

<総説>

現世と過去の収束域における水平および低角沈み込みの地質的影響と成因

君波和雄¹⁾

An overview of geological manifestations and causes of present-day and ancient flat-slab and low-angle subduction in convergent margins

Kazuo Kiminami¹⁾

要旨

現世と過去の水平・低角沈み込みの特徴や地質的影響、成因をレビューする。現世沈み込み帯の約10%は水平・低角沈み込みだとされている。水平沈み込みと低角沈み込みとは区別されることなく使用されてきた。しかし、両者は異なる点も多く、区別して扱うのが適切と考えられる。典型的な水平沈み込みは、チリの Pampean flat-slab、ペルーの Peruvian flat-slab、メキシコの Mexican flat-slab である。Pampean flat-slab と Peruvian flat-slab では、非震性海嶺が沈み込んでいる。低角沈み込みは、北米のカスケード、南部アラスカ、西南日本などに認められる。水平・低角沈み込みの成因には、多くの見解があり、現在も議論が続いている。それらは、1) 浮揚性地塊の沈み込み、2) 上盤プレートの前進、3) マントル吸引力、4) 幅広い (> 6,000 km) 沈み込み帯での長期間にわたる (> 80–110 my) 沈み込み。これら要因の2つ以上が作用して水平・低角沈み込みが形成される可能性が高い。

2024年7月31日受付

2024年9月10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: 830-0047 久留米市津福本町 198-2-701

Address: 807-3, 198-2-701, Tsubuku Motomachi, Kurume
830-0047, Japan

Keywords: flat-slab subduction, low-angle subduction, buoyant ridge, suction force, slab dip

はじめに

沈み込む海洋プレートがマントルウェッジに会合する深さ (40–50 km) まで (thrust zone もしくは seismogenic zone= 地震発生帯) のスラブ傾斜角は、一般に低角度である (Syracuse and Abers, 2006; Syracuse et al., 2010). Jarrard (1986) によりコンパイルされた世界の沈み込み帯の諸パラメータに基づけば、海溝から深さ 60 km までのスラブの平均傾斜角は、多くが 30° 以下である。Lallemand et al. (2005) によれば、海溝から深さ 125 km までのスラブの平均傾斜角

の中間値は、大陸地殻の下のスラブで 27.5°, 海洋地殻の下のスラブで 42.5° である。海洋地殻の下のスラブで傾斜角がより大きい傾向は、深さ 125 km から 670 km のスラブにおいても認められる。Syracuse and Abers (2006) によれば、世界の各沈み込み帯における深さ 50–250 km のスラブの平均傾斜角は、30° から 60° である。また、England et al. (2004) も深さ 80–400 km までのスラブの平均傾斜角の多くが 30° から 60° であることを示している。しかし、世界のいくつかの沈み込み帯では、thrust zone を超えて海溝から数 100 km 離

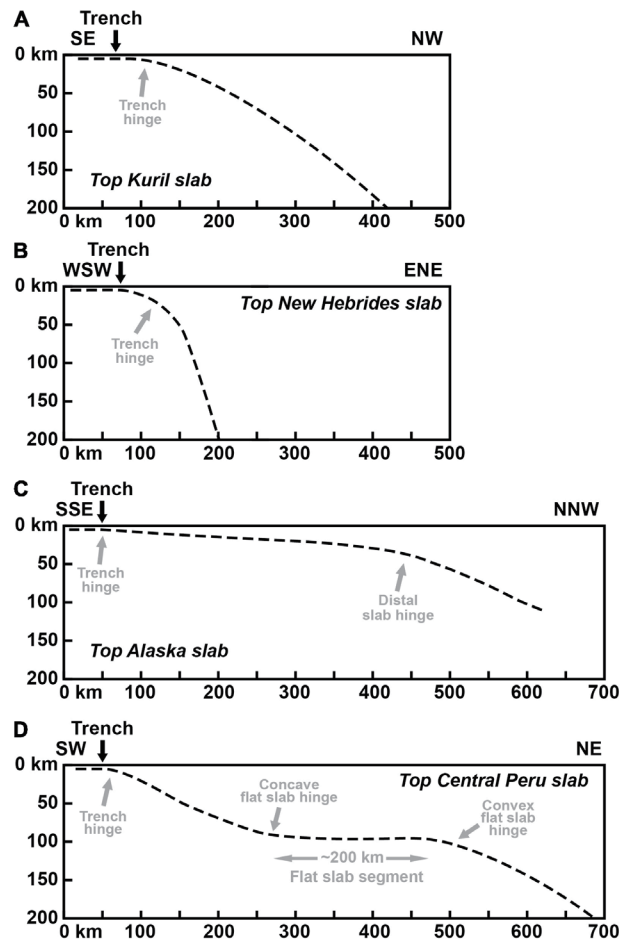
れた所まで、水平もしくは非常に低角に沈み込むスラブの存在が知られている。本論では、こういった沈み込み様式をそれぞれ水平沈み込み (flat-slab もしくは flat-slab subduction) および低角沈み込み (low-angle subduction) と呼ぶ。Gutscher et al. (2000a) によれば、現世の沈み込み帯の約 10 % が水平もしくは低角沈み込みである。水平沈み込みは中央チリやペルー南部-北部、メキシコ、低角沈み込みはカスケードや南部アラスカ、四国などで知られている。また、過去の水平もしくは低角沈み込みは、古第三紀の北米西部 (例えば、Coney and Reynolds, 1977) やトリアス紀の南東中国 (Li and Li, 2007)、後期ジュラ紀-前期白亜紀の東アジア (Kiminami and Imaoka, 2013) などで知られている。水平・低角沈み込みは、火成弧の位置や火成活動の消長、地形、上盤プレートの造構環境・温度などに重要な影響を与えると考えられ、その地質的影響や形成要因に関して多くの研究が行われてきた (例えば、Gutscher et al., 2000a; van Hunen et al., 2004; Espurt et al., 2008; Kay and Coira, 2009; Schellart and Strak, 2021; Horton et al., 2022)。

本論では、現世および過去の水平・低角沈み込みの分布や特徴、成因などに関する研究を紹介し、その重要性や意義を概観する。

水平および低角沈み込みの特徴と定義

水平沈み込みと低角沈み込みは、一般に区別されることなく用いられる (例えば、Gutscher et al., 2000a)。一方、Pérez-Gussinyé et al. (2008) は、スラブが約 100 km の深さで水平に変化し、内陸側に数 100 km にわたって続く水平沈み込みと、スラブが比較的 low angle で進入し、深さ 70–100 km で急角度になり、マントルに入っていく低角沈み込み (南アラスカ、コスタリカ、カスケード、南海など) を区別している。また、Schellart (2020) は、水平沈み込みと低角沈み込みとの違いに関して次のように述べている。「For most active subduction zones on Earth, the uppermost ~200 km of the slab is defined by one convex-upward slab hinge located close to the trench (Figures 1A, B) (e.g., Kuril–Kamchatka, Izu–Bonin–Mariana, Sunda, Tonga–Kermadec–Hikurangi, New Hebrides). Some subduction segments, however, show two or three slab hinges in the uppermost 200 km. The former generally has a very gentle, convex upward, slab hinge near the trench and a second, more pronounced, convex upward hinge several

hundred kilometers downdip, with a very low angle slab segment in between (Figure 1C) (e.g., Alaska, Nankai, Cascadia). The latter, with three slab hinges, has one convex-upward hinge near the trench, one concave upward hinge that marks the start of a flat slab segment dipping $\leq 10^\circ$, and one convex-upward hinge that marks the end of the flat slab segment (Figure 1D). It is this subduction geometry, with three slab hinges that is most enigmatic and that is the subject of this study. In this contribution, only the subduction geometry with three slab hinges will be referred to as flat slab subduction.」このように、Schellart (2020) は、3つのヒンジを有する沈み込みタイプを水平沈み込みと定義している。一方、低角沈み込



第1図. 現世スラブ (上部 200 km) の形状と傾斜角に基づく 4 つの沈み込みタイプ (Schellart, 2020). A: 南千島スラブ. 一つの凸型ヒンジと通常のスラブ傾斜角を有する. B: 南ニューヘブリディーズスラブ. 一つの凸型ヒンジと高角度のスラブ傾斜角を有する. C: アラスカスラブ. 2つの凸型ヒンジとその間の低角のスラブを有する. D: 中央ペルースラブ. 3つのヒンジ (海溝近くの凸型ヒンジ, およびその外側の凹型ヒンジと凸型ヒンジ) と凹型ヒンジと外側の凸型ヒンジの間のほぼ水平なスラブを有する.

みについては、スラブのヒンジが2つであり、通常の沈み込みの亜種としている。また、Schellart and Strak (2021)によれば、低角沈み込みのスラブ平均傾斜角（深さ200 kmまで）は 20° 以下である。

本論では、基本的にSchellart (2020)およびSchellart and Strak (2021)の分類に従い、水平沈み込みと低角沈み込みを区別して記述する。

水平沈み込みおよび低角沈み込みの分布

1. 水平沈み込み

沈み込み帯周辺の震源分布から沈み込む海洋プレートの形状が明らかになるのに従い、南米西部で非常に低角の沈み込みが存在することが明らかになってきた（例えば、Isacks and Molnar, 1971; Barazangi and Isacks, 1976）。そして、これらの低角の沈み込みと非震性海嶺の沈み込みや弧火山活動の停止との相関が注目されてきた（例えば、Isacks and Barazangi, 1977; Pilger, 1981）。Cross and Pilger (1979)やPilger (1981)は、水平沈み込みをlow-angle subductionと表現しており、浮揚性の非震性海嶺の沈み込みや上盤プレートの前進でこれらが形成されたことを指摘するとともに、低密度のアセノスフェアが押し出されて沈み込んだスラブと上盤プレートが直接接しているとした。

水平沈み込みの典型的事例は、南米西岸でナスカプレートが沈み込む 30° S付近の中央チリ、 10° S付近のペルー、および中米西岸でココスプレートが沈み込む 17° N付近のメキシコ南部である。ここでは、それぞれをPampean flat-slab, Peruvian flat-slab, およびMexican flat-slabと呼ぶ。Pampean flat-slabではファンフェルナンデス海嶺（Juan-Fernandez Ridge）が、Peruvian flat-slabではナスカ海嶺（Nazca Ridge）がペルー-チリ海溝に衝突している。

