

「点と線」に注目した沈み込み帯の火山とテクトニクス

市原美恵* Claudia ADAM** Valérie VIDAL***
Pablo GROSSE**** 三部賢治* 折橋裕二*

Dots-and-Lines Approach to Subduction Volcanism and Tectonics

Mie ICHIHARA*, Claudia ADAM**, Valérie VIDAL***,
Pablo GROSSE****, Kenji MIBE* and Yuji ORIHASHI*

[Received 25 June, 2016; Accepted 4 November, 2016]

Abstract

Anomalous arc volcanoes tend to exist where a linear topographic feature (fracture zone, line of seamounts, or ridge) on the oceanic plate is subducting. “Dots-and-lines tectonics” are proposed for clarifying this tendency and understanding the mechanisms that generate it. State-of-the-art studies on along-arc variations of volcanism around the Pacific ring of fire and possible effects of inhomogeneities on the subducting oceanic plate are reviewed. Mechanisms generating the clustered distribution of active volcanoes in North-eastern Japan and the extraordinary volcanism at Mount Fuji are reconsidered from a “dots-and-lines” tectonics point of view. Although there still remain many unsolved problems, “dots-and-lines” tectonics could offer a unified explanation of along-arc variations in volcanism, combining processes in mid-ocean ridges, hot spots, and subduction zones.

Key words : subduction, volcano, tectonics, ridge, fracture zone

キーワード : 沈み込み帯, 火山, テクトニクス, 海嶺, 断裂帯

I. 序 論

プレートが沈み込む海溝に沿った地域（大陸弧・島弧をあわせて島弧と呼ぶことにする）では、火山活動がみられる。そこでの、マグマの生成メカニズム、生成場所、物質科学的な特徴などを決めるプロセスに関して、沈み込むプレートによっ

てもたらされる流体（おもに水）の循環とマントル対流によってもたらされる熱の供給が重要な役割を果たしていると考えられている（巽, 1995）。近年の地球物理学観測・数値シミュレーション・実験岩石学・地球化学分析などの研究によって、水と熱の移動の具体的な経路やメカニズムについて裏づけがなされ、図1のような沈み込

* 東京大学地震研究所

** Kansas State University

*** Univ Lyon, ENS de Lyon

**** CONICET & Fundación Miguel Lillo

* Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan

** Virginia Tech., Blacksburg, VA, U.S.A.

*** Univ Lyon, ENS de Lyon, Univ Claude Bernard, CNRS, Laboratoire de Physique, F-69342 Lyon, France

**** CONICET & Fundación Miguel Lillo, Tucumán, Argentina

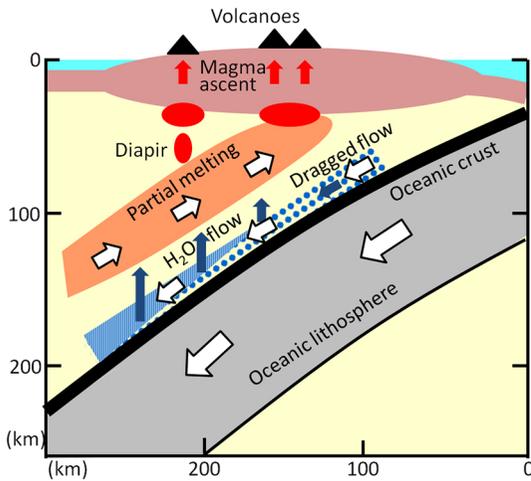


図1 海洋プレートの沈み込みによって島弧火山活動を生成する、沈み込み帯断面の地殻とマンツウエッジの概念。白い矢印はプレートとマンツウの動きを、色つきの矢印は流体の動きを表す。本図は、Hasegawa *et al.* (2009) の図21と Mibe *et al.* (1999) の図5を引用した。

Fig. 1 Schematic illustration of an across-subduction cross-section of crust and mantle wedge. White arrows indicate plate and mantle motions, and colored arrows indicate fluid pathway. The figure refers to Fig. 21 of Hasegawa *et al.* (2009) and Fig. 5 of Mibe *et al.* (1999).

み断面の描像が示されている (Mibe *et al.*, 1999; Iwamori, 2004, 2007; Hasegawa *et al.*, 2009; Kogiso *et al.*, 2009)。海洋プレートが沈み込みはじめると、海水変質を受けた地殻物質の脱水作用が起こる。海洋プレートから放出された水は、適度な温度・圧力条件が満たされれば、直上のマンツウ中に含水鉱物 (おもに角閃石、金雲母、蛇紋石、緑泥石など) として吸収され、マンツウの流れとともにさらに深部に運ばれる。そして、それらの含水鉱物が分解する約 100 km 以深の温度・圧力条件下で、水は再び放出される。放出された水は、マンツウカンラン岩の粒間を浸透流として移動する。水は、マンツウカンラン岩の融点を降下させ、マンツウウエッジ中央部の高温域に達すると、部分融解によってマグマを発生させる。マグマは浮力により上昇し、地殻内での変化を受けつつ地表に達して火山活動を生ずる。

実際の沈み込み帯には、先述の標準的なモデルで島弧火山の存在が想定されているはずの地域 (沈み込んだ海洋プレートの深度が 100 km に達している直上の地域) でも火山の空白域があり、その領域は海溝軸に沿って数百キロ以上に及ぶ大規模なものもある。このような火山の空白域も、沈み込み帯断面内のプロセスに注目して、標準的なモデルからのずれとして説明されている。例えば、海台のような厚くて軽い海洋地殻が載っているために、プレートの沈み込み角度が浅くなっている地域の火山空白域は、含水鉱物の脱水やマンツウの部分融解が起こり得る条件が整わないことから生ずると考えられている (McGeary *et al.*, 1985)。

海洋プレートの沈み込み角度を変えるには、大規模な地殻不均質が必要で、対応する火山の不均質も広範囲に及ぶはずである。しかし、海溝軸に沿った火山の不均質は、1 個の火山程度のスケールのもも多くみられる。例えば、100 km スケールの火山分布の粗密化や特異に大きな火山の存在などがあげられる。これらの成因については確立した説はなく、個々の例に対して、(1) マンツウウエッジ内の対流構造 (Tamura *et al.*, 2002)、(2) 陸側の地殻の構造や応力状態 (Tibaldi, 2005; Lavallee *et al.*, 2009)、(3) 沈み込むプレートの不均質 (Onuma and Lopez-Escobar, 1987)、という異なる視点に立った要因が考えられている。近年は、海溝より陸側に注目した(1)や(2)の見方が主流であり、(3)は際立った特徴のある地域に対する研究を除き普遍的に検討されることは少なかった。

本研究は、沈み込む海洋プレートの線状不均質 (断裂帯・海山列・海嶺等) を島弧に向けて延長した場所には、特異点として特徴的な火山または火山群が存在する、という傾向に着目し、その普遍性の定量化と原因の解明を最終目的としている。火山 (点) と海洋プレート上の不均質 (線) の関係に注目するという意味で、ここでは「点と線」テクトニクスと呼ぶことにする。また、個々の地域、あるいは、火山学・地震学・地球化学などの個々の分野で研究されている現象をつなぐ

