

島弧マグマと地殻形成：マントルから大陸を創る

田村 芳彦*

(2015年11月2日受付, 2015年12月24日受理)

Arc Magmas and Crust Formation: Genesis of the Continental Crust from the Mantle

Yoshihiko TAMURA*

Arc lavas are characteristically evolved, multiply saturated, and rich in phenocrysts. Recent work in the Mariana arc, however, has shown that small parasitic cones on the flanks of larger volcanoes at the depth of ~2,000 m often yield mafic lavas which are not found in the main edifice. Finding and studying such lavas is fundamental to understand the nature of the mantle source and the processes that yield intermediate arc magmas. Additional recent observation is variations in the crustal thickness and its internal structure which is closely related to the average compositions of the lavas from the Quaternary volcanic front in the Izu-Ogasawara arc. I attempt to combine the geophysical findings with the petrology of the volcanic rocks from the oceanic arc in order to understand how the ancient Earth covered by a global ocean developed to the present.

Key words: arc volcano, crustal structure, andesite, continental crust, basalt

1. はじめに

地球は太陽系で唯一、海洋と大陸を持つ惑星である。海洋地殻は玄武岩で構成されているが、大陸地殻は平均組成 60 wt% SiO₂ の安山岩であり (Fig. 1, Rudnick and Gao, 2003) それは太陽系で地球だけに存在し、地球の表層地形の二分性を担うユニークな物質である。大陸地殻はいつ、なぜ、どこで、どのようにして形成されたのであろうか。今も大陸地殻は生成されているのであろうか。究極的な問題は、大陸の平均組成、つまり、海洋地殻とは対照的な組成を有する「安山岩」の成因でもある。大陸形成論には大きく2つの潮流がある。肥厚した玄武岩質下部地殻の再融解が重要と考えるものと、プレートの収束境界（沈み込み帯）のマグマ生成が重要と考えるものである。Arndt (2013) は大陸地殻の形成と成因に関する最近の総説であるが、前者に関する解説と議論が詳しく示されている。一方、Arndt (2013) にはあまり言及されていないが、プレートの収束境界でのマグマ生成が大陸地殻を形成するという議論も古くから存在し、その先駆とも言える Taylor (1967) の安山岩モデルは未だ健在である。巽 (2003) にはこの立場でのまとめも示され

ており、本総説と重複するトピックスであるので是非参照されたい。

この総説は、島弧マグマと地殻形成がテーマである。第一に必要なことは、プレートの収束境界において最初にどのようなマグマが生成されるのか、である。プレート収束境界のマントルは、くさび状の形からマントルウエッジと呼ばれる。マントルが溶けてできた未分化のマグマは初生マグマと呼ばれる。つまり、マントルウエッジの部分融解で生じる初生マグマの組成をまず明らかにすることが必要である。初生マグマはその後様々に分化して、地表に噴出および地殻に貫入し、島弧地殻を形成する。島弧地殻が最終的には大陸地殻へ分化すると考えると、「島弧マグマと地殻形成」はプレート収束境界でのマグマ活動を通して、「マントルから大陸を創ること」に他ならない。島弧初生マグマは、玄武岩から安山岩までの組成を持つと考えられている (巽, 2003; Kushiro, 2007)。一方、一般的に、島弧マグマは斑晶も多く、マントルと平衡な初生マグマから著しく分化している。地殻がある限り、島弧初生マグマを直接手に入れるのは不可能である、と多くの岩石学者が感じていた。ところが偶

* 〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2番地15
国立研究開発法人海洋研究開発機構海洋掘削科学研究開発センター

Research and Development Center for Ocean Drilling

Science, JAMSTEC, 2-15 Natsushima-cho, Yokosuka 237-0061, Japan.

e-mail: tamuray@jamstec.go.jp

然にも、マリアナ弧の海底火山の斜面、水深 2,000 メートル前後の深海に、初生マグマに近い未分化なマグマがかなり普遍的に噴出していることが最近の海洋研究開発機構 (JAMSTEC) による深海調査でわかってきた (Tamura *et al.*, 2011, 2014). 一方、マリアナ弧の深海から採取された未分化マグマおよびそれを基にして求められた初生マグマの平均は玄武岩質 (48.2% SiO₂ および 16.4% MgO, Tamura *et al.*, 2014) であり、主要元素に関しては組成の幅は小さい (Fig. 1). 大陸地殻の平均組成は分化した安山岩 (60.6% SiO₂ および 4.7% MgO, Rudnick and Gao, 2003) であるから、依然として玄武岩質初生マグマと大陸地殻 (安山岩) との間には大きな隔りがある。つまり、マントルと大陸地殻の間にはミッシングリンクが存在している。一見すると、厚い大陸地殻の中に、初生玄武岩マグマを大陸の安山岩へと分化させるミッシングリンクがあり、大陸 (安山岩) を生成するためには大陸 (厚い地殻) が必要である、という仮説を多くの研究者が暗黙に了解している節がある。しかし、大陸を生成するためには大陸は必ずしも必要ではないことが最近明らかにされた。それを明確に示したのは、2013 年 11 月に再開した西之島の火山活動である。この活動は薄い島弧地殻における分化した安山岩マグマの噴出であった。マントルに一番近い島が大陸地殻を形成しているのである。この西之島の噴火は安山岩成因論、大陸成因論に新たな一石を投じている (Fig. 1).

プレートの収束境界では、一般的には、密度の小さい大陸プレートの下に密度の大きい海洋プレートが沈み込む。しかし、海洋プレートに海洋プレートが沈み込んでいる場合もある。後者の場合、沈み込まれた海洋プレートには海溝に沿って火山島と海底火山からなる海洋島弧が形成される。伊豆小笠原マリアナ弧やトンガケルマディック弧は典型的な海洋島弧といわれている。一見不思議なことに、これらの海洋島弧には流紋岩マグマも大量に噴出することが知られている (Tamura and Tatsumi, 2002; Wright *et al.*, 2006). さらに伊豆弧においては玄武岩火山と流紋岩火山が火山フロントに沿って交互に出現し、その分布は伊豆弧の島弧の地殻構造と見事に対応する (Kodaira *et al.*, 2007a). 島弧地殻構造とマグマ組成の対応は、海洋島弧の流紋岩マグマ成因に大きな示唆を与えている。

地震波速度構造において島弧地殻と大陸地殻の決定的な違いは、島弧地殻における高速度の (よって鉄マグネシウム鉱物に富む) 下部地殻の存在である (Suyehiro *et al.*, 1996; Taira *et al.*, 1998; Tatsumi *et al.*, 2008). 島弧を大陸にするためには島弧下部地殻を引きはがす必要がある (Taira *et al.*, 1998; Tatsumi *et al.*, 2008; Jagoutz and Behn,

2013). この作用が現在伊豆弧と本州の衝突帯で起こっているかもしれない (Tamura *et al.*, 2010).