赤道付近のエクアドル下にも水平沈み込みの存在が推定されている（Gutscher et al., 2000a; Beate et al., 2001; Bourdon et al., 2002, 2003）。エクアドルのペルー-チリ海溝ではCarnegie海嶺が衝突している。しかし、エクアドル下の中発地震の震源分布（和達-ベニオフ面の深度）が明確になっておらず、地表で幅の広い（110 km）火山帯が認められるため、水平沈み込みの存在は必ずしも明確ではない（Bourdon et al., 2003; Garrison and Davidson, 2003）。Espurt et al. (2008)は、Carnegie海嶺がまだ十分に沈み込んでいないので、エクアドル下では水平沈み込みに至っていないとしている。

Mexican flat-slab (Pardo and Suárez, 1995) の形

成にはTehuantepec海嶺の沈み込みが関連していると考えられた（Gutscher et al., 2000a）。しかし、Skinner and Clayton (2011)は、Tehuantepec海嶺が沈み込んでいる場所のスラブ傾斜角が 30° なので、この海嶺の沈み込みはスラブの傾斜角にあまり影響を与えていないとしている。Manea et al. (2013)やGérault et al. (2015)は、メキシコ南部の水平沈み込みが非震性海嶺の沈み込みとは無関係としている。

2. 低角沈み込み

Pérez-Gussinyé et al. (2008)やSchellart (2020)は、ファンデフカプレートが沈み込む 48° N付近のカスケード下やアリュウシヤン海溝東部で太平洋プレートが沈み込む南部アラスカ下（ 61° N付近）、フィリピン海プレートが沈み込む西南日本下に低角沈み込みを認めている。

Finzel et al. (2011)は、南部アラスカ下の低角沈み込み（Finzel et al. 論文では水平沈み込みと記述している）の上盤プレートの地質構造や造構史を検討している。Gutscher et al. (2000a)やFinzel et al. (2011)は、アリュウシヤン海溝東縁におけるYakutatマイクロプレートの沈み込みがこの低角沈み込みに関与しているとしている。

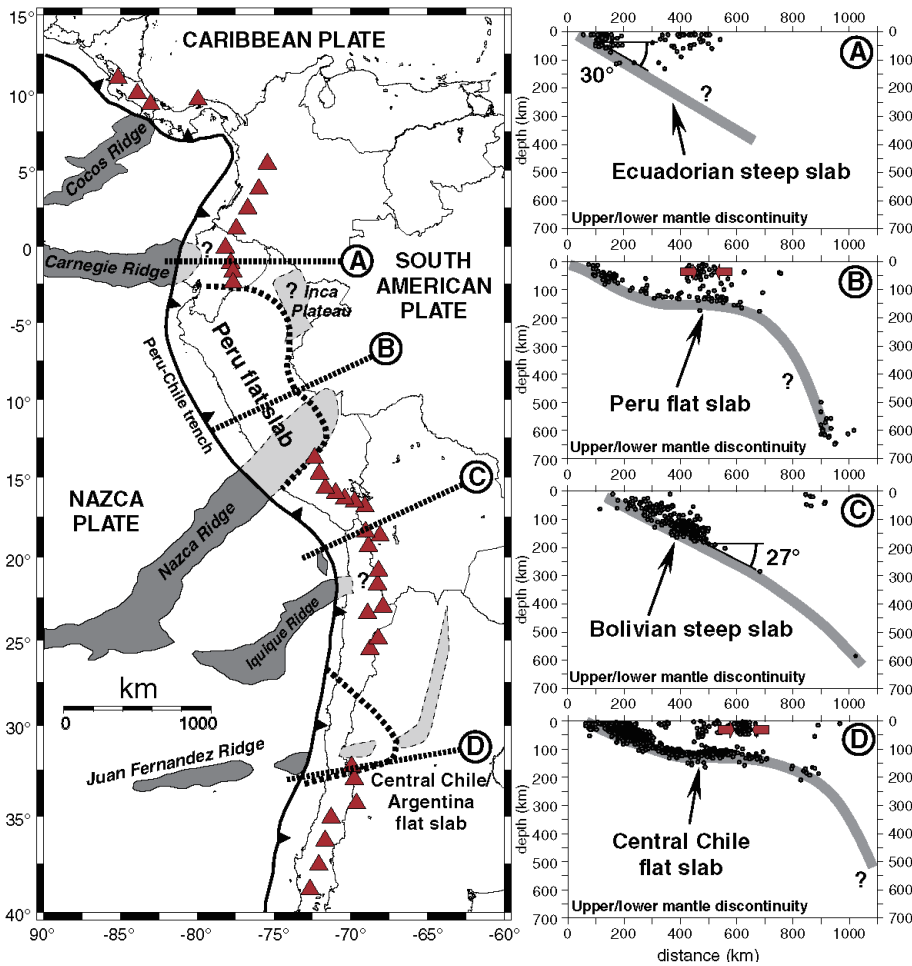
カスケード下の低角沈み込みは、バンクーバー島南部からワシントン州北西部にかけて分布する。対応する非震性海嶺の沈み込みは認められない（Gutscher et al., 2000a）。ここでは非常に若い（7-8 Ma）ファンデフカプレートが沈み込んでいる。

西南日本下の低角沈み込みは、Hirose et al. (2008)やNakajima and Hasegawa (2007), Shiomi et al. (2008)などの断面図に基づけば、南海トラフから 133° E付近の四国や中国地方の下に沈み込むフィリピン海スラブである。 136° E付近にも小規模な低角沈み込みが認められる。Gutscher et al. (2000a)は、九州-パラオ海嶺の沈み込みがこの低角沈み込みに関与しているとした。しかし、Cao et al. (2014)によれば、15 Ma以降の九州-パラオ海嶺は、低角沈み込みセグメントの西側の九州下やさらにその西方に沈み込んでおり、九州-パラオ海嶺の沈み込みが低角沈み込みの原因となる可能性は低いと推定される。

水平・低角沈み込みスラブの形態

1. 水平沈み込み

典型的な水平沈み込みは、南米西岸に2カ所、メキシコ西岸に1カ所存在する。前述したように、水平沈み込みの場合、海溝に直行する断面においてスラブは3つの



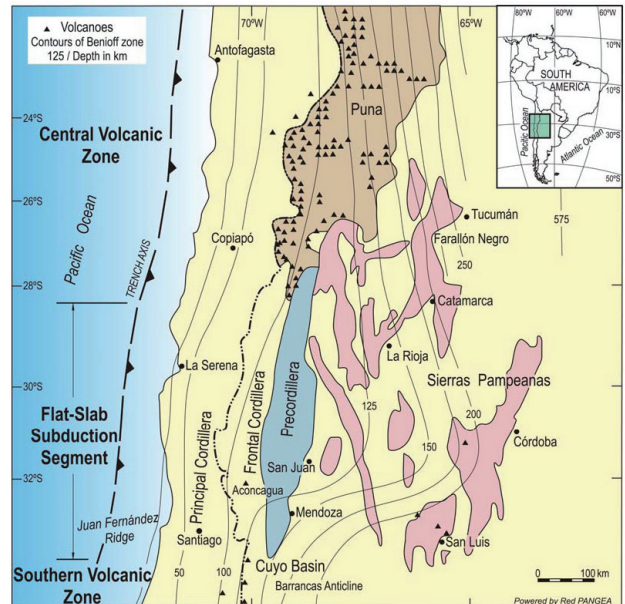
第2図. 南米西岸域における非震性海嶺、水平沈み込みおよび活火山(▲)の分布、およびいくつかのルート(○A~○D)のスラブの形状 (Martinod et al., 2010).

ヒンジを有する：海溝近くに1つ、水平スラブの両端に各1つ。ここでは、水平スラブの海溝側のヒンジをプロキシマル (proximal) ヒンジ (凹型)、海洋側のヒンジをディスタル (distal) ヒンジ (凸型) と呼ぶ。また、プロキシマルヒンジとディスタルヒンジの間の距離を水平スラブセグメントの長さとする。

1) Pampean flat-slab

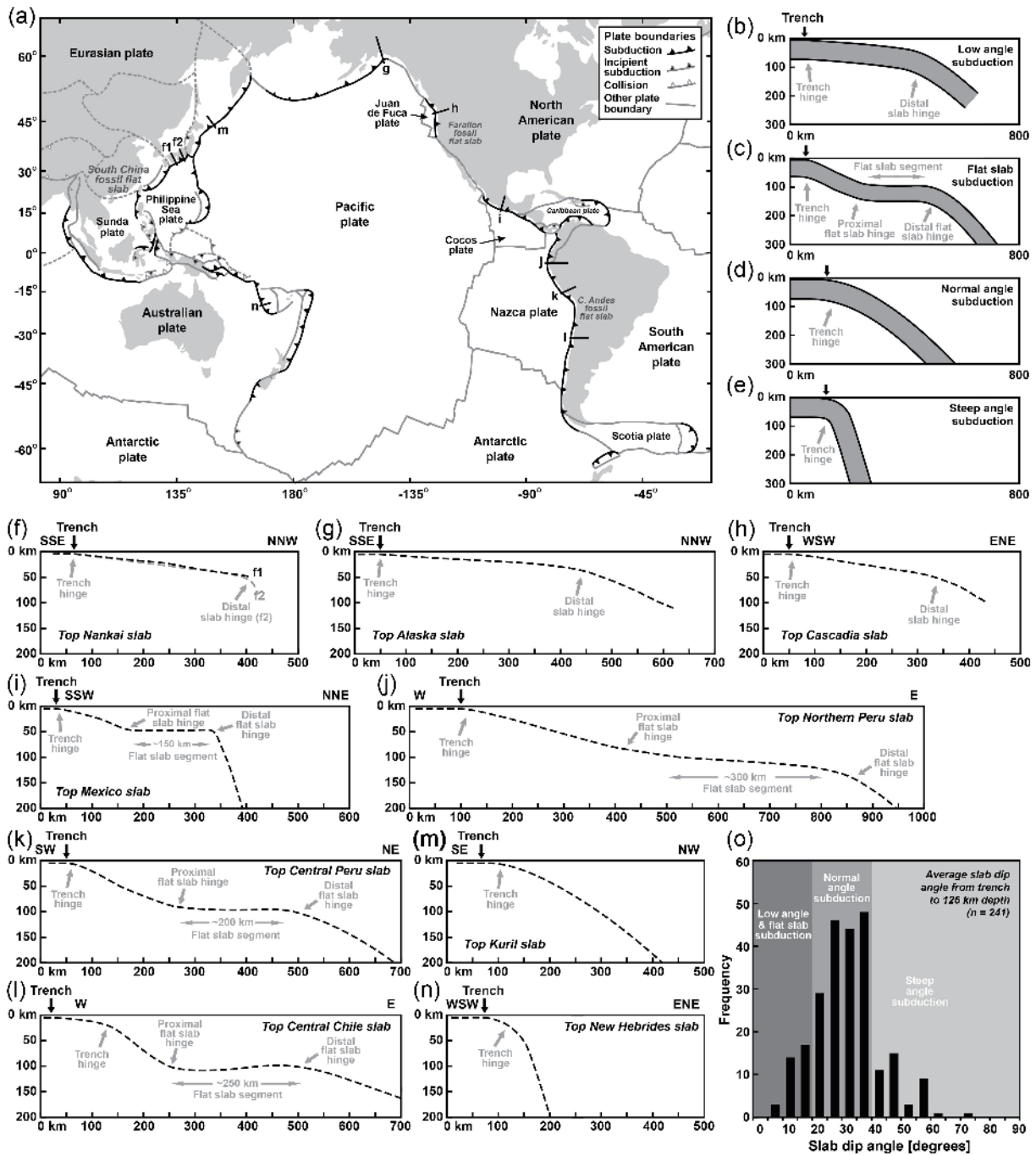
第2図 (Martinod et al., 2010) は、南米西岸の海溝に衝突する主要な非震性海嶺と西岸沿いの活火山の分布およびいくつかの地域のスラブの形状を示した面である。水平沈み込みが認められるのは、30° S 付近の中央チリと 10° S 付近のペルーの下である。