という意味合いも込められている。II章では、環太平洋沈み込み帯（火山帯）について、「点と線」の関係に関する研究をレビューする。III章では、点と線の視点から日本列島の火山の分布を地震や地形の特徴とあわせて見直し、その成因を考える。本研究は、まだ未完成の段階にあるが、定量化と検証に向けた今後の展望をIV章に述べる。

II. 海洋プレートの線状不均質と沈み込み帯の火山活動

1) 断裂帯の沈み込みと火山活動

断裂帯は海洋プレート上にできた傷であり、中央海嶺でプレートが生成される際に、海嶺軸のずれによって生じる (Menard and Atwater, 1969)。また、断裂帯に斜交した傷もあり、海嶺軸のずれの位置が変化する時に生じた pseudofault であると考えられている (Manea *et al.*, 2005; Nakaniishi, 2011)。これらの断裂帯は、マントルへの水の供給量やプレート内・プレート間の強度の不均質を生みだし、沈み込み帯の地震や火山活動に影響を与えていると考えられている (Umino *et al.*, 1990; Manea *et al.*, 2014; Fujie *et al.*, 2016)。

断裂帯の火山活動への影響についての先駆的な研究は、Onuma and Lopez-Escobar (1987) による。彼らは、Sr/Ca と Ba/Ca プロット図において、地殻内での分別結晶作用によるマグマ分化トレンドが上部マントルの部分融解によるマグマ生成過程のトレンドと交差する点を用いて、チリ南部火山帯をつくるマグマの部分融解度 (SB インデックス) を推定し、その空間変化を調べた。その結果、部分融解度の極大値が沈み込む海洋プレート上の断裂帯延長に見事に一致することを示した。その原因として、沈み込んだプレートが断裂帯のところで裂け、熱や物質がその下位のマントル (アセノスフェア) から上昇流によって供給され、周囲と比べ部分融解度が大きくなっていると考えた。

断裂帯からの流体が沈み込み帯の火山活動に与える影響について、地球化学と地球ダイナミクスの両方の観点からグローバルに検討した研究は、

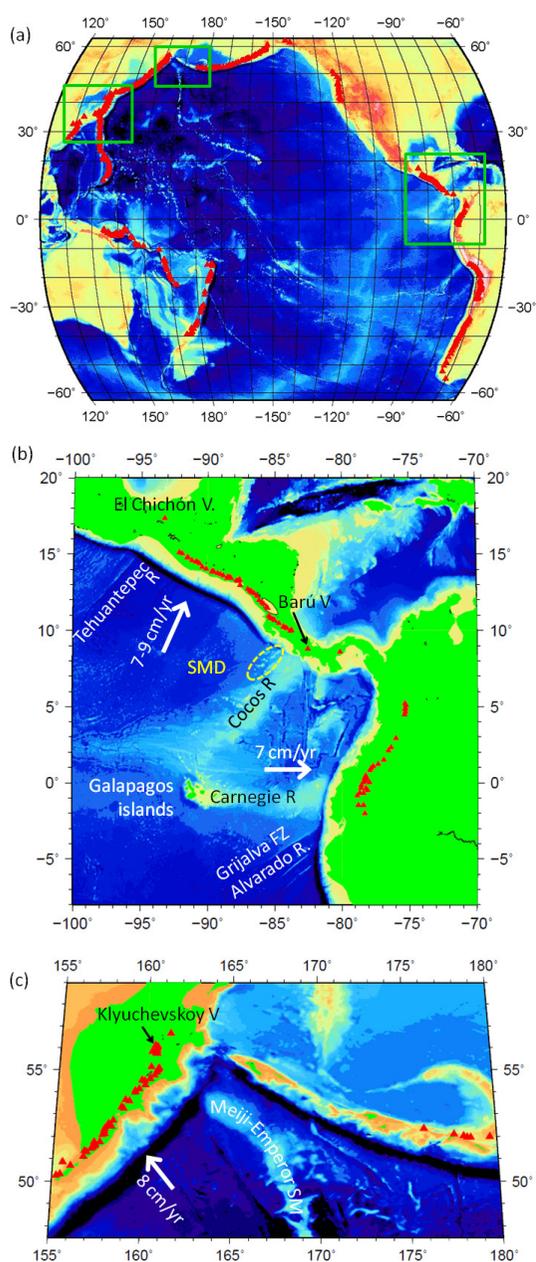
Manea *et al.* (2014) によりはじめて行われた。彼らは、環太平洋火山地帯の南米、中米、カスケード、アリューシャンにあるおもな断裂帯 6 例について、それぞれの延長上にある火山への影響を調べている。スラブ由来の流体の影響を表すホウ素 (親水性) とジルコニウム (疎水性) の比が、沈み込む断裂帯の延長上にある火山で顕著に高くなっていることが、南米の 2 例とアリューシャンの 1 例で確認された。カスケードの 1 例についても同じ傾向が弱いながらもみられている。中米の 2 例については、上記のような傾向はみられなかったが、そのうちの 1 つ、Tehuantepec Ridge と呼ばれる断裂帯の先には、El Chichón という位置的にも組成的にも特異な火山があり、断裂帯の沈み込みの影響が議論されている (Manea and Manea, 2008)。Manea *et al.* (2014) は、また、3 次元の熱流体数値計算を行い、断裂帯のもたらす流体によって、その直上のマントルウェッジで集中的にマグマが生成されることを示した。彼らの研究は、「点と線」テクトニクスの可能性を裏づけるものである。

2) 海嶺・海山列の沈み込みと火山活動

海嶺 (Oceanic Ridge) という、海洋プレートの拡大軸である中央海嶺を思い浮かべがちであるが、この言葉自体は単に海底にある線上の地形の高まりを指す。先述の Tehuantepec Ridge のように地形の高まりを伴う断裂帯である場合もあれば、九州南方にある九州パラオ海嶺のように、島弧火山列の名残であるものもある (Ishizuka *et al.*, 2011; Mahoney *et al.*, 2011)。中米の Cocos Ridge や Carnegie Ridge はガラパゴスホットスポットの軌跡であるが、ハワイホットスポットの軌跡であるハワイ-天皇海山列は、海嶺とは呼ばれていない。また、南米のチリ三重点 (Chile Triple Junction) のように、まさに中央海嶺軸であるチリ海嶺が沈み込んでいる地域もある。このように、名称自体も曖昧であるが、広義の意味での海嶺の沈み込みが与える火山活動への影響について、統一的な理解はまだ得られていない。

大規模な海嶺は、地殻同士の衝突により沈み込みを妨げたり、浮力によって沈み込み角度を浅く

して、火山の空白域を生みだしていると考えられ、先述の Cocos Ridge とチリ海嶺がそれぞれの代表的な例とあげられている (McGeary *et al.*, 1985)。チリ海嶺沈み込み地域では、約 350 km におよぶ Patagonian Volcanic Gap と呼ばれる明瞭な火山空白地帯が形成されており (Orihashi



et al., 2004; Stern, 2004), その成因が沈み込み角度だけで説明できるのかどうかについては、まだ議論が続いている (Ramos, 2005)。一方、Cocos Ridge と大きさも成因も同等である Carnegie Ridge の沈み込む島弧には、周辺よりも多くの火山が集中している (図 2b)。その理由として、通常の角度の沈み込みから浅い沈み込みに変化する過渡期に起こる現象 (Bourdon *et al.*, 2003), 浅い角度で沈み込む海嶺の両縁でプレートが裂けていることによる熱的な影響 (Gutscher *et al.*, 1999), 海嶺の地形的高まりによって上盤プレートと強くカップリングした結果 (Chiaradia *et al.*, 2009) などが提案されている。

