



《総説》

沈み込むスラブの垂直切断

君波和雄^{1)†}

Vertical tearing of subducting slabs

Kazuo Kiminami^{1)†}

(要旨)

沈み込むスラブの切断は、過去および現世において一般的に認められる現象であり、アルカリ岩やアダカイトの形成とも密接に関わっている。本論ではとくにスラブの垂直切断に関して、その成因とそれらの具体的事例を紹介する。また、おもに地球物理学的データから、断裂や切断に起因するフィリピン海スラブのセグメント化が指摘されている。それらの紹介とともにアダカイトからなる青野山単成火山群（島根県-山口県）とフィリピン海スラブの垂直切断との関係性を若干議論する。

2017年9月30日受付

2017年11月7日受理

¹⁾ 北海道総合地質学研究センター

Hokkaido Research Center of Geology,

連絡先: 753-0851 山口市黒川 807-3

Address: 807-3, Kurokawa, Yamaguchi

753-0851, Japan

[†] Corresponding author: kimi@c-able.ne.jp

Keywords: subducting slab, vertical tear, STEP fault, Philippine Sea slab, Aonoyama monogenic volcanoes

はじめに

沈み込むスラブの切断は、過去および現世において一般的に認められる現象であるが、日本ではその研究例がまだ少ない。スラブの切断は、多くの場合アセノスフェアの上昇をもたらすので、海外ではアルカリ岩やアダカイトの形成と関連してしばしば議論されており、今後日本でも注目されるのではないかと考えられる。Rosenbaum et al. (2008)は、スラブを切る断層をスラブ切断断層 (slab tear fault) とし、その分類を試みている: スラブの一部がほぼ水平に切れ、最終的にスラブの分離にいたる slab breakoff (第1図 a), スラブの切断がほぼ垂直

に進行していく vertical propagating tear (第1図 b), スラブの切断が水平的に進行していく horizontal propagating tear (第1図 c), 沈み込むスラブだけではなく、その背後につづく陸もしくは海洋底をつくるリソスフェアも切断する lithospheric tear fault (第1図 d), 海溝を切断する2つのトランスフォーム断層 (=2 tear faults) からなり、切断断層に囲まれたスラブがより速くロールバック (rollback=スラブの高角化) するケース (第1図 e)。第1図 e に示した垂直切断は、後述する Govers and Wortel (2005) の STEP (Subduction-Transform Edge Propagator) 断層にほぼ該当する。個人的見解であるが、切断の程度に関わらず、一般的な表現として水平切断

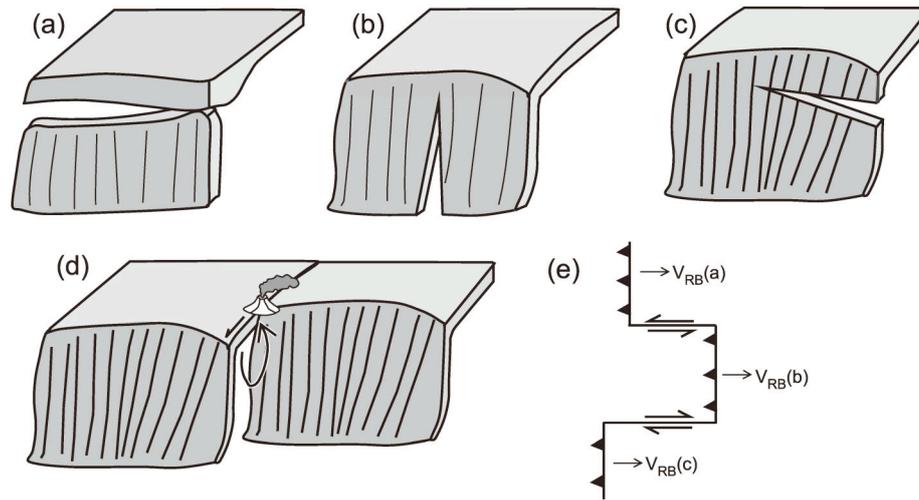


Fig. 1 [Figure 1 of Rosenbaum et al. (2008)]. Schematic illustrations of processes involving tearing and/or breakoff of subducting slabs. (a) Slab breakoff associated with the final detachment of a lithospheric slab. Slab breakoff commonly follows collisional processes and is sometime referred as collisional delamination. (b) A vertical propagating tear. (c) A horizontal propagating tear. (d) Three-dimensional structure of a lithospheric tear fault that separates two subducting segments. The curved arrow indicates upwelling of hot asthenospheric material, which can trigger tear-related magmatism during fault propagation. (e) Two tear faults (indicated by double arrows) that connect three segments of a subduction system characterized by differential rollback velocities ($V_{RB}(b) > V_{RB}(a) > V_{RB}(c)$). Triangles indicate the direction of subduction and single arrows indicate the direction of subduction rollback.

第 1 図. 沈み込むスラブの切断の諸パターン (Rosenbaum et al. 2008). 説明は本文参照.

(horizontal tear) と垂直切断 (vertical tear) を用い、水平切断が進行してスラブの分離にまでいたった状態をスラブ分離 (slab breakoff もしくは slab detachment) とするのが適切と考える。本論では、以下の記述において基本的にこれに従う。

水平切断に関しては、アナログ実験や計算モデル、地震波トモグラフィ、震源分布、火成活動などの多様な分野からのアプローチが行われている。これに対して、垂直切断に関しては、アナログ実験や計算モデルにもとづく研究は乏しい。スラブの水平切断の場合、スラブがネッキングを起こして切れ始めるまでの時間やスラブが切れる深度などが、様々な物理量との関係で計算モデルから議論されているが (例えば, van de Zedde and Wortel, 2001; Gerya et al., 2004; Duretz et al., 2011; van Hunen and Allen, 2011), 垂直切断の場合にはこういった議論が少ない。スラブの水平・垂直切断やロールバックとマンテル流との関係に言及したアナログ実験や計算モデルも多数ある (例えば, Kincaid and Griffiths, 2003; Andrews and Billen, 2009; Duretz and Gerya, 2013; Faccenda and Capitanio,

2013)。また、ロールバックするスラブの下からスラブの側方エッジを回り込んでくる toroidal flow がアセノスフェアによるマンテル・ウエッジの改変にとって重要であるといった指摘もある (Schellart, 2004; Stegman et al., 2006)。水平切断の紹介は別稿に譲り、本論では垂直切断の原因および新第三紀-第四紀の垂直切断の具体例をおもに紹介する。

垂直切断の原因とその具体例

垂直切断に関しては、次のような原因がこれまでに提示されている：1) 沈み込むスラブのロールバック、2) 浮揚性の非震性海嶺の沈み込み、3) 沈み込む2つのスラブの会合部における張力、4) 地形的高まりの海溝への衝突にともなうスラブの“pinning” (針留め)、5) トランスフォーム断層に起因。これらのそれぞれについて具体的な研究例を示しながら説明する。非震性海嶺の沈み込みや2つのスラブの会合部、トランスフォーム断層に関連した垂直切断の一部は、スラブのロールバックも関与している。基本的には主要であると考えられる要因の項であつかう。

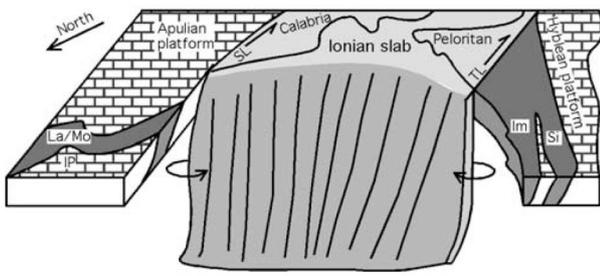


Fig. 2 [Figure 13 of Rosenbaum and Lister (2004)]. Schematic illustration showing possible relationships between the geometry of the subducting slab and the rheological properties of the crust and lithosphere. Tearing of the slab occurred as a result of the arrival of thick continental material (the internal platform) at the subduction system, combined with ongoing subduction of oceanic lithosphere (the Ionian Sea) in the Calabrian Arc. Following tearing, rollback is further accelerated by sideways asthenospheric flow (arrows). Abbreviations are Im, Imerese; IP, internal platform; La, Lagonegro; Mo, Molise; Si, Sicilian; SL, Sangineto line; TL, Taormina line.

第2図. イオニアスラブの南側へのロールバックでできたスラブ切断 (Rosenbaum and Lister, 2004). 矢印はロールバックするスラブの背後からの toroidal flow. 図の左側の Apulian platform や IP (internal platform) は、イタリア半島の一部を構成する。

スラブの垂直切断に起因する火成活動の研究も多数ある。ここではそれらについても簡単に触れる。

1. スラブのロールバック

スラブの低角沈み込みは、例えば四国の下に沈み込むフィリピン海スラブのようにごく一般的に認められる現象であり、低角沈み込みの原因が除去されるとスラブはより高角になる (スラブのロールバック)。スラブがロールバックする場合、スラブは差別的な運動をしがちである。一つのスラブ中で高角化の程度に違いが生じると、スラブが垂直方向に裂けるといった現象が起こりうる。こういった起源の垂直切断は、地中海周辺で多く報告されている。しかし、この地域は、アフリカとユーラシアとの衝突域でもあるために、地質やテクトニクスが複雑であり、研究者による見解の相違も多い。

Rosenbaum and Lister (2004)は、イタリアの南西側に位置するチレニア海の下で西に沈み込むイオニアスラブ (Ionian slab) が 6-5 Ma 頃に

東にロールバックする過程でスラブの北側のアドリア (Adria, Apulia) プレートと南側のアフリカプレートとの間で垂直切断を起こしたとしている (第2図)。彼らは、ロールバックの原因を北側や南側の大陸プレートに比べてイオニアスラブが重いこととしている。このタイプの垂直切断は、後述する Govers and Wortel (2005)の STEP 断層に該当する (Chiarabba et al., 2008)。Gvirtzman and Nur (1999)や Trua et al. (2003), Rosenbaum et al. (2008)もチレニア海の下にあるイオニアスラブのロールバックを推定しており、イオニアスラブの南側の断層上にあるエトナ山 (シシリー島) の火成活動がこの断層から上昇するマグマに起因しているとしている。チレニア海付近のスラブの垂直切断に関しては、Wortel and Spakman (2000)や Marani and Trua (2002), Faccenna et al. (2007), Chiarabba et al. (2008), Gasparon et al. (2009), Trua et al. (2010)などの研究がある。

Gasparon et al. (2009)は、チレニア海北部のカプライヤ島 (Capraia Island; イタリア) に分布する 4.8 Ma のシヨシヨナイトがイオニアスラブのロールバックに起因して形成されたスラブの垂直切断に関連して噴出したと結論した。Trua et al. (2003)は、チレニア海南部のウスチカ島 (Ustica Island; イタリア) の第四紀アルカリ玄武岩がスラブ由来の成分を含む海洋島玄武岩 (OIB) であり、アフリカプレートの下からもたらされたアセノスフェアの toroidal flow に由来するとした。Rosenbaum et al. (2008)は、チレニア海とその周辺の鮮新世-第四紀の火山岩類の形成場 (大陸性火山弧, 海洋性火山弧, スラブ切断, リフトなど) と $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -La/Nb との関係性を議論している。