中央チリの水平スラブセグメント (第3図, Ramos et al., 2002) は、沈み込んだファンフェルナンデス海嶺の軌跡と一致する (Yáñez et al., 2002)。水平スラブセグメントは、北に尖った三角形を呈する。北側は通常の沈み込みに漸移し、南端は 32° S 付近で通常の沈み込みに急速に変化する。南端には南米の最高峰であるアコンカグアがある。水平スラブセグメントの上およびその東側では活火山をほとんど欠いている。Schellart and Strak (2021) の断面によれば (第4図1), プロキシマルヒンジとディスタルヒンジの深さは約 100 km、海溝



第3図. Pampean flat-slab 周辺のナスカスラブ上面の等深度線。黒三角 (▲) は活火山 (Ramos and Folguera, 2009)。

とディスタルヒンジの距離は 500 km である。また、水平スラブセグメントの長さは、250 km である。水平スラブの形状を高い精度で解析した Gans et al. (2011) によれば、水平スラブセグメントの深さは 100 km、海溝



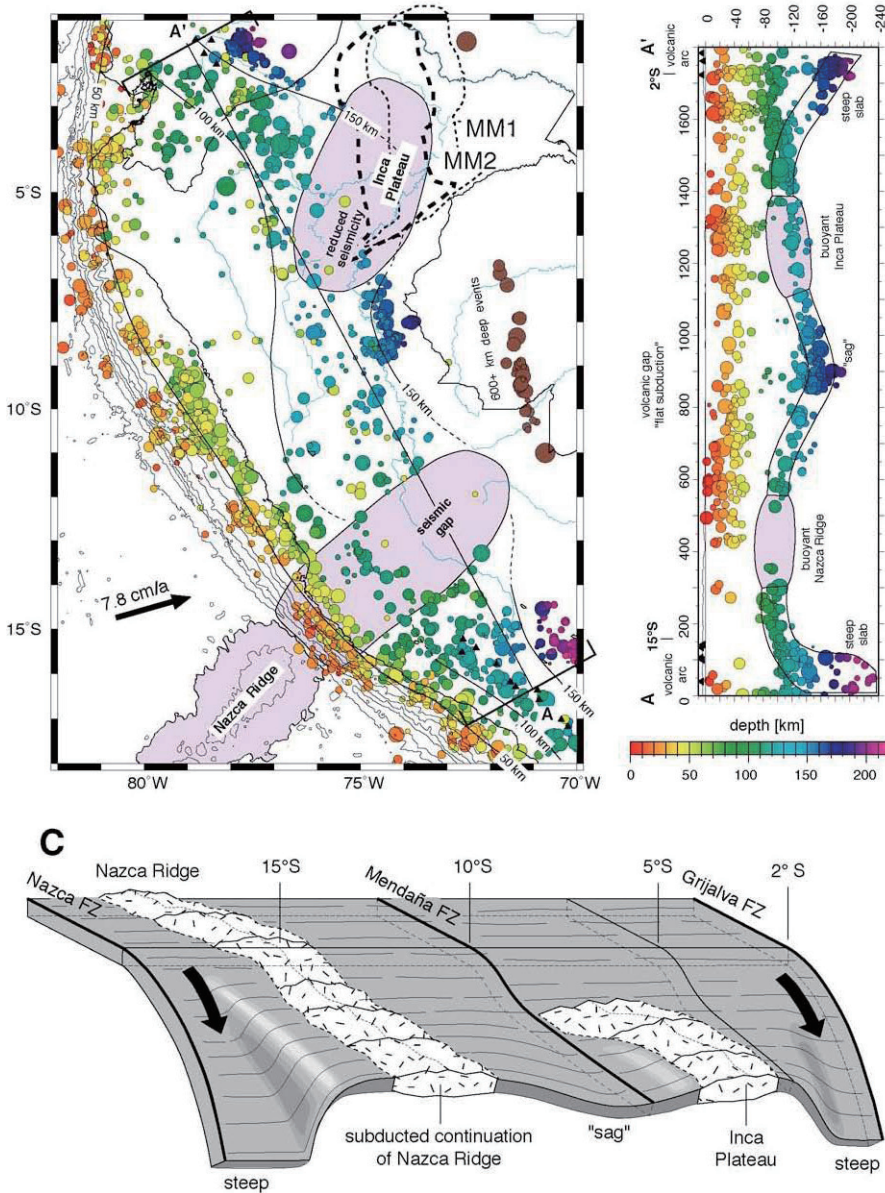
第4図. 現世の低角および水平沈み込みの分類とその実例 (Schellart and Strak, 2021). a: 太平洋とインド洋地域の沈み込み帯を示す造構図. b-e: スラブ傾斜角 (海溝から 200 km の深さ) とヒンジの位置に基づく沈み込みスラブの分類. f-h: 低角沈み込みの分布およびスラブの形状. (i-l) 水平沈み込みの分布およびスラブの形状. m, n: 標準的な沈み込み帯のスラブの形状. o: 海溝から深さ 125 km までのスラブ傾斜角の頻度分布 (241 個の沈み込みセグメント.)

とディスタルヒンジの距離は約 500 km である。

2) Peruvian flat-slab

ペルーの水平沈み込みでは、ナスカ海嶺が沈み込んでいる。水平スラブセグメントは、海溝方向に長辺 (約 1,500 km) をもった長方形を呈しており、その南部にナスカ海嶺が沈み込んでいる (第2図)。北端と南端は比較的急に通常の沈み込みに変化する。海溝と平行な方向に非常に長い Peruvian flat-slab に関しては、2 分割する見解がある。Gutscher et al. (1999) は、ナス

カ海嶺の沈み込みと沈み込みによって現在失われてしまったインカ海台 (Inca Plateau) によって幅の広い水平スラブセグメントが形成されたと考えた (第5図)。Baudino and Hermoza (2014) や Schellart (2020), Schellart and Strak (2021) もこの見解を採用している。インカ海台は、マルキーズ (Marquesas) 海台と対をなす海台として古第三紀に東太平洋海嶺で形成されたと考えられている (Gutscher et al., 1999; Baudino and Hermoza, 2014). Schellart and Strak (2021) の断面(第



第5図. ペルーにおける海台・海嶺の沈み込みと地震活動 (Gutscher et al., 1999). A(上の左): ペルー地域の1964年から1995年の地震活動。黒三角は活火山。B(上の右): 第5図A中のA-A'の断面。活火山が分布する北側と南側の端部では高角度のスラブからなる。長さ1,500 kmの水平スラブは、2つの浮揚性地塊によって支えられる。C: 2つの浮揚性地塊を伴ったナスカスラブの形状。

4図k)によれば、プロキシマルヒンジとディスタルヒンジの深さは約100 km、海溝とプロキシマルヒンジの距離は200 km、海溝とディスタルヒンジの距離は450 kmである。また、水平スラブセグメントの長さは、約250 kmである。

3) Mexican flat-slab

メキシコ南部の水平沈み込みは、非震性海嶺を伴っていない。水平スラブセグメントは、北西から南東に伸びた紡錘形をしており、北西側は比較的急に、南東側は緩く通常の沈み込みに変化する(第6図, Gérard et al., 2015)。Kim et al. (2012)やGérault et al. (2015), Schellart and Strak (2021)の断面によれば、プロキシマルヒンジとディスタルヒンジの深さは約50 km、海溝とプロキシマルヒンジの距離は150 km、海溝とディスタルヒンジの距離は300 kmである。また、水平スラブセグメントの長さは、約150 kmである。

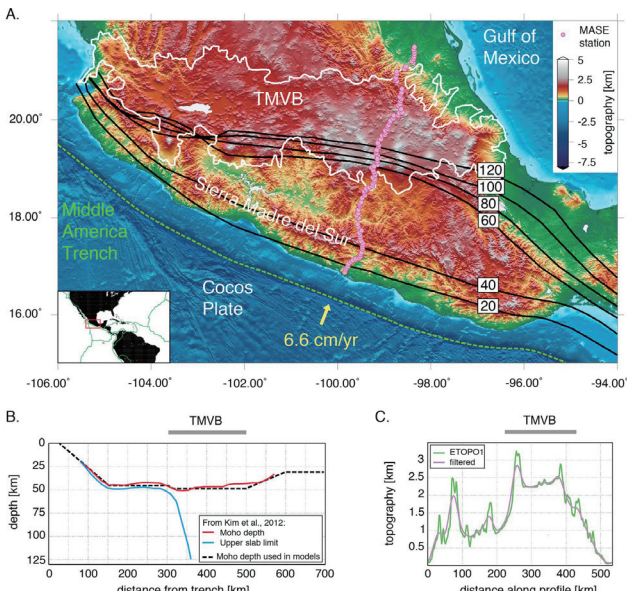
2. 低角沈み込み

低角沈み込みは、カスケード、アラスカ、西南日本などに認められる。低角沈み込みの場合、スラブは海溝に近い位置と離れた位置に凸状のヒンジを有する。ここでは、後者のヒンジをディスタルヒンジと呼ぶ。