上記のような大規模な海嶺の影響は、海溝軸に垂直な断面の描像を変化させ得るものであるが、「点と線」テクトニクスが対象とする不均質は、もっと局所的なものである。例えば、Cocos Ridge の沈み込み先は、大局的には火山の空白域に位置するが、海嶺軸の延長線上には、比較的大きな Barú 火山が 1 点ある (図 2b)。このような

図 2 沈み込む海洋プレート上の線状の地形と島弧火山 (赤色三角) の分布不均質の関係. (a) に示す緑の枠は、右から順に、(b), (c), および、図 3 の領域を表す. (b) 中米では、Tehuantepec Ridge と Cocos Ridge の沈み込む先に特徴的な単独火山 (El Chichón および Barú 火山) があり、海山群 (SMD) と Carnegie Ridge の沈み込む先には、大きな火山の集中がみられる (Gutscher *et al.*, 1999; Manea *et al.*, 2014; Morell, 2016). (c) カムチャッカでは、明治・天皇海山列の沈み込む先に、巨大な Klyuchevskoy 火山群が存在する (Scholl, 2007).

Fig. 2 Linear topographic features on subducting oceanic plates compared to distribution of arc volcanoes (red triangles) around the Pacific Ocean. Green squares in (a) show areas of (b), (c), and Fig. 3. In Central America (b), isolated volcanoes El Chichón and Barú are located in volcanic gaps where the Tehuantepec and Cocos ridges are subducting, respectively. On the other hand, large volcanoes are concentrated on arcs where a seamount district (SMD) and Carnegie Ridge are subducting (Gutscher *et al.*, 1999; Manea *et al.*, 2014; Morell, 2016). In Kamchatka (c), the Klyuchevskoy volcanic group, having huge volcanoes, is directly on the subduction trend of the Meiji-Emperor Seamounts (Scholl, 2007).

不均質を生じ得る局所的な海嶺の沈み込みの影響として、以下の2つが考えられている。

1つは流体の供給量の増加である。例えば、カムチャッカにある Klyuchevskoy という大規模火山は、天皇海山列の沈み込みの延長にあり (図 2c)、海山列から流体供給を受けてできていると考えられている (Dorendorf *et al.*, 2000)。また、Mahoney *et al.* (2011) は、九州における 6.5 Ma 以降の大規模な火山活動が、九州パラオ海嶺のたらず流体の影響を受けて発生した可能性を指摘している。現在、九州パラオ海嶺の延長は、九州の大火山である阿蘇と霧島の間の空白域を通っている。阿蘇と霧島を構成する火山岩は、九州の他の火山よりも流体の影響を強く受けていることが、ホウ素に注目した微量元素分析の結果から示唆されている (Miyoshi *et al.*, 2008a, b)。九州パラオ海嶺の沈み込みが、これら大規模火山の形成に寄与しているのか、火山の空白域をつくる起因となっているのか、その因果関係は明らかにされていない。

2つ目の局所的な影響として、地形的高まりの沈み込みが生み出す力学的な効果があげられる。最近の研究により、海山の沈み込みが応力場や温度場、地震の発生状況に影響していることが明らかになってきた (Dominguez *et al.*, 2000; Seno and Yamasaki, 2003; Mochizuki *et al.*, 2008; Spinelli and Harris, 2011)。同様に、力学的な影響は、火山活動にも影響を与える可能性がある (Rosenbaum and Mo, 2011; Kimura *et al.*, 2014; Morell, 2016)。Morell (2016) は、中米南部の沈み込み帯に対して、長波長 (350 km 程度) の高まりである Cocos Ridge の影響と、短波長 (数十 km スケール) の起伏 (海嶺北側の海山群や海嶺上の起伏など) の影響に分けて整理し、文献から集めた地震、測地、地質など多項目のデータを見直した。そして、海洋プレート上の異なる波長の地形変化が、島弧において異なる波長・時間スケールの地殻変形と火山活動の変化に影響を与えていると考えた。

はたして、地形の高まり (海嶺を含む) の沈み込みは、火山活動を低下させるのだろうか、活発

化させるのだろうか。Rosenbaum and Mo (2011) は、環太平洋沈み込み帯 (火山帯) の海洋プレート上で地形の高まりがみられる 22 の地域について、火山フロント沿いの火山の数とその島弧の平均的な火山の数を単位距離当たりに換算して比較した。その結果、火山の空白域が 10 例、平均よりも火山の数が少ない地域が 6 例、同等か火山の数が多いたものが 7 例あった。彼らの研究は、数値地形データを用いて、グローバルかつ統計的に関係性を評価しようとした点で、議論を一步進めるものであるが、上記の間には明確な答えが出せていない。今注目している「点と線」の関係を抽出するためには、定量化の方法を工夫する必要がある。詳細は IV 章で議論したい。

III. 「点と線」の視点からみた 日本のテクトニクス

沈み込み帯の地震や火山活動は、広く認識されている以上に沈み込む側のプレートの影響を受けている可能性がある。ここでは、日本列島のテクトニクスに関する2つの問題を取りあげ、「点と線」の視点から再考してみることにする。

1) 沈み込むプレート上の傷と地震・火山活動

東北地方の第四紀火山は、火山フロントに沿って均質に分布しているわけではなく、30-75 km の間隔でクラスターをつくっている (Kondo *et al.*, 1998)。このクラスターは、日本海側から伸びるマントル低速度領域の上に位置している。このことから、マントルウェッジ内の3次元流れ場で形成されるホットフィンガーが火山のクラスターをつくっていると考えられている (Tamura *et al.*, 2002; Honda and Yoshida, 2005; Hasegawa *et al.*, 2009)。このような火山の分布を、「点と線」テクトニクスからみてみたらどうだろうか。

プレートの断裂帯が、沈み込み帯の地震や火山活動に影響する可能性については II 章で述べた。Umino *et al.* (1990) は、東北日本に沈み込んでいる断裂帯がプレート境界型地震の滑り域の境界になっていると指摘している。しかし、彼らが言及している断裂帯は、海溝に斜交しており (図 3, 白色線)、また、Nakanishi *et al.* (1989) が示す

東北日本に沈み込む断裂帯はさらに大きく斜交している (図3, 黄色線)。それら断裂帯の延長と火山の分布の関係はよく分からない。

一方, 地震調査研究推進本部 (HERP) によるプレート境界型地震のセグメント境界 (HERP, 2016) を陸側に延長すると, 驚くほど火山のクラスターによく一致する (図3, 赤色点線)。千島弧では, 沈み込む断裂帯 (図3, 緑色線) (Nakanishi *et al.*, 1989) の延長領域ともよく一致している。HERP のセグメント境界は, 地震の規模や頻度の長期評価のために, おもに, 繰り返し発生する地震の起こり方から決められたものである。茨城県沖, 福島県沖, 宮城県沖等, 各県ごとにセグメントがあるようで, 対策上人為的に決められているような印象も受けるが, 反対に, 地震のセグメント境界が火山を含む内陸の地形障壁を生みだし, 結果的に県境となっている可能性も否めない。示されているセグメント境界が, 海岸線の特徴が変化する境界に一致することも, それを示唆している。東北日本における火山と地震のセグメントの境界の関係については, これまでほとんど言及されていない。また, 地震のセグメント境界と沈み込むプレートの不均質の関係についても実証的な研究がはじまったばかりである (例えば, Fujie *et al.*, 2016)。

