



島弧上部マントルの岩石学的性質：何が固有か？

Petrologic characteristics of the upper mantle beneath island arcs

荒井章司* 石丸聡子**

Shoji Arai and Satoko Ishimaru***

2016年11月6日受付.

2017年6月12日受理.

* 金沢大学国際基幹教育院 GS 教育系
Department of GS Education, Institute of
Liberal Arts and Science, Kanazawa Univer-
sity, Kakuma, Kanazawa 920-1192, Japan

** 熊本大学大学院先端科学研究部基礎科学部門地球環境科学分野

Department of Earth and Environmental Science,
Faculty of Advanced Science and Techno-
logy, Kumamoto University, 2-39-1 Kuro-
kami, Chuo-ku, Kumamoto 860-8555, Japan

Corresponding author: S. Arai,
ultrasa@staff.kanazawa-u.ac.jp

Abstract

The mantle wedge is an important locus for material recycling, magma generation, and fluid transportation from the slab, and should therefore be thoroughly examined to better understand these processes. Peridotite xenoliths transported to the surface by arc magmas, or by other magmas, may be representative of the upper part (lithosphere) of the mantle wedge. Fore-arc peridotites exposed on the seafloor also represent the uppermost part of the mantle wedge. We summarize their modal composition, mineral chemistry, equilibrium temperature, and redox state, and discuss the implications for mantle-wedge processes. The arc peridotites are thought to derive mainly from the spinel to plagioclase–peridotite stability fields. They are varied in character, depending on their history as well as the tectonic setting (e.g., fore-arc, volcanic front, and back-arc) of their source regions. Some arc peridotites, especially those from the fore-arc to the volcanic front, are harzburgites and contain high-Mg olivine and high-Cr spinel, with high degrees of partial melting. They also show metasomatism, silica enrichment (i.e., formation of secondary orthopyroxene at the expense of olivine), and hydration (i.e., precipitation of Ca-amphiboles and/or phlogopites). The presence of tremolite, which is indicative of low temperatures and/or depleted (Al-poor) chemistry, is characteristic of sub-arc mantle peridotites. The equilibrium temperature is relatively low (<1100°C) with the exception of the Noyamadake peridotites, SW Japan arc, which are characterized by high temperatures (~1200°C). Some peridotites from the Western Pacific show high oxygen fugacities relative to abyssal peridotite (although a few peridotites show relatively low oxygen fugacities or contain secondary veins composed of highly reduced minerals such as metals and alloys). This indicates the importance of local reducing agents in the mantle wedge.

Keywords: mantle wedge, xenolith, forearc peridotite, mineral chemistry, metasomatism

はじめに

島弧は地球上の特異な変動帯であり、マグマ活動、地震活動が盛んである。それらの解明には、マントル・ウェッジと呼ばれる島弧地殻とスラブ(沈み込む海洋プレート)の間にある物質の理解が不可欠である。かんらん岩捕獲岩はマグマにより地表にもたらされるマントル物質であり、地球深部物質に関する直接的な情報源として極めて重要である。かんらん岩捕獲岩の多くがプレート内または大陸リフト帯マグマ(主としてアルカリ玄武岩)に包有されるものであり、島弧マグマ中のかんらん岩捕獲岩は比較的まれである(Nixon, 1987)。そのため、必然的に島弧マントル(マントル・ウェッジ)の直接的な情報は比較的乏しく、系統性を欠く。さらに、“島弧マントル物質”の認定基準は、島弧発達史の多様性を反映して下記に述べるように複雑である。様々な“島弧マント

ル物質”を系統的に理解する事は重要であり、本論文ではそれをめざす。

島弧下最上部マントル物質はマグマ中の捕獲岩として入手可能である(例えば, Takahashi, 1986; Arai et al., 2004; Ishimaru et al., 2007)。マントル・ウェッジの最先端のマントル物質は海溝付近の前弧域に露出しておりやはり入手は可能である。スラブ直上の、すなわちマントル・ウェッジ下部の物質は高压~超高压の変成岩コンプレックス中のかんらん岩塊(岩体)として地表にもたらされるであろう(例えば, Mizukami and Wallis, 2005)。それらは低温高压変成作用を受けており(例えば, Mizukami and Wallis, 2005; Arai et al., 2012)、変成岩的な性質が強くマントル・ウェッジの主要部分とは性質が著しく異なるため本論文では扱わない。

ここでは基本的に島弧起源を疑う必要がない現在の島弧下のマントル物質を中心に検討する。すなわち、主として島弧

に噴出したマグマ中の捕獲岩および前弧域の海底に露出するかんらん岩を検討対象とする。オフィオライトかんらん岩はその履歴(オブダクション=貫入・定置はサブダクションに伴い上盤が露出)から島弧下マンツルの可能性が高いかもしれないが、起源に関して多様(例えば, Dilek and Furnes, 2011)で不確定, 不明な点も多く, 本論文では検討の対象とはしない。

我々は本論文以前に, Arai et al. (2007)で西太平洋地域のかんらん岩捕獲岩をレビューし, Arai and Ishimaru (2008)ではより幅広い地域の島弧下マンツル捕獲岩等を論じた。日本列島のかんらん岩捕獲岩は Ishiwatari et al. (2016)によりまとめられている。前弧域のかんらん岩については石井ほか(2000)によるレビューがある。本論文は Arai and Ishimaru (2008)に新たな情報を加え再検討したものである。レファレンスとして海洋底かんらん岩(深海性かんらん岩) (Dick and Bullen, 1984; Dick et al., 1984など)を用いる。

超マフィック岩の岩石名については, 基本的に標準的教科書として用いられている都城・久城(1975)で使われているものを使用する。辞典などでは異なった名称が使用されているので注意が必要である。例えば, 都城・久城のピロクシナイトに対して輝石岩(輝岩), などである。また, レールゾライトとハルツバーガイト(ハルツバージャイト)の区別については特別な注意が必要である。一般的にはかんらん岩のうち輝石類が10%以上で, 単斜輝石が5%以下のものをハルツバーガイト, 5%以上(直方輝石[斜方輝石]5%以上)のものをレールゾライトと称している。ただ, この区分は余りにも形式的であり(岩石分類上やむを得ない面もあるが)岩石成因論的議論には不便である(例えば, Kushiro, 1969)。高温で形成された輝石は冷却に伴いソルバスに沿って両輝石の組成, 量比が変化する。リソスフェアを形成するやや冷えたかんらん岩中では単斜輝石/全輝石比が比較的高い。すなわち, 超マフィック岩類のモード組成は平衡温度とともに変化するのである。かんらん岩成因論の上では, ソリダス条件下での単斜輝石の有無が重要であるので, 冷却された岩石のモードをサブソリダスのものに直す必要がある。本論文では, Arai (1984)により単斜輝石/全輝石比=0.1をハルツバーガイト, レールゾライトの境界とする。同様に, レールゾライト, ウェールライト間の境界も検討が必要であろう(Kushiro, 1969を参照)。

また, かんらん岩類はほぼ全てクロムスピネルを含み, ざくろ石を欠く。斜長石を含むマンツルかんらん岩は目瀉のものがある(例えば, Takahashi, 1986)。本論で扱う岩石は主として環太平洋地域のものとなる(Fig. 1)。

島弧下マンツル物質の産状

1. かんらん岩捕獲岩

島弧下マンツル捕獲岩とみなされるものには2種類ある。1つは島弧マグマに包有されるかんらん岩であり, その起源に疑念の余地はない。他は, 島弧に噴出した非島弧性マグマ(アルカリ玄武岩)中の捕獲岩である。ホスト岩(母岩)は島弧

マグマではないものの島弧上に噴出しており, その超マフィック捕獲岩(特にグループI; Frey and Prinz, 1978)は島弧深部を構成していたものであろう。ただし, この種類の捕獲岩類にはグループII(Frey and Prinz, 1978)と呼ばれるホスト岩と同源のアルカリ玄武岩からの若い集積岩(ダナイト, ウェールライト, パイロクシナイト類など)が含まれる(Arai et al., 2000, 2001)。一方グループIのかんらん岩(ダナイト, ハルツバーガイト, レールゾライト)は変成岩的性質を示し, 島弧下マンツルを代表する岩石であろう(Arai et al., 2000)。島弧で得られるグループIIの捕獲岩は, 最近付加された“若い島弧深部物質”と言えるが, アルカリ玄武岩が噴出する様々な場所で得られ島弧固有の物質とは言えないため本論文では扱わない。

島弧マグマ中のかんらん岩捕獲岩は, 東北日本弧, 秋田県目瀉火山(Kuno, 1967; Takahashi, 1986; Aoki, 1987)および渡島大島火山(二ノ宮・荒井, 1992), カムチャツカ弧のアバチャ(Avacha)火山(Arai et al., 2003a; Ishimaru et al., 2007), シベルチ(Shiveluch)火山(Bryant et al., 2007)およびバロバヤム火山域(Valovayam Volcanic Field; VVF) (Kapezhinskas et al., 1995), フィリピン, ルソン弧のイラヤ(Iraya)火山(Vidal et al., 1989; Arai et al., 2004)およびピナツボ(Pinatubo)火山(Kawamoto et al., 2013; Yoshikawa et al., 2016)で典型的に得られる(Fig. 1)。ほかには, 南西太平洋, パプア=ニューギニアのビスマルク地域のタバール=リ=ヒール=タンガ=フェニ(Tabar-Lihir-Tanga-Feni; TLTF)弧の諸海山(McInnes et al., 2001; Franz et al., 2002; McAlpine, 2015), 西ビスマルク弧のリッター(Ritter)海山(Tollan, 2014; McAlpine, 2015), バヌアツ(ニュー・ヘブリデス弧)のメラバ(Merelava)火山(Barsdell and Smith, 1989)がある(Fig. 1)。小アンチール弧のグレナダ(Grenada)火山(Parkinson et al., 2003), メキシコのエルペニオン(El Peñon)火山(Blatter and Carmichael, 1996)も島弧性であり, かんらん岩捕獲岩が得られる(Fig. 1)。これらのうち渡島大島, 目瀉火山を除くとほぼすべてが火山前線上にある(Fig. 1)。

島弧マンツル捕獲岩を含む非島弧性マグマの典型例は西南日本弧の新生代アルカリ玄武岩類であろう(Takahashi, 1978a, b; Aoki, 1987; Arai et al., 2000, 2001) (Fig. 1)。隠岐島後, ^{おんやま}男山, 荒戸山, 野山岳, 川下, 黒瀬, 高島, 新宮などの多くのかんらん岩捕獲岩産地がある(Fig. 1)。また, カナダ~メキシコの太平洋沿岸(いわゆるアメリカン・コルディレラで, カスケードを含む)のマンツル・ウェッジの(または, かつてマンツル・ウェッジだった)岩石をアルカリ玄武岩系のマグマが捕獲している(Canil and Scarfe, 1989; Heinrich and Besch, 1992; Brandon and Draper, 1996; Harder and Russel, 2006) (Fig. 1)。アラスカのヌニバク(Nunivak) (Francis, 1976), バハ・カリフォルニアのサン・クインティン(San Quintin) (Cabanes and Mercier, 1988)も同様である(Fig. 1)。アメリカのベアポー(Bearpaw)やコロラド台地(Colorado Plateau)の単成火山類はミネソタ等のアルカリに富む岩石よりなり, かんらん岩捕獲岩

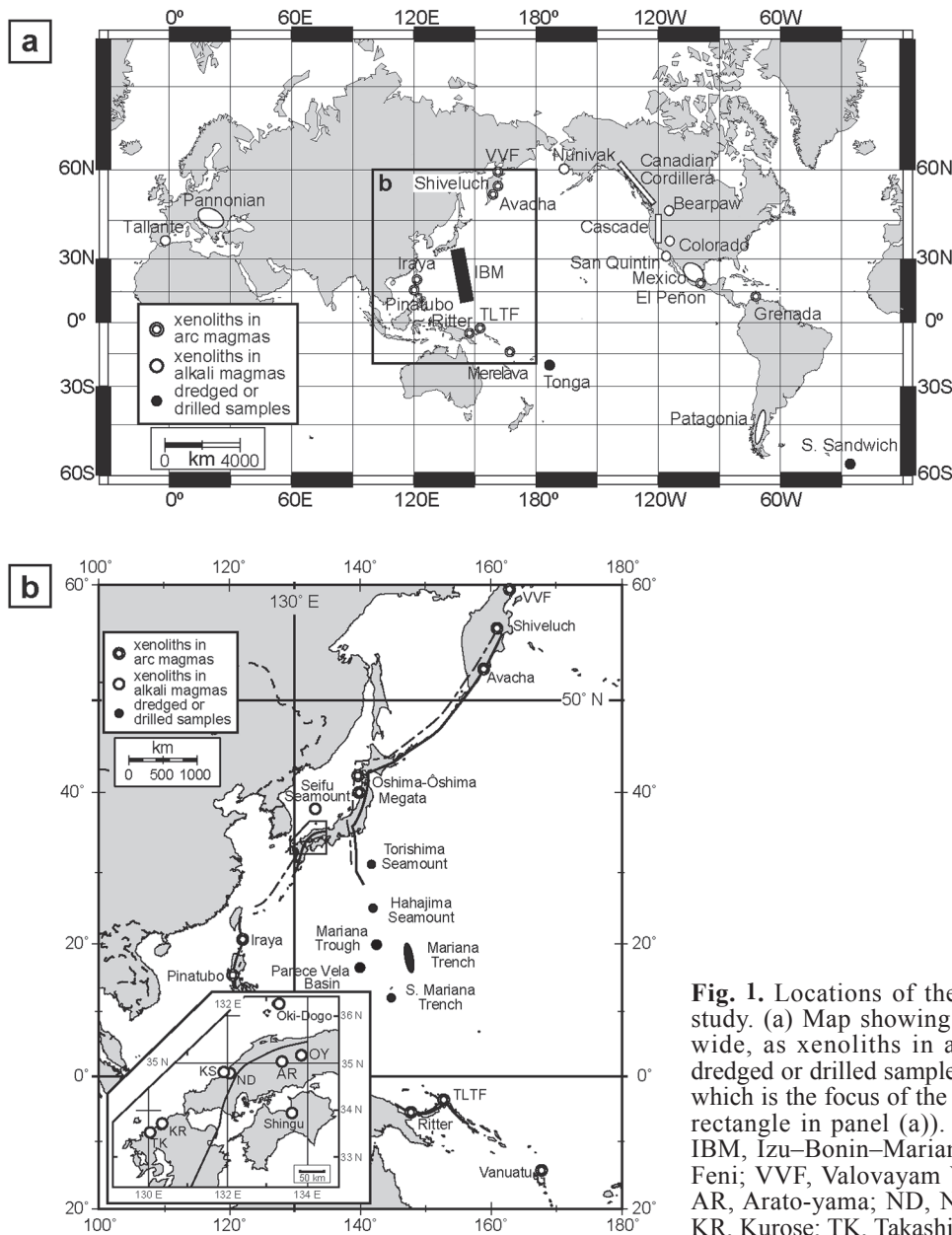


Fig. 1. Locations of the peridotites examined in this study. (a) Map showing peridotite occurrences worldwide, as xenoliths in arc and alkali magmas, or as dredged or drilled samples. (b) The Western Pacific area, which is the focus of the present study (marked by black rectangle in panel (a)). Abbreviations are as follows: IBM, Izu–Bonin–Mariana; TLTF, Tabar–Lihir–Tanga–Feni; VVF, Valovayam Volcanic Field; OY, On-yama; AR, Arato-yama; ND, Noyamadake; KS, Kawashimo; KR, Kurose; TK, Takashima.