トルコ周辺でも北に沈み込むアフリカプレートの垂直切断に関する論文が多数報告されている。ただ、この地域のプレート境界や地質構造は非常に複雑であり、研究者による見解の相違も多い。第3図に Biryol et al. (2011)によるこの地域の構造図を示す。ギリシャからトルコ西部の南側にはヘレニック海溝 (Hellenic Trench=Aegean Trench) があり、その東端は分岐した2つのトランスフォーム断層 (Pliny Transform Fault と Strabo Transform Fault) からなるが、ここを海溝としている研究者もいる。

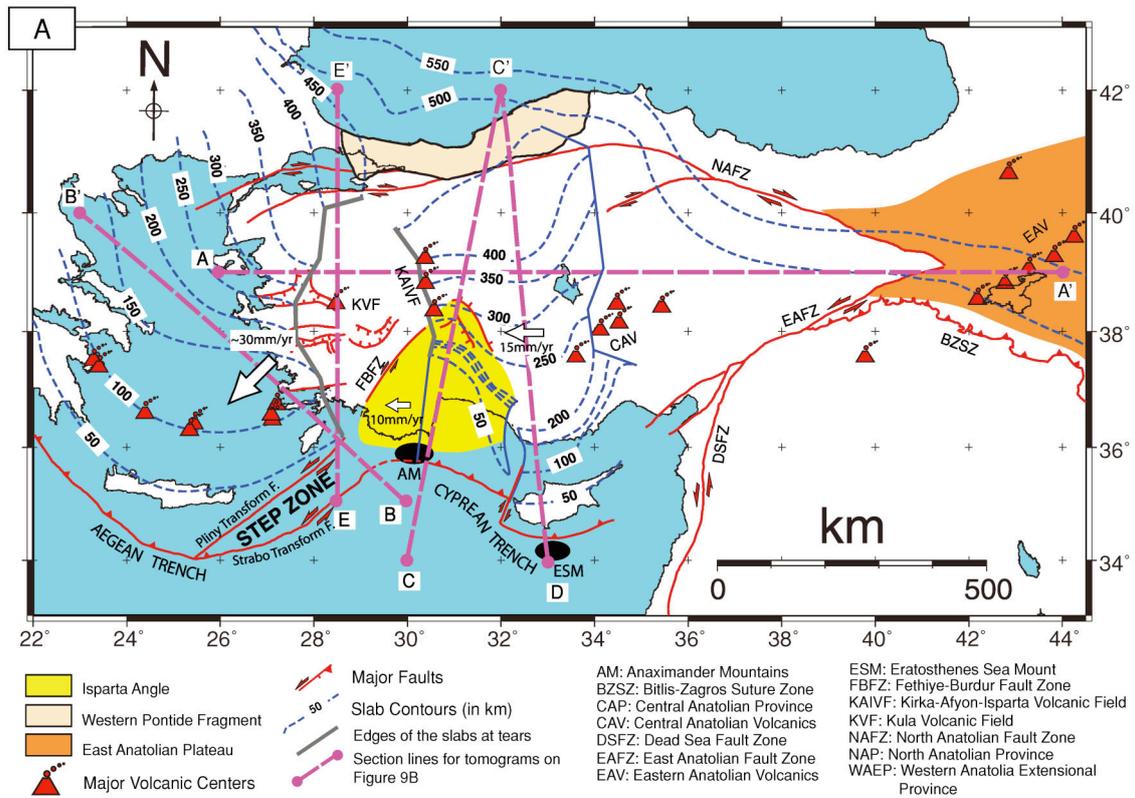


Fig. 3 [Figure 9 A of Biryol et al. (2011)]. General map of the study area with inferred contours (in km) of the Aegean and the Cyprean slabs, tectonic provinces, major structural and geological features. The slab contours are plotted by tracing the approximate upper edges/ surfaces of the Aegean and Cyprean fast anomalies in our tomographic model.

第3図. トルコからエーゲ海にかけての構造図 (Biryol et al., 2011). 図中の2本の灰色実線がスラブ切断の西側と東側のエッジ. 青い破線とそこに付した数字は, スラブ上面の深さ (km) を示す.

また, この東方のトルコ中東部の南側にはキプロス海溝 (Cyprean Trench もしくは Cyprus Trench) がある. 両海溝から北に沈み込む2つスラブの間には地震波トモグラフィーから東西幅 200 km に達するスラブの欠如 (第3図中の南北方向の灰色の2本の太い実線の間) が推定されている (Biryol et al., 2011; Salaün et al., 2012). この欠如の東縁, すなわちキプロススラブの西縁の上には, 第3図中の KAIVF (Kirka-Afyon-Isparta 火山フィールド) で示した南北方向の火山列が存在する. このスラブ欠如が生じた原因は, ヘレニック海溝の南側への後退をともなったヘレニックスラブ (Hellenic Slab=Aegean Slab) の活発なロールバックに起因するとされている (Biryol et al., 2010, 2011; Bakırcı et al., 2012). 一方, Dilek and Altunkaynak (2009)は, キプロス海溝から沈み込むキプロススラブ (Cyprean Slab もしくは Cyprus Slab) とヘレニック海溝から沈み込むヘレニックスラブとの間にスラブの幅広い欠如を認めておら

ず, アルカリ岩の火山列である KAIVF (第3図) の下で両スラブが近接した状態で切断されていると考えた. そして, スラブの垂直切断に関しては, ヘレニックスラブの大きなロールバックが原因であるとしている. また, このアルカリ岩の南北列 (KAIVF) の年代が北から南に向かって, 21-17 Ma, 14-8.7 Ma, 4.6-4.0 Ma と若くなることから, 切断が北から南 (海溝方向) に進行したと考えた.

Bakırcı et al. (2012)は, トモグラフィーのデータにもとづき, キプロス島北側のキプロススラブ中に垂直切断 (第3図の北緯 36°, 東経 32° 付近) を推定している. この切断は, Biryol et al. (2011)でも認められており, 第3図中のスラブ上面の等深度コンターにもとづけば, この垂直切断を挟んで西側のスラブ上面の深さが浅くなっている. この垂直切断は, その東側のスラブのより大きなロールバックによるものと推定される.

Biryol et al. (2011)などによりヘレニックスラ

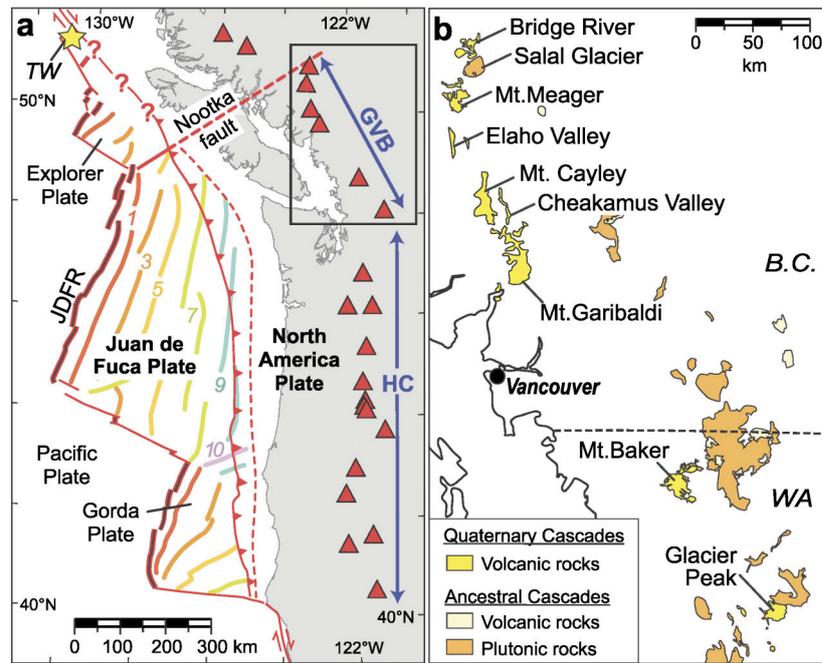


Fig. 4 [Figure 1 of Mullen and Weis (2015)]. a: Map of the Cascade Arc. Red triangles—major volcanoes. Contours (1, 3, 5, 7, 9, 10) indicate the age (in Ma) of the Juan de Fuca plate from Wilson (2002). Dark blue arrows indicate the extents of Garibaldi Volcanic Belt (GVB) and High Cascades (HC). Garibaldi Volcanic Belt is also enclosed in rectangle (enlarged in b). JDFR—Juan de Fuca ridge. Yellow star labeled TW (at upper left) is the Tuzo Wilson volcanic field. b: Garibaldi Volcanic Belt with sample localities indicated. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

第4図. 北米西岸におけるカスケード弧とその西側の海洋プレートの分布 (a), および Garibaldi 火山帯の火山群 (b) (Mullen and Weis, 2015) .

ブとキプロススラブとの間に設定されたスラブの欠損部の上方には Kula 火山フィールド(第3図中の KVF) や Kirka-Afyon-Isparta 火山フィールドがある. Dilek and Altunkaynak (2009) は, Kirka-Afyon-Isparta 火山フィールドを構成する中新世から第四紀にかけての火山岩が OIB の組成的特徴を示すアルカリ玄武岩であり, スラブ下の汚染されたアセノスフェアの減圧溶融に起因すると結論づけた. Kula 火山フィールドの第四紀火山岩も OIB タイプの組成的特徴を示すが, 彼らはそれらが展張場 (Aegean extensional province) におけるアセノスフェアの減圧溶融に由来するとした. Ersoy et al. (2012) および Ersoy and Palmer (2013) は, Kula 火山フィールドの第四紀火山岩および Isparta 火山フィールド (Ersoy and Palmer による Denizli-Isparta 火山地域) の鮮新世-第四紀火山岩が OIB タイプであることを示すとともに, その起源がスラブの垂直切断に関連する可能性を指摘している. Prelević et al. (2012) は, スラブ欠損部の上方に分布するランプロファイ

アーに類似した高マグネシア超カリ質 (High-Mg ultrapotassic) 火山岩の化学組成と同位体組成を検討した. これらのランプロファイアー類似岩は, 南に向かって 20 Ma から 4 Ma まで若くなり, 量的にはより多いシヨシヨナイト質やカルクアルカリ質, 超カリ質の火山岩と共存する. 地球化学および同位体のデータは, ランプロファイアー類似岩が年代的に若くなるのに従って造山性 (orogenic) から非造山性 (anorogenic) に系統的に変化することを示している. 彼らはこの火山活動が北から南に向かって進行するスラブ切断と関連していると推定した. Prelević et al. (2015) は, Kirka-Afyon-Isparta 火山フィールド中の中期中新世 Afyon アルカリ火山岩コンプレックスの化学組成と同位体組成を検討し, スラブの切断に伴って上昇したアセノスフェアとリソスフェアとの相互作用を議論している.