島弧地殻の生成は空間的に一様ではなく (Kodaira *et al.*, 2008), 火山の地下において成長するため、火山の分布に制御されている。火山の分布は「マントルホットフィンガー」と呼ばれるマントル融解の分布に支配されている (Tamura *et al.*, 2002). よって「マントルホットフィンガー」の成因とその安定性、およびマントル融解と地殻成長との関係 (Obana *et al.*, 2010) が重要となる。さらに、近年のオフィオライト研究や、陸域の島弧初生マグマの研究、さらに太古代の地殻岩の生成に関する研究は、大陸地殻の成因研究に重要な進歩をもたらしている (Behn and Kelemen, 2006; Behn *et al.*, 2011; DeBari and Greene, 2011; Moyen and Martin, 2012; Dhuime *et al.*, 2012; Jagoutz and Behn, 2013; Arndt, 2013 など). 一方、現行の海洋島弧の地殻構造、海底探査による初生マグマの採取・分析・解析は、現在のところ JAMSTEC の独壇場である。本小論は、地殻構造とマグマの相互関係を捉え、海洋島弧から大陸の成因に迫ろうとする試みを概観したものである。沈み込み帯における大陸の成因に関して別の立場からの議論 (たとえば巽, 2003) をあわせ読むことによって、大陸の成因という迷宮とそれを解明しようとする試みに対して理解が深まるものと考ええる。

2. 水深 2,000 メートルから未分化溶岩を採取する

プレートの収束境界におけるマグマは、特徴的といえるほど斑晶に富み、分化している。特に安山岩マグマは、一度固結した岩体が加熱されて再融解したもの (Blundy and Sparks, 1992; Murphy *et al.*, 2000; Tamura *et al.*, 2003 など) や地殻の混染、マグマ混合など複雑な過程を経てきたもの (Sakuyama, 1979, 1981; Gamble *et al.*, 1999; Kent *et al.*, 2010; Price *et al.*, 2012 など) が普遍的に存在する。よって、安山岩の全岩組成からマントル由来のメルトの組成を推測するのは難しい。分化している溶岩は地殻内のマグマ溜まりの情報を保持しているが、マントルにおける出来事を語ることはできない。著者らは JAMSTEC による海底火山調査 (NT05-17, NT10-12) によって、マリアナ弧の海底火山 NW Rota-1 およびバガン火山の海底斜面 (水深 2,000 メートル付近) より、地表では確認されていない未分化な玄武岩溶岩を採取した。特にバガンの海底斜面で採取された岩石は MgO が 10-12 wt% あった。これらは、これまでマリアナ弧で採取された中で最も未分化な溶岩であり、さらに含まれるかんらん石斑晶のフォルステライト値 (かんらん石はマグネシウムかんらん石 (forsterite; Fo) と鉄かんらん石 (fayalite; Fa) を端成分としてその間に固溶体をつくる。Fo 成分のモル%

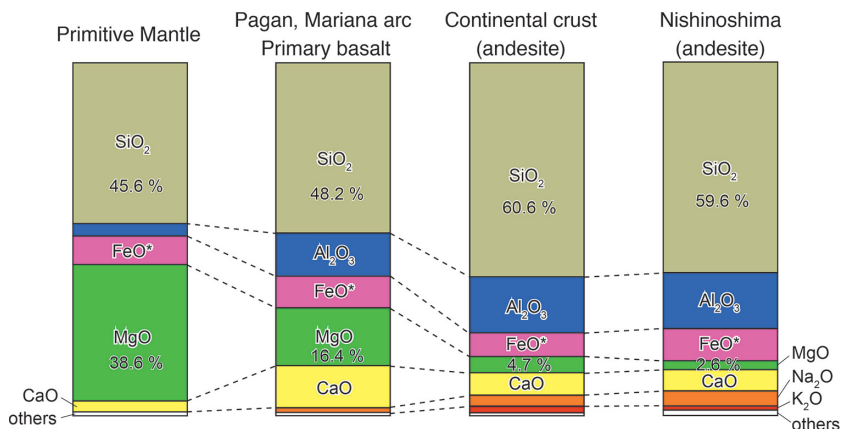


Fig. 1. Comparison of major elements among primitive mantle (Takazawa *et al.*, 2000), average primary basalt magma from Pagan volcano in the Mariana arc (Tamura *et al.*, 2014), average bulk continental crust (Rudnick and Gao, 2003), and Nishinoshima lavas in the Ogasawara Arc, which erupted 40 years ago (S. Nakano, 2013 personal communication, https://gbank.gsj.jp/volcano/Act_Vol/nishinoshima/index.html). Nishinoshima lavas are andesitic and have compositions similar to those of continental crust.

をフォーステライト値と呼ぶ)は Fo_{04} に達するものもある (Tamura *et al.*, 2014). この未分化溶岩を用いてマリアナ弧における初生玄武岩マグマ組成を決定し、一つの火山における初生玄武岩マグマの組成の幅やマントルでのマグマ生成条件が明らかにされた (Tamura *et al.*, 2011; Tamura *et al.*, 2014). その結果、沈み込むプレートから火山フロントに供給される成分 (サブダクション成分) は水に富む堆積物メルト (ケイ酸塩メルト) と水に富む炭酸塩メルト (カーボネイトメルト) であるという結論に至った。両者の流体は不混和であるため、マントル融解にはおのおの別々に関与する。よって一つの火山においても、それぞれのサブダクション成分を持つ二種の初生玄武岩マグマが存在する (Tamura *et al.*, 2014). 沈み込むプレート直上の温度条件下におけるカーボネイトメルトの生成に関しては、未だ議論がある (Gorman *et al.*, 2006; Kumagai *et al.*, 2014). Mibe *et al.* (2011) や Kawamoto *et al.* (2012) は高圧実験の結果から、沈み込むプレートから供給される、水を主体とした流体と堆積物メルトは共存すると考えているが、 CO_2 の移動に関してメルトとして移動するとは特定していない。陸上の火山では、従前から、成層火山周囲の寄生火砕丘などには、比較的未分化なマグマが噴出することが知られている。それと同様に、我々の 2005-2013 年に及ぶマリアナ弧海底火山の深海調査の経験から水深 2,000 メートルでは未分化なマグマがほぼ普遍的に噴出する、ということがわかってきた (Fig. 2). 従来は海底火山の山頂部や水深の浅い部分を主にドレッジなどにより溶岩を採取していたため、海底火

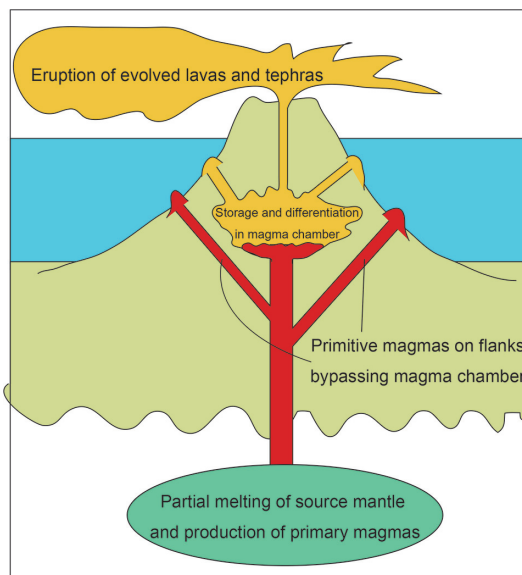


Fig. 2. Cartoon showing a cross-section of island volcano. Several works in the Izu-Bonin-Mariana arc have shown that small parasitic cones on the flanks of larger volcanoes at the depth of ~2,000 m often yield more mafic lavas than the main edifice.