を多産する。かんらん岩捕獲岩は新生代のファラロン・プレートの低角沈み込み帯のマントル・ウェッジを代表している (Smith and Riter, 1997; Smith et al., 1999; Facer et al., 2009)。ホストマグマ生成のセッティングは複雑であるが、ファラロン・プレートのデタッチメントに関係しており非島弧性が示唆される (Facer et al., 2009; Roy et al., 2009; Levander et al., 2011)。

背弧海盆マントル物質も捕獲岩として得られている。清風海山(二ノ宮ほか, 2007の“竹島海山[仮称]”) (Fig. 1)ではアルカリ玄武岩中の捕獲岩として日本海盆下のマントル物質が得られる(二ノ宮ほか, 2007)。南米パタゴニアはアンデス弧の背弧部に相当しているが、かんらん岩捕獲岩がアルカリ玄武岩に包有されている(例えば, Laurora et al., 2001; Rivalenti et al., 2004a, b; Bjerg et al., 2005; Faccini et al.,

2013) (Fig. 1)。

ヨーロッパのハンガリー、オーストリア、ルーマニアにまたがるカルパート=パノニア(パノニア)地域(盆地) (Fig. 1)は島弧ではないものの、かつて島弧的環境にあった可能性が高い (Szabó et al., 1992)。より若いアルカリ玄武岩がかんらん岩捕獲岩を多量に包有している(例えば, Szabó and Taylor, 1994; Vaselli et al., 1995; Szabó et al., 2004)。スペイン、ジブラルタル弧のタヤンテ(Tallante) (Fig. 1)も同様の状況を有し (Platzman, 1992; Turner et al., 1999)、島弧マントルかんらん岩捕獲岩が得られる (Arai et al., 2003b; Shimizu et al., 2004)。

以上で述べたハルツバーナイトおよびレールゾライトはダナイトやパイロクシナイト(主としてウェブステライト、クリノパイロクシナイト)を伴う(例えば, Arai et al., 2000,

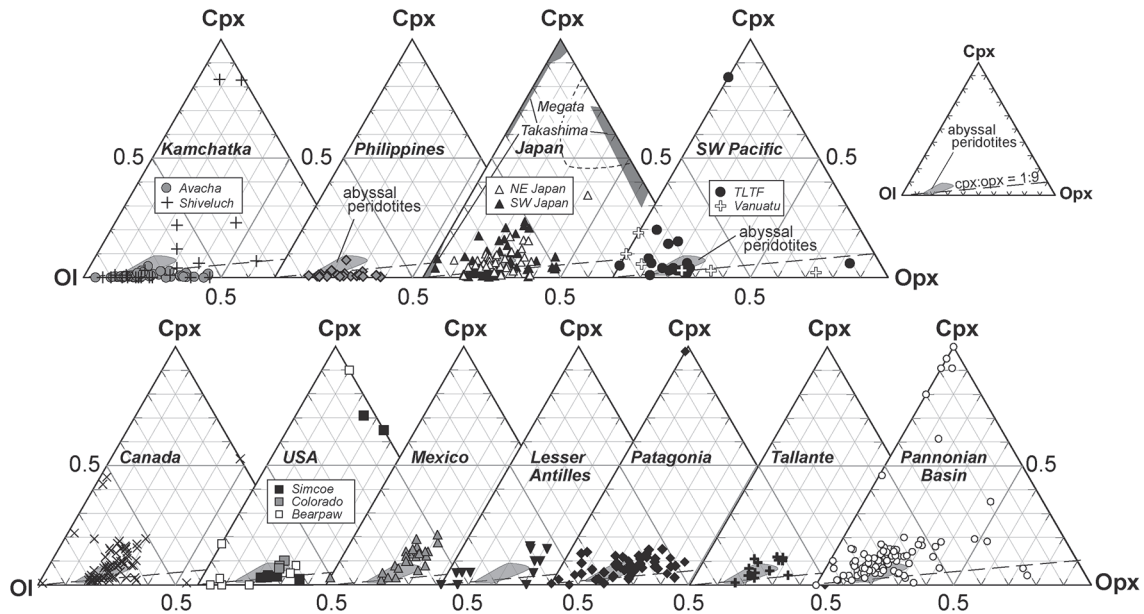


Fig. 2. Ternary plots showing the modal amounts of olivine (Ol), orthopyroxene (Opx), and clinopyroxene (Cpx) in peridotites and related xenoliths from arcs and arc-related settings. Data sources: Ishimaru (2004), Bryant et al. (2007), Ishimaru et al. (2007), and Ionov (2010) for Kamchatka; Kida (1988) and Arai et al. (2004) for the Philippines; Abe (1997), Abe et al. (1992), Arai et al. (2000, 2001), and Hirai (1986) for Japan; Barsdell and Smith (1989), Franz et al. (2002), and McInnes et al. (2001) for the SW Pacific; Brandon and Draper (1996), Francis (1987), Harder and Russell (2006), and Peslier et al. (2002) for Alaska and Canada; Downes et al. (2004), Smith and Riter (1997), and Smith et al. (1999) for the USA; Blatter and Carmichael (1998) and Luhr and Aranda-Gómez (1997) for Mexico; Parkinson et al. (2003) for the Lesser Antilles; Faccini et al. (2013), Rivalenti et al. (2004a, b), and Schilling et al. (2005) for Patagonia; Beccaluva et al. (2004) for Tallante; Bali et al. (2002), Downes et al. (1992), Downes et al. (1995), Nédli et al. (2015), Szabó and Taylor (1994), Szabó et al. (1995), and Vaselli et al. (1995) for the Pannonian Basin.

2001; 荒井ほか, 2005) (例えば, 西南日本弧; Fig. 1). ダナイト中にはしばしばクロムスピネルが濃集しクロミタイトを形成する (Arai and Abe, 1994; Miura and Arai, 2014).

2. 前弧かんらん岩

トンガやマリアナの海溝の陸側斜面にかんらん岩が露出するのは古くから知られている (Fisher and Engel, 1969; Bloomer, 1983; Bloomer and Hawkins, 1983) (Fig. 1). また, 伊豆-小笠原-マリアナ (IBM) 海溝 (Fig. 1) では, しばしば前弧域に蛇紋岩海山と呼ばれる円錐状の蛇紋岩 (一部蛇紋岩化したかんらん岩) 体 (底面の直径 10~30 km; 比高 1~2 km) が見いだされる (Ishii, 1985; Ishii et al., 1992; 石井ほか, 2000; Okamura et al., 2006). 南大西洋, 南サンドウィッチ (South Sandwich) 弧 (Fig. 1) でも, 海溝陸側斜面と海溝-断裂帯会合部でかんらん岩がドレージされている (Pearce et al., 2000). 最近では, IBM 海溝の陸側斜面から得られたかんらん岩類の研究が進んでいる (Michibayashi et al., 2009; Morishita et al., 2011; Sato and Ishii, 2011). ただし, これらのうちマリアナ弧南部の (Fig. 1) もの (Michibayashi et al., 2009; Sato and Ishii, 2011) は, 背弧海盆 (マリアナトラフ) 拡大に関連した活動の影響を受けている (Ribeiro et al., 2013) 可能性があり注意が必要である.

海溝陸側斜面は, 下部がかんらん岩やガブロ, より上部は様々な程度に変質したドレライト, 火山岩 (玄武岩, ポニナイト, 安山岩, デイサイト), 堆積岩よりなる (Fisher and

Engel, 1969; Bloomer, 1983; Bloomer and Hawkins, 1983; Bloomer and Fisher, 1987; Sato and Ishii, 2011; Morishita et al., 2011). 蛇紋岩海山は主としてかんらん岩 (80~90% を占める) より構成され, 変成作用を受けたマフィック岩 (ガブロ, ドレライト, 玄武岩) (20~10% を占める) を伴う (石井ほか, 2000). また, 高压変成岩も見出される (Maekawa et al., 1993).

3. 背弧海盆かんらん岩

背弧海盆は島弧近傍の海洋であるが, そのマンツルの岩石学的性質はつまびらかではない. 背弧海盆には平均的水深が深いなどの特徴があり (Tamaki and Honza, 1991), マンツル物質の回収に制約があるためである. その中で, マリアナ弧の背弧に位置するパレス・ベラ海盆 (Parece Vela Basin) のゴジラ・メガムリオン (Godzilla Megamullion) と呼ばれる巨大な海洋コア・コンプレックス (Ohara et al., 2001) および拡大軸セグメントでは, かんらん岩などがドレージやダイブで得られ研究が進んでいる (Ohara et al., 1996, 2003; Sanfilippo et al., 2013; Loocke et al., 2013). また, マリアナトラフ (Mariana Trough) でもかんらん岩が得られている (Ohara et al., 2002).

前述のように背弧海盆下マンツル物質は火山岩中の捕獲岩としても得られている.

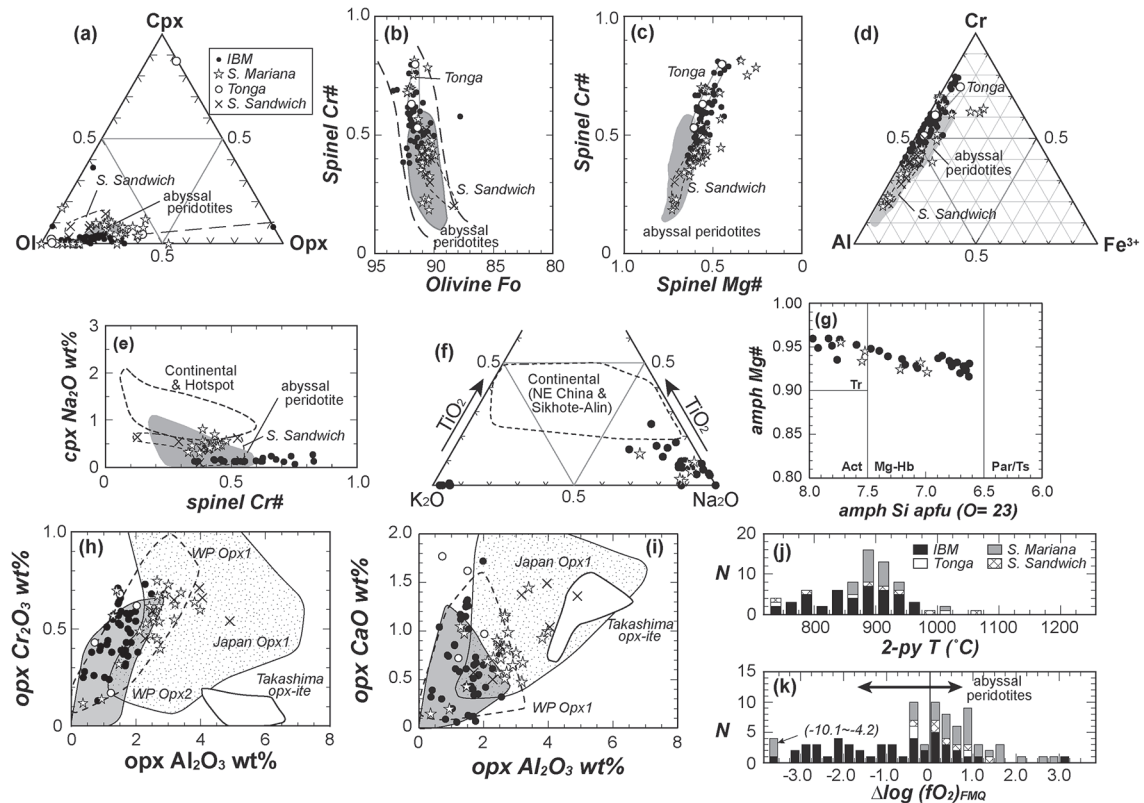


Fig. 3. Characteristics of fore-arc and sea-floor peridotites obtained by dredging, dive, or drilling. (a) Modal amounts of olivine (Ol), orthopyroxene (Opx) and clinopyroxene (Cpx). (b) Relationship between the Fo content of olivine and the Cr/(Cr + Al) atomic ratio (Cr#) of chromian spinel. (c) Relationship between the Mg/(Mg + Fe²⁺) atomic ratio (Mg#) and the Cr# of chromian spinels. (d) Trivalent cation ratios of chromian spinels. (e) Relationship between the Na₂O content of clinopyroxene and the Cr# of chromian spinel. (f) TiO₂-K₂O-Na₂O weight ratios of hydrous minerals (amphiboles and phlogopites). (g) Relationship between the Mg# and the number of Si atoms on O=23 of amphiboles. (h) and (i) Relationships between the Al₂O₃ content and the Cr₂O₃ (h) and CaO (i) contents of orthopyroxenes. (j) Histogram of two-pyroxene equilibrium temperatures. (k) Histogram of calculated oxygen fugacities relative to the fayalite-magnetite-quartz buffer. See other figures for legend information. Data sources: Bloomer and Fisher (1987) for Tonga; Pearce et al. (2000) for the South Sandwich region; Bloomer and Hawkins (1983), Michibayashi et al. (2011), Ohara and Ishii (1998), and Sato and Ishii (2011) for the southern Mariana; Bloomer and Hawkins (1983), Ishii (1985), Ishii et al. (1992, 2000), Parkinson and Pearce (1998), and Okamura et al. (2006) for Izu-Bonin-Mariana (except southern Mariana).

記載岩石学的特徴

1. かんらん岩捕獲岩

島弧のかんらん岩の岩相はハルツバーグイト～レールゾライトまで変化に富む(Fig. 2)。比較的単純な履歴を有する海洋底マントルと比較して、複雑な履歴が予想される島弧下マントルは、岩相も多様である。モード的には島弧下かんらん岩は、海洋底マントルかんらん岩よりメルト成分(輝石類特に単斜輝石)に富むレールゾライトから、単斜輝石に乏しいハルツバーグイトまで多様である(Fig. 2)。

カムチャツカ弧(アバチャ火山)やフィリピン、ルソン弧(イラヤ火山、ピナツポ火山)などの火山前線上の火山では、単斜輝石に極めて乏しく直方輝石に富むハルツバーグイトが優勢であり、ダナイトを伴う(Fig. 2)。レールゾライトは極めてまれであり、ピナツポで1試料発見されている(単斜輝石含有量約6%)のみである。これらのホスト岩のマグマは玄武岩ではなく、安山岩～シヨシヨナイトである。これら火

山前線付近から得られるかんらん岩の共通の特徴としては、かんらん石を置き換える二次的な直方輝石の産出がある。脈状またはスポット的にかんらん石を置換する。置換組織は明瞭であり、シリカに富む流体/マグマがかんらん石と反応して直方輝石を生成したことが読み取れる(Arai et al., 2003a, 2004; Ishimaru et al., 2007; Bryant et al., 2007)。この二次的直方輝石は背弧側の目瀉火山(玄武岩～デイサイト)や渡島大島火山(安山岩)中のかんらん岩には認められない(Takahashi, 1986; 阿部ほか, 1992, 1995; ニノ宮・荒井, 1992)。ただし、最近発見された北海道沖日本海の後志海山のかんらん岩捕獲岩にはかんらん石を置換する直方輝石が認められる(Ichiyama et al., 2013, 2016)。直方輝石はしばしば放射状集合体を呈する(Arai et al., 2004; Ishimaru et al., 2007)。この形状は、脱蛇紋岩化かんらん岩(蛇紋岩が脱水したもの; 例えば, Arai [1975])中の二次的直方輝石のそれと類似している(Arai and Kida, 2000)。Arai et al.(2006)は、これらとは異なった起源をもつ二次的直方輝

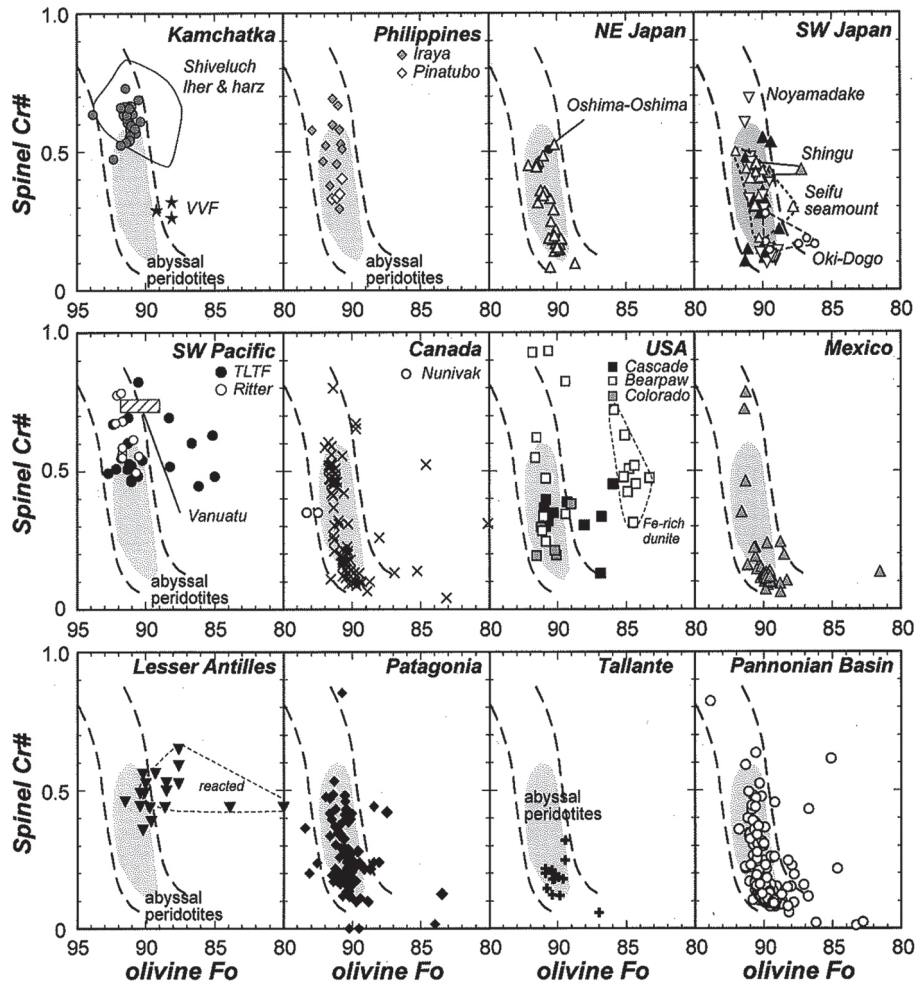


Fig. 4. Ternary plots showing the relationship between the Fo content of olivine and the Cr/(Cr + Al) ratio of chromian spinel in peridotite xenoliths. The field between the broken lines is the olivine–spinel mantle array (OSMA), which is the trend for peridotite restites formed in the spinel lherzolite facies (Arai, 1994a). Data sources: Arai et al. (2003a), Bénard and Ionov (2013), Bryant et al. (2007), Ionov (2010), Ishimaru (2004), Ishimaru et al. (2007), and Kepezhinskas et al. (1995) [VVF, Valovayam Volcanic Field] for Kamchatka; Arai and Kida (2000) and Arai et al. (2004) for the Philippines; Abe (1997), Abe et al. (1992, 1995, 1998, 2003), Ninomiya and Arai (1992), and Takahashi (1978a) for the NE Japan arc; Takahashi (1978a), Hirai (1986), Goto and Arai (1987), Arai et al. (2000), and Ninomiya et al. (2007) for the SW Japan arc; Franz and Wirth (2000), McInnes et al. (2001), Franz et al. (2002), Tollan (2014), and McAlpine (2015) for the SW Pacific; Francis (1976), Canil and Scarfe (1989), Brandon and Draper (1996), Ducea and Saleeby (1998), Shi et al. (1998), Peslier et al. (2002), and Harder and Russell (2006) for Alaska and Canada; Draper (1992), Ertan and Leeman (1996), Downes et al. (2004), Ritter and Smith (1996), Smith and Ritter (1997), Smith et al. (1999), and Facer et al. (2009) for the USA; Cabanes and Mercier (1988), Blatter and Carmichael (1998), Heinrich and Besch (1992), and Luhr and Aranda-Gómez (1997) for Mexico; Parkinson et al. (2003) for the Lesser Antilles; Rivalenti et al. (2004a, b), Laurora et al. (2001), Kilian and Stern (2002), Bjerg et al. (2005), Schilling et al. (2005), Wang et al. (2007), and Faccini et al. (2013) for Patagonia; Arai et al. (2003b), Beccaluva et al. (2004), Shimizu et al. (2004, 2008), Rampone et al. (2010) for Tallante; and Szabó and Taylor (1994), Downes et al. (1995), Konecny et al. (1995), Szabó et al. (1995), Vaselli et al. (1995), Dobosi et al. (1999), Embey-Istztin et al. (2001), Downes et al. (1992), and N dli et al. (2015) for the Pannonian Basin.