Mullen and Weis (2015) は, ファンデフカ (Juan de Fuca) プレートの北縁をなす Nootka 断層 (第4図) の陸上延長部の南側に位置する Garibaldi

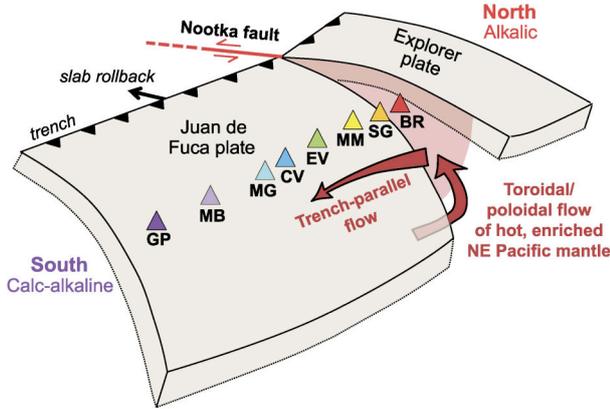


Fig. 5 [Figure 6 of Mullen and Weis (2015)]. Schematic 3-D representation of plate configuration at the northern end of the Cascade Arc. The Explorer plate detached from the Juan de Fuca Plate along the Nootka Fault ~4 Myr ago (Riddihough, 1984) as it became younger, hotter, and more buoyant at the trench. Heavy red line and transparent red shaded area indicate the location of the Nootka Fault and the resultant slab window, respectively. The wide red arrows depict the influx of hot, enriched NE Pacific mantle through the slab gap by toroidal/poloidal flow, triggered by slab rollback (heavy black arrow). Southerly narrowing of the second arrow depicts the waning influence of NE Pacific mantle on magma compositions due to progressive mixing with melts of the depleted mantle wedge. GP–Glacier Peak; MB–Mt. Baker; MG–Mt. Garibaldi; CV–Cheakamus Valley; EV–Elaho Valley; MM–Mt. Meager; SG–Salal Glacier; BR–Bridge River Cones. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

第5図. Garibaldi 火山帯とスラブ切断との関係を示す模式図 (Mullen and Weis, 2015). スラブ切断断層である Nootka 断層に沿って上昇したアセノスフェアがマントル・ウェッジ中で海溝に平行な南向きの流れをつくる. 流れは南側に向かって小さく, 弱くなり, 次第にスラブの影響を被った枯渇したマントル・ウェッジのメルトとの混合が進む. このために OIB タイプのアセノスフェア・メルトは次第に希釈される.

火山帯 (北米西岸沿いのカスケード弧の北部セグメントにあたる) の玄武岩の微量元素組成や同位体比を検討した. そして, Garibaldi 火山帯が南側に向かって OIB タイプの組成からスラブの影響が強くなる組成へと連続的に変化することを見いだした. 彼らはその原因をスラブの切断と関連づけて議論している. Nootka 断層

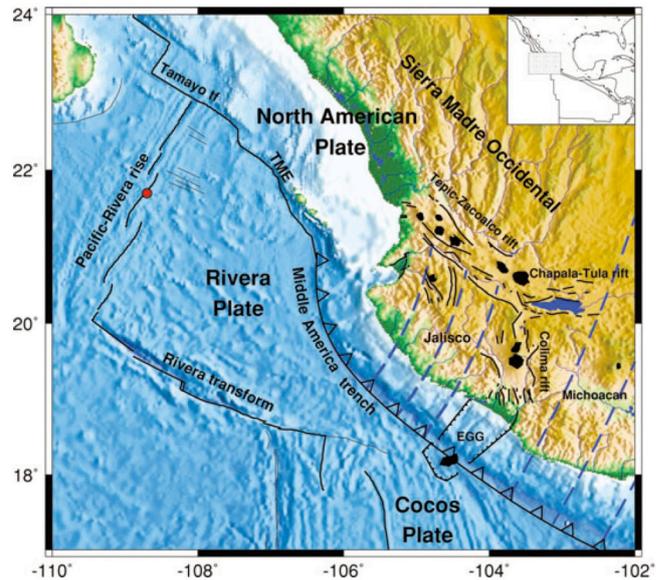


Fig. 6 [Figure 1 of Soto et al. (2009)]. Map showing major tectonic features of western Mexico and Rivera–Cocos plates. Black spots represent the areas of major late Miocene to present volcanism. Red circle indicates the rotation pole of Rivera Plate with respect to North American Plate (Demets & Traylen 2000). Blue dotted lines show the relative motion of the Rivera and Cocos plates with respect to the Jalisco and Michoacan Blocks, respectively. EGG, El Gordo Graben; TME, Tres Marias Escarpment.

第6図. メキシコ中部西岸の構造図 (黒いスポットは主要火山) とその西側の海洋プレートの分布 (Soto et al., 2009).

は, 北側のエクスプローラ (Explorer) プレートと南側のファンデフカプレートを境している. ファンデフカスラブがより速くロールバックすることによりスラブの垂直切断断層である Nootka 断層が形成された. 彼らは, この切断を通してスラブ下からもたらされたアセノスフェアがマントル・ウェッジ中で海溝に平行な南向きの流れをつくり, これに沿って火山が形成されたために規則的な組成変化が生じたと結論している (第5図).

メキシコ西岸の沖合ではリベラ (Rivera) プレートとココス (Cocos) プレートが中米海溝に沈み込んでいる. ココスプレート北縁部の前弧域には, 海域に El Gordo 地溝が, それに続く陸域に Colima リフトが分布する (第6図). Soto et al. (2009)は, トモグラフィーや地震波異方性から, 速くロールバックするリベラスラブとその南側のココススラブとの境界でスラブ切断が起こり, その上方の地表では地溝やリフ

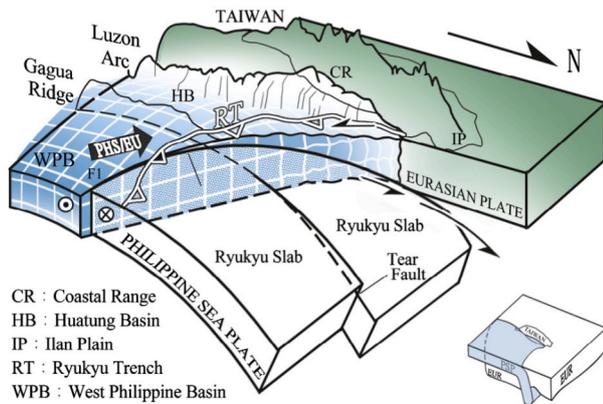


Fig. 7 [Figure 6 of Lin et al. (2013)]. Geodynamic sketch of the northwestern corner of the Philippine Sea Plate with a portion of the EU plate located above the Ryukyu slab and bounded to the south by the Ryukyu trench (shown in the small diagram) removed for clarity. The left-lateral shear fault F1 offsets the Ryukyu slab and is sub-parallel to the PHS/EU convergence vector. The NS Ryukyu slab tear located along trend from the Gagua Ridge accommodates a downward shift of the western part of the Ryukyu slab.

第7図. フィリピン海プレートの北西縁における Gagua 海嶺の沈み込みとスラブの垂直切断 (Lin et al., 2013). 説明は本文参照.

トが形成されたと推定した. Colima リフトに分布する Colima 火山コンプレックスは4つの火山から構成され, 同コンプレックスにおける火山活動は 1.7 Ma に始まり, 南側 (海溝側) に向かって若くなる.

2. 非震性海嶺の沈み込み

沈み込んだ非震性海嶺の脇に沿ったスラブ切断がいくつか報告されている. 台湾東岸の約 150 km 東側において, 非震性海嶺である Gagua 海嶺が琉球海溝とほぼ垂直に交差している. この Gagua 海嶺の北側延長部では, 沈み込んだ海嶺の東縁において, フィリピン海スラブの上面の深さに段差が推定されている (Lin et al., 2004a). 海嶺の東側でスラブの上面が浅く, その程度は北側に向かって大きくなり, 琉球海溝から 150 km 北側では 100 km 以上の高度差ができています. Lin et al. (2004a, b, 2007, 2013) や Wu et al. (2009) は, フィリピン海スラブがここで垂直方向に切れていると推定している (第7図). 与那国島は, この切断のすぐ西側に位置する. また, この切断の直ぐ西側の沖縄トラフ中には約 70 個の海山のクラスターが認められる. Lin

et al. (2007) は, 地震波トモグラフィーからこの切断面を通してマグマが上昇していると推定した. Lin et al. (2013) は, フィリピン海スラブが西側にある台湾に対して斜めに衝突しているために, フィリピン海スラブの最西端が台湾にアンダースラストしており, それが原因で Gagua 海嶺の東側が切断されたと推定している (第7図).

Park et al. (2009) は, 地磁気異常や震源分布, 音響探査, 地形などから南海トラフの最西端から沈み込んだ九州-パラオ海嶺の前弧域下での位置 (宮崎平野からその沖合) を推定している. そして, 沈み込んだ海嶺の東北縁で衝上タイプの中規模地震が起きていることに注目し, 日向市付近から日向灘にかけて北西-南東方向のスラブ切断があると推定した. 彼らは, 浮揚性の九州-パラオ海嶺と上盤プレートとのストレスが原因でスラブ切断が発生したと推定している.

一方, Huang et al. (2013) は, トモグラフィーから山口県東部から島根県西部とその北側の日本海にかけて, スラブ・ウィンドーが存在する可能性を示した. ここは, 四国から中国地方の下で低角に沈み込むフィリピン海スラブと九州の下でより高角に沈み込むフィリピン海スラブとの境界の北部にあたる. Huang et al. (2013) は, このスラブ・ウィンドーの形成原因をよく分からないとしながらも, 九州-パラオ海嶺や紀南海山列などの沈み込みによって, フィリピン海スラブがセグメント化しているためではないかと推定した. Cao et al. (2014) もトモグラフィーのデータから山口県萩市の周辺に分布する阿武火山の下に 100 km 以上の幅で, 北西方向にのびる低速度異常帯を認め, 沈み込むフィリピン海スラブを切ってアセノスフェアが上昇していると推定した. 彼らは, 浮揚性の九州-パラオ海嶺の沈み込みと 2 Ma 以降のフィリピン海プレートの移動方向の変化に関連してフィリピン海スラブの垂直切断が起こり, このスラブ・ウィンドーができたとしている.

伊豆-ボニン海嶺の沈み込みに関連した伊豆半島北側の地下における垂直切断 (Nakajima and Hasegawa, 2007a) については「フィリピン海スラブのセグメント化」の節で説明する.

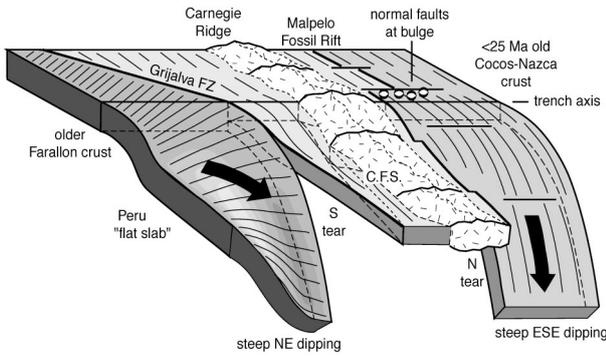


Fig. 8 [Figure 5 of Gutscher et al. (1999)]. 3-D view of the two-tear model for the Carnegie Ridge collision featuring: a steep ESE-dipping slab beneath central Colombia; a steep NE-dipping slab from 1°S to 2°S; the Peru flat slab segment south of 2°S; a northern tear along the prolongation of the Malpelo fossil spreading center; a southern tear along the Grijalva FZ; a proposed Carnegie flat slab segment (C.F.S.) supported by the prolongation of Carnegie Ridge.

