004, Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in the Japan arc. *Am. Jour. Sci.*, **304**, 169–202.
- 高橋正樹 (Takahashi, M.) 1985, 花崗岩系列の提唱と発展 (A proposal and development of granitoid series concept), 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), **25**, 225–244.
- Takahashi, M., 1986, Anatomy of a middle Miocene Valles-type caldera cluster: Geology of the Okueyama volcano-plutonic complex, Southwest Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 33–70.
- Takahashi, M., Aramaki, S. and Ishihara, S., 1980, Magnetite-series/Ilmenite-series vs. I-type/S-type granitoids. *Min. Geol., Spec. Issue*, **8**, 13–28.
- Takahashi, Y., Cho, D.-L. and Kee, W.-S., 2010, Timing of mylonitization in the Funatsu Shear Zone within Hida Belt of southwest Japan: Implications for correlation with the shear zones around the Ogcheon Belt in the Korean Peninsula. *Gondwana Res.*, **17**, 102–115.
- Takahashi, Y., Cho, D.-L., Mao, J., Zhao, X. and Yi, K., 2017, SHRIMP U–Pb zircon ages of the Hida metamorphic and plutonic rocks, Japan: Implications for late Paleozoic to Mesozoic tectonics around the Korean Peninsula. *Island Arc*, **27**, e12220.
- Takahashi, Y., Kagashima, S. and Mikoshiba, U. M., 2005, Geochemistry of adakitic quartz diorite in the Yamizo Mountains, central Japan—Implications for Early Cretaceous adakitic magmatism in the Inner Zone of Southwest Japan. *Island Arc*, **14**, 150–164.
- Takahashi, Y., Mao, J. and Zhou, X., 2012, Timing of mylonitization in the Nihonkoku Mylonite Zone of north Central Japan: Implication for Cretaceous to Paleogene sinistral ductile deformation in the Japanese Islands. *Jour. Asian Earth Sci.*, **47**, 265–280.
- Takahashi, Y., Mikoshiba, M., Kubo, K., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2016, Zircon U–Pb ages of plutonic rocks in the southern Abukuma Mountains: Implications for Cretaceous geotectonic evolution of the Abukuma Belt. *Island Arc*, **25**, 154–188.
- Takatsuka, K., Kawakami, T., Skrzypek, E., Sakata, S., Obayashi, H. and Hirata, T., 2017, Age gap between the intrusion of gneissose granitoids and regional high-temperature metamorphism in the Ryoke belt (Mikawa area), central Japan. *Island Arc*, **27**, e12224.
- Takehara, M., Horie, K., Tani, K., Yoshita, T., Hokada, T. and Kiyokawa, S., 2017, Timescale of magma chamber processes revealed by U–Pb ages, trace element contents and morphology of zircons from the Ishizuchi caldera, Southwest Japan Arc. *Island Arc*, **27**, e12182.
- Tani, K., Dunkley, D. J., Chang, Q., Nichols, A. R. L., Shukuno, H., Hirahara, Y., Tatsumi, Y., 2015a, Pliocene granodioritic knoll with continental crust affinities discovered in the intra-oceanic Izu-Bonin-Mariana Arc: Syntectonic granitic crust formation during back-arc rifting. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **424**, 84–94.
- Tani, K., Dunkley, D. J., Kimura, J.-I., Wysoczanski, R. G., Yamada, K. and Tatsumi, Y., 2010, Syn- collisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: evidence from Tanzawa plutonic complex, Japan. *Geology*, **38**, 215–218.
- Tani, K., Horie, K., Dunkley, D. J. and Ishihara, S., 2014, Pulsed granitic crust formation revealed by comprehensive SHRIMP zircon dating of the SW Japan granitoids. *JpGU Meet. 2014, Abstr.*, SCG61–01.
- Tani, K., Ishihara, S., Horie, K. and Dunkley, D. J., 2015b, Pulsed granitic crust formation revealed by comprehensive SHRIMP zircon dating of the SW Japan granitoids: Enhanced subduction of the Pacific plate triggered the voluminous granitic magma formation. *8th Hutton Symp. Abstr.*, 109.