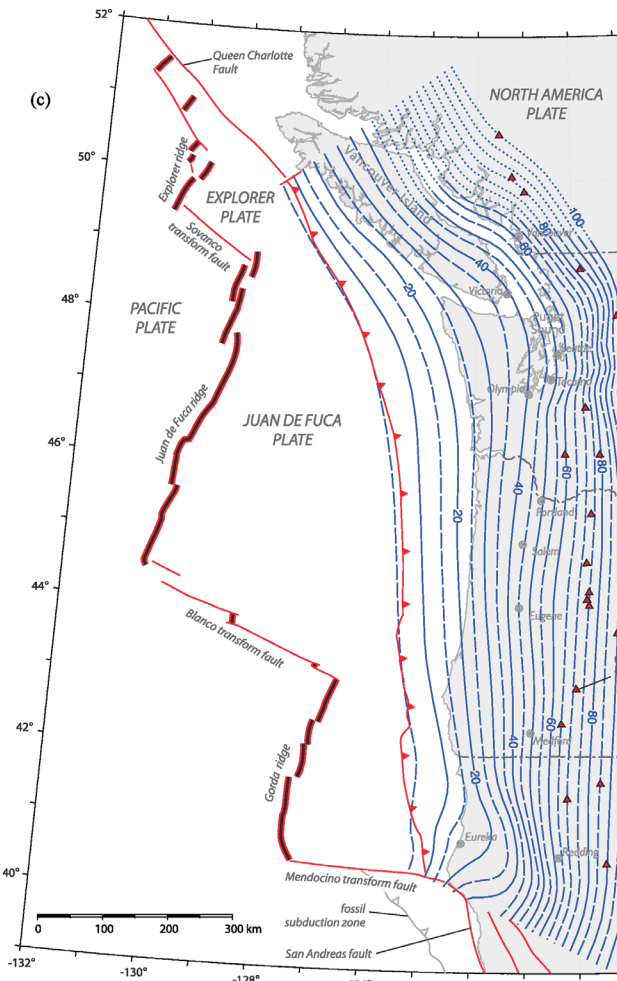
1) カスケードの低角沈み込み

若いファンデフカプレートが沈み込むカスケード低角沈み込みは、McCroory et al. (2012)によれば、バンクーバー島南部からワシントン州北部にかけてスラブ表面の等深度線が緩く内陸(東)側に張り出した形をしており(第7図)、北側と南側の境界は通常の沈み込みに漸移する。Schellart and Strak (2021)の断面によれば、ディスタルヒンジは、海溝からおおよそ300 km東方にあり、深さが約50 kmである。

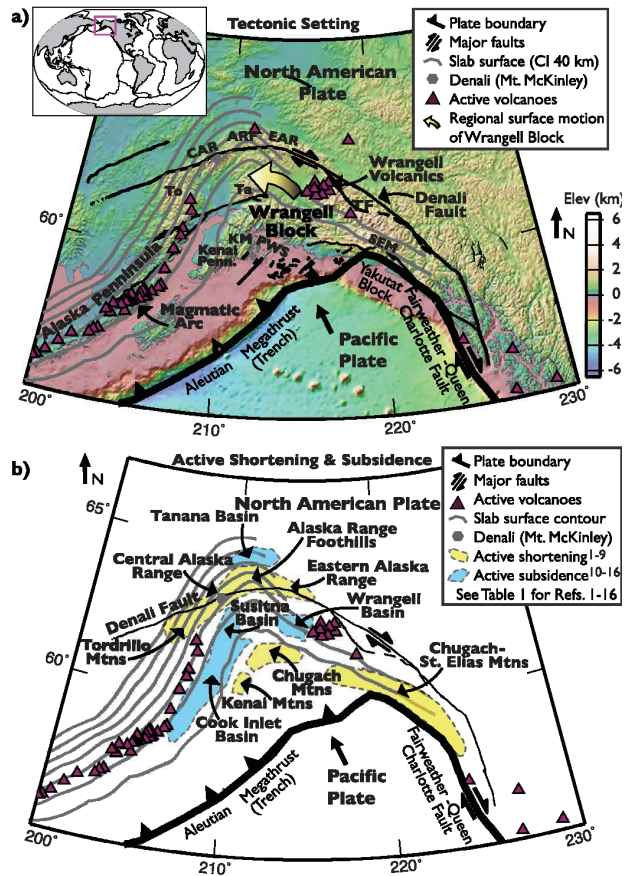
2) アラスカの低角沈み込み



第6図. A: 南西メキシコの地形とココススラブ上面の等深度線 (Gérault et al., 2015). 白線は、メキシコ横断火山帯 (TMVB). ピンク色の小円は、中米沈み込み実験の測点 (MASE). B: 赤線はモホ面の深さ、青線はスラブの上面の深さ、破線は計算モデルから単純化したモホ面の深さ. C: 図A中のピンクの小円 (MASE) に沿う地形. 緑線は実測、赤線は平滑化.



第7図. ファンデフカスラブ表面の等深度線 (McCrory et al., 2012).

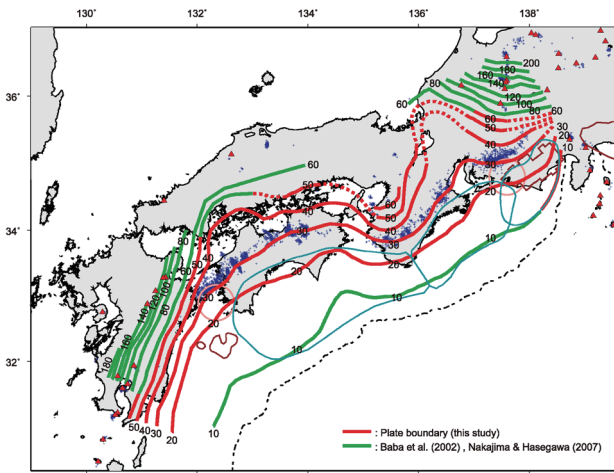


第8図. a: 南-中央アラスカの造構図 (Jadamec et al., 2013). 灰色のコンターは、南-中央アラスカの太平洋スラブ表面の等深度線. ARF: Alaska Range Foothills, CAR: Central Alaska Range, EAR: Eastern Alaska Range, KM: Kenai Mountains, PWS: Prince William Sound, SEM: St. Elias Mountains, Ta: Talkeetna Mountains, TF: Totschunda Fault, To: Tordrillo Mountains. b: 活動的な短縮領域 (黄色)・沈降領域 (水色) の位置.

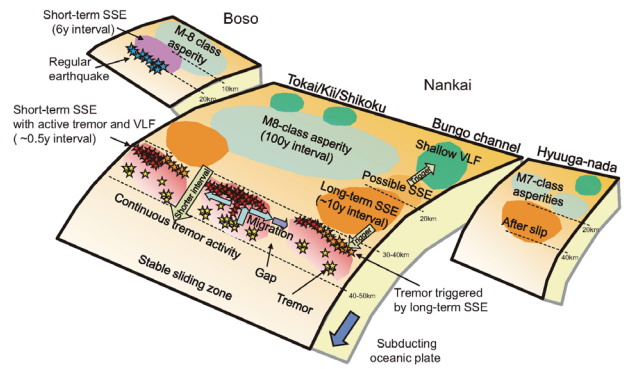
太平洋プレートが沈み込むアラスカ低角沈み込みは、アリューシャン海溝の東縁に位置し、スラブ表面の等深度線が北側に張り出した形をしている (第8図, Jadamec et al., 2013). 東側はいくつかの右ずれの走行移動断層と接する. Schellart and Strak (2021) の断面によれば、ディスタルヒンジは、海溝からおよそ 400 km 北方にあり、深さが約 40 km である.

3) 西南日本の低角沈み込み

西南日本下に沈み込むフィリピン海プレートは、シンフォームとアンチフォームを繰り返しており (第9図, Hirose et al., 2008), アンチフォーム部が低角沈み込みになっている. 幅広いアンチフォームをなす四国から中国地方の下の低角スラブの幅は約 250 km である. この低角沈み込みの西端は急に正常な沈み込みに変化する. Obara (2011) は、ここでスラブが切断されている



第9図. 西南日本におけるフィリピン海スラブ表面の等深度線 (Hirose et al., 2008)



第10図. 西南日本下に沈み込むフィリピン海プレートの構造と地震活動 (Obara, 2011). 低角で沈み込む四国下のスラブとより高角で沈み込む九州下のスラブの間(図中の Bungo channel と Hyuuga-nada の間)でフィリピン海スラブが破断している

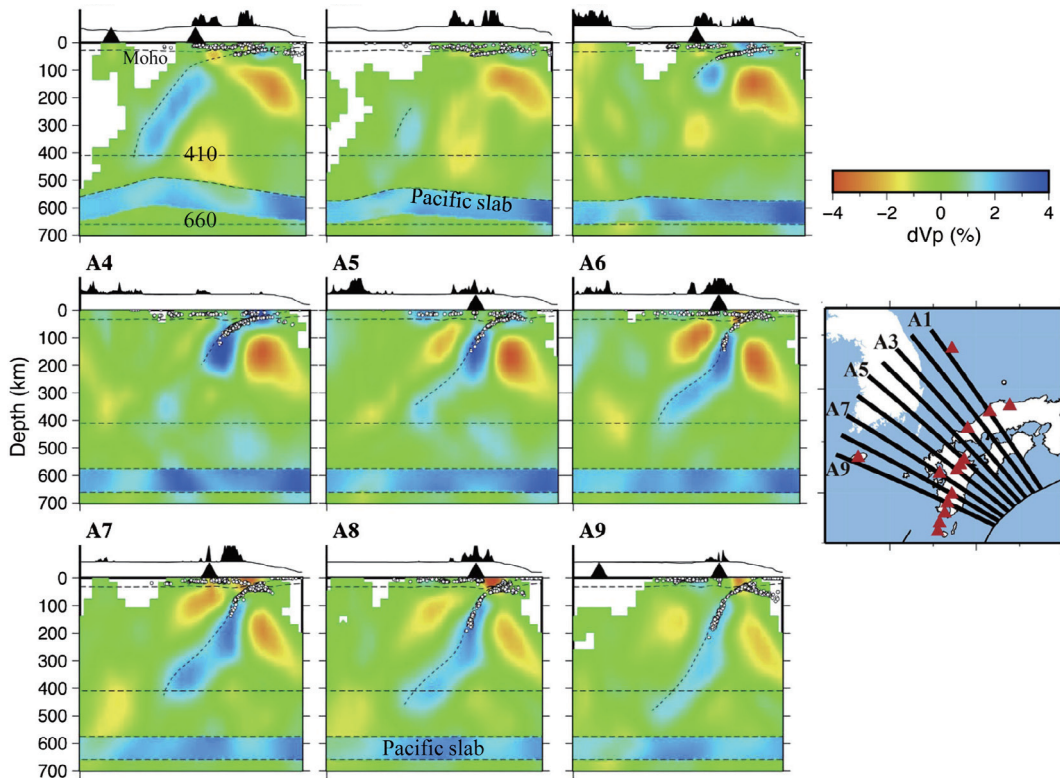
としている(第10図). また, 東側ではフィリピン海スラブがシンフォームとアンチフォームを繰り返す. 四国中央部を通る北西-南東の断面図(第11図 A1, Huang et al., 2013)によれば, 海溝から低角で沈み込んだフィリピン海スラブは, 日本海に面した山陰地域の下で急角度の沈み込みに転じる. ディスタルヒンジは, 海溝から300 km 内陸側にあり, 深さがおよそ 50-60 km である. また, Schellart and Strak (2021) の断面によれば, ディスタルヒンジは, 海溝から約 350 km, 深さ 50 km である.