石を報告した。それは、ダナイト岩片を含むオルソパイロクシナイト捕獲岩およびダナイト中の直方輝石パッチ～オルソパイロクシナイト小脈を形成している(Arai et al., 2006)。

また、角閃石およびフロゴパイトが、火山前線(Arai et al., 2004; Ishimaru et al., 2007; Yoshikawa et al., 2016)～背弧側(Takahashi, 1986; Arai, 1986; Abe and Arai, 1993)までのマントルで幅広く形成されている。これらの鉱物は上記の二次的直方輝石としばしば伴う(Ishimaru et al.,

2007)。

我々は、イラヤ火山(Arai et al., 1996; Arai and Kida, 2000)およびアバチャ火山(Arai et al., 2003a; Ishimaru et al., 2007)の捕獲岩のかんらん石の粒径が変化に富んでいることを見出し、かんらん岩を粗粒なもの(C-type)と細粒なもの(F-type)に分類した。F-typeかんらん岩はC-typeかんらん岩をブロックとして包有し、F-typeかんらん岩はマントル内の塑性変形によりC-typeのものから形成されたこ

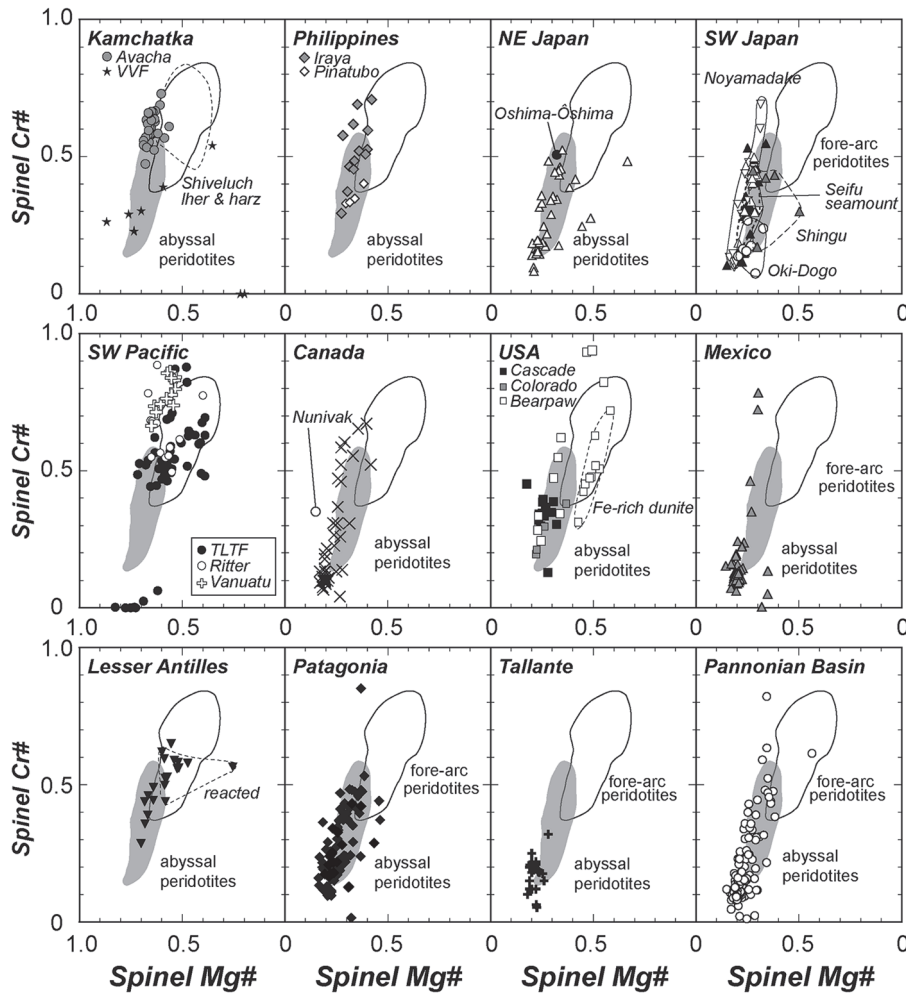


Fig. 5. Relationship between the $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ and $Cr/(Cr + Al)$ atomic ratios of chromian spinels in peridotite xenoliths from various regions. The fore-arc peridotite field is after Ishii et al. (1992). Data sources: Dick and Bullen (1984) and the references cited in Fig. 4.

とを示している。F-type のかんらん岩には含水鉱物や二次的直方輝石がより普遍的に形成されている (Arai et al., 2004; Ishimaru and Arai, 2011)。Takeuchi and Arai (2015) は、目瀉火山の一目瀉からカタクラスティックなかんらん岩捕獲岩を発見し、マントル内でのかんらん岩の脆性破壊の可能性を提示した。

Fig. 2 からわかるように、多くの島弧起源マントルかんらん岩は、モード組成上海洋底かんらん岩と大差ない性質を示す (例えば、日本列島、パノニア盆地、タヤンテ)。ただし、海洋底では見出されていない、ほぼ単斜輝石を欠く (単斜輝石量が極端に低い) ハルツバーガイト (例えば、カムチャツカ弧、ルソン弧) の産出は島弧特有である。ウェールライトは海洋底ではまれ (Arai and Takemoto, 2007) であるが、島弧では極めて普通に捕獲岩として産する (Fig. 2; 例えば、Arai et al., 2000; Muroi and Arai, 2014)。

2. 前弧かんらん岩

かんらん岩は主としてハルツバーガイトであり、少量のダナイトを伴う (Fig. 3a)。一般的にレールゾライトは比較的まれである (Bloomer and Fisher, 1987; Ishii et al., 1992; 石井ほか, 2000) が、南サンドウィッチ弧ではレールゾライト的な岩石が卓越する (Pearce et al., 2000)。また、マリア

ナ海溝南部ではレールゾライトが見出されている (Michibayashi et al., 2009)。マリアナ弧南部のかんらん岩 (ハルツバーガイト) にはしばしば斜長石が含まれる (Bloomer and Hawkins, 1983; Michibayashi et al., 2009; Sato and Ishii, 2011)。かんらん岩類は強く蛇紋岩化しているものが多い (例えば、Ishii et al., 1992)。蛇紋岩の主要構成鉱物はクリソタイル/リザーダイトであるが、蛇紋岩海山では比較的鉄に富むかんらん石と平衡にあるアンチゴライトも見出される (Murata et al., 2009a, b)。また、角閃石 (トレモライト~マグネシオホルンブレンド) がしばしば形成されている (例えば、Ohara and Ishii, 1998; Okamura et al., 2006)。

3. 背弧海盆かんらん岩

清風海山 (日本海盆) の捕獲岩は小さいものが多くモードの測定は困難であるが、レールゾライト的なものが卓越する (二ノ宮ほか, 2007)。パレスベラ海盆のかんらん岩はハルツバーガイト、レールゾライトが主であり、斜長石がしばしば含まれる (Ohara et al., 1996, 2003; Loocke et al., 2013)。ダナイトやトロクトライトも認められ (Ohara et al., 2003; Sanfilippo et al., 2013)、全体的に中央海嶺付近で得られるものに類似する (Sanfilippo et al., 2013)。マリアナトラフのものはほぼハルツバーガイト (斜長石を欠く) である

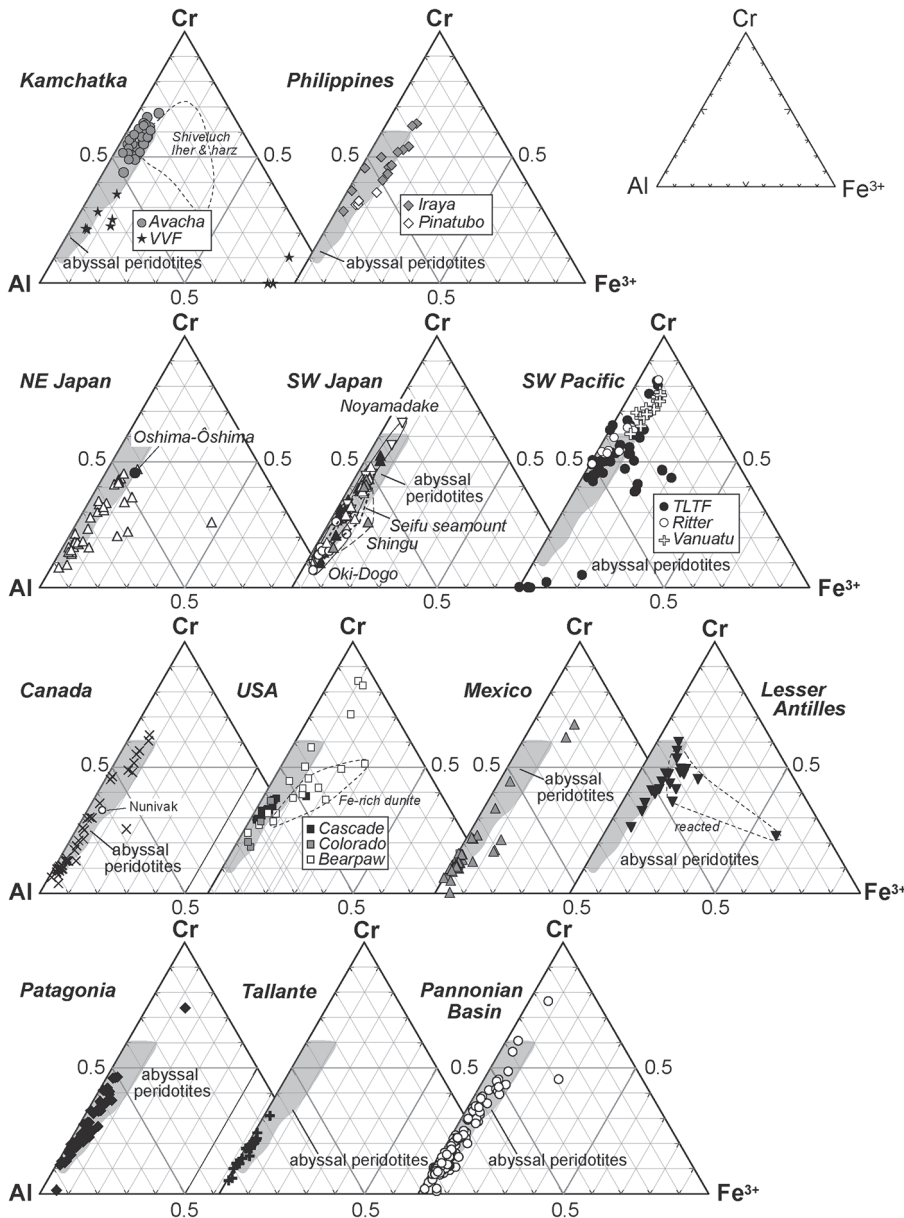


Fig. 6. Cr–Al–Fe³⁺ atomic ratios of chromian spinel in peridotite xenoliths. Data sources: Arai et al. (2006) and the references cited in Fig. 4.

(Ohara et al., 2002).

鉱物化学的特徴

マントルかんらん岩中のかんらん石の Fo 値 (= 100 Mg/[Mg+Fe²⁺] 原子比) とクロムスピネルの Cr# (= Cr/[Cr+Al] 原子比) の関係は、モード組成と良い相関関係がある (Arai, 1994a)。アバチャ(カムチャツカ弧)、リッター(パプア・ニューギニア) (McAlpine, 2015) のかんらん岩は高 Cr# (>0.5) のスピネルを含み、典型的なハルツバーガイトである (Fig. 4)。イラヤ(ルソン弧)でもハルツバーガイトが優勢である (Figs. 2, 4)。他のいくつかの産地(西南日本弧の野山岳など)でもハルツバーガイトが散見される (Fig. 2)。モード組成的に海洋底かんらん岩と類似していた (Fig. 2) マントルかんらん岩類は、かんらん石 (Fo 値)–スピネル (Cr#) 関係でも類似性を示す (例えば東北日本弧のもの) (Fig. 4)。

また、Fig. 4 でかんらん石–スピネルマントル列 (OSMA) から大きく低 Fo 値側にはずれるもの (例えば、南西太平洋や北米西岸; Fig. 4) は、たいていマグマとの二次的接触により反応を受けたものである (Arai et al., 2000)。

クロムスピネルの Mg# (= Mg/[Mg+Fe²⁺] 原子比; スピネルの Fe²⁺, Fe³⁺ 量は化学量論式を仮定して計算) と Cr# は、ほぼ全てのサンプルでほぼ負の相関を示し、海洋底かんらん岩の領域またはその高 Cr#, Mg# 延長上にプロットされる (Fig. 5)。低 Mg# 側にずれているもの (例えば、南西太平洋のもの) (Fig. 5) は、前弧かんらん岩のように低い平衡温度 (Okamura et al., 2006) が主要因ではなく、交代作用によるものと考えられる (Fig. 4 参照)。高 Mg# 側にずれているもの (例えば西南日本弧、野山岳 (Fig. 5) は、高い平衡温度によるものである (後述)。

多くのサンプルのクロムスピネルは Fe³⁺/(Cr+Al+Fe³⁺)

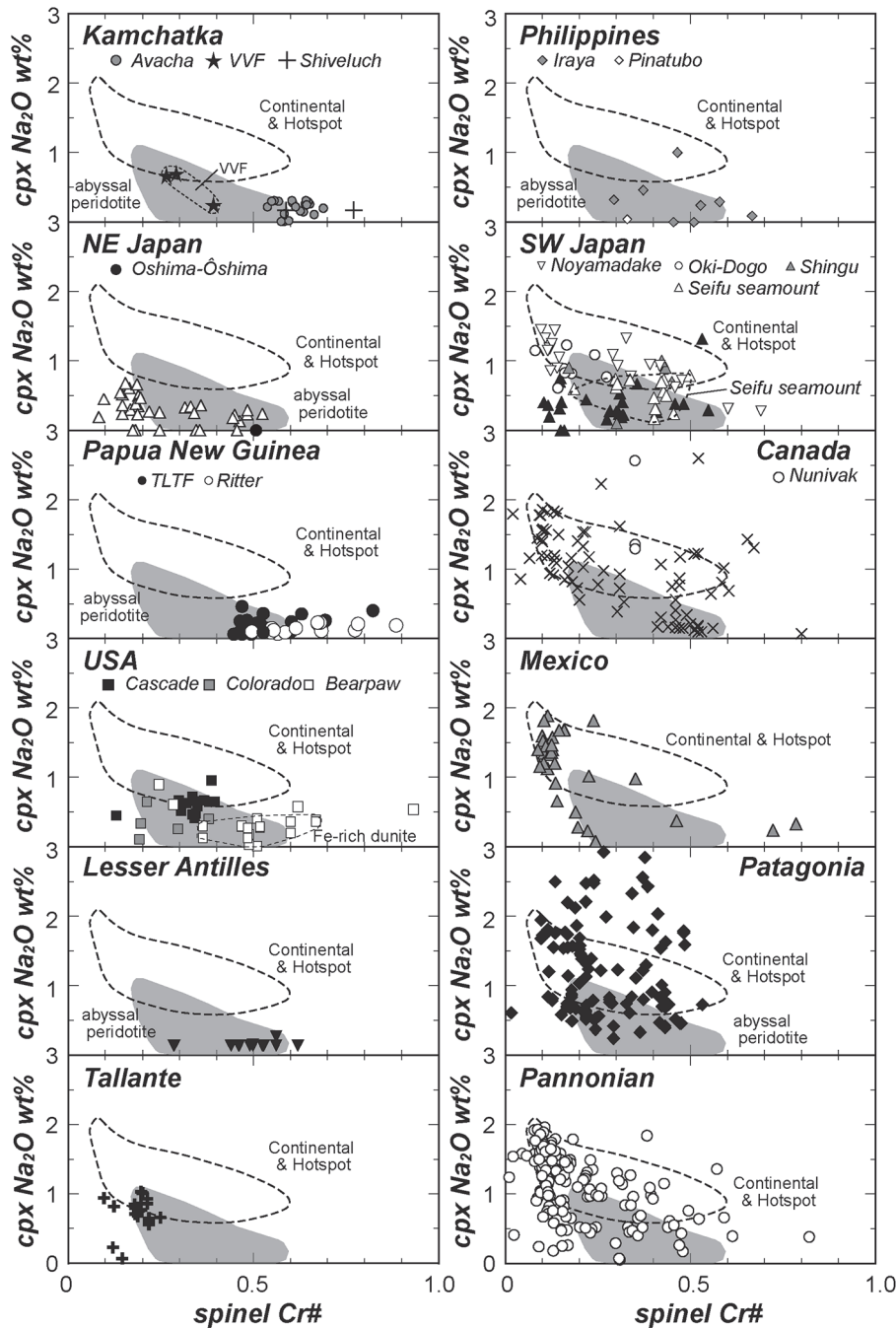


Fig. 7. Relationships between the Cr/(Cr + Al) atomic ratio of chromian spinel and the Na₂O content of clinopyroxene in peridotite xenoliths. Data sources are the same as in Fig. 4. The fields for the abyssal peridotite and continental and oceanic hotspot peridotites are after Arai (1991).