第 8 図. コロンビア海溝から沈み込む浮揚性のカーネギー海嶺とその両側のスラブとの浮力差によって形成されたスラブの垂直切断 (Gutscher et al., 1999).

Gutscher et al. (1999)は、南米のエクアドル沖の海溝から沈み込んでいるカーネギー海嶺周辺とエクアドル周辺の震源分布や火山の分布を検討し、カーネギー海嶺の沈み込み延長部の両側に沿うスラブ切断を推定している (第 8 図). 彼らは、カーネギー海嶺とその両側のスラブとの浮力差がスラブ切断をもたらしたとしている. 南側のスラブ切断の直上付近に位置

するいくつかの火山の安山岩やデイサイトがアダカイト組成 (Beate et al., 2001; Bourdon et al., 2002, 2003; Samaniego et al., 2005) を示すことは注目になる. しかし, Bourdon et al. (2003)は、カーネギー海嶺が水平に沈み込みこむことによってスラブ上面が深さ数 10 km で温度の高いマントル・ウェッジに接触したためにスラブ溶融を起こし、アダカイトが形成されたとしている. この地域のアダカイトもしくはアダカイト的特徴を有する安山岩とデイサイトに関しては、Garrison and Davidson (2003)や Bryant et al. (2006)などによっても研究されており、スラブ溶融以外の成因も指摘されている.

3. 沈み込むスラブの会合部

前述したヘレニックスラブとキプロススラブとの間に形成されたスラブ切断も 2 つのスラブの会合部に形成されているが、その形成は一般にヘレニックスラブの大きなロールバックに起因するとされているので、ここでは触れない. Obayashi et al. (2009)は、沈み込む 2 つのスラブがマントルの漸移帯で滞留する場合、第 9 図 A のようにスラブが水平に曲げられることにより滞留部におけるスラブ会合部が裂け、さらに第 9 図 B のようにその裂け目が 2 つのスラブの会合線に沿って進行すると考えた. このスラブ切断の具体例として、日本海溝から沈み込む日本スラブと伊豆-ボニン海溝から沈み込む伊豆-ボニンスラブをあげており、地震波トモグラフィからこのスラブ切断に起因するスラブ・ウィンドーが深さ 300 km 以深で認

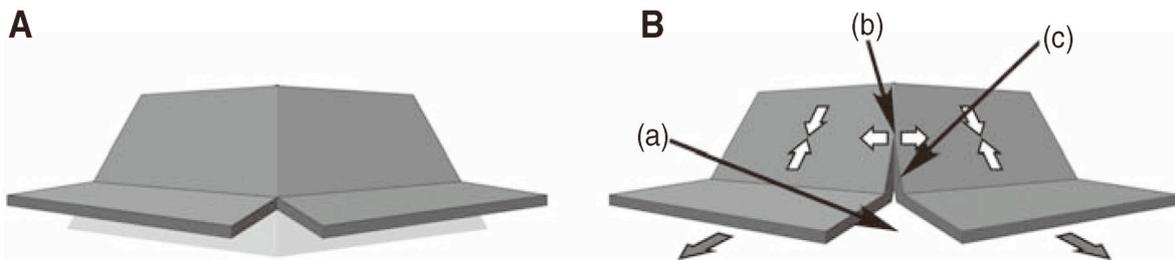


Fig. 9 [Figure 1 of Obayashi et al. (2009)]. (A) Schematic explaining how slab bending to the horizontal causes slab tearing at the slab-slab junction. Dipping slabs without horizontal bending are shown in a light gray for reference. (B) Schematic illustration for the Japan and Izu-Bonin slabs at their junction. The white arrows indicate the dominant principal stress in the slab inferred from the focal mechanisms. The gray arrows show the approximate direction of motion of each segment of the stagnant slab. The resultant direction of the two gray arrows should coincide with the direction of the motion of the Pacific plate.

第 9 図. 2 つのスラブの会合部に形成されるスラブ切断 (Obayashi et al., 2009). 説明は本文参照.

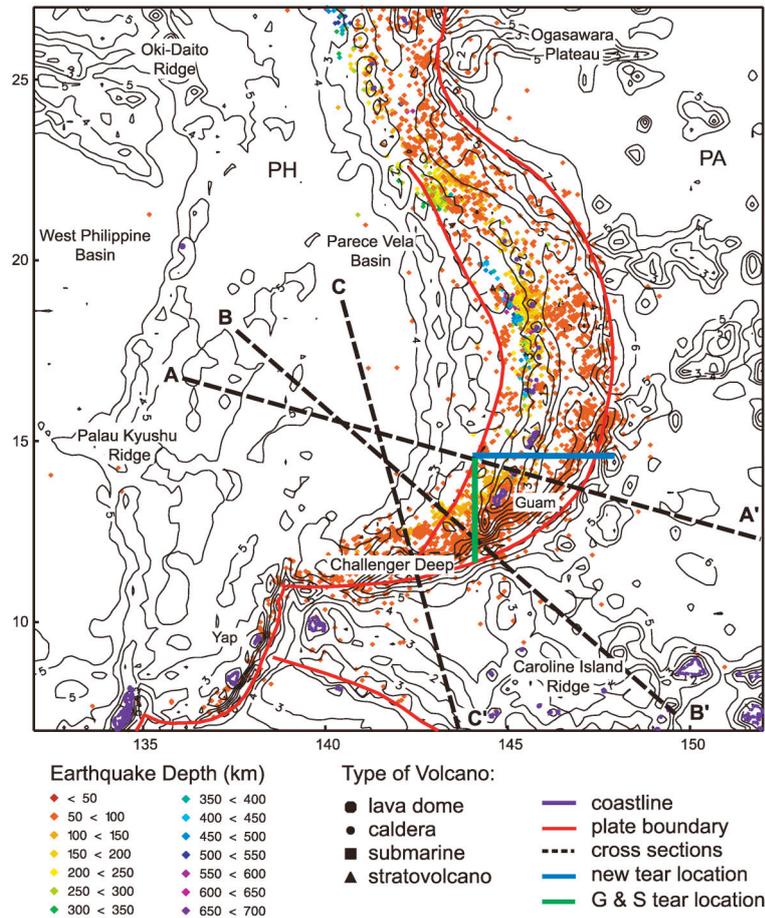


Fig. 10 [Figure 1 of Miller et al. (2006)]. Map of the Mariana arc with the major features of the region, ETOPO5 bathymetry (National Geophysics Data Center, 1988) in km depth, hypocenters of earthquakes events with magnitudes of 5.0 and greater from the Engdahl et al. (1998) catalog, location of the new slab tear and previously identified tear (Gvirtzman and Stern, 2004), and locations of the cross sections used in Figure 2. PA, Pacific Plate; PH, Philippine Plate.

第10図. マリアナ弧周辺の地形と震央分布 (Miller et al., 2006). マリアナ弧が南側で大きく湾曲したところにカロリン島海嶺が衝突している. 青い実線は Miller et al. (2006) によって新たに発見されたスラブ切断. 緑の実線は Gvirtzman and Stern (2004) により報告されたスラブ切断.

められるとしている.

4. 沈み込むスラブの “pinning”

Miller et al. (2006)は, マリアナ弧の南縁付近において, トモグラフィーおよび震源分布から沈み込む太平洋スラブ中に東西性の垂直切断を認めた (第10図中の青い実線). このスラブ切断は, 急傾斜で下部マントルを貫く北側のスラブと深さ 250 km 程度までの比較的短い南側のスラブ (Challenger Deep segment slab) とを分けている. Gvirtzman and Stern (2004)は, 第10図中の緑の実線で示した位置に南北性のスラブ切断を報告している. Miller et al. (2006)は, これら2つのスラブ切断の原因として, 南側のスラブの速いロールバックの可能性とともに, 次のような可能性も指摘している: この2つの

スラブ切断の南側では, 浮揚性のカロリン島海嶺 (Caroline Island Ridge) が海溝に衝突し, それによってマリアナ弧が大きく屈曲させられ, 沈み込みに対して抵抗する浮揚性海嶺によってスラブが pinning (針留め) されるために, スラブ切断が起こった. 震源分布やトモグラフィーから Jaxybulatov et al. (2013)は, 伊豆-マリアナ海溝から沈み込む太平洋スラブがいくつかの垂直切断によりセグメント化していることを指摘している. Mason et al. (2010)は, 海台のような浮力をもった厚い地殻が海溝と衝突すると, スラブの pinning が起こり, スラブが裂ける可能性を計算モデルから示した.

5. トランスフォーム断層に起因するスラブの垂直切断

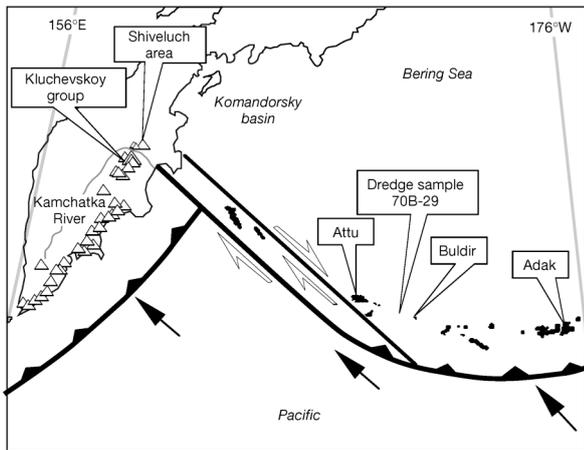


Fig. 11 [Figure 1 of Yogodzinski et al. (2001)]. Map view of the study area. The figure shows the oblique subduction zone of the central Aleutians (near Adak), the transform-type boundary in the westernmost Aleutians, and the sharp bend into the subduction system of the Kurile-Kamchatka arc. The Kluchevskoy volcanic group and the Sheveluch area mark the location of the Kamchatka central depression. Exceptionally voluminous arc volcanism in the central depression, and the slight offset of the magmatic front in this area (apparently due to a slight flattening of the slab dip) are believed to be evidence of mantle flow around the northern edge of the subducting Pacific plate as it passes beneath the Aleutian-Kamchatka junction.
 第 11 図. 千島-カムチャッカ海溝とアリューシャン海溝との会合部周辺の構造とカムチャッカ半島の火山の分布 (Yogodzinski et al., 2001).

第 1 図(e)に示したようなトランスフォーム断層に起因するスラブの垂直切断であり, Govers and Wortel (2005) の STEP (Subduction-Transform Edge Propagator) 断層がほぼこれに該当する. Govers and Wortel (2005) は, トンガ沈み込み帯の北縁やニューヘブリデス沈み込み帯の南縁に代表されるような, 海溝がトランスフォーム断層に移行し, 海洋リソフェアが垂直に切断されているところを Subduction-Transform Edge Propagator と名付けた. こういった場では, 沈み込んだスラブも垂直に切断されている. STEP 断層は, 多くの収束域で認められ, 活発な火山活動とともにアルカリ岩やアダカイトの産出でしばしば特徴づけられる.