地質的影響

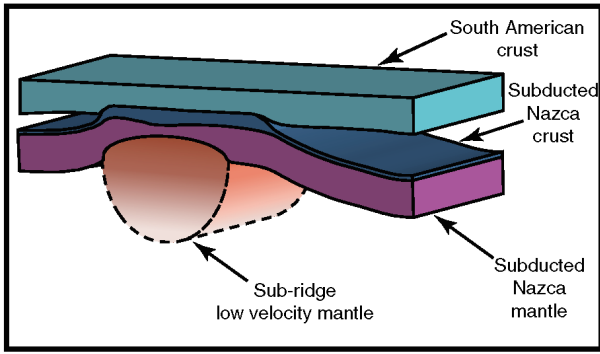
1. 水平沈み込み

1) 火山活動と熱流量

水平沈み込みが進行している地域では, 火山活動が停止もしくは通常よりも海溝から離れた内陸側に位置し, 全般的に活動が低下している. 例えば, Pampean flat-slab では水平スラブセグメント上に活火山はなく, ディスタルヒンジの東(内陸)側に散点的に出現する(例えば, Ramos, 1999; Ramos and Folguera, 2009). ま



第11図. 四国から九州にかけてのP波トモグラフィーの垂直断面 (Huang et al., 2013). 各断面に沿う地表の地形は, 各図の最上部に示す. A1 から A9 中の斜めの破線は, 沈み込むフィリピン海スラブの上面, モホ面, 410 km 不連続面, および 660 km 不連続面も破線で示す



第12図. 中央ペルーの下に沈み込むナスカ海嶺の模式的3次元モデル (Bishop et al., 2017). 薄い青:大陸地殻, 濃い青:沈み込んだナスカプレート (中央部の厚い部分が沈み込んだナスカ海嶺), 紫:沈み込んだナスカマントル, オレンジ:沈み込んだナスカ海嶺の下にある低速度物質, 大陸地殻 (薄い青) の下にある空白部は, 大陸性のリソスフェアマントル. ナスカ海嶺の下の低速度物質 (オレンジ) は, 熱 (部分熔融を含む) もしくは組成に起因する低密度体と推定される.

た, Peruvian flat-slab では, 水平スラブセグメント上だけではなく, その東側にも活火山は認められない. Mexican flat-slab では, フラットスラブセグメントの上に活火山は存在しないが, ディスタルヒンジを超えたスラブ深度 100 km 付近の上位に多くの活火山が存在する.

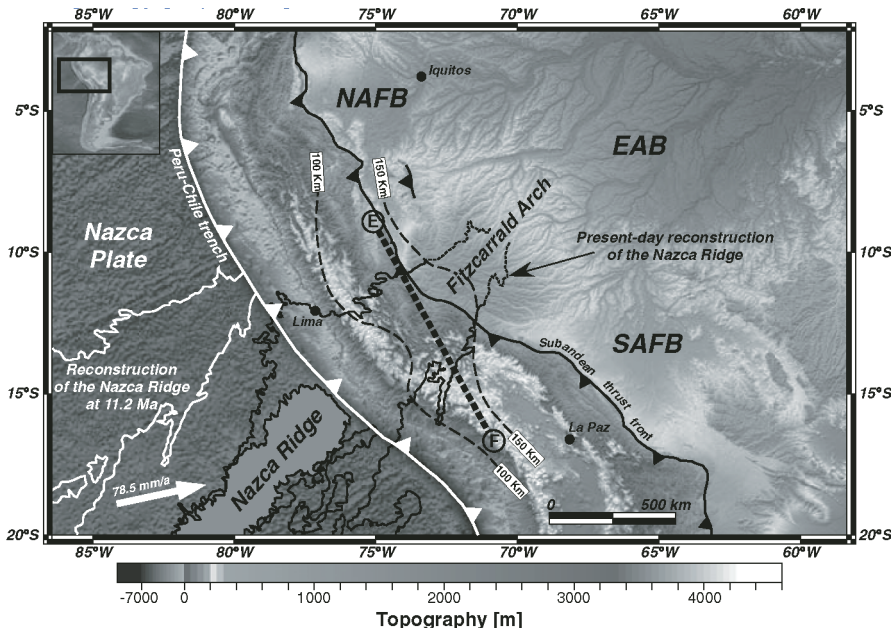
水平沈み込みの地域におけるこういった特異な活火山の分布は, 水平スラブセグメント領域における小さな熱流量 (Hamza et al., 2005) と調和的である. Marot et al. (2014) のトモグラフィーモデルと岩石学的モデルによれば, Pampean flat-slab (31–32° S) とそのすぐ南側の通常の沈み込み帯 (34° S) とでは熱構造に明瞭な相違がある. 水平スラブ上のマントル (深さ約 100–50 km) の温度が約 600–500° C と見積もられるのに対し, その南側の通常の沈み込み帯では 700–1,100° C と見積もられる.

Kay and Mopodosis (2001, 2002) は, Pampean flat-slab 地域の漸新世末以降の火山活動を検討し, この地域が通常の沈み込みから低角の沈み込みに変化して, 火山活動が内陸側に移動したことを明らかにした. この過程でマントルウェッジのアセノスフェアが押し出され, スラブとリソスフェアが直接接したと推定した. Wager et al. (2006) は, Pampean flat-slab の地震波の解析から, 水平スラブの上に低温のマントルが存在し, 通常のコーナー流が存在しないこと, スラブからの脱水によりこの部分のマントルが蛇紋岩化している可能性を指摘している. Litvak et al. (2007) も Pampean flat-slab 地域の始新世以降の火山活動・造構運動を検討し,

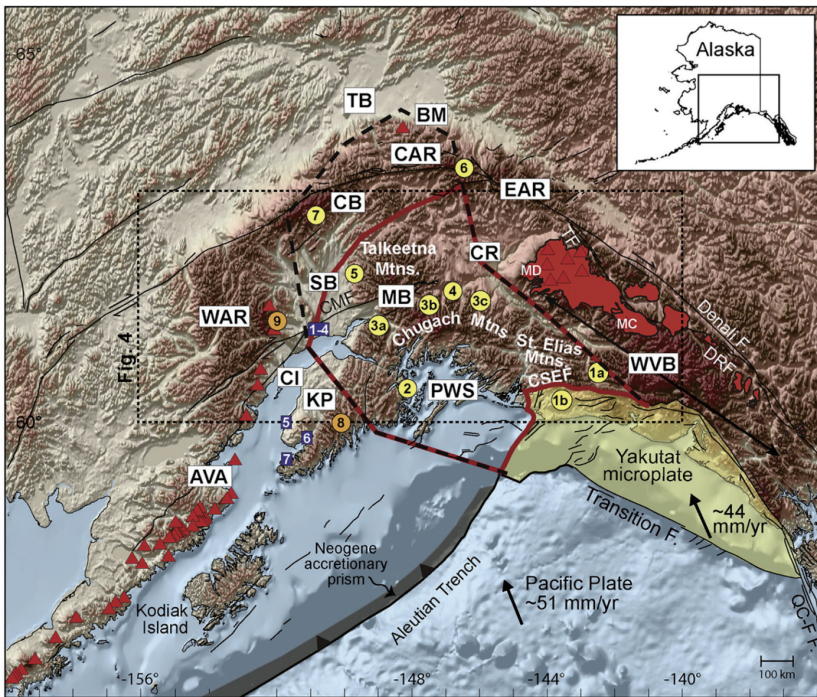
ファンフェルナンデス海嶺が前期–中期中新世に沈み込み始めると, スラブが低角になり, 火山活動が東方 (内陸) に移動し始め, 地殻が圧縮場になって厚化したことを明らかにした. Capaldi et al. (2020) は, Pampean flat-slab 地域の新生代の堆積作用, 火山活動, 堆積物の供給, 碎屑性ジルコンの U–Pb 年代などを検討し, スラブの低角化にともなって火山活動や堆積作用が内陸側に移動したことを明らかにした.

Gutscher (2002) によれば, Peruvian flat-slab は, 隣接した通常の沈み込み帯に比べて熱流量が明瞭に小さい. ナスカ海嶺の移動史を検討した Hampel (2002) は, ナスカ海嶺と海溝との衝突が 11° S でおよそ 11.2 Ma に始まり, 衝突域が数 10mm/年の速度で南に移動したことを明らかにした. Bishop et al. (2017) は, Peruvian flat-slab 地域で沈み込んだナスカプレート, ナスカ海嶺および上盤の大陸リソスフェアのモホ面の深さや形態を解析し, ナスカ海嶺が海溝から 300–350 km まで沈み込んだ付近で急速にエクロジャイト化していることを明らかにした. そして, エクロジャイト化よりもさらに内陸までフラットスラブが連続している (海溝とディスタルヒンジの距離は 450 km) ので, フラットスラブを支えるためには, 非震性海嶺の沈み込みだけではなく, さらなる浮力もしくは揚力が必要であることを指摘した. Bishop et al. (2017) は, 非震性海嶺の下のマントルの蛇紋岩化もしくは部分熔融が附加的な浮力を与えている可能性を指摘している (第12図).