原子比が低く、0.1 以下である (Fig. 6)。OSMA より低 Fo 値側にずれるもの (Fig. 4)、スピネルの Mg#-Cr# トレンドで低 Mg# にずれるもの (Fig. 5) は、スピネルの Fe³⁺ 比が高くなる傾向がある (例えば、南西太平洋のもの) (Fig. 6)。

単斜輝石 (Na)-クロムスピネル (Cr#) 関係はスピネルかんらん岩の平衡圧力を反映すると考えられる (Arai, 1991, 1994a)。これらの値は一連のかんらん岩ではほぼ負の相関を示す (Arai, 1991, 1994a; Fig. 7)。かんらん岩中の単斜輝石の Na はヒスイ輝石 (NaAlSiO₆) 成分として含有されていると考えられる。多くのかんらん岩は海洋底かんらん岩の領域 (および高 Cr# 側延長部分にほぼ収まる) (例えば、東北

日本弧、ルソン弧、カムチャツカ弧) に収まるものの、単斜輝石が Na に富むものも認められる (Fig. 7)。西南日本弧では、野山岳などの高温のかんらん岩 (後述) の単斜輝石が Na に富む傾向がある。Na₂O 含有量が 2% を越えるような単斜輝石はコスモクロア (kosmochlor; NaCrSiO₆) に富むことが多く (Rivalenti et al., 2004a, b; Laurora et al., 2001)、カーボナタイト的マグマによる交代作用の産物であろう (Ikehata and Arai, 2004)。パタゴニアでは、捕獲岩中にカーボナタイト交代作用を示す様々な特徴 (鉱物組み合わせ、微量元素特性) が認められ (Laurora et al., 2001; Rivalenti et al., 2004a, b)、単斜輝石の性質と整合的である。

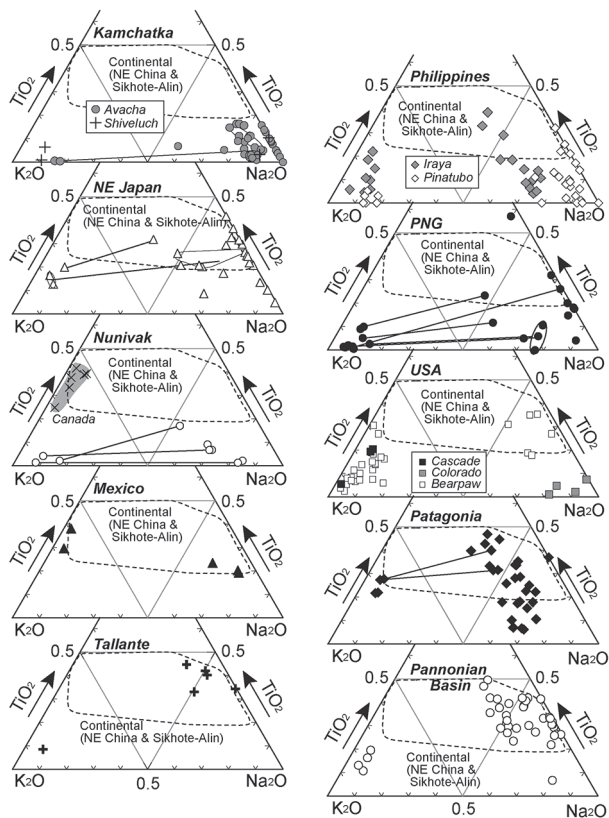


Fig. 8. TiO_2 - K_2O - Na_2O weight ratios of phlogopites and Ca-amphiboles in peridotite xenoliths. The field for phlogopites and amphiboles from continental peridotite xenoliths is from Arai and Ishimaru (2008). Coexisting minerals are tied. Data sources: Ishimaru (2004), Ishimaru et al. (2007), Bryant et al. (2007), Ishimaru and Arai (2008a), Ionov (2010), and Bénard and Ionov (2013) for Kamchatka; Kida (1998), Kawamoto et al. (2013), and Yoshikawa et al. (2016) for the Philippines; Arai (1986), Abe et al. (1992, 1995), and Abe (1997) for the NE Japan arc; McInnes et al. (2001) and Franz et al. (2002) for Papua New Guinea (PNG); Francis (1976), Canil and Scarfe (1989), and Peslier et al. (2002) for Alaska and Canada; Smith (1979), Draper (1992), Ertan and Leeman (1996), Blatter and Carmichael (1998), Smith et al. (1999), Downes et al. (2004), and Facer et al. (2009) for the USA; Luhr and Aranda-Gómez (1997) for Mexico; Gorrying and Kay (2000), Laurora et al. (2001), Rivalenti et al. (2004a, b), and Bjerg et al. (2005) for Patagonia; Beccaluva et al. (2004) and Shimizu et al. (2004, 2008) for Tallante; Szabó and Taylor (1994), Szabó et al. (1995), Vaselli et al. (1995), and Zanetti et al. (1995) for the Pannonian Basin.

二次的な含水鉱物(角閃石, 雲母)の組成(TiO_2 - K_2O - Na_2O 比)も多様である(Fig. 8). 角閃石はトレモラ閃石からパーガス閃石であり(Fig. 9), 雲母はすべてフロゴサイトであり, アスピドライト(フロゴサイトのNaアナログ)は見出されない. 大陸地域のマントルかんらん岩の含水鉱物はTiに富んでいるが, 島弧のものにはTiに乏しいものが存在するのが特徴である(Fig. 8). カムチャツカ弧のかんらん岩中の角閃石, フロゴサイトは特にTiに乏しい(Fig. 8). Na含有量が高い単斜輝石(Fig. 7)を含む岩石中の含水鉱物(特

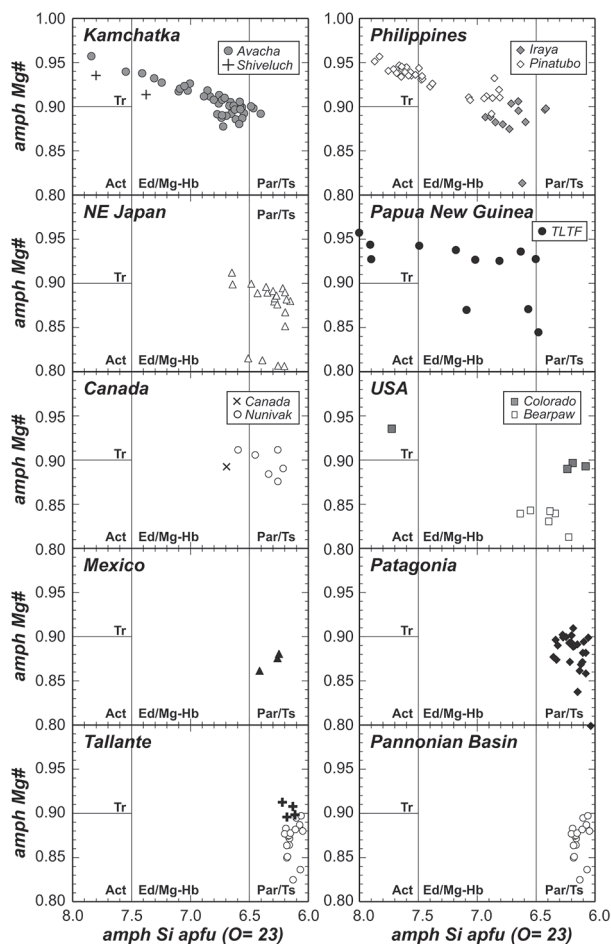


Fig. 9. Chemical characteristics and classification of Ca-amphiboles in peridotite xenoliths. Diagram modified from table 3 of Leake et al. (1997). Data sources are the same as in Fig. 8. Abbreviations are as follows: Te, tremolite; Act, actinolite; Ed, edenite; Mg-Hb, magnesiohornblende; Par, pargasite; Ts/tschermakite.

に角閃石)がよりTiに富む傾向がある(例えば, パタゴニアおよびパノニア盆地; Fig. 8).

角閃石も組成変化に富んでいる(Fig. 9). おおまかに言って, Mg#とSi含有量とは正の相関がある(Fig. 9). 島弧起源のかんらん岩の角閃石にはトレモラ閃石が存在するのが大きな特徴である. しかも, その存在がカムチャツカ弧, ピナツポ(ルソン弧), TLTF弧(パプア・ニューギニア)などの火山前線下起源のかんらん岩に限られる(Fig. 9)のは興味深い.

西南日本弧の愛媛県新宮は, 様々な点で特異な捕獲産地である(鷹村, 1978; Goto and Arai, 1987). 二次的な角閃石, フロゴサイトともにTiに富み(Goto and Arai, 1987), 他の島弧かんらん岩のもの(比較的Tiに乏しい)とは異なる(Fig. 8).

島弧かんらん岩中の交代作用で生じた二次的直方輝石は, 初生的なものに比べてAl, Ca, Crが乏しいという特徴がある(Figs. 10, 11; Arai and Kida, 2000; McInnes et al.,

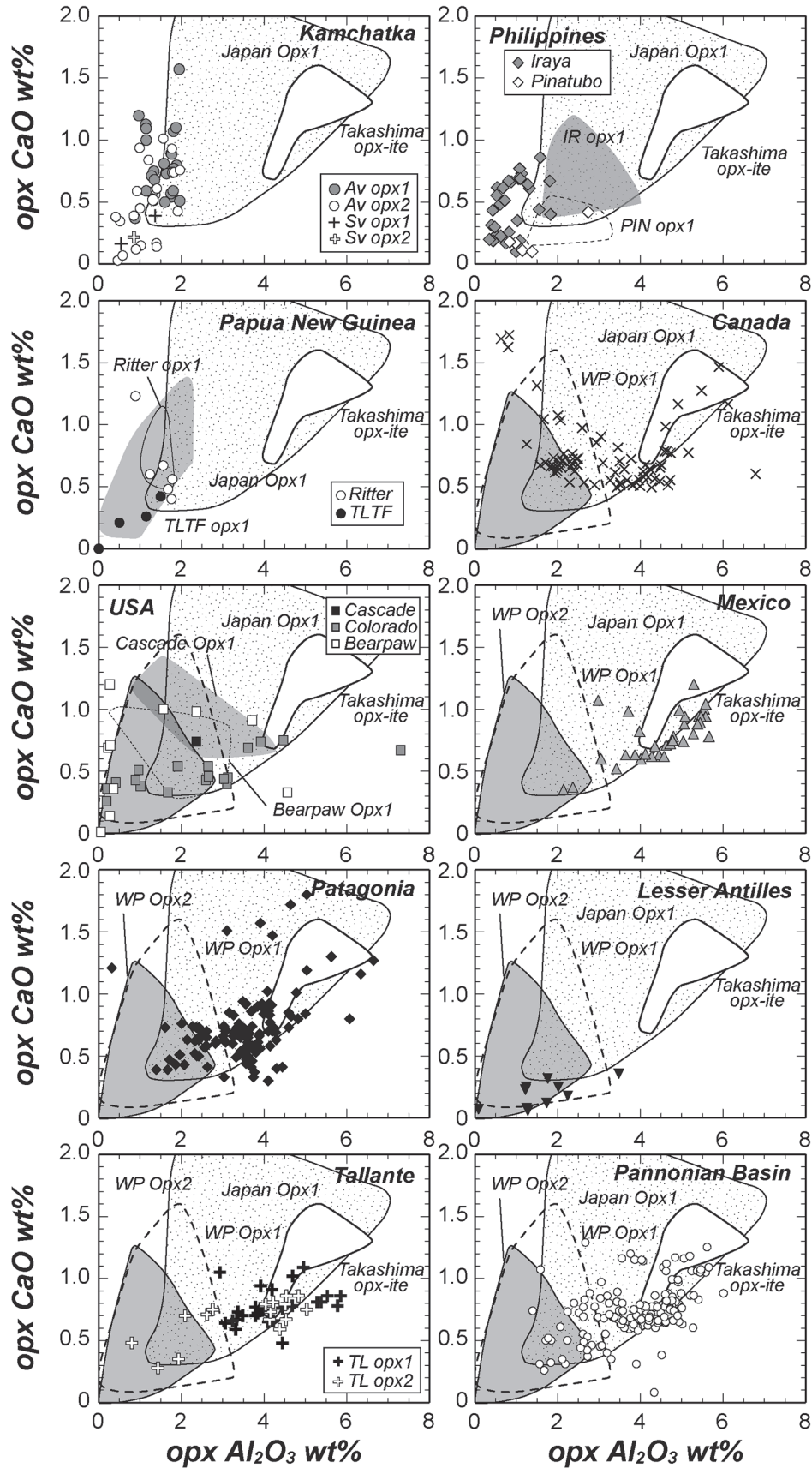


Fig. 10. Relationship between the CaO and Al₂O₃ contents of orthopyroxenes in peridotites xenoliths. Abbreviations are as follows: Opx1, primary orthopyroxene; Opx2, secondary orthopyroxene; WP opx1, primary orthopyroxene associated with Opx2 (WP opx2) from Western Pacific peridotite xenoliths; Av, Avacha; Sv, Shiverluch; IR, Iraya; PIN, Pinatubo; TLTF, Tabar–Lihir–Tanga–Feni arc (PNG); and TL, Tallante. The field for secondary orthopyroxene (or orthopyroxenite) from Takashima, SW Japan arc, is shown for comparison (Arai et al., 2006). Data sources are as in Fig. 4.

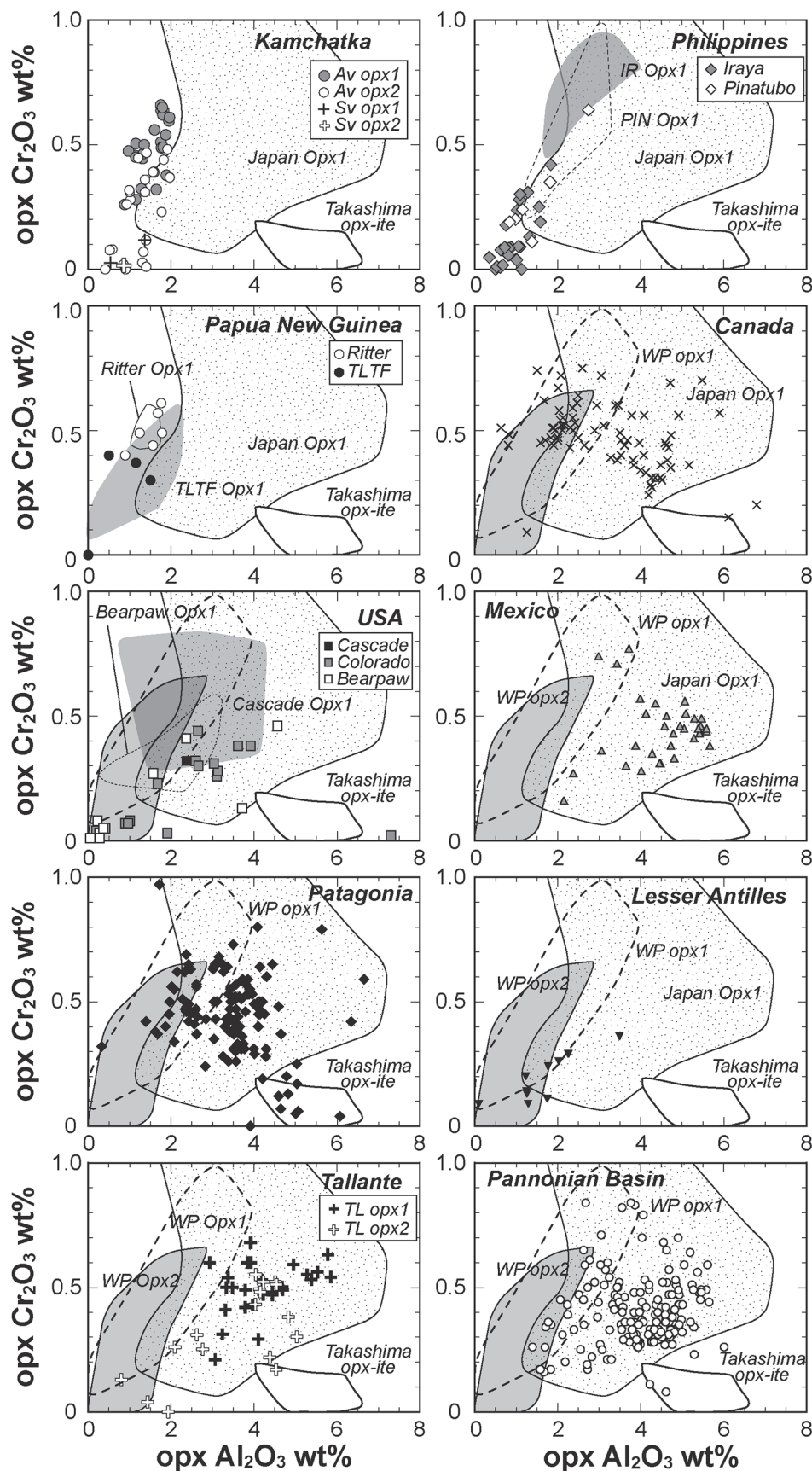


Fig. 11. Relationships between Cr_2O_3 and Al_2O_3 contents of orthopyroxenes in peridotite xenoliths. Abbreviations are as follows: Opx1, primary orthopyroxene; Opx2, secondary orthopyroxene; WP opx1, primary orthopyroxene associated with Opx2 (WP opx2) from Western Pacific peridotite xenoliths; Av, Avacha; Sv, Shiverluch; IR, Iraya; PIN, Pinatubo; TLTF, Tabar–Lihir–Tanga-Feni arc (PNG); TL, Tallante. The field for secondary orthopyroxene (or orthopyroxenite) from Takashima (Arai et al., 2006), SW Japan arc, is shown for comparison. Data sources are as in Fig. 4.