天皇海山列が衝突する千島-カムチャッカ海溝の北東縁は, アリューシャン海溝西縁のトラ

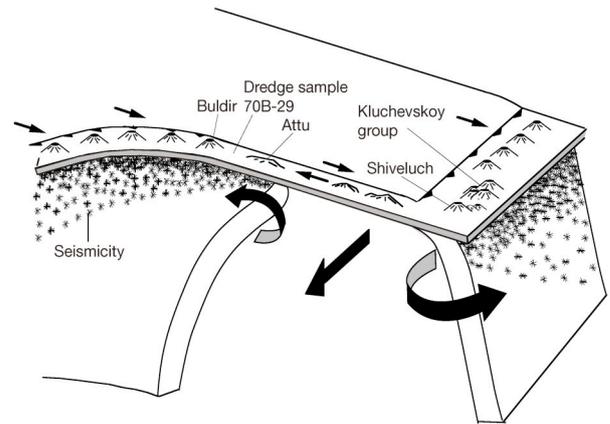


Fig. 12 [Figure 5 of Yogodzinski et al. (2001)]. Perspective drawing showing a torn Pacific plate subducting to the north beneath the central Aleutians (Adak) and to the west beneath Kamchatka. The geometry shown here implies that the Pacific plate is being torn in an unzipping motion as the Aleutian slab sinks to the north beneath the Bering Sea. Adakitic volcanism is observed at Sheveluch volcano, immediately above the torn plate edge beneath Kamchatka, and above the inferred position of the active tear in the Pacific plate beneath the western Aleutians (location of andesite sample 70B-29). The large arrows indicate asthenospheric flow around the plate edges and through the slab window. This kind of mantle flow would explain the melting of relatively old subducting plates along their edges, as well as the relatively high heat flow from the area of the Komandorsky basin in the western Bering Sea (location in Fig. 1). Asterisks indicate the seismicity (schematically) which shoals to the north beneath Kamchatka (Fig. 2) and to the west beneath the Aleutians.

第 12 図. アリューシャン海溝西縁部からカムチャッカ半島下にかけての STEP 断層に沿って形成されたスラブ・ウィンドーの模式図 (Yogodzinski et al., 2001). スラブの下からもたらされたアセノスフェアによりスラブの縁が溶融して Shiveluch 地域やドレッジ・サンプル (70B-29) のアダカイトが形成された.

ランスフォーム断層と会合している (第 11 図). Yogodzinski et al. (2001) は, このトランスフォーム断層がカムチャッカ半島の下まで伸びおり, この付近でスラブが第 12 図に示したように引き裂かれてスラブ・ウィンドーができていると推定した. 海溝から沈み込んだこのトランスフォーム断層は, スラブの垂直切断の一タイプであり, Govers and Wortel (2005) の STEP 断層に該当する. Levin (2002) は, 千島-カムチャッカ

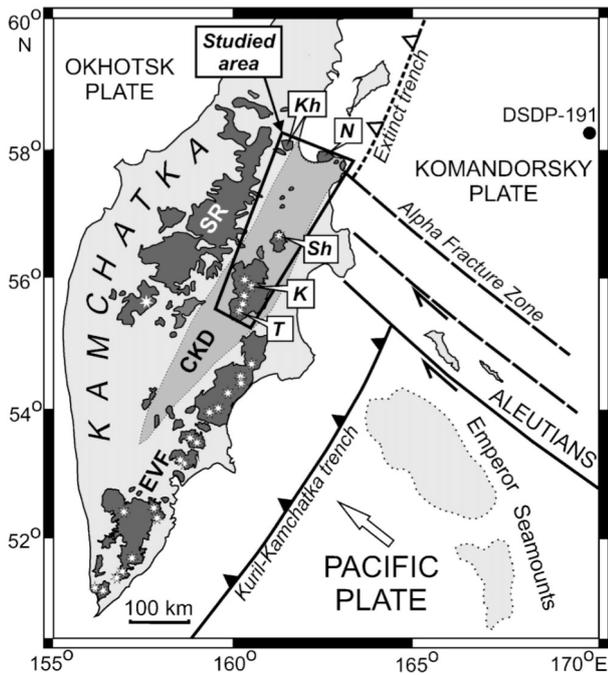


Fig. 13 [Figure 1 of Portnyagin et al. (2005)]. Simplified map of major Quaternary volcanic belts (dark shading) of Kamchatka and tectonic structures of Kamchatka-Aleutian arc junction. SR-Sredinny Range, CKD-Central Kamchatka depression, EVF-Eastern Volcanic front. White stars-locations of active Kamchatkan volcanoes. Volcanoes: N-Nachikinsky, Kh-Khailulia, K-Klyuchevskoy, T-Tolbachik, Sh-Sheveluch. Location of Deep Sea Drilling Project (DSDP) Site 191 in basement of Komandorsky Basin is shown. Extinct Komandorsky trench is shown (after Baranov et al., 1991).

第 13 図. カムチャッカ半島の第四紀火山の分布 (Portnyagin et al., 2005).

スラブの北東縁を形成する垂直切断の回りのアセノスフェアの流れをトモグラフィから推定している. この付近のスラブの垂直切断に関しては, Portnyagin et al. (2005, 2007) や Portnyagin and Manea (2008) によっても報告されている.

Yogodzinski et al. (2001) は, スラブの垂直切断の上方に位置するカムチャッカ半島の Shiveluch 地域の第四紀火山岩の多くがアダカイトと通常の火山弧の火山岩との中間的な組成を示すこと, アッツ島の南東からドレッジしたサンプル (第 11 図) がアダカイト組成を示すことを明らかにした. そして, これらのアダカイト質火山岩がスラブ・ウィンドーから上昇してきたアセノスフェアによってスラブ溶融

を起こしたために形成されたと考えた. また, 彼らは切断されたスラブの縁がアセノスフェアに晒されて溶けやすいことを強調している. Portnyagin et al. (2005) は, Shiveluch 火山 (第 13 図中の Sh) を挟んでさらに北東側の Khailulia 火山から南西側の Tolbachik 火山 (それぞれ, 図 13 中の Kh と T) にかけての第四紀玄武岩一デイサイトの化学組成と同位体組成を検討し, この地域の火山岩が北東側から南西側に向かって海洋タイプ (MORB-OIB) の組成から弧タイプの組成に連続的に変化することを明らかにした. そして, 彼らは北東部の火山岩がスラブ・ウィンドーから上昇してきたアセノスフェアの影響を強くうけていると推定した. Portnyagin et al. (2007) は, この地域の火山岩の形成にエクログャイトのメルトが大きく関与していることを指摘するとともに全体的にスラブ溶融の影響があることを示唆した. しかし, Portnyagin and Manea (2008) は, この地域 (第 13 図中の Kh を除いた N から T まで) のこれまでのデータを再検討し, スラブ縁におけるスラブ溶融を否定した. そして, Shisheisky コンプレックス (第 13 図中の Sh の約 70 km 北東に位置し, この下にスラブ切断があると推定) から Tolbachik 火山までの規則的な組成変化をスラブ縁から南西に向かうスラブ上面の深化とマントル・ウエッジの温度上昇で説明した (第 14 図).

Clark et al. (2008) によって, 小アンチル弧 (Lesser Antilles Arc) の南縁を形成するトランスフォーム断層も STEP タイプのスラブ切断とされた. Miller et al. (2009) はこの STEP 断層を通して, アセノスフェアが上昇していることをトモグラフィや地震波異方性から推定している.

フィリピン海スラブのセグメント化

南海トラフから琉球海溝東部において沈み込むフィリピン海スラブの上面もしくはスラブのモホ面は, フラットではなく, 湾曲していたり, その深さが急変したりする (長谷川, 1991; 松崎ほか, 2003; 三好・石橋, 2004; Shiomi et al., 2006, 2008; 弘瀬ほか, 2007; Nakajima and Hasegawa, 2007a; Hirose et al., 2008; 汐見ほか, 2008; Zhao et al., 2012; Huang et al., 2013). こ

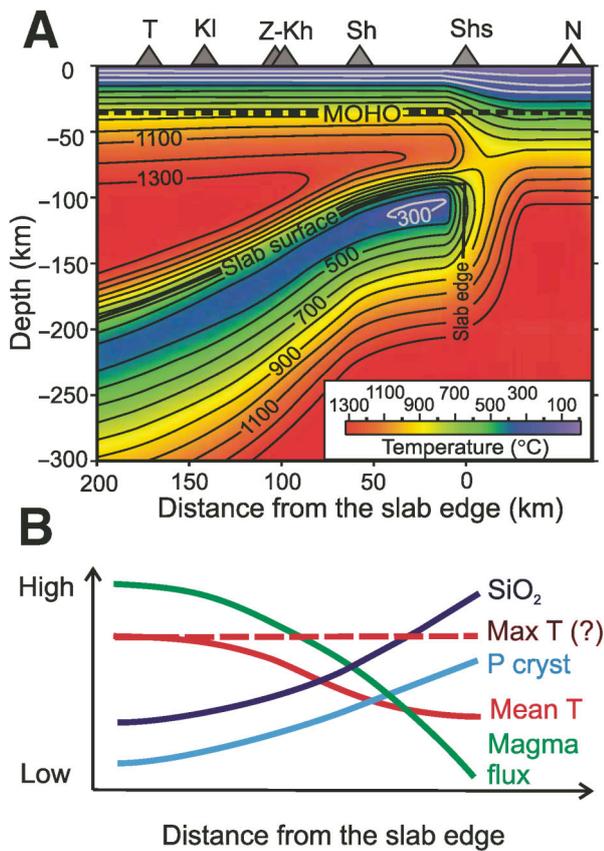


Fig. 14 [Figure 3 of Portnyagin and Manea, 2008]. Trench-parallel along-arc thermal model (A) and summary of physical and compositional parameters of CKD magmatism (B). Volcano abbreviations are explained in Figure 1. Trench-normal thermal cross sections used to constrain along-arc profile are shown in Figure DR2. Due to likely transient regime of subduction near the slab edge, the maximum model temperature near the slab edge is underestimated (see text for explanation); it can be similar beneath all volcanoes (shown as dashed line in Fig. 3B, max T). The volume of hot mantle (>1300 °C) and therefore mean temperatures (mean T) decrease toward the slab edge, which correlates with decreasing subduction dip and magma flux and increasing SiO₂ in evolved and primitive magmas (SiO₂) and pressure of crystallization (P cryst).