Mexican flat-slab 地域の火山は, 通常に沈み込む両側の地域よりも内陸側に位置し, スラブ面の 100 km 等深度線に沿う形で弧状に分布する (Mori et al., 2007). 南米の2つの水平沈み込みとは異なり, 非震性海嶺の衝突は認められない. また, Mori et al. (2007) は, 20 Ma 以降の火山活動の変遷を検討し, フラットスラブの内陸側への前進と後退に応じて火山活動の場が移動したことを明らかにしている. この火山活動場の変遷は, Skinner and Clayton (2011) の検討結果とほぼ一致している. Ferrari (2004) は, 水平沈み込みの北側に海洋島玄武岩やアダカイトを伴った苦鉄質火山帯の存在を報告しており, 11 Ma から 8 Ma に東側に向かってスラブが断裂したとしている. Manea et al. (2006) は, 中央メキシコでは深さ 60–80 km で玄武岩質岩からエクロジャイトに転移する温度構造なので, Mexican flat-slab ではエクロジャイト化が進行していないとしている. Manea and Manea (2011) は, Mexican flat-slab 地域の熱構造を検討し, 大陸地殻のモホ面と直接接したフラットスラブの上面が 500° 以下の低温状態であると



第13図. ペルーアンデスの造構図 (Espurt et al., 2007). アマゾン盆の西部は2つの沈降盆からなる: 北部アマゾン前縁地盆 (NAFB) と南部アマゾン前縁地盆 (SAFB). その間には隆起帯である Fitzcarrald arch がある. Fitzcarrald arch の東側は, 東アマゾン盆 (EAB) によって境される. ナスカ海嶺が沈み込んだと推定される所と Fitzcarrald arch とは重なる.



第14図. 南アラスカの地形と地質構造 (Finzel et al., 2011). 黒色の太い破線は, Yakutat マイクロプレートが沈み込んだと想定される領域. 赤色の太い実線は, flat-slab セグメントの領域. CI, TB, CB, MB, SB, CR: 堆積盆. AVA: アラスカ半島-アリューシャン火山弧. WVB: ラングェル火山帯. CMF, CSEF, DRF, QC-FF, TF: 断層.

推定した. この地域のディスタルヒンジの深さは, 約 50 km なので, フラットスラブ末端部のエクログャイト化によって, 通常の沈み込みに移行しているのかもしれない.

2) 地質構造

Pampean flat-slab 地域は, アンデス山脈の最も高い部分と一致する (Ramos and Folguera, 2009). Kay and Mopodosis (2001) は, Pampean flat-slab 地域において, スラブの低角化に伴い, 火山が東側に移動すると同時にフラットスラブ上の地殻の短縮と厚化が起きたとしている. Ramos et al. (2002) もスラブの低角化に伴い, 断層活動が東側に移動したとしている. Gutscher (2002) は, Pampean flat-slab の上の地殻に

おいて放出される地震エネルギーが通常の沈み込み帯のそれよりも有為に大きいこと, およびそれら地震の発震機構が海溝に直交する方向の圧縮であることから, フラットスラブセグメントと上盤プレートとのカップリングが強いと推定した. Rosenbaum et al. (2005) は, ファンフェルナンデス海嶺の沈み込み軌跡と銅や金, 亜鉛の鉱床形成場の変遷との関係を明らかにした.

Ramos and Folguera (2009) は, Peruvian flat-slab 地域の基本的な特徴が Pampean flat-slab 地域の特徴と共通するとしている. ナスカ海嶺が沈み込んだ延長部には Fitzcarrald Arch と呼ばれるドーム状の隆起帯が存在する (例えば, Espurt et al., 2007; Bishop et al., 2017). この隆起帯は, NE-SW 方向に伸長してお

り(幅 200 km, 長さ 750 km), その頂部は大陸下に沈み込んだナスカ海嶺の頂部と一致している(第 13 図). Espurt et al. (2007) は, ナスカ海嶺の沈み込みによってこの隆起帯が形成されたとしている. Rosenbaum et al. (2005) や Sun et al. (2010) は, 南米アンデスに多数分布する銅や金, 亜鉛の鉱床が水平スラブセグメントの上に位置することを示し, これらの金属鉱床が非震性海嶺や海台の沈み込みに関連して形成されたと考えた. そして, ナスカプレートの沈み込みから推定される非震性海嶺の移動と鉱床の形成が連動していることを示した. また, この過程で Peruvian flat-slab 北部に沈み込んでしまった海台(Inca Plateau)の存在を推定した.

Pérez-Campos et al. (2008) は, 地震波の解析に基づき, Mexican flat-slab 地域では海溝から 250 km の距離に渡ってココスプレートの構造的底付けが行われているとしている. また, 非常に薄い(10 ± 3 km) 低粘性の地質体によって水平スラブが地殻から切り離されているとしている. これを反映したためか, Mexican flat-slab 地域では海岸から 10 km 内陸の地域をのぞいて大きな地震が起きていない. Stubailo et al. (2012) は, 水平スラブセグメントの北西側が垂直の断裂によって切断されているとしている. Gérard et al. (2015) は, Mexican flat-slab が南米の現世水平沈み込みと異なる点として, 活発な火山活動(鮮新世-第四紀の Trans-Mexican Volcanic Belt)が認められる, 火山弧が展張場である, 地震活動が不活発である, 大陸性のマントルリソスフェアが非常に薄いか存在しない, 近くに continental root (マントル中に張り出した大陸性基盤=keel)が存在しないなどを列挙している.

2. 低角沈み込み

カスケードの低角沈み込みでは, 沈み込むプレートの年代は, およそ 7 Ma であり(Syracuse et al., 2010), その北側や南側の通常の沈み込み帯に比べて活火山の分布がまばらになっている. McCrory et al. (2012) によれば, カスケード低角沈み込みの南方のカリフォルニア州 Eureka 付近(40.5° N)にも小規模な低角沈み込みが存在する(第 7 図). この低角沈み込みのディスタルヒンジは, 海溝から 130 km の距離にあり, 深さが 25 km 程度である. Calvert et al. (2003, 2006) によれば, バンクーバー島南部の下で低角に沈み込んだファンデフカスラブの上には, 厚さ 10 km 程度の低角な構造をもった付加体が存在する. McCrory et al. (2012) は, 若いプレートが沈み込むカスケードではおよそ 40-45 km の深さでエクロジャイト化が始まっている.

アラスカの低角沈み込みでは, 30 Ma 以降に火山

活動が途絶えている(Finzel et al. 2011). その北端部は沈降帯をなし(Cook Inlet 盆など), さらにその北側は北米最高峰のデナリを含む短縮域になっている(Jadamec et al., 2013). Finzel et al. (2011) は, アラスカ低角沈み込み地域の造構運動には Yakutat マイクロプレートの沈み込み(第 14 図)が重要な役割を演じているとしている. Yakutat マイクロプレートは, 厚さ 5 km 以上の新第三紀珪碎屑性(siliciclastic)堆積層からなり, 沈み込んだ部分がアラスカ低角沈み込み地域に重なる(Finzel et al. 2011). Yakutat マイクロプレートの沈み込みは, アラスカ低角沈み込み地域の褶曲や逆断層などの圧縮変形および火山活動の停止に重要な役割を演じている(Finzel et al. 2011).

西南日本の低角沈み込みのディスタルヒンジは, 日本海に面した地域の下にあり, 最も若いステージ(4-0 Ma)の火山岩類の分布域(山陰帯)とほぼ一致している. 最も若いステージの火山岩類は, アルカリ玄武岩やアダカイトからなる(Kimura et al. 2005). Kiminami et al. (2017) や君波(2021) は, 四国の下で低角に沈み込むフィリピン海プレートがマントルウェッジを欠いて上盤の地殻と直接接しているとした. Hasebe et al. (1993) および Tagami et al. (1995) は, アパタイト FT 年代の検討から, およそ 10 Ma に四万十帯が広域的に冷却・上昇(exhumation)したと推定した. また, 溝口ほか(2009)の室戸地域の四万十帯の研究は, 四万十付加体の上に堆積した海溝斜面堆積物が中期中新世以降に強く短縮変形したことを示している. これらの事実は, 四国南部(新生代四万十帯)が中新世もしくはそれ以降に強く短縮したことを示唆しており, 低角沈み込みによる上盤プレートの変形を反映している可能性がある.

過去の水平沈み込みもしくは低角沈み込み

過去の沈み込み帯においては, 水平沈み込みと低角沈み込みを識別することが難しい場合が多い. そのため, ここでは両者を区別することなく, 水平沈み込みとして説明する.

過去のケースで最も有名なのは, 北米西岸のララミー水平沈み込みである. Coney and Reynolds (1977) は, カリフォルニアからアリゾナに分布する白亜紀-新生代の火山岩の放射年代をコンパイルし, 120 Ma から 55 Ma にかけて火山岩類の年代が東(内陸)側に若くなり, 55 Ma から 40 Ma に火山活動がほぼ休止し, 40 Ma から 20 Ma にかけて西側に若くなることを明らかにした. 火山活動の移動距離は, 太平洋岸から 800 km に達する. そして, スラブが深さ 150 km 沈み込んだところで

火山が発生すると考えて、火山の移動をスラブ傾斜角と結びつけた。こうして、Coney and Reynolds (1977) は、火山活動場の時空変化を沈み込むスラブの水平化とその後に続くスラブのロールバックで説明した。Livaccari et al. (1981) は、ララミー水平沈み込みの原因を大きな海台（ヘス海台と対をなす、太平洋-ファラロン海嶺で形成された海台）の沈み込みによるとした。北米における過去の水平沈み込みに関する研究は多数に及ぶ。紙数の制限もあるため、ここではそれらの文献をリストアップしておく：Bird (1988), Dumitru et al. (1991), Livaccari and Peery (1993), Humphreys (1995), Murphy et al. (1999), English et al. (2003), Humphreys et al. (2003), Murphy et al. (2003), Saleeby (2003), Chapin et al. (2004), English and Johnston (2004), Lee (2005), Smith and Griffin ((2005), Bedle and van der Lee (2006), Valencia-Moreno et al. (2006), Liu et al. (2008), Wells and Hoisch (2008), Humphreys (2009), Liu et al. (2010), Currie and Beaumont (2011), Jones et al. (2011).