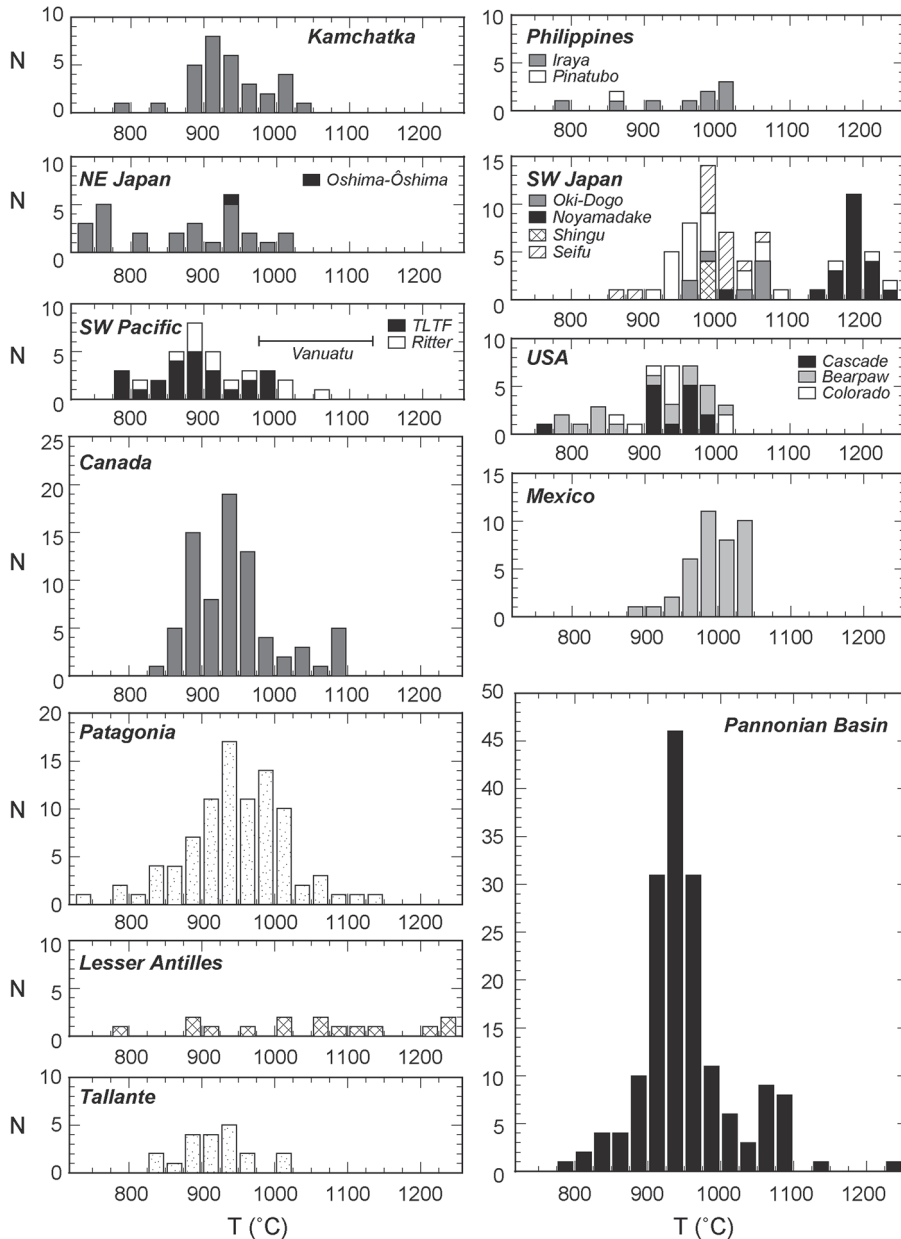


Fig. 12. Histograms of equilibrium temperatures for peridotites from various regions calculated using the thermometry data of Wells (1977). Data sources are as in Fig. 4.

2001; Franz et al., 2002; Arai et al., 2003a; Ishimaru et al., 2007). Arai et al. (2006)が記載した高島(西南日本弧)の二次的直方輝石は, Al, Ca に富み Cr に乏しく, 上記のものとは全く異なる組成を有する (Figs. 10, 11). タヤンテ(ジブラルタル弧)のかんらん岩中の二次的直方輝石は斜長石や石英と共存する(Arai et al., 2003b; Shimizu et al., 2004). また, 上記2種の二次的直方輝石の中間的な組成を有し, 一部は初生的直方輝石の領域と重なる (Figs. 10, 11).

前弧域の海洋底から得られるかんらん岩の鉱物化学的性質を Fig. 3 にまとめる. 多くは枯渇したハルツバーサイトであり, 鉱物化学的諸性質は火山前線下のマントル物質(例えば, TFLT 弧のもの)に類似している (Figs. 2, 4-11). ただし, 南サンドウィッチ弧の前弧かんらん岩(Pearce et al.,

2000)は, トンガや IBM 弧のものとは異なりややレールゾライト的である(例えば, Figs. 2, 4-7). 前弧かんらん岩(トンガおよび IBM)と火山前線かんらん岩との異なる点はいくつか認められる. クロムスピネルの Mg# を同じ Cr# で比べると, 前者の方が低い傾向がある(Okamura et al., 2006 参照) (Figs. 3, 5). なお, 南西太平洋島弧の前弧かんらん岩のスピネルの低 Mg# は, 前述のように Fe 交代作用の結果である. また, 直方輝石の Al, Ca, Cr 含有量の低いものが認められる (Fig. 3h, i). これらは化学組成的に二次的な直方輝石と同等である (Figs. 10, 11). これらの性質は一般的に低い平衡温度を示唆する.

平衡条件

よい地質圧力計がないので, 圧力に関しては定量的記載が

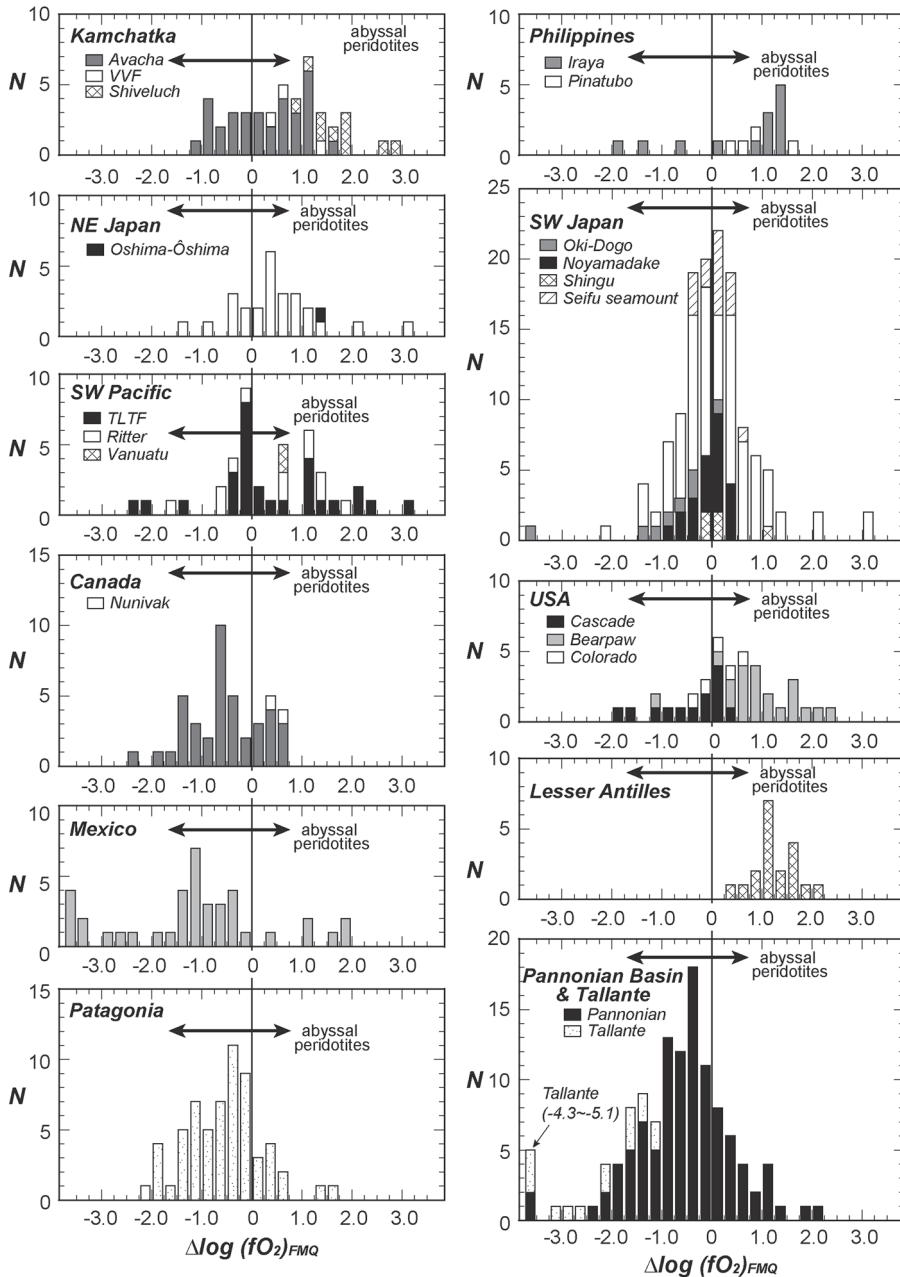


Fig. 13. Histograms of calculated oxygen fugacities for peridotites from various regions relative to the fayalite-magnetite-quartz buffer. Oxygen barometry is after Ballhaus et al. (1991), assuming a pressure of 1.5 GPa. Data sources are as in Fig. 4.

不可能である。しかし、島弧のかんらん岩捕獲岩にはざくろ石が認められず(阿部・荒井, 2001 参照), その起源はスピネルかんらん岩安定領域以浅であろう。枯渇度が低いレールゾライト(Figs. 2, 4)は典型的なスピネルかんらん岩の鉱物組み合わせを示す。目淵ではレールゾライトに一部スピネル輝石シンプレクタイト化した斜長石が含まれ、斜長石かんらん岩からスピネルかんらん岩への転移が認められる(Takahashi, 1986)。アバチャの、交代作用によって形成されたクリノパイロクシナイト中にCaに富む二次的斜長石が形成されており、斜長石かんらん岩安定領域のマントル由来と考えられる(Ishimaru and Arai, 2011)。それらはおそらく、高枯渇度かんらん岩中に形成されたと考えられ、一部かんらん岩の低圧起源を示唆する。

平衡温度(Wells, 1977)も変化に富む(Fig. 12)。日本列島では、Takahashi(1978a, b)が指摘した通り、西南日本弧のかんらん岩の方が東北日本弧のものより高温を示す(Fig. 12)。特に島根県野山岳のかんらん岩(Hirai, 1986; Arai et al., 2000)は、世界中の島弧から報告されているかんらん岩中で最も高温を示す(Fig. 12)。多くの試料で1,000°C以下の比較的低い平衡温度が計算される。カムチャツカ弧、東北日本弧(ほとんどが目淵火山由来)、TLTF弧など(パプア・ニューギニア)のかんらん岩は中でも比較的低い温度を示す(Fig. 12)。試料数は少ないが、ピナツボ火山(ルソン弧)のかんらん岩も低温を示す。二次的含水鉱物としてトレモラ閃石を有するかんらん岩類(カムチャツカ弧、ピナツボ火山、パプア・ニューギニア)(Fig. 9)はおしなべて比較的低温を示

す (Fig. 12). 前弧かんらん岩は、わずかではあるが、両輝石温度計で見た場合平均的にさらに低温 (800–900°C) を示す (Fig. 3j).

酸化還元状態をかんらん石–直方輝石–クロムスピネルのペアを使用して検討した (Ballhaus et al., 1990, 1991) (Fig. 13). 酸素フガシティーは $\Delta \log (fO_2)_{FMQ}$ [FMQ バッファからのずれ] で表す. Brandon and Draper (1996) や Parkinson and Arculus (1999) が指摘したように、島弧マントルかんらん岩には海洋底かんらん岩よりやや酸化されたものがある (例えば、カムチャツカ弧、ルソン弧のもの) (Fig. 13). また、パタゴニアやパノニア盆地などのかんらん岩は、ほぼ海洋底かんらん岩と同等の酸素フガシティーを有する (Fig. 13). また、タヤンテ (ジブラルタル弧) のかんらん岩 (Arai et al., 2003b; Shimizu et al., 2004) はおしなべて低めの酸素フガシティーを呈する (Fig. 13). これは捕獲岩中のシリカに富む二次的小脈 (閃緑岩～直方輝石岩) に伴ってグラファイトが産することと整合的である. また、Ishimaru et al. (2009) はアバチャ火山の捕獲岩 (やや酸化的) から強い還元的状態を示唆する金属や合金を含む二次的微小脈を報告している.

前弧かんらん岩ではトンガ、南サンドウィッチのもの (Pearce et al., 2000) は、海洋底かんらん岩と同等かやや高めの酸素フガシティーを示すが、IBM 弧のものは非常にばらつきが大きい (Fig. 3k). なかでも、Ohara and Ishii (1998) は南部マリアナから極めて低い酸素フガシティー ($\Delta \log (fO_2)_{FMQ} = -4 \sim -10$) を示すかんらん岩 (A-type harzburgite) を報告している.

議 論

以上の記載岩石学的情報をもとに、島弧のマントル物質の性質を以下に議論する. 良く知られたものに関しては再検討し、そうでないものはここで改めて提唱する (Arai et al., 2007; Arai and Ishimaru, 2008; Ishiwatari et al., 2016 を参照).

1. 部分融解度

島弧マントルの特徴は部分融解度が高いとよく言われる. しかしそれは一般的には成り立たない. それが言えるのは現在の火山前線～前弧域のマントルに存在しているかんらん岩類である. 多くの初生的島弧かんらん岩は、モード、かんらん石 (Fo 値)–スピネル (Cr#) 関係、スピネルなどの鉱物化学組成の上からも海洋底かんらん岩と同等の部分融解度を示すことに注目すべきである (Figs. 2, 4–7). ただし、そのような比較的低融解度 (スピネルの Cr# < 0.6) を示すかんらん岩類に伴って、高い部分融解度を示すかんらん岩 (スピネルの Cr# > 0.6) がぼつぼつと存在するのは島弧マントル起源の捕獲岩群の特徴でもある (例えば、西南日本弧、メキシコパノニア盆地; Figs. 2, 4–7). 島弧マグマの融け残りかんらん岩中のスピネルの Cr# に幅があることは、噴出岩からも推定されている (Arai, 1994b).

火山前線下のマントルかんらん岩の部分融解度が高いのは、そこが島弧で最もマグマの生産力が高いという良く知ら

れた事実 (Sugimura et al., 1963; Kuno, 1966; Tatsumi et al., 1983; Tatsumi, 1986) と整合的である. このような高枯渇度かんらん岩は前弧域から火山前線まで存在していることになる.

2. 交代作用

二次的直方輝石は明瞭に初生的かんらん石を置換しており、シリカの付加は明らかである. この過程は火山前線下マントル物質にほぼ例外なく認められる. ホスト岩が比較的シリカに富む安山岩質であることが多く、マグマ溜りでの安山岩マグマ–かんらん石捕獲岩の反応生成物であることが疑われる. 一方で、これらのかんらん石捕獲岩はホルンブレンダイトやホルンブレンド・ガプロの殻 (捕獲岩を忠実に覆う) やそれから派生する細脈を含む (Arai et al., 1996; Ishimaru et al., 2007). 産状からみて、これらこそマグマ溜りでの産物であろう. 二次的直方輝石の分布はホルンブレンダイトと異なり捕獲岩の形状とは無関係であり、より深部での別のステージの産物であると考えられる (Ishimaru et al., 2007). このシリカ付加作用 (交代作用) はマントル過程と考えて問題はない. ただし、二次的直方輝石はしばしば複雑に (デリケートに) かんらん石を置換しており、組織的な非平衡を示す. したがって、関与した交代作用は、これらの二次的直方輝石を含むかんらん石捕獲岩を地表にもたらしたマグマ活動にやや先行するマントルでの諸過程 (スラブからの流体供給およびそれによるシリカに富むマグマの生成) の産物であろう. すなわち、ホスト岩のマグマやその火山体を形成したマグマ活動と一連のものであったと考えられる. この辺の状況は西南日本弧のアルカリ玄武岩活動のそれと類似している. 西南日本弧では、前述のように、グループ II と総称される若い深成岩捕獲岩が、マントルかんらん岩などの比較的古い岩石 (グループ I) とともに産する (例えば、Arai et al., 2000). グループ II の岩石 (関連するメガクリストを含む) は、ホスト岩と関連する先行するアルカリ玄武岩の深部活動によりもたらされた集積岩～交代岩である (Irving, 1974; Arai et al., 2000).

タヤンテのかんらん岩中の二次的直方輝石はカムチャツカなどの環太平洋地域の火山前線下のものと化学組成的には異なる (Al にやや富む) (Figs. 10, 11). 交代作用に関与したメルトは石英閃緑岩質であり (Arai et al., 2003b; Shimizu et al., 2004), Al に富んでいたのであろう. タヤンテの場合はホスト岩がアルカリ玄武岩であること、岩石がハルツバーグイトではなくレールゾライトであること (Figs. 2, 4) が火山前線下の場合と異なる.

上述のように、これらのシリカ付加を受けたかんらん岩は、現在典型的には火山前線下のマントルに認められる. この過程によるモード直方輝石の増加も確認されている (Ishimaru et al., 2007). ただし、このかんらん岩が再結晶を受けるとデリケートな置換組織は消失してしまうであろう. さらに温度が上がると低 Al, Ca, Cr の化学的特徴も不明になる可能性が高い. 沈み込み帯コンプレックスには島弧リソスフェアの断片と思われるダナイトなどが含まれており (Hattori et al., 2010), 沈み込みに伴って上部マントル深部

にもたらされるであろう (Kelemen et al., 1998; Neumann and Simon, 2009).