2) 富士山の謎

「富士山はなぜそこにあるのか」というのは, 日本の火山学・テクトニクス学の根本的な問題である (貝塚, 1990; 藤井, 2007)。富士山は, 太平洋プレートの沈み込みによってフィリピン海 (PHS) プレート上に形成された伊豆ボニン弧の火山フロントの並びにあるが, PHS プレートがユーラシアプレート下へ沈み込んでいる西方近傍 (本州側) で糸魚川-静岡線, すなわち, ユーラシアプレートと北米プレートという2つの大陸プレートの境界付近という特異点に位置している (図3)。

富士山の第一の特徴は, その大きさである。通常の島弧火山に比べて1桁以上大きい噴出率が長年続いている (Tsukui *et al.*, 1986)。貝塚 (1990) は富士山がなぜそこにあるかを議論して,

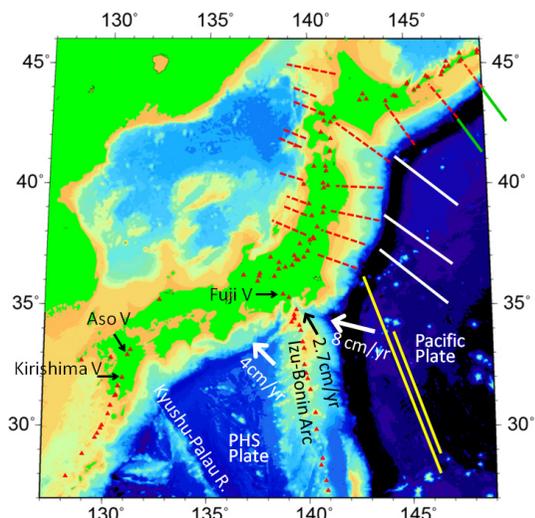


図3 日本周辺の火山 (赤三角) の分布とテクトニクス。プレートの速度は Seno (2005) による。太平洋プレート上の白色実線は, Umino *et al.* (1990) による断裂帯, 黄色と緑の実線は, Nakanishi *et al.* (1989) による断裂帯を示す。赤い点線は, 東北地方以北のプレート境界地震のセグメント境界 (地震調査推進本部, HERP, 2016) を, 島弧に延長したもので, 火山のクラスターに一致する。西南日本では, 伊豆ボニン島弧の沈み込む先には富士山があり, 九州パラオ海嶺の延長線は, 阿蘇火山と霧島火山の間の火山空白域を通っている。

Fig. 3 Distribution of arc volcanoes (red triangles) and tectonics around Japan. Plate velocities follow Seno (2005). White lines on the Pacific plate are fracture zones presented by Umino *et al.* (1990), while yellow and green lines are those shown by Nakanishi *et al.* (1989). Boundary lines of inter-plate earthquake segments (HERP, 2016) in northeastern Japan are extended to the arc (red broken lines) and are shown to coincide with volcano clusters. In southwestern Japan, the Izu-Bonin arc and the Kyushu-Palau ridge are subducting beneath Mt. Fuji and the volcanic gap between Aso and Kirishima, respectively.

火山フロントと衝突帯が交差する特異点にあるからマグマ上昇率が高いと述べているが, その理由は説明していない。また, 富士山の下には, 太平洋プレートと PHS プレートが二重に沈み込んでおり, マントルウェッジは通常より冷たいはずであるが, 高橋 (2000) は, 富士火山の下で PHS プレートが海嶺のように裂けて拡大しつつあるた

め、玄武岩質マグマが大量に生成されると提案した。しかし、最近の地震学・測地学的研究は、PHS プレートはつながっているという結論へ収束しつつある (Seno, 2005; Nakamichi *et al.*, 2007; Nakajima *et al.*, 2009; Kinoshita, 2016)。

藤井 (2007) は、約 10 万年前以降の富士山の玄武岩は、 FeO^*/MgO 比がマントルで生成される初生マグマに比べて高い値をもち、伊豆島弧の玄武岩よりも結晶分化作用の進行していることを示している。通常、結晶分化作用が進行するにつれてマグマのシリカ含有量は増加し、玄武岩から安山岩やデイサイトに変化するが、富士山のマグマのシリカ含有量は玄武岩 (いわゆる、鉄質玄武岩) の範囲にとどまっている。藤井 (2007) は、通常のマグマ溜りの深さ (約 10 km) より深い (約 20 km) ところで結晶分化作用が起これば、このような組成の玄武岩ができるとし、10 万年前頃、密度の軽い本州島弧の上部地殻が急激に厚くなったため、それに伴いマグマの滞留深度も深くなったと考えた。その後行われた掘削研究により、組成の変化が起こった時期は、富士山の前に同じ場所で活動した先小御岳火山が約 16 万年前に活動をやめてから、古富士火山が約 10 万年前に活動を開始するまでの間であると結論づけられた (Yoshimoto *et al.*, 2010; Shibata *et al.*, 2015)。そして、Yoshimoto *et al.* (2010) は、同じ頃に箱根や伊豆半島の火山活動も変化していることから、PHS プレートの運動に急激な変化が生じた可能性を指摘している。

これまでの章で述べてきたように、沈み込み帯のマグマ生成過程において、沈み込むプレートがマントルにもたらす流体が重要な役割を果たしていると考えられる。Nakamura *et al.* (2008) は、東日本弧および伊豆ボニン弧火山岩の同位体組成から太平洋プレート由来の流体と PHS プレート由来の流体のそれぞれの寄与を分別定量化した。その結果、富士山のマグマはほぼ完全に太平洋プレート由来の流体でできているという結論を得た。

以上に述べたことから、富士山には 4 つの謎があるといえる。(1) PHS と太平洋プレートが二重に沈み込む、相対的に冷たいマントルウェッジ

下で大量のマグマが噴出している。(2) 結晶分化過程で通常の玄武岩より多くの造岩鉱物を晶出した残渣のマグマであるのに、大量のマグマ生成物を噴出している。(3) PHS プレートを突き抜けてきたマグマなのに、PHS プレート由来の流体の寄与がみられない。(4) プレート境界の特異点に数百万年以上前から位置しながら、16 ~ 10 万年前までは他の伊豆ボニン島弧北部の火山と同等な火山であった。

「点と線」の視点からみた富士山のマグマ成因モデルを図 4 に示す。富士山直下の PHS プレート構造は、Nakajima *et al.* (2009) の結果を用い、その直下にも PHS プレートが繋がっていることを前提とする。富士山が現在のような特徴的な活動をはじめ前、その場所では先小御岳火山が、伊豆ボニン島弧北部の火山と同様の活動をしていた (Yoshimoto *et al.*, 2010)。この時、PHS プレート下位のマントルウェッジでできた先小御岳火山のマグマは、通常の伊豆ボニン島弧火山のマグマ成因と同じように、太平洋プレート由来の流体による加水融解により形成され、PHS プレートを突き抜けて地表へと噴出していた。16 ~ 10 万年前に富士山の特異な火山活動がはじまる (藤井, 2007; Yoshimoto *et al.*, 2010) わけであるが、この頃、伊豆ボニン島弧の火山の 1 つ (ここでは仮に Z 火山と呼ぶことにする) のマグマ溜りを含むマグマ上昇経路が PHS プレートと共に富士山直下に運ばれてきたというのがこのモデルの本質的な点である。