- Taylor, H. P. Jr. and Silver, L. T., 1978, Oxygen isotope relationships in plutonic igneous rocks of the Peninsular Ranges Batholith, southern and Baja California. *U. S. G. S. Open File Rept.*, **78-701**, 423–426.
- Terakado, Y. and Nakamura, N., 1984, Nd and Sr isotopic variations in acidic rocks from Japan: significance of upper mantle heterogeneity. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **87**, 407–417.
- Terakado, Y. and Nohda, S., 1993, Rb–Sr dating of acidic rocks from the middle part of the Inner Zone of Southwest Japan: tectonic implications for the migration of the Cretaceous to Paleogene igneous activity. *Chem. Geol.*, **109**, 69–87.
- Terakado, Y., Shimizu, H. and Masuda, A., 1988, Nd and Sr isotopic variations in acidic rocks formed under a peculiar tectonic environment in Miocene Southwest Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **99**, 1–10.
- Tiepolo, M., Langone, A., Morishita, T., Yuhara, M., 2012, On the recycling of amphibole-rich ultramafic intrusive rocks in the arc crust: evidence from Shikanoshima Island (Kyushu, Japan). *Jour. Petrol.*, **53**, 1255–1285.
- Tsuchiya, N., Kanisawa, S., 1994, Early Cretaceous Sr-rich silicic magmatism by slab melting in the Kitakami Mountains, Northeast Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 22205–22220.
- Tsuchiya, N., Kimura, J., Kagami, H., 2007, Petrogenesis of Early Cretaceous adakitic granites from the Kitakami Mountains, Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 134–159.
- 土谷信高・武田朋代・足立達朗・中野伸彦・小山内康人・足立佳子 (Tsuchiya, N., Takeda, T., Adachi, T., Nakano, N., Osanai, Y. and Adachi, Y.) 2015, 北上山地の前期白亜紀アダカイト質火成活動とテクトニクス (Early Cretaceous adakitic magmatism and tectonics in the Kitakami Mountains, Japan). 岩石鉱物科学 (*Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **44**, 69–90.
- Tsuchiya, N., Takeda, T., Tani, K., Adachi, T., Nakano, N., Kimura, J.-I., 2014, Zircon U–Pb ages and its geological significance of late Carboniferous and Early Cretaceous adakitic granites from eastern margin of the Abukuma Mountains, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan.*, **120**, 37–51.
- Tsutsumi, Y., Otomo, Y., Horie, K., Nakamura, K. and Yokoyama, K., 2010, Granitoids with 300 Ma in the Joban coastal region, east of Abukuma Plateau, northeast Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **105**, 320–327.
- Tsutsumi, Y., Yokoyama, K., Kasatkin, S. A., Golozubov, V. V., 2014, Zircon U–Pb age of granitoids in the Maizuru Belt, southwest Japan and the southernmost Khanka Massif, Far East Russia. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **109**, 97–102.
- 植木忠正・原山 智 (Ueki, T. and Harayama, S.), 2012, 北アルプス、仁科山地における白亜紀後期の高温で水に乏しい珪長質火成活

- 動(Late Cretaceous hot and dry felsic magmatism in the Nishina Mountains, Northern Japan Alps). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 207–219.
- Usuki, T., Kaiden, H., Misawa, K., Shiraishi, K., 2006, Sensitive high-resolution ion microprobe U–Pb ages of the Latest Oligocene-Early Miocene rift-related Hidaka high-temperature metamorphism in Hokkaido, northern Japan. *Island Arc*, **15**, 503–516.
- von Huene, R., Ranero, C. R., Vannucci, P., 2004, Generic model of subduction erosion. *Geology*, **32**, 913–916.
- Wada, H., Harayama, S. and Yamaguchi, Y., 2004, Mafic enclaves floating through a vertical gractionating felsic magma chamber: the Kurobegawa Granitic Pluton, Hida Mountain Range, central Japan. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **116**, 788–801.
- Watanabe, T., Fanning, C. M., Uruno, K. and Kano, T., 1995, Pre-Middle Silurian granitic magmatism and associated metamorphism in northern Japan: SHRIMP U–Pb zircon chronology. *Geol. Jour.*, **30**, 273–280.