O'Driscoll et al. (2012) は、20° S 付近の南米西岸（ペルーとチリの境界付近）に Manihiki 海台と対をなす海台が 50 Ma 頃に沈み込むことによって 40 Ma 頃に水平沈み込みが形成され、火成弧の内陸側への移動や地殻の短縮などが起きたとしている。この水平沈み込みの形成には、海台の沈み込みとともに continental root の存在による吸引力 (suction force) の強化が重要な役割を演じたとしている。南米のファンフェルナンデス海嶺やナスカ海嶺と海溝との交点は、プレートの沈み込みとともに南側に移動している。そのために、非震性海嶺の沈み込みによって起こる地質現象は、時間の経過とともに南側に移動していくはずである。Kay and Mpodozis (2001, 2002) や Kay and Coira (2009) は、この観点 (diachroneity) に基づいて南米のファンフェルナンデス海嶺やナスカ海嶺の過去の沈み込みを復元している。

Zhou and Li (2000) は、南東中国に分布する火成岩類の時空分布を検討し、180–80 Ma に火成活動が約 1,000 km 内陸から海岸付近まで移動したことを明らかにした。そして、南東中国の下に沈み込んでいた古太平洋スラブの傾斜角が水平からより高角に変化したと推定した。Li et al. (2007) および Li and Li (2007) は、南東中国における中生代の SHRIMP U–Pb ジルコン年代および褶曲断層帯・堆積盆などの時空分布を整理し、250 Ma から 190 Ma にかけてのスラブ傾斜角の低下、flat-slab の形成、スラブの分離と沈下などが起こった

とした。Li et al. (2012) は、火成岩の地球化学や新たな年代データに基づき、280–250 Ma のアンデス型沈み込み、海台の沈み込みによる 250–190 Ma における火成活動の内陸方向への移動と火成活動の停止、190–90 Ma のスラブのロールバックを提案している。Meng et al. (2012) は玄武岩の新たな年代データや地球化学に基づき、この地域の水平沈み込みやスラブの分離と沈下、ロールバックに言及している。この地域の水平沈み込みやロールバックについては、反論も含め Chen et al. (2008), Jiang et al. (2009), Zhang et al. (2009), Zhu et al. (2009), He and Xu (2012), Dai et al. (2020), Wang and Yan (2021), Wu et al. (2021) などとも言及している。

Sagong et al. (2005) は、韓国の後期ジュラ紀から前期白亜紀にかけて（約 50 my）火成活動に休止期があること、そしてその原因の一つとしてスラブの水平沈み込みの可能性を示唆した。君波ほか (2009) は、西南日本のジュラ-白亜紀付加体砂岩の火山岩岩片量や全岩化学組成を検討し、中期ジュラ紀から前期白亜紀前期の砂岩が火山岩岩片をほとんど含まず、花崗岩類や大陸基盤からおもに供給されたことを明らかにした。そして、韓半島から遼東半島北側の Tan Lu 断層までの花崗岩類の放射年代をコンパイルして、前期ジュラ紀から中期ジュラ紀に火成弧が内陸側に移動したことを明らかにした。西南日本付加体砂岩で確認された花崗岩・大陸基盤からの供給期は火成活動の休止期とほぼ一致する。君波ほか (2009) は、これらのことを踏まえて、西南日本から Tan Lu 断層までの地域で認められる一連の現象を沈み込むスラブの低角化とそれに続く水平沈み込み、スラブのロールバックで説明した。Kiminami and Imaoka (2013) は、西南日本から Tan Lu 断層までの火成岩の放射年代の時空分布とこの地域の中生代の造構運動を統合し、ジュラ紀におけるスラブの低角化と水平スラブの形成、前期白亜紀におけるスラブのロールバックを提案した。そして、その原因として海台の沈み込みと continental root の存在による吸引力の増強を主張した。この水平沈み込みの形成は、北中国地塊の下と考えられる。古生代の北中国地塊は、厚さ 200 km を超える非常に厚いリソスフェアを有していたが、その後北中国地塊東部のリソスフェアが厚さ数 10 km にまで急速に薄化したと考えられている（例えば、Xu, 2001; Menzies et al., 2007）。このリソスフェアの薄化に関しては極めて多数の報告があり、中国の地質学の重要な研究テーマになっている。薄化の時期に関しては、コン

センサスが得られていないものの、多くの研究者が前期白亜紀もしくは白亜紀と推定している。薄化の原因に関しても多くの見解があり、意見の一致をみていない。仮に前期白亜紀に薄化したとすると、ジュラ紀には continental root の存在によってスラブ吸引力が大きく、それが水平沈み込みの形成に関与していた可能性が考えられる。Lin et al. (2020) は、北中国地塊北部の地質構造と火山岩・深成岩のジルコン U-Pb 年代を検討し、この地域が 143–129 Ma に圧縮から展張に転じたことを明らかにした。そして、その原因をイザナギスラブが約 144 Ma に水平沈み込みからロールバックに転じたためとした。Ma and Xu (2021) は、北中国地塊の火成岩の地球化学や年代、時空分布などを検討し、185–145 Ma に火成活動が内陸方向（西）に 1,000 km 以上移動したこと、145–140 Ma に東に移動し、同時に造構環境が圧縮から展張に転じたことを明らかにした。また火成岩類の地球化学的特徴もこれに連動して変化したことを示し、一連の変化を沈み込むスラブの低角化とロールバックで解釈した。Liu et al. (2021) は、東アジアの中期ジュラ紀から前期白亜紀の水平沈み込みとラミー水平沈み込みとを比較検討した。そして、東アジアで沈み込んだスラブがより浮揚性のある大陸リソスフェアであったこと、大きな複合水平スラブを成していたことを指摘している。この地域の水平沈み込みやロールバックについては、Kee et al. (2010), Zhang et al. (2010), Kim et al. (20016), Park et al. (2018, 2019), Sun et al. (2018), Ji et al. (2019), Cheong and Jo (2020), Lee et al. (2021), Wu et al. (2021), Cheong et al. (2023) などとも言及している。

水平沈み込みおよび低角沈み込みの成因

前述したように、水平沈み込みと低角沈み込みとは、いくつかの異なる点がある（例えば、ヒンジの数、ディスタルヒンジの深さ、非震性海嶺の沈み込みなど）。両者の成因的な関係は明確ではなく、両者を別物ととらえるのか、それとも低角沈み込みが水平沈み込みの不完全型（もしくは発達段階の一つ）と捉えるのか明らかではない。ここではおもに水平沈み込みの成因についてレビューする。

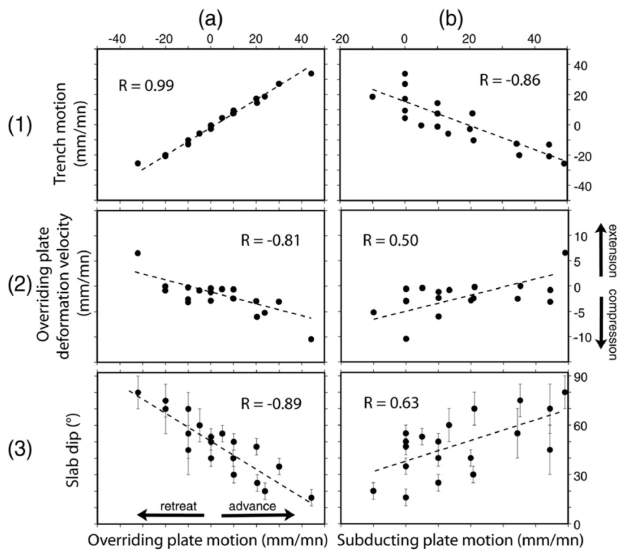
水平沈み込みと低角沈み込みの成因は、スラブ傾斜角を支配するパラメータの問題でもある。ここで扱うスラブ傾斜角は、深さ 400 km までのある区間の平均傾斜角とする。スラブ傾斜角の支配要因に関しては、これまでに多くの議論が行われている。Ueda (1983) や上田 (1989) により提案されたチリ型沈み込み（前進する南

米大陸の下に若いプレートが低角度で沈み込む）とマリアナ型沈み込み（背弧海盆を伴い、後退するフィリピン海プレートの下に古い太平洋プレートが急角度で沈み込む）の 2 つの類型が学界で広く認められることにより、若いプレートが低角で沈み込み、古いプレートが高角で沈み込むといった図式が広く行き渡った。しかし、沈み込みパラメータの関係を詳細に吟味したいいくつかの研究は、この仮説を支持していない。

世界各地の収束域の沈み込みパラメータは、いくつかの論文でコンパイルされている（例えば、Jarrard, 1986; England et al., 2004; Lallemand et al., 2005; Syracuse and Abers, 2006; Wada and Wang, 2009; Syracuse, 2010; Abers et al., 2017）。England et al. (2004) や Syracuse and Abers (2006) によりコンパイルされた、沈み込むプレートの年代とスラブの平均傾斜角とはほとんど相関を示さない。なお、England et al. (2004) のスラブ傾斜角は深さ 80 から 400 km の平均値、Syracuse and Abers (2006) のスラブ傾斜角は深さ 50 から 250 km の平均値である。沈み込む海洋プレートの年代がスラブ傾斜角と相関しないことは、多くの研究論文で指摘されている（例えば、Lallemand et al., 2005; Hayes et al., 2012）。

非震性海嶺が沈み込む場で活火山を欠き、スラブ傾斜角が小さいことが古くから指摘されていた（例えば、Isacks and Barazangi, 1977; Cross and Pilger, 1979; Pilger, 1981; Ben-Avraham, 1989）。これらの研究では非震性海嶺の沈み込みが火山活動の停止やスラブ傾斜角の低角化に寄与しているとしている。一方、非震性海嶺が沈み込んでいるにもかかわらず、スラブ傾斜角が低角になっていないケースもある（例えば、南米の 22° S 付近にある Iquique 海嶺）。しかし、Espurt et al. (2008) が指摘するように、こういった所では海嶺がまだ十分に深く沈み込んでいないのかもしれない。また、Mexican flat-slab やカスケード、西南日本のように、非震性海嶺の沈み込みがないにもかかわらず、水平もしくは低角沈み込みが認められるケースもある。

Lallemand et al. (2005) と Heuret et al. (2007) は、現世収束域の沈み込みパラメータの相関やアナログ実験に基づくパラメータ間の相関を検討している。Lallemand et al. (2005) によれば、現世沈み込み帯のスラブ傾斜角は、スラブプルの大きさや、沈み込むプレートの年代、収束速度などとは相関せず、上盤プレートの前進によって低角になる。Heuret et al. (2007) のアナログ実験も上盤プレートの前進・後退は、スラブ傾斜角の重要な支配要因であることを示している（第 15 図）。



第 15 図. アナログ実験に基づく沈み込みパラメータの関係 (Heuret et al., 2007). 海溝の移動速度 (列 1), 上盤プレートの変形速度 (列 2), スラブ傾斜角 (列 3) vs. 上盤プレートの移動速度 (欄 a), 沈み込むプレートの速度 (欄 b). スラブ傾斜角の測定精度は, 沈み込みスタイル (I と II) に強く依存する. スタイル I (上盤プレートが前進) の場合は, 深さにあまり依存せずほとんど一定であり, スラブの傾斜角の測定が容易である. スタイル II (上盤プレートが後退) の場合は, 深さによって大きく変化し, 傾斜角の測定精度が低い

それに対して, Hu et al. (2016) は, 最近のプレート復元 (例えば, Müller et al., 2008; Seton et al., 2012) において, 新生代における南米大陸の西進が小さいことを根拠に水平沈み込みの形成にとって, 上盤プレートの前進は重要ではないとしている. Artemieva et al. (2016) は, 大陸-大陸, 大陸-海洋および海洋-海洋の 3 タイプの収束域のそれぞれに関して色々な地球物理ファクターがプレート運動に及ぼす影響を検討した. そして, 大陸-海洋型のスラブ傾斜角はプレート年代と相関しないが, 海洋-海洋型ではプレート年代が大きくなるとスラブ傾斜角が小さくなるとしている.