このモデルは、富士山の不思議な特徴(1)~(4)を都合よく説明する。Z 火山が PHS プレートとともに駿河・相模トラフに沈み込みはじめると、その地下のマグマは出口を塞がれ、噴出できなくなる (マグマ溜りの肥大化)。この沈み込んだ Z 火山のマグマ通路が富士山直下のマントルウェッジ内のマグマ上昇経路と合致した時、新たに上昇してきたマグマが肥大化したマグマ溜り内の分化したマグマ (Z 火山由来) に注入し、混合しながらこれを押し出す。これにより、富士山では通常よりも増量したマグマが噴出を開始し、地表ではマグマ生成物の噴出量が増加する。この沈み込ん

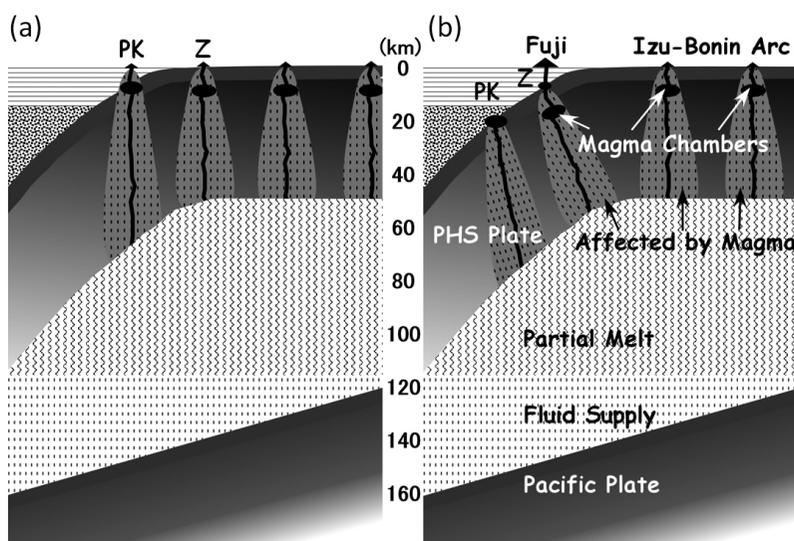


図 4 富士山の特異な火山活動の成因モデル。かつては、先小御岳火山 (PK) が富士山の位置で活動し、島弧火山 (Z) が PHS プレート上で活動していた (a)。現在、その火山 (Z) が富士山の下に沈み込み、マグマ溜りとマグマの供給経路を与えている (b)。

Fig. 4 Model proposed to explain anomalous activity of Mt. Fuji. In the past, Pre-Komitake (PK) was active at the present position of Mt. Fuji, and an arc volcano (Z) was active on the PHS plate (a). Volcano (Z) is now beneath Mt. Fuji providing a magma chamber and a pathway for supplying new magma.

だ Z 火山由来のマグマ溜り内未固結分化マグマと富士山直下の、既存のマグマ経路で上昇した新たなマグマは、ともに太平洋プレート由来の流体により加水融解したマグマであるので、富士山の火山岩には PHS プレート由来の流体の混入がないとする Nakamura *et al.* (2008) の結果と矛盾しない。また、かつて深さ 10 km 付近にあった Z 火山の肥大化したマグマ溜りは、プレートの沈み込みに対応して約 20 km 以深まで運ばれており、深部で大部分が固結することなく分化が進んだマグマ (藤井, 2007) をいかに大量に形成するかという点も説明でき得る。

このような特異なマグマ生成場が生じる時間スケールは、沈み込んだ島弧火山 (Z 火山) のマグマ経路が地表の火山 (富士山) のマグマ経路を通過する時間に相当すると考えられる。火山の直径を約 5 km とし、PHS プレートの沈み込み速度を 2.7 cm/yr とすると、約 20 万年になる。また、伊豆ボニン島弧の火山間隔は 15 km 以上である

ため、Z 火山より前に沈み込んだ火山が同様の影響を及ぼしたとすると、それは、55 万年以上前、すなわち、先小御岳火山より 40 万年以上前の活動にみられるはずである。

過去に沈み込んだ島弧火山が新しい火成活動を誘発するというモデルは、前弧域の中新世深成岩類についてであるが、Kimura *et al.* (2014) も類似のモデルを提案している。彼らは、四国海盆の拡大に伴い伊豆ボニン (+マリアナ) 弧が九州から関東にかけて沈み込みつつ東方へ移動した際、島弧火山列が間欠的に沈み込むのに対応して、足摺岬、室戸岬、潮岬などを起点として北に続く延長領域で火成活動が誘発されたと考えた。しかし、沈み込む島弧火山列が関東地域に到達してからは、甲府の花崗岩体の形成に影響を与えた可能性を指摘しているが、これと活動期の異なる富士山との関係については述べられていない。本論で提案したモデルは、先行して駿河・相模トラフに沈み込んだ PHS プレート上の島弧火山のマ

グマ経路が PHS プレート下位のマントルウェッジで形成された新たな島弧マグマ（流体は太平洋プレート由来）に上昇通路を与える、というものであり、Kimura *et al.* (2014) のモデルとは異なるが、海洋プレート上の「線」が陸上の火山「点」を支配している、という意味では、同じ視点に立つものである。

IV. 今後の展望

これまでの議論で主張した「点と線」テクトニクスの視点自体は、前述したように多くの先行研究がある。しかし、最近 20 年の沈み込み帯の火山学における議論の主流にはなっておらず、今後さらなる検討の余地が残されているとわれわれは考えている。本研究は、沈み込む海洋プレートの線状不均質（海嶺や断裂帯など）の先には、特異な島弧火山が存在する、という傾向を前提としている。そもそも、その傾向は、客観的に有意なのであるか。「点と線」に注目して火山分布を考えはじめると、仮説に合致する特徴だけが目につき、主観的なバイアスがかかってきてしまう。何らかの客観的な基準に基づいて、線状の不均質や特異な火山を抽出し、それらの関係について統計的な検討を行う必要があるだろう。また、「点と線」の関係を生み出すメカニズムを特定することも重要である。以下に、今後進めるべき研究の方向性を議論したい。

1) 「点と線」の地形的相関関係の検証

II 章で紹介した Rosenbaum and Mo (2011) は、火山フロント単位距離あたりの火山の個数に着目して、海嶺の沈み込みとの関係を調べたが、その結果には明瞭な「点と線」の関係はみられない。われわれが注目している局所的な線状不均質と相関のよいのは、火山の平均個数ではなく、火山の体積分布の局在化にあると考えた。しかし、火山の体積の客観的な評価は、実は難しい。広域に分布する噴出物の総量を見積もったり、地下の山体の体積を評価することは、地質学・地球物理学的研究の進んでいる火山でなければ不可能で、グローバルに一律の精度でデータを得ることはできない。そこで、デジタル地形データ (SRTM