山の深海部はほとんど調査されていない。より水深の深い部分を調査して初生マグマを探すこと、が今後のターゲットの一つであろう。しかし、地殻構造と初生マグマという観点でいうと、なぜ深海に未分化マグマが噴出す

るのかを明らかにすることが今後の課題である。

3. 安山岩マグマと薄い地殻

マントルから如何に安山岩組成の大陸地殻をつくるかは依然として地球惑星科学における大きな謎として残っている (Fig. 1)。肥厚した玄武岩質下部地殻の再融解が重要か、あるいは沈み込み帯のマグマ生成が重要かで、大陸形成論には大きく2つの潮流がある。前者は Arndt (2013) などの総説に詳しい。後者に関しては、大きく分けて、島弧の初生マグマが安山岩質か玄武岩質かどうか、また前者の成因に沈み込むプレート (スラブ) からのシリカ (SiO_2 成分) に富んだメルトの寄与を求めるかどうかなど、島弧初生マグマの生成に関する議論が本質的である。(Taylor, 1967; Hofmann, 1988; Tatsumi *et al.*, 2008 など)。さらに、地球史のうち、どの時代に現在ある大陸の大半が形成されたかの議論とあわせ、どのメカニズムに重きを置くのかで議論がある (Arndt, 2013 の総説など)。Taylor (1967) は大陸地殻の平均組成が安山岩 (カルクアルカリ安山岩) であること、カルクアルカリ安山岩マグマが沈み込み帯の火山に特徴的であることから、大陸地殻が沈み込み帯の火山活動で生じると論じた。彼は沈み込み帯のマントルウエッジの部分融解により安山岩質の初生マグマが発生すると考えていた (Taylor and White, 1965)。Kelemen *et al.* (2005) はスラブからのシリカに富んだメルトの寄与をうけた未分化安山岩マグマからの結晶分化が大陸生成に本質的であると考えている。久城育夫はエンスタタイト (頑火輝石) が含水下では3 GPa までかんらん石とメルトに不調和融解すること (Kushiro *et al.*, 1968)、および単純な系 (forsterite-diopside-silica, forsterite-nepheline-silica, forsterite-CaAl₂SiO₆-silica) において forsterite の安定領域が含水下で拡大すること (Kushiro, 1972) など高温高圧融解実験の結果から、島弧の含水マントルウエッジの部分融解により安山岩組成のマグマが発生すると考えた。Kushiro (1990, 2007) はさらに多様な初生マグマが島弧の下で生産されると考え、地殻の進化を論じた。

しかしながら、普遍的にプレート収束境界のマントルウエッジで初生安山岩マグマが生成するのであろうか。筆者はこれまで「無水マントルが融解して玄武岩マグマを生じ、含水マントルが融解して安山岩マグマを生じる」との単純なシナリオで初生マグマの研究を進めてきた (Tamura, 1994 など)。しかし、このシナリオと「水に富む初生玄武岩マグマの存在」は相容れないものである。近年は、プレート収束境界の玄武岩マグマは水に富んで

いることが火山岩に含まれるかんらん石斑晶中の流体包有物 (メルトインクルージョン) の研究などから明らかになっている (Kelley *et al.*, 2010; Parman *et al.*, 2011 など)。マリアナの火山の研究で得られた初生マグマは「水に富む初生玄武岩マグマ (Tamura *et al.*, 2011, 2014)」であり、「水に富む初生安山岩マグマ」は未だ見いだされていない。

このジレンマに一つの解決策の可能性を与えたのが西之島の噴火である。その前に、まず、なぜ西之島を取り上げるのかを説明する必要がある。一つの地域を徹底的に調査して、その結果を一般化しようとするのはサイエンスとして正しい方向である。一方、特定の事例 (ここでは西之島) を一般化するにはまだ時期尚早であり、さらに地殻の薄い水曜・火曜・土曜海山らをさらに調査し、データを蓄積して議論していく必要がある、という意見も当然である。また、大陸の成因を語るには、特定の島弧ではなく、世界の他の島弧ではどうなっているのかの比較は必要であろう。一方で、現状では、世界の他の島弧は、未だ伊豆小笠原弧ほどの精度で地殻構造とマグマの関係が明らかになっていない。たとえば、伊豆小笠原弧と類似した海洋島弧といわれるトンガ-ケルマディック弧において海底地震計を配置して地殻構造を明らかにし、無人探査機で海底火山を広域に調査し、試料を採取するという提案がなされているが、まだ実行はされていない¹。よって、現状では西之島を引き合いに出してそれを一般化するのは今後の方向性も含めて正当な議論であろう。そこで、議論を再び西之島へ戻そう。東京から南へ1,000 km、太平洋のただ中に位置する西之島において、2013年11月以来、活発な火山活動が続いている。海底火山の噴火により拡大を続けている西之島は、直径およそ2 km、高さ140 m以上に成長し、40年前の噴火で形成された旧西之島を飲み込み、なおも拡大を続けている (2015年10月現在)。Fig. 1はマントル、初生玄武岩マグマ、大陸地殻および40年前に噴火した西之島の溶岩の平均組成を表している。西之島の1973-74年の噴出物の分析結果は、驚くべき事に、すべてシリカ量が60%前後の均質な大陸張りの安山岩であった。それでは、西之島は厚さ30 km以上の大陸地殻でできているのであろうか。ここに全く逆の事実がある。Fig. 3は伊豆小笠原弧の地殻構造 (Kodaira *et al.*, 2007b) を示したものである。伊豆弧の三宅島、八丈島、青ヶ島、鳥島などは玄武岩溶岩を流出する火山であるが、地下には厚さ30-35 kmの地殻がある。一方、安山岩溶岩を流出する西之島を含む小笠原弧の地殻は厚さ16-21 kmしかない。

¹ International Workshop for Large-scale research cruises: https://www.jamstec.go.jp/maritec/e/large-scale_cruise/

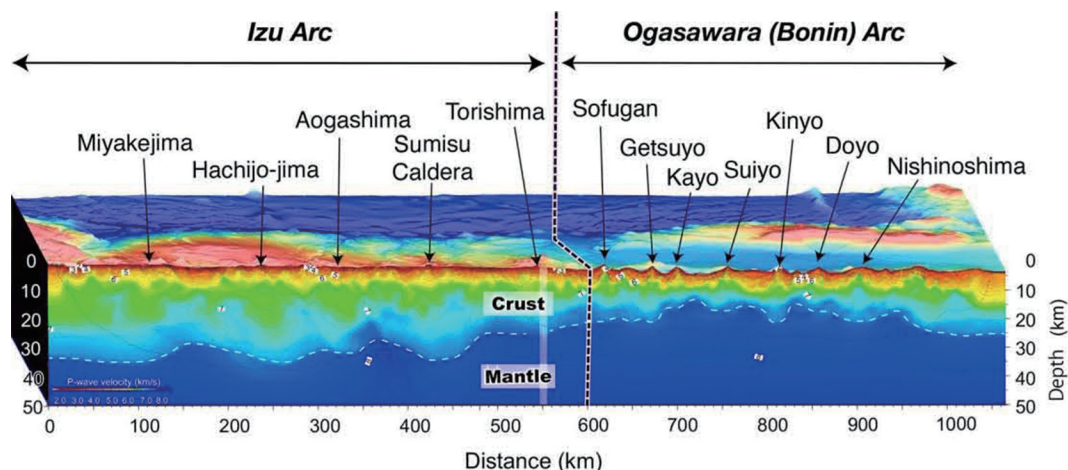


Fig. 3. Seismic velocity image along the volcanic front of the Izu-Ogasawara arc obtained by seismic refraction tomography (Kodaira *et al.*, 2007b). The crust beneath the Izu Arc volcanoes is 32–35 km thick, which is twice as thick as the 16–21 km crust underlying the Ogasawara Arc volcanoes.