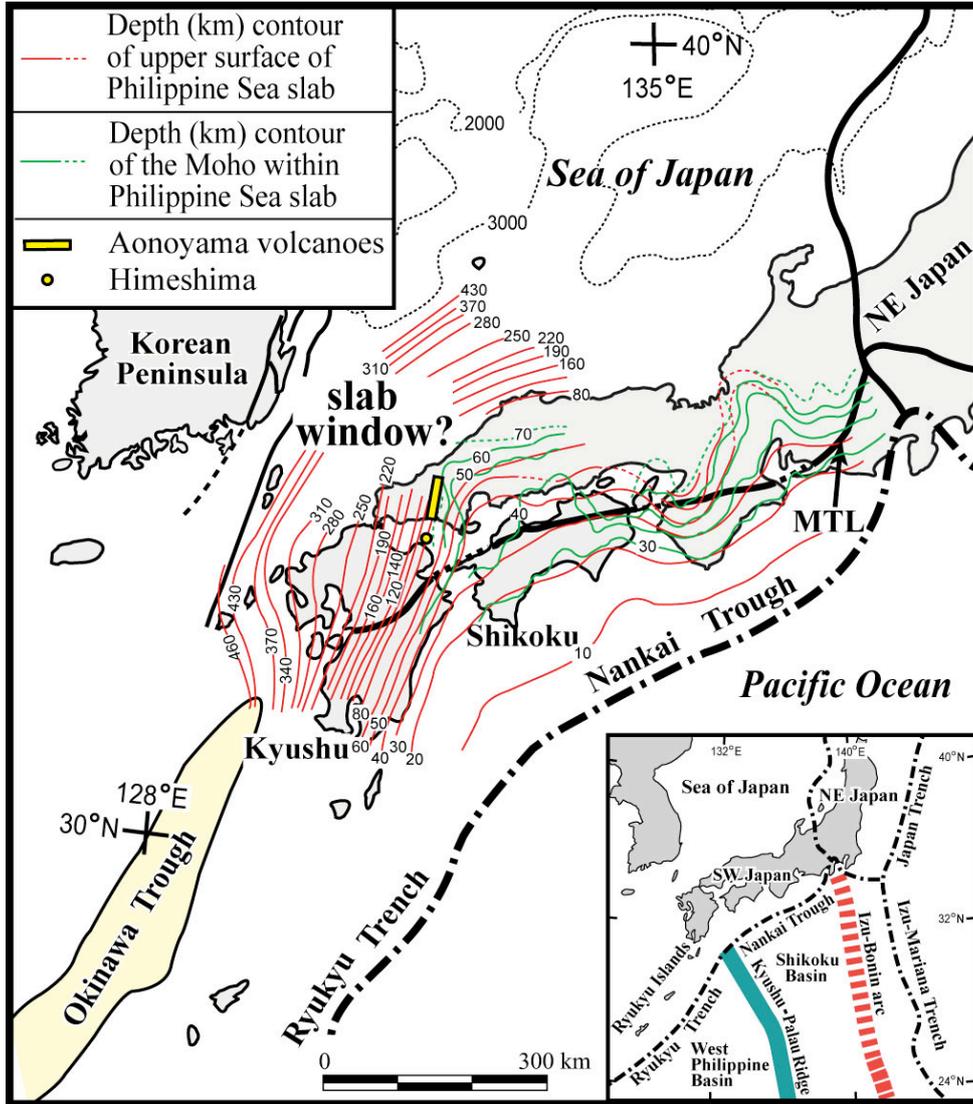
第14図. カムチャッカ半島の Shisheisky (Shs) コМПレックスから Tolbachik (T) 火山までのスラブ深度とマントル・ウェッジの温度構造 (A), およびこの区間における諸パラメータの変化 (B) (Portnyagin and Manea, 2008).

これらのデータは、フィリピン海スラブがセグメント化していることを示唆している。弘瀬ほか (2007) および Hirose et al. (2008) によるフィリピン海スラブ上面の等深度コンターマップに

もとづけば、伊勢湾付近から若狭湾東部付近にかけてフィリピン海スラブは尾根 (背斜) 状に、紀伊半島西部において谷 (向斜) 状になっている (第15図)。また、四国からその北側の中国地域の下ではスラブが低角で沈み込んでいるのに対して、九州下ではより高角で沈み込んでいる。汐見ほか (2008) および Shiomi et al. (2008) によるフィリピン海スラブのモホ面の等深度コンターマップによって示されたスラブの形態 (第15図) は、Hirose et al. (2008) と基本的に類似するが、四国東部の地下でスラブ内モホ面の深度が急に深くなり、南北性の急斜面が存在する点が異なる。この急斜面の南側延長部に室戸岬周辺の MORB と類似した中新世火成岩類 (室戸岬ハンレイ岩・ドレライト、椎名火山岩類など) が分布することは注目には値するが、この関係を議論するためには中新世のスラブの形態を復元する必要がある。

Nakajima and Hasegawa (2007a) は、トモグラフィにもとづき伊豆半島の北側の地下でフィリピン海スラブが南北方向に垂直に切断されていると推定した。彼らは、沈み込んだ伊豆-ボニン海嶺 (弧) の強度が小さくなったためにこの垂直切断が形成されたとしている。Miyoshi and Ishibashi (2005) は、2004年に起きた紀伊半島沖地震とその前震・余震の解析から、紀伊半島沖の南海トラフから北西方向にのびるスラブの垂直切断を推定した。Ishise et al. (2009) は、トモグラフィと地震波異方性からフィリピン海スラブが紀伊半島の中央部付近の下で南北に延びる断裂 (fracture) 帯によってセグメント化していると指摘している。この断裂帯は、Hirose et al. (2008) によって示されたスラブ上面がつくる向斜の東翼に沿っており、その上方付近には紀伊半島の中新世火成岩類 (潮岬岩体、熊野酸性岩類、大峯酸性岩、三笠山安山岩など) が分布する。Nakajima and Hasegawa (2007b) は、トモグラフィにもとづき、紀伊半島の下で北北西の長軸をもつ楕円形のアセノスフェア上昇域 (Kinki Spot) を推定している。この上昇域は、紀伊半島におけるスラブ上面の向斜軸に沿っている。

石原・吉田 (1992) は、深発地震の震源を解析し、九州下で沈み込むフィリピン海スラブが北西-南東方向の断裂によりセグメント化して

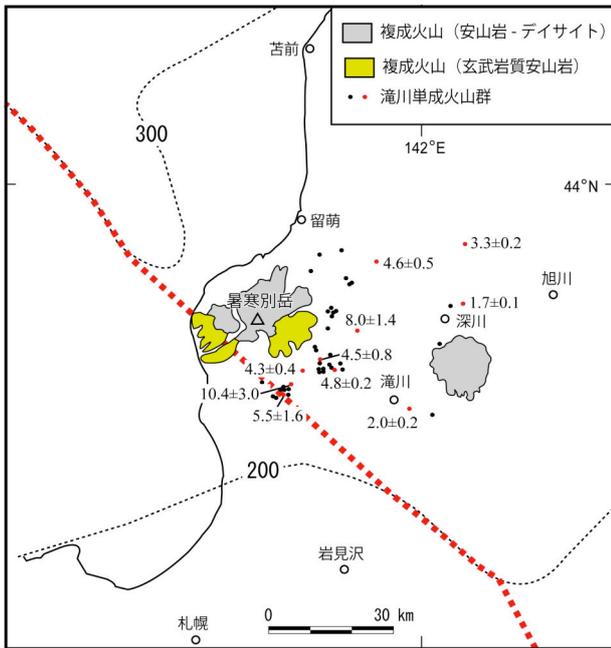


第 15 図. 西南日本下におけるフィリピン海スラブ上面の等深度コンター (Hirose et al., 2008; Huang et al., 2013) とスラブ内モホ面の等深度コンター (Shiomi et al., 2008).

おり、南側に向かってスラブ上面が階段状に深くなるとしている。しかし、これに対しては別の見解も示されている (岡本ほか, 2007)。

前述したように四国とその北側の中国地域の下ではフィリピン海スラブは低角で沈み込み、九州の下ではより高角で沈み込んでいる。低角のスラブとより高角のスラブとの会合線は、南海トラフから沈み込むスラブと琉球海溝から沈み込むスラブとの会合線や九州-パラオ海嶺の延長に一致する可能性がある。Huang et al. (2013)や Cao et al. (2014)は、会合部の少なくとも北側部分 (山口県東部から島根県西部とその北西側) がスラブ・ウィンドーをつくっていると推定した。しかし、このスラブ切断が南側にどこまで伸びるのか明らかではない。Shiomi

et al. (2008)によるスラブ内モホ面の等深度コンター・マップにもとづけば (第 15 図), 低角に沈み込む四国-中国地域下のスラブとより高角な九州-山口県下のスラブとの境界は、島根県西端の津和野町と山口県の旧徳山市を結ぶ線の地下で西傾斜の急崖をつくっている。一方、津和野町の青野山から旧徳山市の岳山と四熊ヶ岳にかけては、0.62 Ma から 0.14 Ma の放射年代を示すデイサイトからなる単成火山が点々と直線的に分布し、青野単成火山群 (第 15 図) と呼ばれている (木村, 2009)。この火山群はさらに大分県の姫島に連続すると推定され、一般にここが火山フロントとされている (例えば, Kimura et al., 2014)。これらの直線的に分布する火山群は、アダカイトから構成され



第 16 図 滝川単成火山群 (中川, 2010) と和達-ベニオフ面の深度 (島弧深部構造研究グループ, 2009). 赤丸で示した滝川単成火山に付した数値は, K-Ar 年代 (Ma). 細い黒破線とそこに付した数値は, 和達-ベニオフ面の深度 (km). 太い赤破線は, 和達-ベニオフ面の階段状変位部.

る. Kimura et al. (2014)は, 青野火山群のアダカイトの化学組成と同位体組成を検討し, これらがホットなフィリピン海スラブの変質した海洋地殻の熔融に起因すると結論した. しかし, 火山フロントが津和野付近で急に南に折れ曲がること, 津和野から姫島に連なるアダカイトの分布が直線的であり, 背後に同年代の火山が存在しないこと, それらの年代が第四紀後期であることなどを説明するためには, Kimura et al. (2014)の解釈に加え, テクトニクスからの何らかの制約条件が必要と考えられる.

Shiomi et al. (2008)の等深度コンター・マップにもとづけば, アダカイトの火山列は, およそ 70 km のスラブ内モホ面コンターの上に位置する (第 15 図). Kiminami et al. (2017)は, 四国-中国地域下の低角沈み込みが前期中新世における西南日本の海溝方向への前進によって生じた可能性を示した. Shinjo et al. (2000), Yamaji (2003)および Watanabe (2005)は, 九州下のスラブが 4 Ma 以降にロールバックし, 現在のようなより高角な沈み込みになったとしている. Cao et al. (2014)の復元によれば, 沈み込んだ九

州-パラオ海嶺の 2 Ma における東縁は, このアダカイト列と非常に近接している. 九州-パラオ海嶺の東側の四国海盆は, ca. 30-15 Ma (Okino et al., 1994)に形成された若い海盆である. それに対して西側の西フィリピン海盆中の奄美海台からは 117 Ma のトータル岩 (Hickey-Vargas, 2005)が報告されており, 西フィリピン海盆は四国海盆よりも明らかに古い. 九州-山口県下のフィリピン海スラブが 4 Ma 以降にロールバックしたとすると, 四国-中国地域下のスラブとの接合部付近にひずみが集中することになる. この接合部は, 2 Ma 頃に九州-パラオ海嶺の東縁付近であったと推定され, ここを挟んで両側のスラブの物性の違いがスラブの垂直切断を引き起こした可能性が考えられる. この切断部を通して上昇したアセノスフェアがスラブ熔融を誘因したのかもしれない. Kimura et al. (2014)は, 青野山アダカイトの組成的特徴から, 沈み込んだ九州-パラオ海嶺の関与を推定している. この付近のスラブの形態とその形成過程がさらに詳しく解明されることを期待したい.