90 m) を用いて火山の地形的特徴を系統的に数値化する計算手法 (MORVOLC: Grosse *et al.*, 2009, 2012) によってデータベース化された体積 (Grosse *et al.*, 2014) を用いる。この体積は、火山が噴出したマグマ生成物の総体積を表すものではなく、現在の火山地形から推定したものである。したがって、カルデラ噴火を経験した火山の場合であっても、カルデラ形成後の現在の火山地形をもとに火山体積を見積もっているため、本来の火山山体の大きさを過小評価することになる。しかし、一律の基準で抽出した火山の地形パラメータとしては有用だろう。沈み込む線状不均質については、海底地形に短波長の起伏のみを抽出するフィルターを施し、成因に関わらず地形の高まりが確認できるものを抽出した。得られた各火山の体積と沈み込む線状不均質の位置関係を中米 (図 2b) について比較したものを図 5 に示す。Cocos Ridge 北側の海山群 (SMD) や Carnegie Ridge の沈み込む延長線上の直上では、大きな火山が存在しており、Cocos Ridge や Tehuantepec Ridge の先には、孤立した火山が 1 つ存在している様子が数値としてみられる。注意すべきことは、Cocos Ridge や Carnegie Ridge が、プレートの沈み込み角度も変え得る大規模な地形変化である (Bourdon *et al.*, 2003; Gutscher *et al.*, 1999) のに対し、火山の体積分布の異常は局所的にみられることである。このことは、II 章 2) 節で紹介した Morell (2016) が指摘しているように、海嶺上の起伏など、局所的な線状不均質に注目すべきであることを示唆している。地形解析手法の詳細、環太平洋火山帯全体の解析結果、統計的な関係性の検討については、場を改めて報告したい。

2) 「点と線」の関係をつくるメカニズムの特定
力学的影響、熱的影響、物質的影響の 3 つが考えられる。すべての「点と線」の関係が 1 つのメカニズムで説明できると美しいが、現時点では難しそうである。これまで行われてきた、1 つ 1 つの地域に関する詳細な検討と、地域間の比較研究を積み重ねて行く以外に近道はないと思われる。重要なことは、「点と線」の視点をもって検討をすることである。

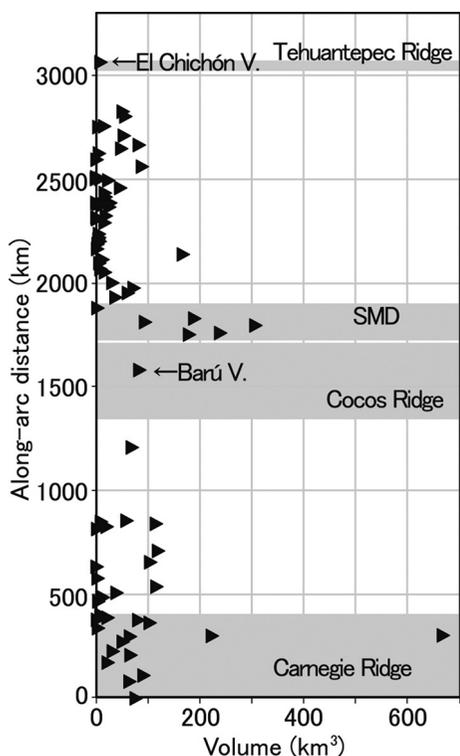


図5 図2bの領域の個々火山の体積を、火山フロント沿いに図った距離に対して示す。灰色は、海嶺や海山群の沈み込む領域。火山の体積は、SRTM 90 m デジタル地形データを用い、MORVOLC (Grosse *et al.*, 2009, 2012) プログラムによって計算したデータベース (Grosse *et al.*, 2014) による。

Fig. 5 Volcano volumes along the arc in the area of Fig. 2b. Gray zones indicate subduction of ridges and seamounts. Volcano volumes are taken from the global morphometric database of Grosse *et al.* (2014), in which data were computed from SRTM 90 m DEMs using the MORVOLC program (Grosse *et al.*, 2009, 2012).

東北日本の火山のクラスター分布と沈み込むプレートの断裂帯の関係について可能性を述べた。これを検証するためには、断裂帯が火山活動に影響を与えるメカニズムについて理解を深める必要がある。Onuma and Lopez-Escobar (1987) の先駆的な研究では、断裂帯が沈み込むプレートの裂け目となって下位のアセノスフェリック・マントルから熱が供給されるという、熱的影響が提案

された。一方、Manea *et al.* (2014) は、断裂帯のもたらす加水量の増加による影響という物質的影響に注目している。別の可能性としては、断裂帯がプレート境界地震のセグメント境界になることで、島弧地殻に応力的不均質を与え、力学的影響によって火山活動が集中していることも考えられる。こういった可能性を検討する上で、沈み込む断裂帯の場所が明瞭に認識できる、南米の沈み込み帯、とくにチリ南部火山地帯 (Southern Volcanic Zone) はよいテストフィールドであると考えられる。同地域について、沈み込む断裂帯と島弧火山の化学組成の空間分布の相関を明らかにした Onuma and Lopez-Escobar (1987) の研究結果を最新の地球化学的研究によって検証し、SB インデックスから示された部分熔融度の増減がマントルウェッジへの加水量の影響なのか、彼らが指摘したようにアセノスフェア上昇流による熱的影響なのか、または、それ以外の影響なのかを区別することが期待される。また、地震学的見地から、南米におけるプレート境界地震のセグメント境界と、断裂帯や火山の不均質性の空間分布との関係も確かめる必要がある。これら研究課題については、2015年度から開始した基盤A・海外学術「プレート境界沈み込みに伴う南部チリ弧火成作用の多様性とマグマ生成過程の全容解明」において現在進行中である。

伊豆ボニン島弧の沈み込みが富士山に与える影響については、非常に限定的なモデルを提案した。先行して沈み込んだ島弧火山のマグマ溜りの再利用で、本当に富士山のマグマ生成率や組成的特徴が説明できるのかどうか、熱流体力学および岩石学的検証が必要である。また、伊豆ボニン島弧と富士山の間に存在する箱根火山や愛鷹山塊 (活火山ではない火山) もまた、なぜそこにあるのか明らかにされていない火山であるが、今回のモデルを検証する上で重要な情報をもっている可能性がある。地球物理学的構造解析からも、富士山直下にかつての島弧火山の痕跡があるかどうか検証することが望ましい。地震学 (Kinoshita *et al.*, 2015; Kinoshita, 2016)、地球電磁気学 (Aizawa *et al.*, 2004) の最新の研究により、PHS プレー

トを貫通する穴（おそらく過去のマグマ経路）が
あいている可能性は高まってきた。今後さらに富
士山直下の地下構造が明らかになるだろう。

上記のような検討を足掛かりに「点と線」テク
トニクスの研究を進めて行くことにより、海溝軸
に沿った不均質の成因について理解が深まるはず
である。今後の「点と線」テクトニクスの進展の
可能性に期待されたい。