- Weinberg, R. F., 1997, The disruption of a diorite magma pool by intruding granite: the Sobu body, Ladakh batholith, Indian Himalayas. *Jour. Geol.*, **105**, 87–98.
- Whalen, J. B., Currie, K. I. and Chappell, B. W., 1987, A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **95**, 407–489.
- Wiebe, R. A., 1994, Silicic magma chambers as traps for basaltic magmas: the Cadillac Mountain intrusive complex, Mount Desert Island, Maine. *Jour. Geol.*, **102**, 423–437.
- Windley, B. F., 1995, *The Evolving Continents, Third Ed.* John Wiley & Sons, 526p.
- 山田直利・片田正人・端山好和・山田哲雄・仲井 豊・香掛俊夫.....
- 宮川邦彦(Yamada, N., Ktada, M., Hayama, Y., Yamada, T., Nakai, Y., Kutsukake,...Miyagawa, K.), 1974, 中部地方領家帯地質図(*Geological Map of the Ryoke Belt, Central Japan*). 地質調査所.
- Yamamoto, S., Senshu, H., Rino, S., Omori, S. and Maruyama, S., 2009, Granitic subduction: Arc subduction, tectonic erosion and sediment subduction. *Gondwana. Res.*, **15**, 443–453.
- Yokoyama, K., Shigeoka, M., Goto, A., Terada, K., Hidaka, H. and Tsutsumi, Y., 2010, U-Th-total Pb ages of uraninite and thorite from granitic rocks in the Japanese Islands. *Bull. Natl. Museum, Nat. Sci., Ser.C.*, **36**, 7–18.
- Yokoyama, K., Shigeoka, M., Otomo, Y., Tokuno, K. and Tsutsumi, Y., 2016, Uraninite and thorite ages of around 400 granitoids in the Japanese Islands. *Mem. Natl. Mus. Nat. Sci., Tokyo*, **51**, 1–24.
- Yoshida, T., 1984, Tertiary Ishizuchi cauldron, Southwest Japan arc: Formation by ring fracture. *Jour. Geophys. Res.*, **89B**, 8502–8510.
- 吉倉紳一・熱田真一(Yoshikura, S. and Atsuta, S.), 2000, 花崗岩体に記録されたマグマ混交・混合現象(Magma mingling and mixing recorded in granitic plutons). 月刊地球号外(*Chikyu Monthly, Extra Ed.*), **30**, 140–145.
- Yuguchi, T. and Nishiyama, T., 2007, Cooling process of granite body deduced from the extents of exsolution and deuteric subsolidus reactions: Case study of the Okueyama granitic body, Kyushu, Japan. *Lithos*, **97**, 395–421.
- Zhao, X., Mao, J., Ye, H., Liu, K. and Takahashi, Y., 2013, New SHRIMP U–Pb zircon ages of granitic rocks in the Hida Belt, Japan: Implications for tectonic correlation with Jamusi massif. *Island Arc*, **22**, 508–521.

(要 旨)

中島 隆, 2018, 日本の花崗岩：2017 年における総括. 地質雑, **124**, 603–625. (Nakajima, T., 2018, Granites of Japan: A review at 2017. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 603–625.)

2017 年時点での日本の花崗岩の総括を行った。日本列島の花崗岩類はすべて顕生代の造山運動で形成された島弧型花崗岩である。大部分が日本列島がまだアジア大陸の一部だった時代に大陸の成長最前線として形成された花崗岩類で、ほとんどが I タイプであり、S タイプ花崗岩類は非常に少ない。起源物質はその大部分がマントル由来の玄武岩質下部地殻の部分溶融によると考えられ、古い大陸基盤の存在や関与は考えられない。その活動はきわめてエピソードであり、地表露出面積では 50–130 Ma の白亜紀～古第三紀の花崗岩類が全体の約 8 割を占め、後期中生代環太平洋花崗岩地帯の一部をなす。西南日本外帯には 13–15 Ma と極めて限られた期間に活動した花崗岩類が広範囲に露出しており、背弧海盆の拡大に関連した特異なテクトニクスでの活動と考えられている。ジュラ紀と三畳紀の花崗岩類は飛驒帯に見られる。古生代の花崗岩類はきわめて少ない。