つまり西之島は世界でも有数の「マントルに近い島」「地殻の薄い島」なのである。なぜマントルに近い海洋島弧の火山島から大陸張りの安山岩マグマが噴出するのか。さらに、なぜ地殻の厚い北部の伊豆諸島からは玄武岩マグマが噴出しているのだろうか。

一つの可能性は、西之島の地下のマントルで「初生安山岩マグマ」が生成していることである。従来マントルにおける初生安山岩マグマの生成には水の効果が強調されてきた (Kushiro, 1990 など)。マントルの融解に対する水の影響は大きい。水だけでは初生安山岩マグマを生成することはできないのではないだろうか。Gaetani and Grove (1998) の実験では 1.2–2.0 GPa において 12% まで水を加えたマントルかんらん岩 (レゾブライト) 融解実験を行ったが、安山岩メルトは得られていない。一方、Umino and Kushiro (1989) はより低圧の 0.8 GPa, 1,250 °C、含水条件で Mg に富む特殊な安山岩であるボニナイトが発生するとしている。ボニナイトは初生安山岩マグマのひとつである。Tatsumi and Eggins (1995) も同様の低圧および 5–8% 含水量の条件で初生安山岩マグマが生成することを示している。つまり、初生安山岩マグマ生成には低圧かつ含水条件という二つの要因が加わる必要があるのではないか。三宅島や八丈島のある伊豆弧と西之島のある小笠原弧はどちらもフィリピン海プレートに太平洋プレートが沈み込んでいる連続したプレート収束境界である。同様の条件下で、前者は玄武岩マグマが噴出し、後者は安山岩マグマが噴出している。一方、伊豆弧と小笠原弧の大きな違いはその地殻構造にある (Fig. 3)。「マントルに近い島」西之島においては地殻が薄い

ため、地殻直下の低圧 (1 GPa 以下) においてマントルが融解することが可能であるが、既に 30 km の地殻を持つ伊豆弧においてはマントル融解は必ず 1 GPa 以上の圧力で起きる。マントルが含水でかつ低圧 (1 GPa 以下) で融解したときのみ初生安山岩マグマができる、と考えると多くの事実が整合的になる (Umino and Kushiro, 1989; Tatsumi and Eggins, 1995; Tamura *et al.*, 投稿中)。

4. 流紋岩マグマと島弧地殻の融解

話題は小笠原弧の安山岩マグマ主体の火山活動から、伊豆弧のバイモーダルな火山活動へ移る。伊豆弧は巨大な玄武岩火山 (大島, 三宅島, 八丈島, 青ヶ島, スミス島 (スミスカルデラ), 鳥島 (鳥島カルデラ)) が 80 から 100 km 間隔で並んでおり、これらの玄武岩火山の間に流紋岩質の海底カルデラ (大室だし, 黒瀬カルデラ, 南八丈カルデラ, 明神海丘, 明神礁, 南スミスカルデラ) が存在する (Fig. 4)。マグマの噴出量で見ても、玄武岩マグマと流紋岩マグマのバイモーダルな火成活動に特徴付けられる海洋島弧である (Tamura and Tatsumi, 2002)。玄武岩マグマは主に上述の火山島から噴出し、流紋岩マグマは火山島と火山島間の海底から噴出する。Tamura and Tatsumi (2002) は、流紋岩マグマは伊豆弧の中部地殻を形成する安山岩質の深成岩 (Suyehiro *et al.*, 1996) が融解したものであると考えた。

この考えは伊豆弧の地殻構造と火山の噴出するマグマの興味深い対応関係 (Kodaira *et al.*, 2007a) と整合的である。Fig. 4 は伊豆弧の火山フロントに沿った側線を示しており、それぞれの点は海底地震計の位置を示している。