謝 辞

本特集号編集委員長の小野重明博士には、本稿を執
筆する機会を与えていただきました。伴 雅雄博士には
査読を通じて有益な助言をしていただきました。1名
の匿名の査読者による批判的コメントも、本稿を完成
させる上で大変役に立ちました。本研究を実施するに
あたり、東京大学地震研究所所長裁量経費（2014年・
2015年度）、および、東京大学地震研究所共同利用研
究集会（2014-W-03）により、以下の方々と議論をさ
せていただきました（敬称略）。三好達也（福井大学）、
安間 了（筑波大学）、新正裕尚（東京経済大学）、佐野
貴司（国立科学博物館）、阿部祐希（神奈川県温泉地
学研究所）、平田大二（神奈川県生命の星・地球博物
館）、吉本充宏（山梨県富士山科学研究所）、北 佐枝子
（広島大学）、J. Lees (Univ. North Carolina), J.A.
Naranjo (SERMAGEOMIN, Chile), 青木陽介・加藤
愛太郎・望月公廣・武尾 実・栗田 敬・瀬野徹三（東
京大学地震研究所）。ここに記して感謝の意を表しま
す。なお、本研究の一部は科学研究費補助金・基盤研
究 (A) 海外学術（研究課題番号 15H02630, 代表：折
橋）の助成を受けて行われました。

文 献

Aizawa, K., Yoshimura, R. and Ohiman, N. (2004):
Splitting of the Philippine Sea Plate and a magma
chamber beneath Mt. Fuji. *Geophysical Research
Letters*, **31**, doi:10.1029/2004GL019477.
Bourdon, E., Eissen, J.-P., Gutscher, M.-A., Monizier,
M., Hall, M.L. and Cotten, J. (2003): Magmatic
response to early aseismic ridge subduction: The
Ecuadorian margin case (South America). *Earth
and Planetary Science Letters*, **205**, 123-138.
Chiaradia, M., Muntener, O., Beate, B. and Fontignie,
D. (2009): Adakite-like volcanism of Ecuador: Low-
er crust magmatic evolution and recycling. *Contri-
butions to Mineralogy and Petrology*, **158**, 563-588.
Dominguez, S., Malavieille, J. and Lallemand, S.
(2000): Deformation of accretionary wedges in

response to seamount subduction: Insights from
sandbox experiments. *Tectonics*, **19**, 182-196.
Dorendorf, F., Wiechert, U. and Worner, G. (2000):
Hydrated sub-arc mantle: A source for the Kluch-
evskoy volcano, Kamchatka/Russia. *Earth and Pla-
netary Science Letters*, **175**, 69-86.
Fujiie, G., Kodaira, S., Sato, T. and Takahashi, T.
(2016): Along-trench variations in the seismic
structure of the incoming Pacific plate at the outer
rise of the northern Japan Trench. *Geophysical Re-
search Letters*, **43**, 666-673.
藤井敏嗣 (2007): 富士火山のマグマ学. 荒牧重雄・藤
井敏嗣・中田節也・宮地直道編: 富士火山. 山梨県
環境科学研究所, 233-244. [Fujiie, T. (2007): Mag-
matology of Fuji volcano. in *Fuji Volcano* edited by
Aramaki, S., Fujiie, T., Nakada, S. and Miyaji, N.,
Yamanashi Institute of Environmental Sciences, 233-
244. (in Japanese with English abstract)]
Grosse, P., de Vries, B.V., Petrinovic, I.A., Euillades,
P.A., and Akvaradim G.E. (2009): Morphometry
and evolution of arc volcanoes. *Geology*, **37**, 651-
654.
Grosse, P., de Vries, B.V., Euillades, P.A., Kervyn, M.
and Petrinovic, I.A. (2012): Systematic morpho-
metric characterization of volcanic edifices using
digital elevation models. *Geomorphology*, **136**, 114-
131.
Grosse, P., Euillades, P.A., Euillades, L.D. and de
Vries, B.V. (2014): A global database of composite
volcano morphometry. *Bulletin of Volcanology*, **76**,
doi:10.1007/s00445-013-0784-4.
Gutscher, M.-A., Malavieille, J., Lallemand, S. and
Collot, J.-Y. (1999): Tectonic segmentation of the
North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge
collision. *Earth and Planetary Science Letters*, **168**,
255-270.
Hasegawa, A., Nakajima, J., Uchida, N., Okada, T.,
Zhao, D., Matsuzawa, T. and Umino, N. (2009):
Plate subduction, and generation of earthquakes
and magmas in Japan as inferred from seismic ob-
servations: An overview. *Gondwana Research*, **16**,
370-400.
HERP (The Headquarters for Earthquake Research
Promotion) (2016): Long-term earthquake forecast-
ing for subduction earthquakes.
[http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_](http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/subduction_fault/)
[evaluation/subduction_fault/](http://www.jishin.go.jp/evaluation/subduction_fault/) [Cited 2016/6/25,
[2016/11/9\].](http://www.jishin.go.jp/evaluation/subduction_fault/)
Honda, S. and Yoshida, T. (2005): Application of the
model of small-scale convection under the island
arc to the NE Honshu subduction zone. *Geochemis-
try, Geophysics, Geosystems*, **6**, doi:10.1029/2004GC
000785.
Ishizuka, O., Taylor, R.N., Yuasa, M. and Ohara, Y.
(2011): Making and breaking an island arc: A new
perspective from the Oligocene Kyushu-Plau arc,
Philippine Sea. *Geochemistry, Geophysics, Geosys-*