補 遺

本電子ジャーナルは「北海道総合地質学研究中心」の発行誌なので, 北海道に関連したちょっとした思いつきを書いて終わりにしたい.

暑寒別岳の東側から深川-滝川にかけて, おもに玄武岩からなる滝川単成火山群が分布する (第 16 図). これらの玄武岩は, 10.4-1.7 Ma の K-Ar 年代を示す (中川, 2010). 放射年代の空間的な定向変化は明確ではないが, 大局的に東側に若くなるようにみえる. 小火山群は, アルカリ岩-ソレライトからなり, その形成に関してプリュームの上昇との関連が指摘されている (中川, 2010). 島弧深部構造研究グループ (2009) がまとめた日本とその周辺の和達-ベニオフ面の深度にもとづけば, 暑寒別岳の南側を北西-南東方向にのびる和達-ベニオフ面の階段状の変位が推定されている (第 16 図). この変位を境にして, 北東側の和達-ベニオフ面が南西側に比べて深くなっている. これは, 沈み込む太平洋スラブが垂直に切断され, 北東側のスラブが落ちていることを示唆する. この

スラブ切断を通してアセノスフェアが上昇したとすると、アセノスフェアは北東側のマントル・ウェッジ中に流れ込むことになる。推定されるスラブ切断の北東側に滝川単成火山群が分布することは、これと整合的であるが、単成火山群がこの地域に限定される理由を説明する必要もある。五十嵐ほか (2011) はレシーバー関数解析から日本のマントル最上部深度を推定している。それにもとづけば、暑寒別岳東側ではマントル最上部深度が周辺に比べて浅く、その領域は滝川単成火山群とほぼ重なる。滝川単成火山群の下の地殻が薄いことが火山群形成のもう一つの要因かもしれない。しかし、暑寒別岳周辺でモホ面の深度が周辺よりも深いといった解析結果も報告されており (Katsumata, 2010), 地殻構造に関する研究のさらなる進展が待たれる。

謝辞 査読者の前田仁一郎博士の有益なご助言によって本稿は改善された。記して感謝申し上げる。

文 献

- Andrews, E.R. and Billen, M.I., 2009, Rheologic controls on the dynamics of slab detachment. *Tectonophysics*, **464**, 60–69.
- Bakırcı, T., Yoshizawa, K. and Özer, F.M., 2012, Three-dimensional S-wave structure of the upper mantle beneath Turkey from surface wave tomography. *Geophys. Jour. Int.*, **190**, 1050–1076.
- Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotten, J., Silva, S., Bourdon, E., and Eissen, J.-P., 2001, Mio–Pliocene adakite generation related to flat subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **192**, 561–570.
- Biryol, C.B., Beck, S.L., Zandt, G. and Özacar, A.A., 2011, Segmented African lithosphere beneath the Anatolian region inferred from teleseismic *P*-wave tomography. *Geophys. Jour. Int.*, **184**, 1037–1057.
- Biryol, C.B., Zandt, G., Beck, S.L. Ozacar, A.A., Hande, E. Adiyaman, H.E. and Gans, C.R., 2010, Shear wave splitting along a nascent plate boundary: the North Anatolian Fault Zone. *Geophys. Jour. Int.*, **181**, 1201–1213.
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Gutscher, M.-A., Monzier, M., Hall, M.L. and Cotton, J., 2003, Magmatic response to early aseismic ridge subduction: the Ecuadorian margin case (South America). *Earth Planet. Sci. Lett.*, **205**, 123–138.
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotton, J. and Hall, M.L., 2002, Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): Evidence for slab melt metasomatism beneath Andean Volcanic Zone. *Jour. Petrol.*, **43**, 199–217.
- Bryant, J.A., Yogodzinski, G.M., Hall, M.L., Lewicki, J.L. and Bailey, D.G., 2006, Geochemical constraints on the origin of volcanic rocks from the Andean Northern Volcanic Zone, Ecuador. *Jour. Petrol.*, **47**, 1147–1175.
- Cao, L., Wang, Z., Wu, S., and Gao, X., 2014, A new model of slab tear of the subducting Philippine Sea Plate associated with Kyushu–Palau Ridge subduction. *Tectonophysics*, **636**, 158–169.
- Chiarabba, C., Gori, P.D. and Speranza, F., 2008, The southern Tyrrhenian subduction zone: Deep geometry, magmatism and Plio–Pleistocene evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **268**, 408–423.
- Clark, S.A., Sobiesiak, M., Zelt, C.A., Magnani, M.B., Miller, M.S., Bezada, M.J. and Levander, A., 2008, Identification and tectonic implications of a tear in the South American plate at the southern end of the Lesser Antilles. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **9**, Q11004, doi: 10.1029/2008GC002084.
- Dilek, Y. and Altunkaynak, Ş., 2009, Geochemical and temporal evolution of Cenozoic magmatism in western Turkey: mantle response to collision, slab break-off, and lithospheric tearing in an orogenic belt. In van Hinsbergen, D.J.J., Edwards, M.A. and Govers, R., eds., *Collision and Collapse at the Africa–Arabia–Eurasia Subduction Zone*. Geol.

- Soc. London, Spec. Publ., **311**, 213–233.
- Duretz, T. and Gerya, T.V., 2013, Slab detachment during continental collision: Influence of crustal rheology and interaction with lithospheric delamination. *Tectonophys.*, **602**, 124–140.
- Duretz, T. Gerya, T.V. and May, D.A., 2011, Numerical modelling of spontaneous slab breakoff and subsequent topographic response. *Tectonophys.*, **502**, 244–256.
- Ersoy, Y.E., Helvacı, C., Uysal, İ., Karaoğlu, Ö., Palmer, M.R. and Dindi, F., 2012, Petrogenesis of the Miocene volcanism along the İzmir-Balıkesir Transfer Zone in western Anatolia, Turkey: Implications for origin and evolution of potassic volcanism in post-collisional areas. *Jour. Volcan. Geotherm. Res.*, **241-242**, 21–38.
- Ersoy, E.Y. and Palmer, M.R., 2013, Eocene-Quaternary magmatic activity in the Aegean: Implications for mantle metasomatism and magma genesis in an evolving orogeny. *Lithos*, **180-181**, 5–24.
- Faccenda, M. and Capitanio, F.A., 2013, Seismic anisotropy around subduction zones: Insights from three-dimensional modeling of upper mantle deformation and SKS splitting calculations. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **14**, doi:10.1029/2012GC004451.
- Faccenna, C., Funicello, F., Civetta, L., D'Antonio, M., Moroni, M. and Piromallo, C., 2007, Slab disruption, mantle circulation, and the opening of the Tyrrhenian basins. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **418**, 153–169.
- Garrison, J.M. and Davidson, J.P., 2003, Dubious case for slab melting in the Northern volcanic zone of the Andes. *Geology*, **31**, 565–568.
- Gasparon, M., Rosenbaum, G., Wijbrans, J. and Manetti, P., 2009, The transition from subduction arc to slab tearing: Evidence from Capraia Island, northern Tyrrhenian Sea. *Jour. Geodynam.*, **47**, 30–38.
- Gerya, T.V., Yuen, D.A. and Maresch, W.V., 2004, Thermomechanical modelling of slab detachment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **226**, 101–116.
- Govers, R. and Wortel, M.J.R., 2005. Lithosphere tearing at STEP faults: response to edges of subduction zones. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **236**, 505–523.
- 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 Planet. Sci. Lett.*, **168**, 255–270.
- Gvirtzman, Z. and Nur, A., 1999, The formation of Mount Etna as the consequence of slab rollback. *Nature*, **401**, 782–785.
- Gvirtzman, Z. and Stern, R.J., 2004, Bathymetry of Mariana trench-arc system and formation of the Challenger Deep as a consequence of weak plate coupling. *Tectonics*, **23**, TC2011, doi: 10.1029/2003TC001581.
- 長谷川昭, 1991. 微小地震活動の時空特性. 地震, 第2輯, **44**, 329–340.
- Hickey-Vargas, R., 2005, Basalt and tonalite from the Amami Plateau, northern West Philippine Basin: New Early Cretaceous ages and geochemical results, and their petrologic and tectonic implications. *Island Arc*, **14**, 653–665.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭, 2007, Double-difference tomography法による西南日本の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定. 地震, 第2輯, **60**, 1–20.
- Hirose, F., Nakajima, J. and Hasegawa, A., 2008, Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography. *Jour. Geophys. Res.*, **113**, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- Huang, Z., Zhao, D., Hasegawa, A., Umino, N., Park, J.-H. and Kang, I.-B., 2013, Aseismic deep subduction of the Philippine Sea plate and slab window. *Jour. Asian Earth Sci.*, **75**, 82–94.
- 五十嵐俊博・飯高 隆・宮林佐和子, 2011, レシーバー関数解析から推定される日本列島の地殻構造. 地震, 第2輯, **63**, 139–151.
- 石原和彦・吉田明夫, 1992, 九州下フィリピン