これらとは異なった起源の二次的直方輝石がある。唐津市高島のアルカリ玄武岩のダナイト捕獲岩(グループ D)中にはかんらん石を置換する、鉄、Al、Ca に比較的富み、Cr に乏しい直方輝石が見出される (Arai et al., 2006)。この二次的直方輝石は、上記の火山前線下のものとは化学的性質が異なり、マントル内でシリカに不飽和なアルカリ玄武岩マグマから分化した (straddle-type の分化トレンド; Miyashiro [1978]) シリカに過飽和なアルカリ玄武岩マグマとかんらん石の反応物である (Arai et al., 2006)。したがって島弧マグマ活動とは無関係である。パタゴニアやパノニア盆地にも似たような組成を有するものがあり (Figs. 10, 11)、同様な起源が予想される (Faccini et al., 2013)。

火山前線下マントルの二次的直方輝石には含水鉱物が普遍的に付随するので、シリカ交代作用は同時に加水化ももたらす。Ertan and Leeman (1996) が記載した北米カスケード弧のフロゴバイトを含むオルソパイロクシナイト(直方輝石岩)の捕獲岩は、アバチャやイラヤ、ピナツボ火山のかんらん岩に見られる二次的直方輝石の集合体、すなわち二次的オルソパイロクシナイトかもしれない。角閃石やフロゴバイトの組成、量比は、交代作用に関与した流体/マグマの組成によるであろう。それらの結晶分化 (Arai, 1986; Arai and Takahashi, 1989) を考えると、晶出順序は、K に富む場合、フロゴバイト→フロゴバイト+角閃石、また Na に富む場合、角閃石→角閃石+フロゴバイトとなる。また Ti 含有量は徐々に低下する (Arai and Takahashi, 1989)。多くの場合、交代作用をもたらした流体/マグマは Na に富んでいたことが予想される (Figs. 3f, 8)。カナダの捕獲岩の場合は K に富んでいたと思われる (Fig. 8)。これら Na に富む (Na/K 比が高い) 流体/マグマは、上部マントルのより深部でのフロゴバイト晶出により分化したものである可能性がある (Arai, 1986 参照)。角閃石としてトレモラ閃石の生成は一般的には低温を示唆する (Evans, 1977) が、岩石の枯渇度が高く、Al に乏しい場合は高温でも形成される (Ishimaru and Arai, 2008a)。

新宮(西南日本弧)の二次的含水鉱物は Ti に富み (Goto and Arai, 1987)、ホスト・マグマに先行する同様のプレート内マグマによる交代作用の結果であると考えられる。すなわち、グループ II 的な産物である。

3. 平衡条件

一部のかんらん岩、特に前弧域や火山前線下、目潟(東北日本弧)のもの、は 800°C 以下の低温の平衡温度を示す (Figs. 3j, 12)。しかし、多くの島弧かんらん岩は他のセッティングのスピネルかんらん岩(ハワイ, 900–1040°C, Sen et al., 2005; アイフェル, 760–1200°C, Witt-Eikschén et al., 2003; ケニア, 750–1100°C, Kaeser et al., 2006; イエメン, 880–1130°C; Ali and Arai, 2007) とほぼ同様である。ただし、野山岳のかんらん岩捕獲岩は 1200°C 前後の例外的に高い平衡温度を示す (Fig. 12)。これは、アイフェル(ドイツ)の高温かんらん岩 (Eitt-Eikschén et al., 2003) の平衡

温度に相当し、各地のアルカリ玄武岩中のざくろ石かんらん岩捕獲岩の温度(例えば、ケニア, 950–1065°C, Henjes-Kunst and Altherr, 1992; バイカル・リフト, 980–1150°C, Ionov et al., 1993) と同等もしくはより高温を呈する。おそらく、スピネルかんらん岩安定領域の最高圧部(～1.5 GPa; Gasparik, 1987) より由来したのであろう。

島弧マントルは酸素フガシティーが比較的高いと考えられている (Wood et al., 1990; Brandon and Draper, 1996; Parkinson and Arculus, 1999) (Figs. 3k, 13)。ただし、一部のかんらん岩(例えば、タヤンテ, Shimizu et al., 2004; パタゴニア, Wang et al., 2007) はやや低い酸素フガシティー ($\Delta \log(fO_2)_{FMQ} - 5.1$ まで) を示す (Fig. 13)。さらに、Ishimaru et al. (2009) は、アバチャ(カムチャツカ弧)の比較的酸化的なかんらん岩捕獲岩 (Fig. 13) から金属 Ni、Fe および Fe-Si 合金を含む二次的な包有物の列(癒着した交代作用流体が満たしたクラック)を報告した。これは、酸化的なかんらん岩の下方に還元的なマントルが存在することを強く示唆する (Ishimaru et al., 2009)。還元的環境をもたらした要因の特定は難しいが、マントル・ウェッジ下底部の蛇紋岩化による還元的流体 (Ishimaru et al., 2009) やスラブ由来の還元的流体 (Wang et al., 2007) が考えられる。いずれにしても、これらが初生的島弧マグマを形成する高温部のマントル・ウェッジ (Tatsumi et al., 1983) を通過するのは不可能なので、高温部の縮退の時期(=火山前線でのマグマ活動の休止期)に上昇した可能性が高い (Ishimaru et al., 2009)。

また、アバチャでは交代作用で砒化物ができており、スラブから As も火山前線下マントル・ウェッジに供給されている (Ishimaru and Arai, 2008b)。さらに火山前線下では特殊な S や Si に富む酸化的流体が Ni などを移動させ、Ni に富むかんらん石を形成させる (Ishimaru and Arai, 2008c)。

4. 破碎作用

岩石の組織から F-type の(細粒の)かんらん岩は、C-type の(粗粒な)かんらん岩が破碎されて生じたことを示唆する (Ishimaru and Arai, 2008a, 2011 の図参照) (Arai et al., 2006; Arai and Ishimaru, 2008)。この破碎はなぜ生じたのであろうか? 東アジア(北西太平洋)地域には多数の北東-南西方向の左横ずれ断層系が存在する(例えば、Xu et al., 1989; Lee, 1999)。斜め沈み込みは普通に起こるが、それは直交方向の沈み込み成分と上盤の横ずれ成分へ分配される (Fitch, 1972)。この上盤(マントル・ウェッジ)への横ずれ成分の分配は一連の横ずれ断層を発生させる(例えば、Fitch, 1972; Aurelio, 2000)。日本の中央構造線やフィリピンのフィリピン断層もそれらの例とされている (Fitch, 1972; Aurelio, 2000)。これらの断層は弱線、島弧火山帯では火山付近、に生じやすいとされる (Fitch, 1972)。火山前線は火山が多く、もっとも横ずれ断層が生じやすい場所であろう。これは火山前線火山(カムチャツカ弧、ルソン弧)の捕獲岩に F-type かんらん岩(破碎による変形岩)が認められることと整合的である。

Takeuchi and Arai (2015) は目潟火山(東北日本弧)よりカタクラスティックな変形により形成されたかんらん岩捕獲

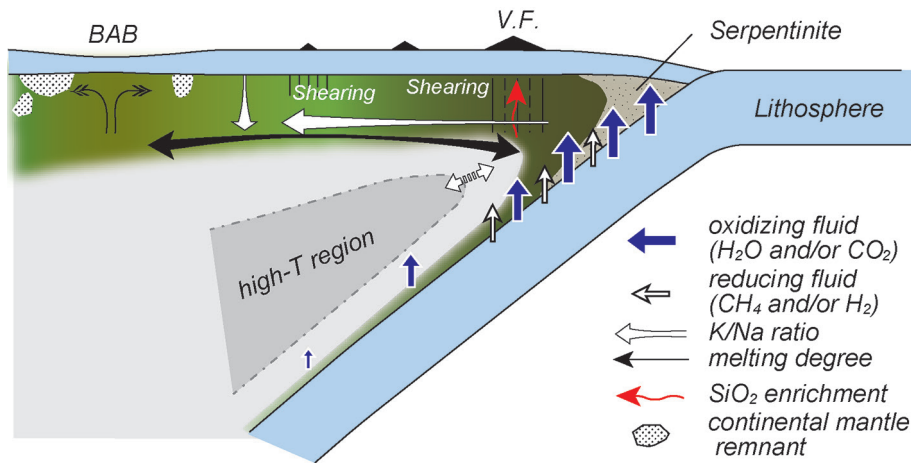


Fig. 14. Petrologic model of the mantle wedge showing fluid transport directions and various processes. See text for further details.

岩を発見した。斜長石レーブルライトが原岩であり、様々なサイズの不規則形のマントル鉱物の堅牢な集合体を呈する。やや鉄に富む単斜輝石のクロットが含まれており、複数の岩石種の機械的な混合を示唆する。ホスト・マグマの浸透は観察されない。マグマによる運搬途中、特に爆発的噴火時に形成されたという反論もあるが、堅牢でかつマグマの浸透がないという産状を説明できない。マントル中で形成されたものであることは間違いないと思われる。マントルでも弾性的な変形が起きることを示すものである。これも島弧での横ずれ断層系の卓越を示すものである。

おわりに

上記のように、島弧下の上部マントルは多様である。この原因の一つは島弧の発達過程での多様性にあると思われる。海洋性島弧は海洋リソスフェアの上に島弧マグマ活動が発生し、海洋リソスフェアに島弧成分が付加(置換)する。大陸性島弧ならば大陸縁が島弧化する。時には日本列島のように背弧海盆が形成され大陸から分離される。アンデス弧の場合は背弧にマグマ活動が起こるが、背弧海盆は形成されていない。また、同一島弧でも、前弧、火山前線、背弧側ではマントル過程に差があり、マントルの構成物も異なるであろう。本論文で扱った、主としてマグマ中のマントル捕獲岩を使用したマントル探査法にはマントル構成物質を直接手に取って調べられるという長所があるものの、重大な限界がある。マグマの気まぐれからか、マントル捕獲岩の産地が限られていることである。例えば、東北日本弧ではマントル捕獲岩の情報はほとんどが目潟を中心とした日本海縁のものであり、とても島弧全体を代表できない。一方、カムチャツカ弧では火山前線付近での捕獲岩の情報が卓越する。この場合、火山前線下のマントルはカムチャツカ弧などから、背弧海盆近くのマントルは目潟の捕獲岩から得て、島弧マントル像を作ることになる。

そうして得られたのが Fig. 14 である。ほぼ日本列島を念頭に置いている。リソスフェア・マントルは火山前線～前弧部および背弧海盆に向かって枯渇度が増すであろう。また、火山前線付近をはじめとして方々に破碎帯が存在するであろう。

う。背弧海盆マントル中には大陸マントルの欠片が散在するであろう。シリカ付加は特に火山前線付近で盛んに行なわれる。K/Na 比の変化は、加水作用の際のフロゴサイト(Kに富む)、角閃石(Naに富む)の晶出(それぞれ、残液のK/Na比を低下、上昇させる)による関与した流体/マグマの分化による(Arai, 1986 参照)。舌状の高温マントル(Tatsumi et al., 1983)部分はおそらく縮退することもあり、その時はマントル最上部に供給されうであろう。そうでない場所では/場合は、スラブ起源の流体/マグマは島弧マグマを介してより上部に到達する。

最近、大阪府南部に新たなマントル捕獲岩の産地が発見された(荒井ほか, 2016)。この情報は本論文には取り込まれていないが、このような新たな捕獲岩産地の発見が基本的に重要であり、Fig. 14 のようなモデルの今後の改良につながるであろう。

謝 辞

本論文は荒井研究室の卒業生を初めとする多くの人達との共同研究も成果が基になっている。特に、平井寿敏、阿部なつ江、武内美佑紀、B. D. Payot、二ノ宮淳、角島和之、清水洋平、田中小満、田村明弘、森下知晃、芳川雅子、V. M. Okrugin の諸氏には野外調査、室内分析等についてお世話になった。道林克禎氏には本論文を発表する機会をいただいた。高澤栄一氏および匿名の査読者の方には有益なコメントをいただいた。以上の方々に感謝する。

文 献

- Abe, N., 1997, *Petrology of Mantle Xenoliths from the Arcs: Implications for the Petrochemical Evolution of the Wedge Mantle*. Ph. D. Thesis, Kanazawa Univ., 113p.
 Abe, N. and Arai, S., 1993, Petrographical characteristics of ultramafic xenoliths from the Megata volcano, the Northeast Japan arc. *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, **38**, 1–24.
 阿部なつ江・荒井章司(Abe, N. and Arai, S), 2001, 「岡山県荒戸山のアルカリ玄武岩中のざくろ石を含むハルツパーチャイト捕獲岩(山元ら, 1999)」に対するコメント(Comments on "Garnet-bearing spinel harzburgite xenolith from Arato-yama alkali basalt, southwest Japan." by Yamamoto et al.). 岩石鉱物科

- 学(*Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **30**, 190–193.
- 阿部なつ江・荒井章司・二ノ宮 淳(Abe, N., Arai, S. and Ninomiya, A.), 1995, 東北日本弧, ニノ目瀉かんらん岩捕獲岩および本質噴出物について(Peridotite xenoliths and essential ejecta from the Ninomegata crater, the Northeastern Japan arc). *岩鉱(Jour. Petrol. Mineral. Econ. Geol.)*, **90**, 41–49.
- 阿部なつ江・荒井章司・佐伯泰広(Abe, N., Arai, S. and Saeki, Y.), 1992, 目瀉火山のかんらん岩捕獲岩にみられる島弧マンツルの加水作用(Hydration processes in the arc mantle; petrology of the Megata peridotite xenoliths, the Northeast Japan arc). *岩鉱(Jour. Petrol. Mineral. Econ. Geol.)*, **87**, 305–317.
- Abe, N., Arai, S. and Yurimoto, H., 1998, Geochemical characteristics of the uppermost mantle beneath the Japan island arcs: implications for upper mantle evolution. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **107**, 233–247.
- Abe, N., Takami, M. and Arai, S., 2003, Petrological feature of spinel lherzolite xenolith from Oki-Dogo Island: an implication for variety of the upper mantle peridotite beneath southwest Japan. *Island Arc*, **12**, 219–232.
- Ali, M. and Arai, S., 2007, Clinopyroxene-rich lherzolite xenoliths from Bir Ali, Yemen-possible product of peridotite/melt reactions. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **102**, 137–142.
- Aoki, K., 1987, Japanese Island arc: xenoliths in alkali basalts, high-alumina basalts, and calc-alkaline andesites and dacites. In Nixon P. H., ed., *Mantle Xenoliths*, John Wiley & Sons, 314–331.
- Arai, S., 1975, Contact metamorphosed dunite-harzburgite complex in the Chugoku district, western Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **52**, 1–16.
- Arai, S., 1984, Igneous mineral equilibria in some alpine-type peridotites in Japan. In Sunagawa, I., ed., *Materials Science of the Earth's Interior*, Terra Pub., 445–460.
- Arai, S., 1986, K/Na variation in phlogopite and amphibole of upper mantle peridotites due to fractionation of the metasomatic fluids. *Jour. Geol.*, **94**, 436–444.
- Arai, S., 1991, Petrological characteristics of the upper mantle peridotites beneath the Japan Island Arcs: Petrogenesis of spinel peridotites. *Soviet Geol. Geophys. (Geologiya i Geofizika)*, **32**, 8–26.
- Arai, S., 1994a, Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chem. Geol.*, **113**, 191–204.
- Arai, S., 1994b, Compositional variation of olivine-chromian spinel in Mg-rich magmas as a guide to their residual spinel peridotites. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **59**, 279–294.
- Arai, S. and Abe, N., 1994, Podiform chromitite in the arc mantle: chromitite xenoliths from the Takashima alkali basalt, southwest Japan arc. *Mineral. Deposita*, **29**, 434–438.
- Arai, S., Abe, N., Hirai, H. and Shimizu, Y., 2001, Geological, petrographical and petrological characteristics of ultramafic-mafic xenoliths in Kurose and Takashima, northern Kyushu, southwestern Japan. *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, **46**, 9–38.
- Arai, S., Abe, N. and Ishimaru, S., 2007, Mantle peridotites from the Western Pacific. *Gondwana Res.*, **11**, 180–199.
- 荒井章司・平井寿敏・阿部なつ江(Arai, S., Hirai, H. and Abe, N.), 2005, かんらん岩捕獲岩の地質学的側面—日本列島の例—(Geological aspects of peridotite and related xenoliths in volcanic rocks: an example from the Japan arcs). *岩石鉱物科学(Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.)*, **34**, 133–142.
- Arai, S., Hirai, H. and Uto, K., 2000, Mantle peridotite xenoliths from the Southwest Japan arc and a model for the sub-arc upper mantle structure and composition of the Western Pacific rim. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **95**, 9–23.
- Arai, S. and Ishimaru, S., 2008, Insights into petrological characteristics of the lithosphere of mantle wedge beneath arcs through peridotite xenoliths: A review. *Jour. Petrol.*, **49**, 665–695.
- Arai, S., Ishimaru, S. and Mizukami, T., 2012, Methane and propane micro-inclusions in olivine in titanoclinohumite-bearing dunites from the Sanbagawa high-P metamorphic belt, Japan: Hydrocarbon activity in a subduction zone and Ti mobility. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **353-354**, 1–11.
- Arai, S., Ishimaru, S. and Okrugin, V. M., 2003a, Metasomatized harzburgite xenoliths from Avacha volcano as fragments of mantle wedge of the Kamchatka arc: an implication for the metasomatic agent. *Island Arc*, **12**, 233–246.
- Arai, S. and Kida, M., 2000, Origin of fine-grained peridotite xenoliths from Iraya volcano of Batan island, Philippines: deserpentinization or metasomatism at the wedge mantle beneath an incipient arc? *Island Arc*, **9**, 458–471.
- Arai, S., Kida, M., Abe, N., Ninomiya, A. and Yumul, G. P., Jr., 1996, Classification of peridotite xenoliths in calc-alkaline andesite from Iraya volcano, Batan Island, the Philippines, and its genetical implications. *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, **41**, 25–45.
- Arai, S., Shimizu, Y. and Gervilla, F., 2003b, Quartz diorite veins in a peridotite xenolith from Tallante, Spain: implications for reaction and survival of slab-derived SiO₂-oversaturated melt in the upper mantle. *Proc. Japan Acad., Ser. B.*, **79**, 145–150.
- Arai, S., Shimizu, Y., Morishita, T., and Ishida, Y., 2006, A new type of orthopyroxenite xenolith from Takashima, the Southwest Japan arc: silica enrichment of the mantle by evolved alkali basalt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **152**, 387–398.
- Arai, S., Takada, S., Michibayashi, K. and Kida, M., 2004, Petrology of peridotite xenoliths from Iraya Volcano, Philippines, and its implication for dynamic mantle-wedge processes. *Jour. Petrol.*, **45**, 369–389.
- Arai, S. and Takahashi, N., 1989, Formation and compositional variation of phlogopites in the Horoman peridotite complex, Hokkaido, northern Japan: implications for origin and fractionation of metasomatic fluids in the upper mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **101**, 165–175.
- Arai, S. and Takemoto, Y., 2007, Mantle wehrlite from Hess Deep as a crystal cumulate from an ultra-depleted primary melt in East Pacific Rise. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08302, doi: 10.1029/2006GL029198.
- 荒井章司・田村明弘・三浦 真・清家一馬(Arai, S., Tamura, A., Mura, M. and Seike, K.), 2016, 新たなマンツル捕獲岩産地: 番川かんらん岩捕獲岩(大阪府南部)(New mantle xenolith locality: the Bankawa peridotite xenolith suite (southern Osaka, SW Japan)). 日本鉱物科学会 2016 年年会要旨(*Abstr. Japan Assoc. Mineral. Sci., 2016 Meet.*)R7–04.
- Aurelio, M. A., 2000, Shear partitioning in the Philippines: Constraints from Philippine Fault and global positioning system data. *Island Arc*, **9**, 584–597.
- Bali, E., Szabó, C., Vaselli, O. and Török, K., 2002, Significance of silicate melt pockets in upper mantle xenoliths from the Bakony-Balaton Highland Volcanic Field, Western Hungary. *Lithos*, **61**, 79–102.
- Ballhaus, C., Berry, R. F. and Green, D. H., 1990, Oxygen fugacity controls in the Earth's upper mantle. *Nature*, **348**, 437–440.
- Ballhaus, C., Berry, R. F. and Green, D. H., 1991, High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **102**, 230–241.
- Barsdell, M. and Smith, I. E. M., 1989, Petrology of recrystallized ultramafic xenoliths from Merelava volcano, Vanuatu. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **102**, 230–241.
- Beccaluva, L., Bianchini, G., Bonadiman, C., Siena, F. and Vaccaro, C., 2004, Coexisting anorogenic and subduction-related metasomatism in mantle xenoliths from the Betic Cordil-