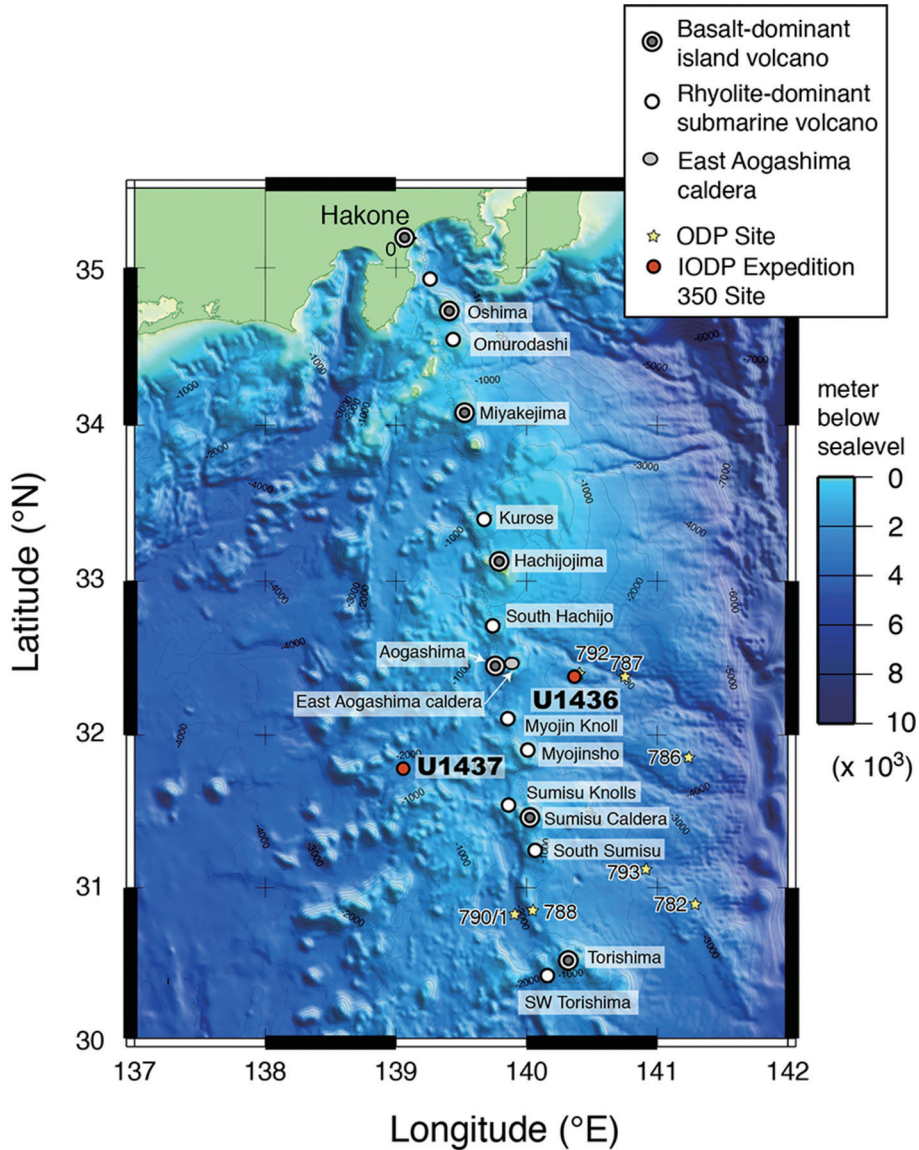


Fig. 4. Map showing the 16 Quaternary volcanoes with which this study is concerned and the location of the wide-angle seismic profile. Dots on the profile indicate a total of 103 ocean bottom seismographs (OBSs), which were deployed at approximately 5-km intervals, and the numbers on the profile show the distance from its northern end (Kodaira *et al.*, 2007a). Numbered stars indicate sites drilled on the Philippine Sea plate in the Izu-Bonin region during ODP Legs 125 and 126 and IODP Expedition 350. Modified from Tamura *et al.* (2009). Copyright (2009) Oxford University Press. Reproduced with permission from the Oxford University Press.

Fig. 5a は Kodaira *et al.* (2007a) によって得られた中部地殻の厚さとそれぞれの火山のマグマ組成の平均をプロットしたものである。驚くべきことに地殻構造と噴出するマグマの組成は関連があり、玄武岩を噴出する火山の中部地殻は厚く、流紋岩を噴出する火山の中部地殻は薄くなっている。模式的には Fig. 5b の繰り返しが伊豆弧の

箱根から鳥島の 550 km 間である (Tamura *et al.*, 2009)。

玄武岩火山に噴出する少量の流紋岩マグマは現在の玄武岩マグマの地球化学的特徴と同じであるが、流紋岩火山に噴出する大量の流紋岩マグマの地球化学的特徴は現在の玄武岩マグマの特徴とは異なり、漸新世の伊豆弧のマグマの特徴を示している (Tamura *et al.*, 2009)。だとす

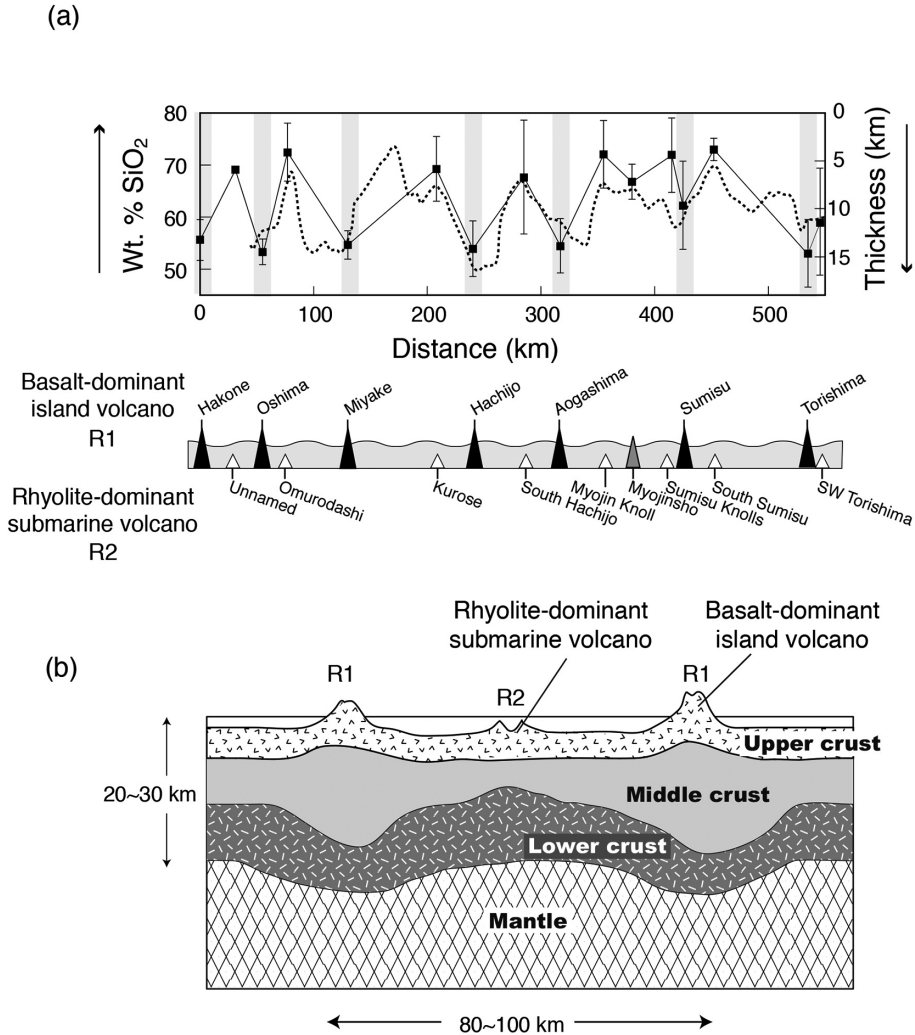


Fig. 5. (a) Along-arc crustal structure (dotted line; thickness of middle crust with V_p of $6.0\text{--}6.8\text{ km s}^{-1}$ at depths between 5 and 20 km) and average wt% SiO₂ of volcanic rocks (solid squares) sampled and dredged from the 16 Quaternary volcanoes of the Izu-Bonin arc shown in Fig. 2. The basalt-dominant island volcanoes produce small volumes of rhyolites that we will call R1. The rhyolite-dominant submarine volcanoes erupt mostly rhyolite that we will call R2. (b) Schematic crustal structure of the Izu-Bonin arc volcanic front of alternating basalt-dominant island volcanoes and rhyolite-dominant submarine volcanoes, which have thick and thin middle crust and erupt R1 and R2 rhyolite, respectively. These diagrams are from Tamura *et al.* (2009). Copyright (2009) Oxford University Press. Reproduced with permission from the Oxford University Press.

ると、流紋岩海底カルデラ直下で中部地殻が薄いのは、なぜか。それはかつて存在した伊豆弧の古い中部地殻が部分融解を起こしてシリカの大きい流紋岩マグマとシリカの低いマフィックな（鉄マグネシウム鋳物に富んだ）溶け残り岩へと分化したからである (Fig. 6)。それに対し、地殻の肥厚部の中部地殻は Early Quaternary にマントル由来のマグマの付加により成長し (Fig. 6b)、その後

Late Quaternary に玄武岩の貫入により融解し流紋岩を生成している (Fig. 6c)。つまり、伊豆弧の流紋岩は、玄武岩火山の下にある中部地殻（新しい時代の中部地殻）の再融解したものと漸新世にできた中部地殻の再融解のものとの二種類あることになる。さらに近年、玄武岩質の火山島（八丈島や大島）から側方にマグマが長距離移動していることが明らかになってきている (Ishizuka *et al.*,