- tems, **12**, doi:10.1029/2010GC003440.
- Iwamori, H. (2004): Phase relations of peridotites under H₂O-saturated conditions and ability of subducting plates for transportation of H₂O. *Earth and Planetary Science Letters*, **277**, 57–71.
- Iwamori, H. (2007): Transportation of H₂O beneath the Japan arcs and its implications for global water circulation. *Chemical Geology*, **239**, 182–198.
- 貝塚爽平 (1990): 富士山はなぜそこにあるのか. 丸塚, 174p. [Kaizuka, S. (1990): *Why Mt. Fuji Exists There? (Fuji-san Wa Naze Soko Ni Arunoka)*. Maruzen, 174p. (in Japanese)*]
- Kimura, G., Hashimoto, Y., Kitamura, Y., Yamaguchi, A. and Koge, H. (2014): Middle Miocene swift migration of the TTT triple junction and rapid crustal growth in southwest Japan: A review. *Tectonics*, **33**, 1219–1238.
- Kinoshita, S. (2016): *S-wave Velocity Structure of the Lithosphere beneath Mt. Fuji, Japan, by Inversion of Receiver Functions*. PhD. Thesis, University of Tokyo.
- Kinoshita, S., Igarashi, T., Aoki, Y. and Takeo, M. (2015): Imaging crust and upper mantle beneath Mount Fuji, Japan, by receiver functions. *Journal of Geophysical Research*, **120**, 3240–3254.
- Kogiso, T., Omori, S. and Maruyama, S. (2009): Magma genesis beneath Northeast Japan arc: A new perspective on subduction zone magmatism. *Gondwana Research*, **16**, 446–457.
- Kondo, H., Kaneko, K. and Tanaka, K. (1998): Characterization of spatial and temporal distribution of volcanoes since 14 Ma in the northeast Japan arc. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan*, **43**, 173–180.
- Lavallee, Y., de Silva, S.L., Salas, G. and Byrnes, J.M. (2009): Structural control on volcanism at the Ubinas, Huaynaputina, and Tiscani Volcanic Group (UHTVG), southern Peru. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **186**, 253–264.
- Mahoney, S.H., Wallace, L.M., Miyoshi, M., Villamor, P., Sparks, R.S.J. and Hasenaka, T. (2011): Volcano-tectonic interactions during rapid plate-boundary evolution in the Kyushu region, SW Japan. *Geological Society of America Bulletin*, **123**, 2201–2223.
- Manea, M. and Manea, V.C. (2008): On the origin of El Chichón volcano and subduction of Tehuantepec Ridge: A geodynamical perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **175**, 459–471.
- Manea, M., Manea, V.C., Ferrari, L., Kostoglodov, V. and Bandy, W.L. (2005): Tectonic evolution of the Tehuantepec Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, **238**, 64–77.
- Manea, V.C., Leeman, W.P., Gerya, T., Manea, M. and Zhu, G. (2014): Subduction of fracture zones controls mantle melting and geochemical signature above slabs. *Nature Communication*, **5**, 5095, doi:10.1038/ncomms6095.
- McGeary, S., Nur, A. and Ben-Avraham, Z. (1985): Spatial gaps in arc volcanism: The effect of collision or subduction of oceanic plateaus. *Tectonophysics*, **119**, 195–221.
- Menard, H.W. and Atwater, T. (1969): Origin of fracture zone topography. *Nature*, **222**, 1037–1040.
- Mibe, K., Fujii, T. and Yasuda, A. (1999): Control of the location of the volcanic front in island arcs by aqueous fluid connectivity in the mantle wedge. *Nature*, **401**, 259–262.
- Miyoshi, M., Fukuoka, T., Sano, T. and Hasenaka, T. (2008a): Subduction influence of Philippine Sea plate on the mantle beneath northern Kyushu, SW Japan: An examination of boron contents in basaltic rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **171**, 73–87.
- Miyoshi, M., Shimono, M., Hasenaka, T., Sano, T. and Fukuoka, T. (2008b): Determination of boron and other elements in volcanic rocks by prompt gamma-ray analysis: An application to magma genesis in Kyushu island, SW-Japan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **278**, 343–347.
- Mochizuki, K., Yamada, T., Shinohara, M., Yamanaka, Y. and Kanazawa, T. (2008): Weak interplate coupling by seamounts and repeating M7 earthquakes. *Science*, **321**, 1194–1197.
- Morell, K.D. (2016): Seamount, ridge, and transform subduction in southern Central America. *Tectonics*, **35**, 357–385.
- Nakajima, J., Hirose, F. and Hasegawa, A. (2009): Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity. *Journal of Geophysical Research*, **114**, doi:10.1029/2008JB006101.
- Nakamichi, H., Watanabe, H. and Ohminato, T. (2007): Three-dimensional velocity structures of Mount Fuji and the South Fossa Magna, central Japan. *Journal of Geophysical Research*, **112**, doi:10.1029/2005JB004161.
- Nakamura, H., Iwamori, H. and Kimura, J. (2008): Geochemical evidence for enhanced fluid flux due to overlapping subducting plates. *Nature Geoscience*, **1**, 380–384.
- Nakanishi, M. (2011): Bending-related topographic structure of the subducting plate in the Northwestern Pacific ocean. in *Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin* edited by Ogawa, Y., Anma, R and Dilek, Y., Modern Approaches in Solid Earth Sciences, **8**, 1–38.
- Nakanishi, M., Tamaki, K. and Kobayashi, K. (1989): Mesozoic magnetic anomaly lineations and seafloor spreading history of the Northwestern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 15437–15462.
- Onuma, N. and Lopez-Escobar, L. (1987): Possible contribution of the asthenosphere below the subducted oceanic lithosphere to the genesis of arc

- magmas: Geochemical evidence from the Andean southern volcanic zone (33–46°S). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **33**, 283–298.
- Orihashi, Y., Naranjo, J.A., Motoki, A., Sumino, H., Hirata, D., Anma, R. and Nagao, K. (2004): Quaternary volcanic activity of Hudson and Lautaro volcanoes, Chilean Patagonia: New constraints from K-Ar ages. *Revista Geológica de Chile*, **31**, 207–224.
- Ramos, V.A. (2005): Seismic ridge subduction and topography: Foreland deformation in the Patagonian Andes. *Tectonophysics*, **399**, 73–86.
- Rosenbaum, G. and Mo, W. (2011): Tectonic and magmatic responses to the subduction of high bathymetric relief. *Gondwana Research*, **19**, 571–582.
- Scholl, D.W. (2007): Viewing the tectonic evolution of the Kamchatka-Aleutian (KAT) connection with an Alaska crustal extrusion perspective. in *Volcanism and Subduction, The Kamchatka Region* edited by Eichelberger, J., Gordeev, E., Kasahara, M. Izbekov, P. and Lees, J., American Geophysical Union, 3–35.
- Seno, T. (2005): Izu detachment hypothesis: A proposal of a unified cause for the Miyake-Kozu event and the Tokai slow event. *Earth, Planets and Space*, **57**, 925–934.
- Seno, T. and Yamasaki, T. (2003): Low-frequency tremors, interslab and interplate earthquakes in Southwest Japan—from a viewpoint of slab dehydration. *Geophysical Research Letters*, **30**, doi:10.1029/2003GL018349.
- Shibata, T., Yoshimoto, M., Fujii, T. and Nakada, S. (2015): Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of Quaternary Magmas from the Pre-Komitake volcano. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **110**, 65–70.
- Spinelli, G.A. and Harris, R.N. (2011): Thermal effects of hydrothermal circulation and seamount subduction: Temperatures in the Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment transect, Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, doi:10.1029/2011GC003727.
- Stern, C. (2004): Active Andean volcanism: Its geological and tectonic setting. *Revista Geológica de Chile*, **31**, 161–206.
- 高橋正樹 (2000): 富士火山のマグマ供給システムとテクトニクス場—ミニ拡大海嶺モデル—. 月刊地球, **22**, 516–523. [Takahashi, M. (2000): The magma supply system and tectonic field of Mt. Fuji Volcano—A mini-spreading ridge model—. *Chikyū Monthly*, **22**, 516–523. (in Japanese)*]
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D.P. and Kido, Y. (2002): Hot fingers in the mantle wedge: New insights into magma genesis in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, **197**, 105–116.
- 巽 好幸 (1995): 沈み込み帯のマグマ学—全マントルダイナミクスに向けて. 東京大学出版会, 187p. [Tatsumi, Y. (1995): *Subduction Zone Magmatism—A Contribution to Whole Mantle Dynamics (Shizumikomi No Magumagaku Zen Mantoru Dinamikusu Ni Mukete)*. University of Tokyo Press, 187p. (in Japanese)]
- Tibaldi, A. (2005): Volcanism in compressional tectonic settings: Is it possible?. *Geophysical Research Letters*, **32**, doi:10.1029/2004GL021798.
- Tsukui, M., Sakuyama, M., Koyaguchi, T. and Ozawa, K. (1986): Long-term eruption rates and dimensions of magma reservoirs beneath quaternary polygenetic volcanoes in Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **29**, 189–202.
- Umino, N., Hasegawa, A. and Takagi, A. (1990): The relationship between seismicity patterns and fracture zones beneath Northeastern Japan. *Tohoku Geophysical Journal*, **33**, 149–162.
- Yoshimoto, M., Fujii, T., Kaneko, T., Yasuda, A., Nakada, S. and Matsumoto, A. (2010): Evolution of Mount Fuji, Japan: Inference from drilling into the subaerial oldest volcano, pre-Komitake. *Island Arc*, **19**, 470–488.

* Title etc. translated by M.I.