- lera (southern Spain). *Lithos*, **75**, 67–87.
- Bénard, A. and Ionov, D. A., 2013, Melt- and fluid-rock interaction in supra-subduction lithospheric mantle: evidence from andesite-hosted veined peridotite xenoliths. *Jour. Petrol.*, **54**, 2339–2378.
- Bjerg, E. A., Ntaflou, T., Kurat, G., Dobosi, G. and Labudía, C. H., 2005, The upper mantle beneath Patagonia, Argentina, documented by xenoliths from alkali basalts. *Jour. South Am. Earth Sci.*, **18**, 125–145.
- Blatter, D. L. and Carmichael, I. S. E., 1998, Hornblende peridotite xenoliths from central Mexico reveal the highly oxidized nature of subarc upper mantle. *Geology*, **26**, 1035–1038.
- Bloomer, S. H., 1983, Distribution and origin of igneous rocks from the landward slopes of the Mariana Trench; Implications for its structure and evolution. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 7411–7428.
- Bloomer, S. H. and Fisher, J. W., 1987, Petrology and geochemistry of igneous rocks from the Tonga trench: a non-accreted plate boundary. *Jour. Geol.*, **95**, 469–495.
- Bloomer, S. H. and Hawkins, J. W., 1983, Gabbroic and ultramafic rocks from the Mariana trench: an island arc ophiolite. In Hayes, D. E., ed., *The Tectonic and Geologic Evolution of Southwest Asian Seas and Islands*, Geophys. Monogr., **27**, Am. Geophys. Union, 294–317.
- Brandon, A. D. and Draper, D. S., 1996, Constraints on the origin of the oxidation state of the mantle overlying subduction zones: an example from Simcoe, Washington, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 1739–1749.
- Bryant, J. A., Yogodzinski, G. M. and Churikova, T. G., 2007, Melt-mantle interaction beneath the Kamchatka arc: Evidence from mantle xenoliths from Shiveluch volcano. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, **8**, Q04007, doi: 10.1029/2006GC001443.
- Cabanes, N. and Mercier, J.-C. C., 1988, Insight into the upper mantle beneath an active extensional zone: the spinel-peridotite xenoliths from San Quintin (Baja California, Mexico). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **100**, 374–382.
- Canil, D. and Scarfe, C. M., 1989, Origin of Phlogopite in mantle xenoliths from Kostal Lake, Wells Gray Park, British Columbia. *Jour. Petrol.*, **30**, 1159–1179.
- Dick, H. J. B. and Bullen, T., 1984, Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 54–76.
- Dick, H. J. B., Fisher, R. L. and Bryan, W. B., 1984, Mineralogical variability of the uppermost mantle along mid-oceanic ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**, 88–106.
- Dilek, Y. and Furnes, H., 2011, Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **123**, 387–411.
- Dobosi, G., Kurat, G., Jenner, G. A. and Brandstätter, F., 1999, Cryptic metasomatism in the upper mantle beneath Southeastern Austria: a laser ablation microprobe-ICP-MS study. *Mineral. Petrol.*, **67**, 143–161.
- Downes, H., Embey-Isztin, A. and Thirlwall, M. F., 1992, Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from the western Pannonian Basin (Hungary): evidence for an association between enrichment and texture in the upper mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **109**, 340–354.
- Downes, H., Macdonald, R., Upton, B. G. J., Cox, K. G., Bodinier, J.-L., Mason, P. R. D.,...Hearn, B. C., Jr., 2004, Ultramafic xenoliths from the Bearpaw Mountains, Montana, USA: evidence for multiple metasomatic events in the lithospheric mantle beneath the Wyoming craton. *Jour. Petrol.*, **45**, 1631–1662.
- Downes, H., Vaselli, O., Seghedi, I., Ingram, G., Rex, D., Coradossi, N.,...Pinarelli, L., 1995, Geochemistry of late Cretaceous-early Tertiary magmatism in Poiana Rusca (Romania). *Acta Vulcanol.*, **7**, 209–217.
- Draper, D. S., 1992, Spinel lherzolites from Lorena Butte, Simcoe Mountains, southern Washington (USA). *Jour. Geol.*, **100**, 766–776.
- Ducea, M. and Saleeby, J., 1998, Crustal recycling beneath continental arc: silica-rich glass inclusions in ultramafic xenoliths from the Sierra Nevada, California. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **156**, 101–116.
- Embey-Isztin, A., Dobosi, G., Altherr, R. and Meyer, H.-P., 2001, Thermal evolution of the lithosphere beneath the western Pannonian Basin: evidence from deep-seated xenoliths. *Tectonophysics*, **331**, 285–306.
- Ertan, I. E. and Leeman, W. P., 1996, Metasomatism of Cascades subarc mantle: evidence from a rare phlogopite orthopyroxenite. *Geology*, **24**, 451–454.
- Evans, B. W., 1977, Metamorphism of alpine peridotite and serpentinite. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **5**, 397–447.
- Faccini, B., Donadiman, C., Coltorti, M., Grégoire, M. and Siena, F., 2013, Oceanic material recycled within the sub-Patagonian lithospheric mantle (Cerro del Fraile, Argentina). *Jour. Petrol.*, **54**, 1211–1258.
- Facer, J., Downes, H. and Beard, A., 2009, In situ serpentinization and hydrous fluid metasomatism in spinel dunite xenoliths from the Bearpaw mountains, Montana, USA. *Jour. Petrol.*, **50**, 1443–1475.
- Fisher, R. L. and Engel, C. G., 1969, Ultramafic and basaltic rocks dredged from the nearshore flank of the Tonga trench. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **80**, 1373–1378.
- Fitch, T. J., 1972, Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the Western Pacific. *Jour. Geophys. Res.*, **77**, 4432–4460.
- Francis, D. M., 1976, The origin of amphibole in lherzolite xenoliths from Nunivak Island, Alaska. *Jour. Petrol.*, **17**, 357–378.
- Franz, L., Becker, K.-P., Kramer, W. and Herzig, P. M., 2002, Metasomatic mantle xenoliths from Bismark microplate (Papua New Guinea) – Thermal evolution, geochemistry and extent of slab-induced metasomatism. *Jour. Petrol.*, **43**, 315–343.
- Franz, L. and Wirth, R., 2000, Spinel inclusions in olivine of peridotite xenoliths from TUBAF seamount (Bismarck Archipelago/Papua New Guinea): evidence for the thermal and tectonic evolution of the oceanic lithosphere. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **140**, 283–295.
- Frey, F. A. and Prinz, M., 1978, Ultramafic inclusions from San Carlos, Arizona: Petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **38**, 129–176.
- Gasparik, T., 1987, Orthopyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **96**, 357–370.
- Gorring, M. L. and Kay, S. M., 2000, Carbonatite metasomatized peridotite xenoliths from southern Patagonia: implications for lithospheric processes and Neogene plateau magmatism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **140**, 55–72.
- Goto, K. and Arai, S., 1987, Petrology of peridotite xenoliths in lamprophyre from Shingu, Southwestern Japan: implications for origin of Fe-rich mantle peridotite. *Mineral. Petrol.*, **37**, 137–155.
- Harder, M., and Russell, J. K., 2006, Thermal state of the upper mantle beneath the Northern Cordilleran Volcanic Province (NCVP), British Columbia, Canada. *Lithos*, **87**, 1–22.
- Hattori, K., Wallis, S. R., Enami, M. and Mizukami, T., 2010, Subduction of mantle wedge peridotites: Evidence from the Higashi-akaishi ultramafic body in the Sanbagawa metamorphic belt. *Island Arc*, **19**, 192–207.
- Heinrich, W. and Besch, T., 1992, Thermal history of the upper mantle beneath a young back-arc extensional zone: ultra-

- mafic xenoliths from San Luis Potosí, Central Mexico. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **111**, 126–142.
- Henjes-Kunst, F. and Altherr, R., 1992, Metamorphic petrology of xenoliths from Kenya and northern Tanzania and implications for geotherms and lithospheric structures. *Jour. Petrol.*, **33**, 1125–1156.
- Hirai, H., 1986, *Petrology of Ultramafic Xenoliths from Noyamadake and Kurose, Southwestern Japan*. Ph.D thesis, University of Tsukuba, 181p.
- Ichiyama, Y., Morishita, T., Tamura, A. and Arai, S., 2013, Petrology of peridotite xenolith-bearing basaltic to andesitic lavas from the Shiribeshi Seamount, off northwestern Hokkaido, Japan Sea: Mixing of near-primary basaltic and crustal felsic magmas in a rear-arc volcano. *Jour. Asian Earth Sci.*, **76**, 48–58.
- Ichiyama, Y., Morishita, T., Tamura, A. and Arai, S., 2016, Peridotite xenoliths from the Shiribeshi Seamount, Japan Sea: insights into mantle processes in a back-arc basin. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **171**: 86, doi: 10.1007/s00410-016-1300-6
- Ikehata, K. and Arai, S., 2004, Metasomatic formation of kosmochlor-bearing diopside in peridotite xenoliths from North Island, New Zealand. *Am. Mineral.*, **89**, 1396–1404.
- Ionov, D. A., 2010, Petrology of mantle wedge lithosphere: New data on supra-subduction zone peridotite xenoliths from the andesitic Avacha volcano. *Jour. Petrol.*, **51**, 327–361.
- Ionov, D. A., Ashchepkov, I. V., Stosch, H.-G., Witt-Eickshen, G. and Seck, H. A., 1993, Garnet peridotite xenoliths from the Vitim Volcanic Field, Baikal region: the nature of the garnet-spinel peridotite transition zone in the continental mantle. *Jour. Petrol.*, **34**, 1141–1175.
- Irving, A. J., 1974, Megacrysts from the Newer Basalts and other basaltic rocks of Southeastern Austria. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **85**, 1503–1514.
- Ishii, T., 1985, Dredged samples from the Ogasawara fore-arc seamount or “Ogasawara paleoland” – “fore-arc ophiolite”. In Nasu, N., Uyeda, S., Kobayashi, K., Kushiro, I. and Kagami, H., eds., *Formation of Active Ocean Margins*, Terra Scientific Publ. Co., 307–342.
- Ishii, T., Robinson, P. T., Maekawa, H. and Fiske, R., 1992, Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc, Leg 125. *Proc. Ocean Drill. Program., Sci. Results.*, **125**, 445–485.
- 石井輝秋・佐藤 暢・原口 悟・Fryer, P.・藤岡換太郎・Bloomer, S.・横瀬久芳 (Ishii, T., Sato, H., Haraguchi, S., Fryer, P., Fujioka, K., Bloomer, S. and Yokose, H.), 2000, 伊豆一小笠原一マリアナ前弧域の蛇紋岩海山産カンラン岩の岩石学的特徴 (Petrological characteristics of peridotites from serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc). *地学雑誌 (Jour. Tokyo Geogr. Soc.)*, **109**, 517–530.
- Ishimaru, S., 2004, *The Petrological Characters of Mantle Wedge Beneath Kamchatka Arc*. Master's Thesis, Kanazawa Univ., 104p.
- Ishimaru, S. and Arai, S., 2008a, Calcic amphiboles in peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka, and their implications for metasomatic conditions in the mantle wedge. In Coltorti, M. and Grégoire, M., eds., *Metasomatism in Oceanic and Continental Lithospheric Mantle*, Geol. Soc. London, Spec. Publ. *Geol. Soc.*, **293**, 35–55.
- Ishimaru, S. and Arai, S., 2008b, Arsenide in a metasomatized peridotite xenolith as a constraint on arsenic behavior in the mantle wedge. *Am. Mineral.*, **93**, 1061–1065.
- Ishimaru, S. and Arai, S., 2008c, Nickel enrichment in mantle olivine beneath a volcanic front. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **156**, 119–131.
- Ishimaru, S. and Arai, S., 2011, Peculiar Ca-Mg-Si metasomatism along a shear zone within the mantle wedge: inference from fine-grained xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **161**, 703–720.
- Ishimaru, S., Arai, S., Ishida, Y., Shirasaka, M. and Okrugin, V. M., 2007, Melting and multi-stage metasomatism in the mantle wedge beneath a frontal arc inferred from highly depleted peridotite xenoliths from the Avacha volcano, southern Kamchatka. *Jour. Petrol.*, **48**, 395–433.
- Ishimaru, S., Arai, S. and Shukuno, H., 2009, Metal-saturated peridotite in the mantle wedge inferred from metal-bearing peridotite xenoliths from Avacha volcano, Kamchatka. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **284**, 352–360.
- Ishiwatari, A., Ozawa, K., Arai, S., Ishimaru, S., Abe, N. and Takeuchi, M., 2016, Ophiolites and ultramafic rocks. In Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T. and Gibbons, W., eds., *The Geology of Japan*, Geol. Soc., London, 223–250.
- Kaesler, B., Kalt, A. and Pettko, T., 2006, Evolution of the lithospheric mantle beneath the Marsabit Volcanic Field (Northern Kenya): Constraints from textural, *P-T* and geothermal studies on xenoliths. *Jour. Petrol.*, **47**, 2149–2184.
- Kawamoto, T., Yoshikawa, M., Kumagai, Y., Mirabueno, M. H. T., Okuno, M. and Kobayashi, T., 2013, Mantle wedge infiltrated with saline fluids from dehydration and decarbonation of subducting slab. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, **110**, 9663–9668.
- Kelemen, P. B., Hart, S. R. and Bernstein, S., 1998, Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **164**, 387–406.
- Kepezhinskas, P. K., Defant, M. J. and Drummond, M. S., 1995, Na metasomatism in the sub-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the Kamchatka arc. *Jour. Petrol.*, **36**, 1505–1527.
- Kida, M., 1998, *Peridotite Xenoliths from Iraya Volcano, the Philippines: Metasomatized Peridotite Beneath the Immature Arc*. Master's Thesis, Kanazawa Univ., 78p.
- Kilian, R. and Stern, C. R., 2002, Constraints on the interaction between slab melts and the mantle wedge from adakitic glass in peridotite xenoliths. *Eur. Jour. Mineral.*, **14**, 25–36.
- Konecny, P., Konecny, V., Lexa, J. and Hurajova, M., 1995, Mantle xenoliths in alkali basalts of Southern Slovakia. *Acta Vulcanol.*, **7**, 241–247.
- Kuno, H., 1966, Lateral variation of basalt magma across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, **29**, 195–222.
- Kuno, H., 1967, Mafic and ultramafic nodules from Ichinomegata, Japan. In Wyllie, P. J., ed., *Ultramafic and Related Rocks*, John Wiley & Sons, 337–346.
- Kushiro, I., 1969, The system forsterite-diopside-silica with and without water at high pressures. *Am. Jour. Sci.*, **267-A**, 269–294.
- Laurora, A., Mazzucchelli, M., Rivalenti, G., Vannucci, R., Zanetti, A., Barbieri, M. A. and Cingolani, C. A., 2001, Metasomatism and melting in carbonated peridotite xenoliths from the mantle wedge: the Bobernador Gregores case (Southern Patagonia). *Jour. Petrol.*, **42**, 69–87.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D.,...Youzhi, G., 1997, Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineral. Mag.*, **61**, 295–321.
- Lee, D.-W., 1999, Strike-slip fault tectonics and basin formation during the Cretaceous in the Korean Peninsula. *Island Arc*, **8**, 218–231.
- Levander, A., Schmandt, B., Miller, M. S., Liu, K., Karlstrom, K. E., Crow, R. S.,...Humphreys, E. D., 2011, Continuing Colorado plateau uplift by delamination-style convective lithospheric downwelling. *Nature*, **472**, 461–466.
- Loocke, M., Snow, J. E. and Ohara, Y., 2013, Melt stagnation in peridotites from the Godzilla Megamullion Oceanic Core Complex, Parece Vela Basin, Philippine Sea. *Lithos*, **182**–