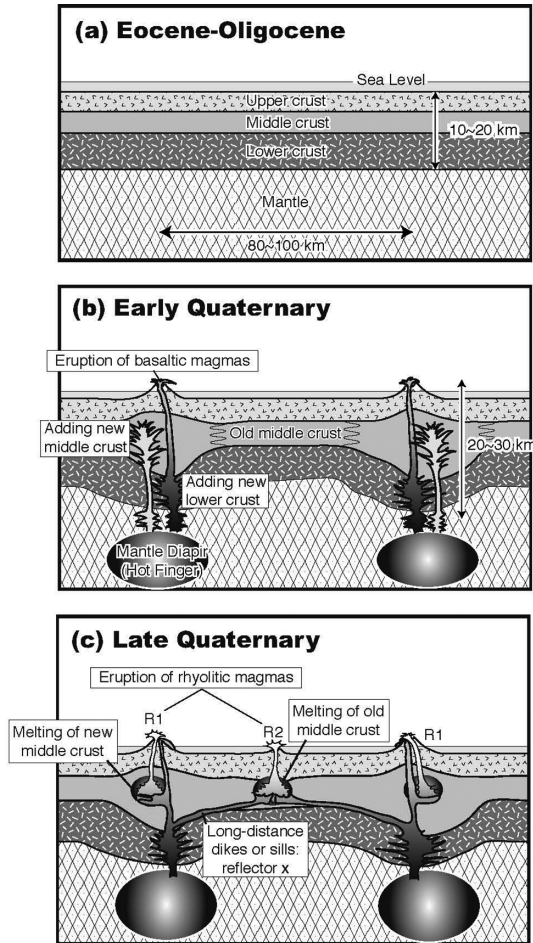


Fig. 6. Schematic along-arc cross-section of the Izu-Bonin arc, showing volcanism and crustal evolution. (a) Eocene-Oligocene. Crustal structure is assumed to be similar to the thin crust in the present-day Izu-Bonin arc front (Kodaira *et al.*, 2007b). Volcano distribution and variations of crustal thickness in this early stage are not well understood and are omitted. (b) Early Quaternary. Locally developed hot regions within the mantle wedge (hot fingers) are responsible for the production of basaltic volcanoes (Tamura *et al.*, 2002). Basalt-dominant volcanoes have thicker crust (Kodaira *et al.*, 2007a) that might have accumulated during Neogene-present. Black areas represent basaltic magma systems that thicken lower crust and also erupt to the surface. Grey areas represent magnesian andesite magma systems that thicken middle crust and do not erupt to the surface because their higher water contents promote rapid crystallization within the crust (Tamura and Tatsumi, 2002). (c) Late Quaternary. Remelting of middle crust and formation of rhyolite magmas take place at both basaltic and rhyolitic volcanoes. Basalt intrusions melt new middle crust to produce R1 rhyolite magma at basalt-dominant volcanoes, and melt Oligocene middle crust to produce R2 rhyolite magma at rhyolite-dominant volcanoes. Rhyolite volcanoes have no mantle roots beneath the crust but dikes (reflector x of Kodaira *et al.*, 2007a) travel laterally from basalt volcanoes to produce rhyolite magma having Oligocene character. For further details, see Tamura *et al.* (2009). Copyright (2009) Oxford University Press. Reproduced with permission from the Oxford University Press.

2008, 2015). この発見は、流紋岩マグマのカルデラは、玄武岩火山の間の中部地殻に側方に長距離移動し貫入したマグマが地殻を融解して生成した、という考えと整合的である (Tamura *et al.*, 2009). 伊豆弧の流紋岩カルデラはマントルに根を持っていない根無し火山なのか? 今後は地殻構造のみではなく、マントルトモグラフィと火山のマグマの組成を議論する必要があると考えられる (Obana *et al.*, 2010).

5. 島弧地殻から大陸地殻へ

島弧の地震波速度構造 (Kodaira *et al.*, 2007a; Kodaira *et al.*, 2007b; Takahashi *et al.*, 1998; Takahashi *et al.*, 2007; Takahashi *et al.*, 2008) は島弧地殻に巖として安山岩質の中部地殻が存在することを示している。しかし、安山岩質の中部地殻を形成しただけではまだ大陸地殻の生成とはいえない。Taira *et al.* (1998) および Tatsumi *et al.* (2008) によって示された伊豆小笠原マリアナ弧の地殻は大陸地

殻に比較して SiO_2 量が 6 wt% から 12 wt% 低く、アルカリ元素に乏しく、 Al_2O_3 , FeO , MgO , および CaO に富んでいる。Taira *et al.* (1998) は、伊豆弧の全島弧地殻の組成は 54 wt% SiO_2 であるが、下部地殻を除くと 60 wt% SiO_2 となり、上部地殻と中部地殻は大陸地殻の組成に近いと結論している。また Tatsumi *et al.* (2008) のモデルは、マントル起源のマグマが玄武岩である事を出発として、それから地殻分化を考察し、したがって、最下部地殻の剥離が必要であると論じている。本論では、マントル起源の安山岩マグマの役割を主張しているが、マントル起源の安山岩は高いマグネシウム量を持ち、大陸の平均組成の安山岩とは明瞭に異なる組成を持つ。よって、マントル起源のマグマが玄武岩であろうと安山岩であろうと、全地殻の平均組成を安山岩組成にし、大陸地殻を形成するためには、島弧地殻から上部地殻、中部地殻を抽出・集積し、かつ下部地殻を取り除くという最後の仕上げが必要なのである。Tamura *et al.* (2010) では、伊豆

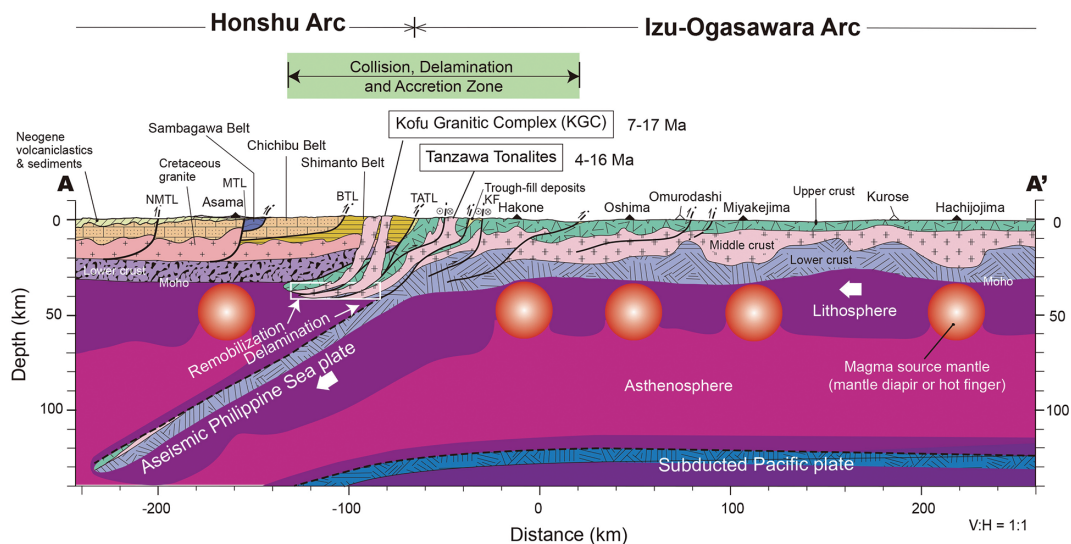


Fig. 7. Schematic cross-section of the Izu-Bonin arc and the Honshu arc. The Kofu Granitic Complex (KGC) and the Tanzawa tonalites were emplaced during the Miocene within the zone of collision, delamination and accretion between the two arcs. Crustal structure of the Izu-Bonin arc after Kodaira *et al.* (2007a). Most parts of the middle crust of the Izu-Bonin arc were produced in Eocene-Oligocene times (Kodaira *et al.*, 2008). The middle crust in the collision zone was dragged to mantle depths (40~50 km) and temperatures (900~1,000°C). The resulting partial melting resulted in remobilization and delamination of the middle crust from the lower crust of the Philippine Sea plate. For further details, see Tamura *et al.* (2010). Copyright (2010) Oxford University Press. Reproduced with permission from the Oxford University Press.