- 海スラブの形状と地震活動. 地震, 第2輯, **45**, 45-51.
- Ishise, M., Koketsu, K. and Miyake, H., 2009, Slab segmentation revealed by anisotropic P-wave tomography. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08308, doi:10.1029/2009GL037749.
- Jaxybulatov, K., Koulakov, I. and Dobretsov, N.L., 2013, Segmentation of the Izu-Bonin and Mariana slabs based on the analysis of the Benioff seismicity distribution and regional tomography results. *Solid Earth*, **4**, 59-73.
- Katsumata, A., 2010, Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by traveltimes analysis. *Jour. Geophys. Res.*, **115**, B04303, doi:10.1029/2008JB005864.
- Kiminami, K., Imaoka, T., Ogura, K., Kawabata, H., Ishizuka, H. and Mori, Y., 2017, Tectonic implications of Early Miocene OIB magmatism in a near-trench setting: The Outer Zone of SW Japan and the northernmost Ryukyu Islands. *Jour. Asian Earth Sci.*, **135**, 291-302.
- 木村純一, 2009, 青野火山岩. 日本地方地質誌, 中国地方. 朝倉書店, 359.
- Kimura, J.-I., Gill, J.B., Kunikiyo, T., Osaka, I., Shimoshioiri, Y., Katakuse, M., Kakubuchi, S., Nagao, T., Furuyama, K., Atsushi Kamei, A., Kawabata, H., Nakajima, J., van Keken, P.E. and Stern, R.J., 2014, Diverse magmatic effects of subducting a hot slab in SW Japan: Results from forward modeling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **15**, 691-793.
- Kincaid, C. and Griffiths, R. W., 2003, Laboratory models of the thermal evolution of the mantle during rollback subduction. *Nature*, **425**, 58-62.
- Levin, V., Shapiro, N., Park, J. and Ritzwoller, M., 2002, Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka. *Nature*, **418**, 763-767.
- Lin, J.-Y., Hsu, S.-K. and Sibuet, J.-C., 2004a, Melting features along the Ryukyu slab tear, beneath the southwestern Okinawa Trough. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L19607, doi: 10.1029/2004GL020862.
- Lin, J.-Y., Hsu, S.-K. and Sibuet, J.-C., 2004b, Melting features along the western Ryukyu slab edge (northeast Taiwan): Tomographic evidence. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, B12402, doi:10.1029/2004JB003260.
- Lin, J.-Y., Hsu, S.-K., Sibuet, J.-C., Lee, C.-S. and Liang, C.-W., 2013, Plate tearing in the northwestern corner of the subducting Philippine Sea Plate. *Jour. Asian Earth Sci.*, **70-71**, 1-7.
- Lin, J.-Y., Sibuet, J.-C., Lee, C.-S., Hsu, S.-K. and Klingelhoefer, F., 2007, Origin of the southern Okinawa Trough volcanism from detailed seismic tomography. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, B08308, doi:10.1029/2006JB004703.
- Marani, M.P. and Trua, T., 2002, Thermal constriction and slab tearing at the origin of a superinflated spreading ridge: Marsili volcano (Tyrrhenian Sea). *Jour. Geophys. Res.*, **107**, doi:10.1029/2001JB000285.
- Mason, W.G., Moresi, L., Betts, P.G. and Miller, M.S., 2010, Three-dimensional numerical models of the influence of a buoyant oceanic plateau on subduction zones. *Tectonophysics*, **483**, 71-79.
- 松崎紳一・大野裕記・池田倫治・福島美光, 2003, 震源分布からみた伊予灘周辺のフィリピン海プレートの形状および地震特性. 地震, 第2輯, **56**, 267-279.
- Miller, M.S., Gorbatov, A. and Kennett, B.N., 2006, Three-dimensional visualization of a near-vertical slab tear beneath the southern Mariana arc. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, Q06012, doi:10.1029/2005GC001110.
- Miller, M.S., Levander, A., Niu, F. and Li, A., 2009, Upper mantle structure beneath the Caribbean-South American plate boundary from surface wave tomography. *Jour. Geophys. Res.*, **114**, B01312, doi:10.1029/2007JB005507.
- 三好崇之・石橋克彦, 2004, 震源分布からみた伊勢湾から四国西部にかけてのフィリピン海スラブの形状. 地震, 第2輯, **57**, 139-152.
- Miyoshi, T. and Ishibashi, K., 2005, A tectonic interpretation of NW-SE strike-slip faulting during the 2004 off the Kii peninsula earthquakes, Japan: Probable tear of the

- Philippine Sea plate. *Earth Planets Space*, **57**, 1115–1120.
- Mullen, E.K. and Weis D., 2015, Evidence for trench-parallel mantle flow in the northern Cascade Arc from basalt geochemistry. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **414**, 100–107.
- 中川光弘, 2010, 滝川単成火山群. 日本地方地質誌, 北海道地方, 朝倉書店, 319–320.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A., 2007a, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, B08306, doi:10.1029/2006JB004770.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A., 2007b, Tomographic evidence for the mantle upwelling beneath southwestern Japan and its implications for arc magmatism. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **254**, 90–105.
- Obayashi, M., Yoshimitsu, J. and Fukao, Y., 2009, Tearing of stagnant slab. *Science*, **324**, 1173–1175.
- 岡本 響・大倉敬宏・瀬野徹三, 2007, 九州地方中南部におけるフィリピン海スラブ内地震活動. 地震, 第2輯, **61**, 77–90.
- Okino, K., Shimakawa, Y. and Nagaoka, S., 1994, Evolution of the Shikoku Basin. *Jour. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 463–479.
- Park, J.-O., Hori, T. and Kaneda, Y., 2009, Seismotectonic implications of the Kyushu-Palau ridge subducting beneath the westernmost Nankai forearc. *Earth Planet Space*, **61**, 1013–1018.
- Portnyagin, M., Bindeman, I., Hoernle, K. and Hauff, F., 2007, Geochemistry of primitive lavas of the Central Kamchatka Depression: Magma generation at the edge of the Pacific Plate. In Eichelberger, J. et al., eds., *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*, Geophys. Monogr. Ser., **172**, AGU, Washington, D.C., 199–239.
- Portnyagin, M., Hoernle, K., Avdeiko, G., Hauff, F., Werner, R., Bindeman, I., Uspensky, V. and Garbe-Schönberg, D., 2005, Transition from arc to oceanic magmatism at the Kamchatka-Aleutian junction. *Geology*, **33**, 25–28.
- Portnyagin, M. and Manea, V.C., 2008, Mantle temperature control on composition of arc magmas along the Central Kamchatka Depression. *Geology*, **36**, 519–522.
- Prelević, D., Akal, C., Foley, S.F., Romer, R.L., A. Stracke, A. and Van Den Bogaard, P., 2012, Ultrapotassic mafic rocks as geochemical proxies for post-collisional dynamics of orogenic lithospheric mantle: the Case of southwestern Anatolia, Turkey. *Jour. Petrol.*, **53**, 1019–1055.
- Prelević, D., Akal, C., Romer, R.L., Mertz-Kraus, R. and Helvacim C., 2015, Magmatic response to slab Tearing: Constraints from the Afyon alkaline volcanic Complex, western Turkey. *Jour. Petrol.*, **56**, 527–562.
- Rosenbaum, G., Gasparon, M., Lucente, F.P., Peccerillo, A. and Miller, M.S., 2008, Kinematics of slab tear faults during subduction segmentation and implications for Italian magmatism. *Tectonics*, **27**, TC2008, doi:10.1029/2007TC002143.
- Rosenbaum, G. and Lister, G.S., 2004, Neogene and Quaternary rollback evolution of the Tyrrhenian Sea, the Apennines, and the Sicilian Maghrebides. *Tectonics*, **23**, TC1013, doi:10.1029/2003TC001518.
- Salaün, G., Pedersen, H.A., Paul, A., Farra, V., Karabulut, H., Hatzfeld, D., Papazachos, C., Childs, D.M., Pequegnat, C. and Team, S., 2012, High-resolution surface wave tomography beneath the Aegean-Anatolia region: constraints on upper-mantle structure. *Geophys. Jour. Int.*, **190**, 406–420.
- Samaniego, P., Martin, H., Monzier, M., Robin, C., Fornari, M., Eissen, J.-P. and Cotton, J., 2005, Temporal evolution of magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The geology and petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador). *Jour. Petrol.*, **46**, 2225–2252.
- Schellart, W.P., 2004, Kinematics of subduction and subduction-induced flow in the upper mantle. *Jour. Geophys. Res.*, **109**, B07401,

- doi:10.1029/2004JB002970.
- Shinjo, R., Woodhead, J.D. and Hergt, J.M., 2000, Geochemical variation within the northern Ryukyu Arc: magma source compositions and geodynamic implications. *Contrib. Miner. Petrol.*, **140**, 263–282.
- Shiomi, K., Matsubara, M., Ito, Y. and Obara, K., 2008, Simple relationship between seismic activity along Philippine Sea slab and geometry of oceanic Moho beneath southwest Japan. *Geophys. Jour. Int.*, **173**, 1018–1029.
- 汐見勝彦・松原 誠・小原一成, 2008, 地震学的探査によるモホ不連続面の検出—近畿地方を例として—. *地学雑誌*, **117**, 45–58.
- Shiomi, K., Obara, K. and Sato, H., 2006, Moho depth variation beneath southwestern Japan revealed from the velocity structure based on receiver function inversion. *Tectonophys.*, **420**, 205–221.
- Soto, G.L., Ni, J.F., Grand, S.P., Sandvol, E., Valenzuela, R.W., Speziale, M.G., González, J.M.G. and Reyes, T.D., 2009, Mantle flow in the Rivera–Cocos subduction zone. *Geophys. Jour. Int.*, **179**, 1004–1012.
- Stegman, D.R., Freeman, J. and Schellart, W.P., 2006, Influence of trench width on subduction hinge retreat rates in 3-D models of slab rollback. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, Q03012, doi:10.1029/2005GC001056.
- 島弧深部構造研究グループ, 2009, 日本列島とその周辺地域の深発地震の震源分布—和達・ベニオフ面の検討—. *地球科学*, **63**, 9-27.
- Trua, T., Clocchiatti, R., Schiano, P., Ottolini, L. and Marani, M., 2010, The heterogeneous nature of the Southern Tyrrhenian mantle: Evidence from olivine-hosted melt inclusions from back-arc magmas of the Marsili seamount. *Lithos*, **118**, 1–16.
- Trua, T., Serri, G. and Marani, M., 2003, Lateral flow of African mantle below the nearby Tyrrhenian plate: geochemical evidence. *Terra Nova*, **15**, 433–440.
- van de Zedde, D.M.A and Wortel, M.J.R., 2001, Shallow slab detachment as a transient source of heat at mid lithospheric depths. *Tectonics*, **20**, 868–882.
- van Hunen, J. and Allen, M.B., 2011, Continental collision and slab break-off: A comparison of 3-D numerical models with observations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **302**, 27–37.
- Watanabe, Y., 2005, Late Cenozoic evolution of epithermal gold metallogenic provinces in Kyushu, Japan. *Miner. Deposita*, **40**, 307–323.
- Wortel, M.J.R. and Spakman, W., 2000, Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. *Science*, **290**, 1910–1917.
- Wu, Y.-M., Shyu, J.B.H., Chang, C.-H., Zhao, L., Nakamura, M. and Hsu, S.-K., 2009, Improved seismic tomography offshore northeastern Taiwan: implications for subduction and collision processes between Taiwan and the southernmost Ryukyu. *Geophys. Jour. Int.*, **178**, 1042–1054.
- Yamaji, A., 2003, Slab rollback suggested by latest Miocene to Pliocene forearc stress and migration of volcanic front in southern Kyushu, northern Ryukyu Arc. *Tectonophys.*, **364**, 9–24.
- Yogodzinski, G.M., Lees, J.M., Churikova, T.G., Dorendorf, F., Wöerner, G. and Volynets, O.N., 2001, Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges. *Nature*, **409**, 500–504.
- Zhao, D., Yamada, T., Hasegawa, A., Umino, N. and Wei, W., 2012, Imaging the subducting slabs and mantle upwelling under the Japan Islands. *Geophys. Jour. Int.*, **190**, 816–828.

Abstract

Tearing of subducting slabs is a wide-spread phenomenon in present-day and ancient subduction zones, and resultant upwelling of asthenosphere is partially responsible for generation of specific magmas such as alkaline mafic and adakitic magmas. Here, I review some factors leading to vertical tearing of subducting slabs and their Miocene–Quaternary examples. Segmentation caused by fracturing and/or tearing of the Philippine Sea slab subducting beneath Southwest Japan has been inferred from geophysical data by many authors. I also review the studies on segmentation of the Philippine Sea slab, and tentatively suggest a possibility that the origin of Aonoyama monogenic volcanoes made up of adakite lavas may be related to a possible vertical-tear of the subducting Philippine Sea slab.