- 183, 1–10.
- Luhr, J. F. and Aranda-Gómez, J. J., 1997, Mexican peridotite xenoliths and tectonic terranes: correlations among vent location, texture, temperature, pressure, and oxygen fugacity. *Jour. Petrol.*, **38**, 1075–1112.
- Maekawa, H., Shozui, M., Ishii, T., Fryer, P. and Pearce, J. A., 1993, Blueschist metamorphism in an active subduction zone. *Nature*, **364**, 520–523.
- McAlpine, S. R. B., 2015, *A Petrological Study of Peridotite & Pyroxenite Xenoliths from the West Bismarck Arc and the Tabar-Lihir-Tanga-Feni Arc, Papua New Guinea*. Ph.D Thesis, Australian National Univ., 359p.
- McInnes, B. I. A., Grégoire, M., Binns, R. A. Herzig, P. M. and Hannington, M. D., 2001, Hydrous metasomatism of oceanic subarc mantle, Lihir, Papua New Guinea: petrology and geochemistry of fluid-metasomatized mantle wedge xenoliths. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **188**, 169–183.
- Michibayashi, K., Ohara, Y., Stern, R. J., Fryer, P., Kimura, J.-I., Tasaka, M.,...Ishii, T., 2009, Peridotites from a ductile shear zone within back-arc lithospheric mantle, southern Mariana Trench: Results of a Shinkai 6500 dive. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**, Q05X06, doi: 10.1029/2008GC002197.
- Miura, M. and Arai, S., 2014, Platinum-group element and mineral characteristics of sub-arc chromitite xenoliths from the Takashima alkali basalt, Southwest Japan arc. *Canad. Mineral.*, **52**, 899–916.
- Miyashiro, A., 1978, Nature of alkali volcanic rocks series. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**, 91–104.
- 都城秋穂・久城育夫(Miyashiro, A. and Kushiro, I.), 1975, 岩石学 II 岩石の性質と分類(*Petrology II: Characteristics and Classification of Rocks*)*. 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 198p.
- Mizukami, T. and Wallis, S. R., 2005, Structural and Petrological constraints on the tectonic evolution of the garnet-lherzolite facies Higashi-akaishi peridotite body, Sanbagawa belt, SW Japan. *Tectonics*, **24**, TC6012, doi: 10.1029/2004TC001733.
- Morishita, T., Tani, K., Shukuno, H., Harigane, Y., Tamura, A., Kumagai, H. and Hellebrand, E., 2011, Diversity of melt conduits in the Izu-Bonin-Mariana forearc mantle: Implications for the earliest stage of arc magmatism. *Geology*, **39**, 411–414.
- Murata, K., Maekawa, H., Ishii, K., Mohammad, Y. O. and Yokose, H., 2009a, Iron-rich stripe patterns in olivines of serpentinized peridotites from Mariana forearc seamounts, western Pacific. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **104**, 199–203.
- Murata, K., Maekawa, H., Yokose, H., Yamamoto, K., Fujioka, K., Ishii, T.,...Wada, Y., 2009b, Significance of serpentinization of wedge mantle peridotites beneath Mariana forearc, western Pacific. *Geosphere*, **5**, 90–104.
- Muroi, R. and Arai, S., 2014, Formation process of olivine-clinopyroxene cumulates inferred from Takashima xenoliths, Southwest Japan arc. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **109**, 79–84.
- Nédli, Z., Szabó, C. and Dégi, J., 2015, Orthopyroxene-enrichment in the lherzolite-websterite xenolith suite from Paleogene alkali basalts of the Poiana Ruscă mountains (Romania). *Geologica Carpathica*, **66**, 499–514.
- Neumann, E.-R. and Simon, N. S. C., 2009, Ultra-refractory mantle xenoliths from oceanic islands: How do they compare to peridotites retrieved from oceanic sub-arc mantle? *Lithos*, **107**, 1–16.
- 二ノ宮 淳・荒井章司(Ninomiya, A. and Arai, S.), 1992, 渡島大島火山の安山岩中に見いだされた複合捕獲岩中のハルツバーグサイト岩片(Harzburgite fragment in a composite xenolith from an Oshima-Oshima andesite, the Northeast Japan arc). *火山(Jour. Volcanol. Soc. Japan)*, **37**, 269–273.
- 二ノ宮 小満・荒井章司・石井輝秋(Ninomiya, C., Arai, S. and Ishii, T.), 2007, 日本海竹島海山(仮称)のかんらん岩捕獲岩の成因とその意義(Peridotite xenoliths from the Takeshima seamount, Japan: an insight into the upper mantle beneath the Sea of Japan). *岩石鉱物科学(Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.)*, **36**, 1–14.
- Nixon, P. H., ed., 1987, *Mantle Xenoliths*. John Wiley & Sons, 844p.
- Ohara, Y., Fujioka, K., Ishii, T. and Yurimoto, H., 2003, Peridotites and gabbros from the Parece Vela backarc basin: Unique tectonic window in an extinct backarc spreading ridge. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**, 8611, doi: 10.1029/2002GC000469.
- Ohara, Y. and Ishii, T., 1998, Peridotites from the southern Mariana forearc: Heterogeneous fluid supply in the mantle wedge. *Island Arc*, **7**, 541–558.
- Ohara, Y., Kasuga, S. and Ishii, T., 1996, Peridotites from the Parece Vela Rift in the Philippine Sea: Upper mantle material exposed in an extinct back-arc basin. *Proc. Japan Acad., Ser. B*, **72**, 118–123.
- Ohara, Y., Stern, R. J., Ishii, T., Yurimoto, H. and Yamazaki, T., 2002, Peridotites from the Mariana Trough: first look at the mantle beneath an active back-arc basin. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**, 1–18.
- Ohara, Y., Yoshida, T., Kato, Y. and Kasuga, S., 2001, Giant megamullion in the Parece Vela backarc basin. *Mar. Geophys. Res.*, **22**, 47–61.
- Okamura, H., Arai, S. and Kim, Y.-U., 2006, Petrology of forearc peridotite from the Hahajima Seamount, the Izu-Bonin arc, with special reference to chemical characteristics of chromian spinel. *Mineral. Mag.*, **70**, 15–26.
- Parkinson, I. J. and Arculus, R. J., 1999, The redox state of subduction zones; insights from arc-peridotites. *Chem. Geol.*, **160**, 409–423.
- Parkinson, I. J., Arculus, R. J. and Eggins, S. M., 2003, Peridotite xenoliths from Grenada, Lesser Antilles Island Arc. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**, 241–262.
- Parkinson, I. J. and Pearce, J. A., 1998, Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): Evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *Jour. Petrol.*, **39**, 1577–1618.
- Pearce, J. A., Barker, P. F., Edwards, S. J., Parkinson, I. J. and Leat, P. T., 2000, Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **139**, 36–53.
- Peslier, A. H., Francis, D. and Ludden, J., 2002, The lithospheric mantle beneath continental margins: melting and melt-rock reaction in Canadian Cordillera xenoliths. *Jour. Petrol.*, **43**, 2013–2047.
- Platzman, E. S., 1992, Paleomagnetic rotations and the kinematics of the Gibraltar arc. *Geology*, **20**, 311–314.
- Rampone, R., Vissers, R. L. M., Poggiom, M., Scambelluri, M. and Zanetti, A., 2010, Melt-migration and intrusion during exhumation of the Alboran lithosphere: the Tallante mantle xenoliths record (Betic Cordillera, SE Spain). *Jour. Petrol.*, **51**, 295–325.
- Ribeiro, J. M., Stern, R. J., Martinez, F., Ishizuka, O., Merle, S. G., Kelley, K.,...Bloomer, S., 2013, Geodynamic evolution of a forearc rift in the southernmost Mariana Arc. *Island Arc*, **22**, 453–476.
- Riter, J. C. A. and Smith, D., 1996, Xenolith constraints on the thermal history of the mantle below the Colorado Plateau. *Geology*, **24**, 267–270.
- Rivalenti, G., Mazzucchelli, M., Laurora, A., Ciuffi, S. I. A., Zanetti, A., Vannucci, R. and Cingolani, C. A., 2004a, The backarc lithosphere in Patagonia, South America. *Jour. South Am. Earth Sci.*, **17**, 121–152.
- Rivalenti, G., Zanetti, A., Mazzucchelli, M., Vannucci, R. and Cingolani, C. A., 2004b, Equivocal carbonatite markers in the mantle xenoliths of the Patagonia backarc: the Goberna-

- dor Gregores case (Santa Cruz Province, Argentina). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **147**, 647–670.
- Roy, M., Jordan, T. H. and Pederson, J. I., 2009, Colorado Plateau magmatism and uplift by warming of heterogeneous lithosphere. *Nature*, **159**, 978–983.
- Sanfilippo, A., Dick, H. J. B. and Ohara, Y., 2013, Melt-rock reaction in the mantle: Mantle troctolites from the Parece Vela ancient back-arc spreading center. *Jour. Petrol.*, **54**, 861–885.
- Sato, H. and Ishii, T., 2011, Petrology and mineralogy of mantle peridotites from the Southern Marianas. In Ogawa, Y., Anma, R. and Dilek, Y., eds., *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin*. Modern Approaches in Solid Earth Sciences 8, Springer, 129–147.
- Schilling, M., Conceição, R. V., Mallmann, G., Koester, E., Kawashita, K., Hervé, F.,...Motoki, A., 2005, Spinel-facies mantle xenoliths from Cerro Redondo, Argentine Patagonia: petrographic, geochemical, and isotopic evidence of interaction between xenoliths and host basalt. *Lithos*, **82**, 485–502.
- Sen, G., Keshav, S. and Bizimis, M., 2005, Hawaiian mantle xenoliths and magmas: Composition and thermal character of the lithosphere. *Am. Mineral.*, **90**, 871–887.
- Shi, L., Francis, D., Ludden, J., Frederiksen, A. and Bostock, M., 1998, Xenolith evidence for lithospheric melting above anomalously hot mantle under the northern Canadian Cordillera. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **131**, 39–53.
- Shimizu, Y., Arai, S., Morishita, T. and Ishida, Y., 2008, Origin and significance of spinel-pyroxene symplectite in lherzolite xenoliths from Tallante, SE Spain. *Mineral. Petrol.*, **94**, 27–43.
- Shimizu, Y., Arai, S., Morishita, T. and Yurimoto, H., 2004, Petrochemical characteristics of felsic veins in mantle xenoliths from Tallante (SE Spain): an insight into activity of silicic melt within the mantle wedge. *Trans. R. Soc. Edinburgh. Earth Sci.*, **95**, 265–276.
- Smith, D. and Riter, J. C. A., 1997, Genesis and evolution of low-Al orthopyroxene in spinel peridotite xenoliths, Grand Canyon field, Arizona, USA. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **127**, 391–404.
- Smith, D., Riter, J. C. A. and Merzhan, S. A., 1999, Erratum to “Water-rock interactions, orthopyroxene growth, and Si-enrichment in the mantle: evidence in xenoliths from the Colorado Plateau, southwestern United States”. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **167**, 347–356.
- Sugimura, A., Matsuda, T., Chinzei, K. and Nakamura, K., 1963, Quantitative distribution of late Cenozoic volcanic materials in Japan. *Bull. Volcanol.*, **26**, 125–140.
- Szabó, Cs., Fauls, G., Zajacz, Z., Kovacs, I. and Bali, E., 2004, Composition and evolution of lithosphere beneath the Carpathian-Pannonian region: a review. *Tectonophysics*, **393**, 119–137.
- Szabó, Cs., Harangi, S. and Csontos, I., 1992, Review of Neogene and Quaternary volcanism of the Carpathian-Pannonian region. *Tectonophysics*, **208**, 243–256.
- Szabó, Cs. and Taylor, L. A., 1994, Mantle petrology and geochemistry beneath the Nógrád-Gömör Volcanic Field, Carpathian-Pannonian Region. *Int. Geol. Rev.*, **36**, 328–358.
- Szabó, Cs., Vaselli, O., Vannucci, R., Bottazzi, P., Ottolini, L., Coradossi, N. and Kubovics, I., 1995, Ultramafic xenoliths from the Little Hungarian Plain (Western Hungary): a petrologic and geochemical study. *Acta Vulcanol.*, **7**, 249–263.
- Takahashi, E., 1978a, *Petrology of Ultramafic and Mafic Xenoliths in Cenozoic Alkali Basalts of Okidogo Island in the Japan Sea*. Ph.D. Thesis, Univ. Tokyo, 252p.
- Takahashi, E., 1978b, Petrological model of the crust and upper mantle of the Japanese island arcs. *Bull. Volcanol.*, **41**, 529–547.
- Takahashi, E., 1986, Genesis of calc-alkali andesite magma in a hydrous mantle-crust boundary: petrology of lherzolite xenoliths from the Ichinomegata crater, Oga Peninsula, north-east Japan, part II. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 355–395.
- 鷹村 権 (Takamura, H.), 1978, 愛媛県新宮村の玄武岩岩床中にスピネル・レルゾライト捕獲岩の発見 (Finding of spinel-lherzolite xenolith in basaltic sheets from Shingu, Ehime Prefecture, Japan). *地質雑 (Jour. Geol. Soc. Japan)*, **84**, 475–479.
- Takeuchi, M. and Arai, S., 2015, Upper mantle can in-situ fracture: an implication from a cataclastic peridotite xenolith from Megata, Northeast Japan arc. *Mineral. Petrol.*, **109**, 283–294.
- Tamaki, K. and Honza, E., 1991, Global tectonics and formation of marginal basins: Role of the western Pacific. *Episodes*, **14**, 224–230.
- Tatsumi, Y., 1986, Formation of the volcanic front in subduction zones. *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 717–720.
- Tatsumi, Y., Sakuyama, M., Fukuyama, H. and Kushiro, I., 1983, Generation of arc basalt magmas and thermal structure of the mantle wedge in subduction zones. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 5815–5825.
- Tollan, P. M. E., 2014, *A Tale of Two Arcs: Petrogenesis of Ultramafic Xenoliths Sampling the Upper Mantle Wedge Beneath the West Bismarck Island Arc*. Ph.D. Thesis, Durham Univ., 233p.
- Turner, S. P., Platt, J. P., George, R. M. M., Kelley, S. P., Pearson, D. G. and Nowell, G. M., 1999, Magmatism associated with orogenic collapse of the Betic-Alboran Domain, SE Spain. *Jour. Petrol.*, **40**, 1011–1036.
- Vaselli, O., Downes, H., Tharllwall, M., Dobosi, G., Coradossi, N., Seghedi, I.,...Vannucci, R., 1995, Ultramafic xenoliths in Plio-Pleistocene alkali basalts from the Eastern Transylvanian basin: depleted mantle enriched by vein metasomatism. *Jour. Petrol.*, **36**, 23–53.
- Vidal, P., Dupuy, C., Maury, R. and Richard, M., 1989, Mantle metasomatism above subduction zones: trace-element and radiogenic isotope characteristics of peridotite xenoliths from Batan Island (Philippines). *Geology*, **17**, 1115–1118.
- Wang, J., Hattori, K. H., Kilian, R. and Stern C. R., 2007, Metasomatism of sub-arc mantle peridotites below southernmost South America: reduction of fO_2 by slab melt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **153**, 607–624.
- Wells, P. R. A., 1977, Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **62**, 129–139.
- Witt-Eickschen, G., Sech, H. A., Mezger, K., Eggins, S. M. and Altherr, R., 2003, Lithospheric mantle evolution beneath the Eifel (Germany): Constraints from Sr-Nd-Pb isotopes and trace element abundances in spinel peridotite and pyroxenite xenoliths. *Jour. Petrol.*, **44**, 1077–1095.
- Wood, B. J., Bryndiza, L. T. and Johnson, K. E., 1990, Mantle oxidation state and its relationship to tectonic environment and fluid speciation. *Science*, **248**, 337–345.
- Xu, J., Weixing, T., Guang, Z., Shoufa, L. and Ma, G., 1989, An outline of the pre-Jurassic tectonic framework. *Jour. Southeast Asian Earth Sci.*, **3**, 29–45.
- Yoshikawa, M., Tamura, A., Arai, S., Kawamoto, T., Payot, B. D., Rivera, D. J.,...Kobayashi, T., 2016, Aqueous fluids and sedimentary melts as agents for mantle wedge metasomatism, as inferred from peridotite xenoliths at Pinatubo and Iraya volcanoes, Luzon arc, Philippines. *Lithos*, **262**, 355–368.
- Zanetti, A., Vannucci, R., Oberti, R. and Dobosi, G., 1995, Trace-element composition and crystal-chemistry of mantle amphiboles from the Carpatho-Pannonian region. *Acta Vulcanol.*, **7**, 265–276.

* English translation from the original written in Japanese

(著者プロフィール)



荒井章司 金沢大学国際基幹教育院特任教授。71年 東京大学理学部卒, 76年 東京大学大学院博士課程修了(理学博士), 76年 東京大学助手, 77年 静岡大学助手, 79年 同講師, 81年 筑波大学講師, 85年 同助教授, 89年から金沢大学教授。14年 金沢大学理工研究域特任教授。16年より現職。研究内容: 岩石学。本研究では, 総括・原稿執筆・編集委員会との対応を担当。

E-mail : ultrasa@staff.kanazawa-u.ac.jp



石丸聡子 熊本大学大学院先端科学研究部基礎科学部門地球環境科学分野助教。02年 金沢大学地学部卒, 07年 金沢大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了(博士(理学)), 07年 金沢大学研究員, 08年 金沢大学博士研究員, 11年から現職。研究内容: 岩石学。本研究では, 文献調査・原稿執筆を担当。

E-mail : s_ishimaru@kumamoto-u.ac.jp

(要 旨)

荒井章司・石丸聡子, 2018, 島弧上部マントルの岩石学的性質：何が固有か？. 地質雑, **124**, 551–573. (Arai, S. and Ishimaru, S., 2018, Petrologic characteristics of the upper mantle beneath island arcs. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 551–573.)

本論文では島弧マグマ中および島弧に噴出した他のマグマ中の捕獲岩, さらに前弧域の海底に露出するかんらん岩を島弧リソスフェアマントルを代表するものとして, その岩石学的性質(モード組成, 鋳物化学組成, 平衡条件, 酸化還元状態)を総括した。特に火山前線～前弧域の枯渇したハルツバータイトの存在は上部マントル・ウェッジを特徴づける。それらは高度部分溶融の融け残りである。また, それらの多くは交代作用(シリカの付加および加水作用)を被っている。トレモラ閃石の存在は, 低温および/または枯渇した(Alに乏しい)化学組成を示唆し, 特徴的である。特に太平洋西部の火山前線～前弧域のものは比較的高い酸素フガシティーを示し, 島弧マントルを強く特徴づけている。ただし, いくつかの島弧かんらん岩は低い酸素フガシティーを示すことが注目される。特に, マントル・ウェッジ深部には強い還元的な流体が存在している。