弧と本州弧の衝突帯で安山岩質の中部地殻が部分融解して本州弧に付加・集積される一方、マフィックな下部地殻がマントルへと沈み込んでいることを示した (Fig. 7). 衝突帯の深成岩の年代 (Tani *et al.*, 2010 など) や化学組成 (Tamura *et al.*, 2010) および丹沢岩体に下部地殻が存在しないこと (Kitamura *et al.*, 2003) などはこの考えと整合的である。

6. おわりに

島弧マグマと地殻構造について我々の研究を基にその関係を述べてきた。さらにマントル-地殻-マグマの関係から「マントルから大陸を創る」特に、「海（海洋島弧）から大陸を創る」という自然の営みが明らかになりつつある。まだ研究が進行中のもの、更に議論が必要なものも多いが、「大陸成因の鍵は深山幽谷ではなく、海底火山にある」という我々のワクワク感が少しでも多くの研究者に伝染し、大陸成因の解明に繋がることを望んでいる。

謝 辞

本総説は石塚 治 氏、匿名の査読者の方および編集を担当して頂いた篠原宏志 氏により大幅に改善された。微力ながらマグマの成因研究を続けられたのは久城育夫

先生（久城さん）を始め多くの方々のご協力と温かいご支援のおかげである。

引用文献

- Arndt, N.T. (2013) Formation and evolution of the continental crust. *Geochem. Perspect.*, **2**, 405-533.
- Behn, M.D., Kelemen, P.B., Hirth, G., Hacker, B.R. and Massonne, H.-J. (2011) Diapirs as the source of the sediment signature in arc lavas. *Nat. Geosci.*, **4**, 641-646.
- Behn, M.D. and Kelemen, P.B. (2006) Stability of arc lower crust: Insights from the Talkeetna arc section, south central Alaska, and the seismic structure of modern arcs. *J. Geophys. Res.*, **111**, B11207, doi: 10.1029/2006JB004327.
- Blundy, J.D. and Sparks, R.S.J. (1992) Petrogenesis of mafic inclusions in granitoids of the Adamello massif, Italy. *J. Petrol.*, **33**, 1039-1104.
- DeBari, S.M. and Greene, A. (2011) Vertical stratification of composition, density, and inferred magmatic processes in exposed arc crustal sections. In *Arc-continent collision*, (Brown, D. and Ryan P. eds), 121-144. *Frontiers in Earth Sciences*, DOI 10.1007/978-3-540-88558-0_2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Dhuime, B., Hawkesworth, C.J., Cawood, P.A. and Storey, C.D. (2012) A change in the Geodynamics of continental growth 3 billion years ago. *Science*, **335**, 1334-1336.

- Gaetani, G. A. and Grove, T. L. (1998) The influence of water on melting of mantle peridotite. *Contrib. Mineral. Petr.*, **131**, 323–346.
- Gamble, J. A., Wood, C. P., Price, R. C., Smith, I. E. M., Stewart, R. B. and Waight, T. (1999) A fifty year perspective of magmatic evolution on Ruapehu Volcano, New Zealand: verification of open system behaviour in an arc volcano. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **170**, 301–314.
- Gorman, P. J., Kerrick, D. M. and Connolly, J. A. D. (2006) Modeling open system metamorphic decarbonation of subducting slabs. *Geochem. Geophys. Geosy.*, **7**, Q04007, doi: 10.1029/2005GC001125.
- Hofmann, A. W. (1988) Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **90**, 297–314.
- Ishizuka, O., Geshi, N., Itoh, J., Kawanabe, Y. and TuZino, T. (2008) The magmatic plumbing of the submarine Hachijo NW volcanic chain, Hachijojima, Japan: long-distance magma transport? *J. Geophys. Res.*, **113**, doi: 10.1029/2007JB005325.
- Ishizuka, O., Taylor, R. N., Geshi, N., Oikawa, T., Kawanabe, Y. and Ogitsu, I. (2015) Progressive mixed-magma recharging of Izu-Oshima volcano, Japan: A guide to magma chamber volume. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **430**, 19–29.
- Jagoutz, O. and Behn, M. D. (2013) Foundering of lower island-arc crust as an explanation for the origin of the continental Moho. *Nature*, **504**, 131–134.
- Kawamoto, T., Kanzaki, M., Mibe, K., Matsukage, K. N. and Ono, S. (2012) Separation of supercritical slab-fluids to form aqueous fluid and melt components in subduction zone magmatism. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **109**, 18695–18700.
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K. and Greene, A. R. (2005) One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In *The Crust* (Rudnick, R. L. ed). 593–659. *Treatise on Geochemistry*, **3**, Oxford, Elsevier-Pergamon.
- Kelley, K. A., Plank, T., Newman, S., Stolper, E. M., Grove, T. L., Parman, S. and Hauri, E. H. (2010) Mantle melting as a function of water content beneath the Mariana arc. *J. Petrol.*, **51**, 1711–1738.
- Kent, A. J. R., Darr, C., Koleszar, A. M., Salisbury, M. J. and Cooper, K. M. (2010) Preferential eruption of andesitic magmas through recharge filtering. *Nat. Geosci.*, **3**, doi: 10.1038/NCEO924.
- Kitamura, K., Ishikawa, M. and Arima, M. (2003) Petrological model of the northern Izu-Bonin-Mariana arc crust: Constraints from high-pressure measurements of elastic wave velocities of the Tanzawa plutonic rocks, central Japan. *Tectonophysics*, **371**, 213–221.
- Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Ito, A., Tamura, Y., Tatsumi, Y. and Kaneda, Y. (2007a) Seismological evidence for variable growth of crust along the Izu intraoceanic arc. *J. Geophys. Res.*, **112**, B05104, doi: 10.1029/2006JB004593.
- Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Miura, S., Tamura, Y., Tatsumi, Y. and Kaneda, Y. (2007b) New seismological constraints on growth of continental crust in the Izu-Bonin intra-oceanic arc. *Geology*, **35**, 11, doi: 10.1130/G23901A, 1031–1034.
- Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Yamashita, M., No, T. and Kaneda, Y. (2008) Seismic imaging of a possible paleo-arc in the Izu-Bonin intra-oceanic arc and its implications for arc evolution processes. *Geochem. Geophys. Geosy.*, **9**, Q10X01, doi: 10.1029/2008GC002073.cube.
- Kumagai, Y., Kawamoto, T. and Yamamoto, J. (2014) Evolution of carbon dioxide-bearing saline fluids in the mantle wedge beneath the Northeast Japan arc. *Contrib. Mineral. Petr.*, **168**, 1056, DOI 10.1007/s00410-014-1056-9.
- Kushiro, I., Yoder, H. S. and Nishikawa, M. (1968) Effect of water on the melting of enstatite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **79**, 1685–1692.
- Kushiro, I. (1972) Effect of water on the composition of magmas formed at high pressures. *J. Petrol.*, **13**, 311–334.
- Kushiro, I. (1990) Partial melting of mantle wedge and evolution of island arc crust. *J. Geophys. Res.*, **95**, 15929–15939.
- Kushiro, I. (2007) Origin of magmas in subduction zones: a review of experimental studies. *Proc. Japan Acad.*, **B83**, 1–15.
- Mibe, K., Kawamoto, T., Matsukage, K. N., Fei, Y. and Ono, S. (2011) Slab melting versus slab dehydration in subduction-zone magmatism. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, **108**, 8177–8182.
- Moyen, J-F. and Martin, H. (2012) Forty years of TTG research. *Lithos*, **148**, 312–336.
- Murphy, M. D., Sparks, R. S. J., Barclay, J., Carroll, M. R. and Brewer, T. S. (2000) Remobilization of andesite magma by intrusion of mafic magma at the Soufriere Hills volcano, Montserrat, West Indies. *J. Petrol.*, **41**, 21–42.
- Obana, K., Kamiya, S., Kodaira, S., Suetsugu, D., Takahashi, N., Takahashi, T. and Tamura, Y. (2010) Along-arc variation in seismic velocity structure related to variable growth of arc crust in northern Izu-Bonin intraoceanic arc. *Geochem. Geophys. Geosy.*, **11**, Q08012, doi: 10.1029/2010GC003146.
- Parman, S. W., Grove, T. L., Kelley, K. A. and Plank, T. (2011) Along-arc variations in the pre-eruptive H₂O contents of Mariana arc magmas inferred from fractionation paths. *J. Petrol.*, **52**, 257–278.
- Price, R. C., Gamble, J. A., Smith, I. E. M., Maas, R., Waight, T., Stewart, R. B. and Woodhead, J. (2012) The Anatomy of an Andesite Volcano: a Time-Stratigraphic Study of Andesite Petrogenesis and Crustal Evolution at Ruapehu Volcano, New Zealand. *J. Petrol.*, **53**, 2139–2189.
- Rudnick, R. L. and Gao, S. (2003) 3.01 Composition of the Continental Crust. In *The Crust* (Rudnick, R. L. ed). 1–64. *Treatise on Geochemistry*, **3**, Oxford, Elsevier-Pergamon.
- Sakuyama, M. (1979) Evidence of magma mixing: petrological study of Shirouma-Oike calc-alkaline andesite volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **5**, 179–208.
- Sakuyama, M. (1981) Petrological study of the Myoko and Kurohime volcanoes, Japan: crystallization sequence and evidence for magma mixing. *J. Petrol.*, **22**, 553–583.
- Suyehiro, K. *et al.* (1996) Continental crust, crustal under-

- plating, and low-Q upper mantle beneath an oceanic island arc. *Science*, **272**, 390–392.
- Taira, A. *et al.* (1998) Nature and growth rate of the Northern Izu-Bonin (Ogasawara) arc crust and their implications for continental crust formation. *Isl. Arc*, **7**, 395–407.
- Takahashi, N., Kodaira, S., Klempner, S., Tatsumi, Y., Kaneda, Y. and Suyehiro K. (2007) Structure and evolution of Izu-Ogasawara (Bonin)-Mariana oceanic island arc crust. *Geology*, **35**, 203–206.
- Takahashi, N., Kodaira, S., Tatsumi, Y., Kaneda, Y. and Suyehiro K. (2008) Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust: 1. Seismic constraint on crust and mantle structure of the Mariana arc-back-arc system. *J. Geophys. Res.*, **113**, B01104, doi: 10.1029/2007JB005020.
- Takahashi, N., Suyehiro, K. and Shinohara, M. (1998) Implications from the seismic crustal structure of the northern Izu-Bonin arc. *Isl. Arc*, **7**, 383–394.
- Tamura, Y. (1994) Genesis of Island Arc Magmas by Mantle-Derived Bimodal Magmatism: Evidence from the Shirahama Group, Japan. *J. Petrol.*, **35**, 619–645.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. and Shukuno, H. (2002) Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **197**, 107–118.
- Tamura, Y. and Tatsumi, Y. (2002) Remelting of an andesitic crust as a possible origin for rhyolitic magma in oceanic arcs: and example from the Izu-Bonin arc. *J. Petrol.*, **43**, 1029–1047.
- Tamura, Y., Yuhara, M., Ishii, T., Irino, N. and Shukuno, H. (2003) Andesites and Dacites from Daisen Volcano Japan: Partial-to-Total Remelting of an Andesite Magma Body. *J. Petrol.*, **44**, 2243–2260.
- Tamura, Y. *et al.* (2009) Silicic magmas in the Izu-Bonin oceanic arc and implications for crustal evolution. *J. Petrol.*, **50**, 685–723.
- Tamura, Y. *et al.* (2010) Missing Oligocene Crust of the Izu-Bonin Arc: Consumed or Rejuvenated During Collision? *J. Petrol.*, **51**, 823, doi: 10.1093/petrology/egq002.
- Tamura, Y. *et al.* (2011) Two primary basalt magma types from Northwest Rota-1 volcano, Mariana arc and its mantle diapir or mantle wedge plume. *J. Petrol.*, **52**, 1143–1183.
- Tamura, Y. *et al.* (2014) Mission Immiscible: Distinct subduction components generate two primary magmas of Pagan volcano, Mariana arc. *J. Petrol.*, **55**, 63–101.
- 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.
- 巽 好幸 (2003) 安山岩と大陸の起源-ローカルからグローバルへ. 東京大学出版会, 東京, 213 p.
- Tatsumi, Y. and Eggins, S. (1995) **Subduction Zone Magmatism**. Frontiers in Earth Sciences, Blackwell Science, 211 p.
- Tatsumi, Y., Shukuno, H., Tani, K., Takahashi, N., Kodaira, S. and Kogiso, T. (2008) Structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc crust: 2. Role of crust-mantle transformation and the transparent Moho in arc crust evolution. *J. Geophys. Res.*, **113**, B02203, doi: 10.1029/2007JB005121.
- Taylor, S.R. (1967) The origin and growth of continents. *Tectonophysics*, **4**, 17–34.
- Taylor, S.R. and White, A.J.R. (1965) Geochemistry of andesites and the growth of continents. *Nature*, **208**, 271–273.
- Umino, S. and Kushiro, I. (1989) Experimental studies on boninite petrogenesis. In *Boninites and related Rocks* (Crawford, A.J. ed), 89–111. Unwin Hyman, London.
- Wright, I.C., Worthington, T.J. and Gamble, J.A. (2006) New multibeam mapping and geochemistry of the 30°–35° S sector and overview of southern Kermadec arc volcanism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **149**, 263–296.

(編集担当 篠原宏志)