非震性海嶺や海台のような浮揚性地塊の沈み込みが水平沈み込みの形成にとって極めて重要であることが多くの研究者によって指摘されている. アナログ実験や計算モデルの結果もこれを支持している (van Hunen et al., 2002a, b; Espurt et al. 2008; Rosenbaum and Mo, 2010). Gerya et al. (2009) の 2D 計算モデルによれば, スラブの低角化や火山活動の停止には, 沈み込む非震性海嶺や海台のサイズが十分に大きい必要がある. 同論文は中程度のサイズ (200 km × 18 km) の海嶺や海台の沈み込みではスラブの低角化は起きないが, 上盤プレートの上昇や構造浸食, 海溝の陸側への後退が起こるとしている. Tassara et al. (2006) は, チリ縁辺のブー

グ異常に着目した 3D 計算モデルの結果から, 水平沈み込みに浮揚性地塊の沈み込みが重要な役割を演じているが, 上盤プレートの前進や上部マントルの加水なども必要としている.

以上のように, 水平沈み込みの形成にとって浮揚性地塊の沈み込みと上盤プレートの前進が重要であると考えられる. これらに加えて, 吸引力の重要性も多くの研究者によって主張されている. Stevenson and Turner (1977) や van Hunen et al. (2004), Manea and Gurnis (2007), Pérez-Gussinyé et al. (2008) は, 吸引力の強化がスラブの低角化に関与していることを指摘している. O'Driscoll et al. (2009) は, 有限要素法を用いて沈み込み帯における continental root の影響をモデル化し, root の存在がマントルウェッジのコーナーフローを制限して吸引力を増大させることを明らかにした. 3D モデルでは root がマントルウェッジの端から 400 km 以上の距離にあると吸引力が急激に減少している. すなわち適切な位置に root の発達した大陸地殻の下に沈み込むプレートでは吸引力が強く作用して水平 (低角) 沈み込みを起こしやすいことになる. 南米では海溝から 600 km ほど離れた位置に深さ 200 km を超える root が存在する (O'Driscoll et al., 2012). マントルウェッジの厚さが薄く, 粘性が大きくなり, 沈み込みが速くなると, 吸引力はより強くなるとされている (Stevenson and Turner, 1977; Pérez-Gussinyé et al., 2008; Manea and Gurnis, 2007; O'Driscoll et al., 2009). O'Driscoll et al. (2009) の研究の後も水平 (低角) 沈み込みの形成に吸引力の関与を指摘する研究者は多い (Jones et al., 2011; Roda et al. 2011; Manea and Manea, 2011; Manea et al., 2012; Taramón et al., 2015; Schepers et al., 2017; Schellart, 2020; Schellart and Strak, 2021) が, その影響を限定的だとする主張もある (Hu et al., 2016; Huangfu et al., 2016).

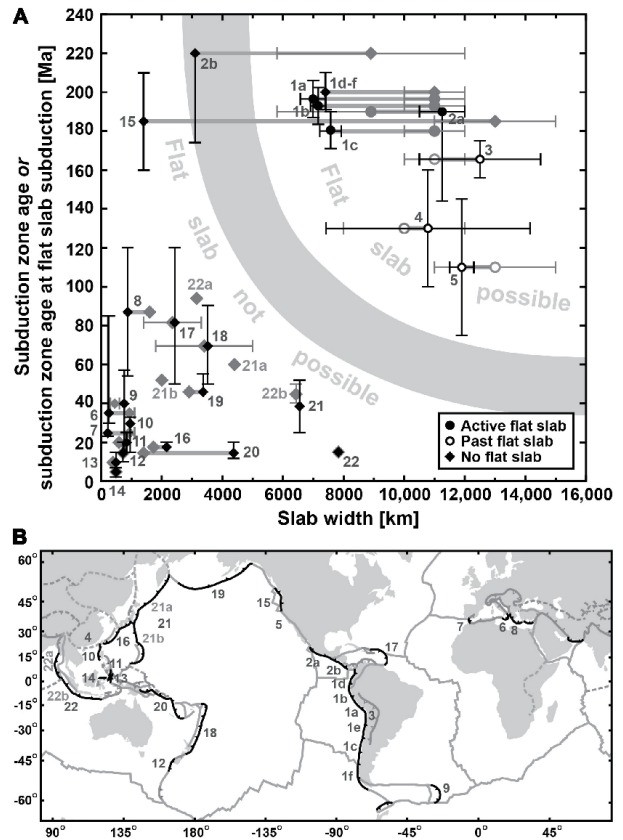
これまで述べた以外にも水平 (低角) 沈み込みの形成要因に言及した論文は多い. Manea and Gurnis (2007) は, 計算モデルに基づいて, スラブ上位の低粘性ウエッジがスラブ傾斜角を低下させ, 水平 (低角) 沈み込みが形成されることを示した. 低粘性ウエッジは, スラブと上盤プレートとのカップリングを弱めるので, 水平スラブセグメントの上の大陸地殻に圧縮環境を発生させない. Mexican flat-slab では, Pampean flat-slab や Peruvian flat-slab とは異なり, 非震性海嶺の沈み込みが認められず, 水平スラブセグメントの上の地殻に圧縮に伴う構造変形が認められない. Manea and Gurnis

(2007) は、スラブの上のマントルが低粘性だとスラブの低角化を阻害しないので、水平スラブの形成にとって低粘性のマントルウェッジが有利だとしている。Manea and Gurnis (2007) や Skinner and Clayton (2011) は、スラブからの脱水によってマントルが加水して粘性が低下し、Mexican flat-slab が形成されたと推定した。Kim et al. (2012) は、S 波の観測から Mexican flat-slab セグメントの境界付近のマントルに低粘性の層 (厚さ 7–8 km) が存在することを示し、これがスラブを低角化させたと考えた。しかし、マントルウェッジの粘性が低下すると吸引力も低下する (例えば、Stevenson and Turner, 1977; Pérez-Gussinyé et al., 2008; Manea and Manea, 2011; Schellart and Strak, 2021) ので、マントルウェッジの低粘性化は水平スラブの形成にとっては負の要因となる。

Roda et al. (2011) は、計算モデルに基づき、厚い大陸リソスフェアと薄い海洋プレートの組み合わせがスラブを低角にすることを示した。上盤プレートが厚く、冷たいとマントルウェッジの粘性が増大し、吸引力が大きくなると考えられるので、これは吸引力の増大に起因するスラブの低角化と考えられる。

Schellart (2020) は、非震性海嶺や海台が沈み込んでいるにもかかわらず水平沈み込みが起きていないケース (例えば、西太平洋) があつたり、非震性海嶺や海台の沈み込みがないにもかかわらず水平沈み込みが起きている (例えば、メキシコ) ことに注目し、水平沈み込みを形成する要因を現世沈み込み帯の 3 次元的な形状や計算モデルから検討した。その結果、長い沈み込み帯 (海溝に平行な方向の広がり) が >6,000 km。著者注: スラブの幅が沈み込みに与える影響は、Schellart et al., 2007 を参照) において、長期間 (>80–100 my) に渡って沈み込みが続くと、沈み込み帯の中央部で水平沈み込みが形成されると主張した (第 16 図, 第 1 表)。さらにこの計算モデルは、幅広い海溝でスラブ傾斜角が小さくなると、スラブ表面の垂直的な偏差展張力 (deviatoric tensional stress) が増大 (すなわち、吸引力が増大) し、水平沈み込みを形成しやすくなることを示す。

Schellart and Strak (2021) は、深さ 200 km までのスラブの形態に基づき、現世の沈み込み帯を低角沈み込み (low angle subduction), 水平沈み込み (flat slab subduction), 通常沈み込み (normal angle subduction), 高角沈み込み (steep angle subduction) に区分した (第 4 図)。前述したように、低角沈み込みは、深さ 200 km までのスラブ平均傾斜角が 20° 以下で、2 つのヒンジを持ち、水平沈み込みは、水平スラブセグメ



第 16 図. A: 現世沈み込み帯におけるスラブの幅 (海溝に平行な方向のスラブの長さ) と沈み込みの継続時間およびスラブの形状との関係 (Schellart, 2020). 黒丸: 水平沈み込み, 白丸: 過去の水平沈み込み, 黒ダイヤ: 非水平沈み込み. B: A で用いている沈み込み帯の位置.

ントの傾斜角が 10° 以下で、3 つのヒンジをもつ。さらに、計算モデルから、次の 3 つのタイプの水平沈み込みがあることを指摘している: 短期間の水平沈み込み, 長期間の水平沈み込み, および間欠的な水平沈み込み。深さ 660 km の不連続帯でスラブの折りたたみがあると、上部マントル中のスラブ傾斜角が間欠的に変化する。上盤プレートの強度が大きいかしくは沈み込むプレートが厚いと間欠的な水平沈み込みが起こる。上盤プレートの短縮と厚化が起きると、マントルウェッジ先端の角度が増大し、吸引力が弱くなるので、水平沈み込みが終わる (これに関する詳細は、Schellart and Strak 論文の Fig. 15 を参照)。上盤プレートの強度が地殻の短縮の程度を支配するので、上盤プレートの強度は、水平沈み込みの継続時間に強く影響する。最も弱い上盤プレートでは水平沈み込みの継続時間は 6 my 程度であり、最も強い上盤プレートではその継続時間は 75 my を超える。Schellart and Strak (2021) による計算モデルの結果は、水平沈み込みの開始・継続時間・終焉に関して示唆に富み、興味深い。

沈み込む海洋プレートのエクロジャイト化は、水平沈

第1表. 水平スラブを有する沈み込み帯の諸特徴 (Schellart, 2020). 表中の2つ目の欄の番号は, 第15図を参照.

Subduction zone	Number in Figure 2	Slab width (average) at flat slab initiation* [km]	Slab width (min.-max.) at flat slab initiation [km]	Distance to closest slab edge at flat slab initiation [^] [km]	Slab width during/close to subduction zone formation [km]	Subduction zone age (best estimate/average) [†] [Ma]	Subduction zone age (min.-max.) [Ma]	Time of flat slab inception [Ma]	Subduction zone age at flat slab initiation [‡] [Ma]
With present-day flat slab									
South America (Southern Peru) [§]	1a	6992 ^(1,2)	6571–7413	2200	11,000 ± 1000 ⁽²⁾	200 (be)	191–210 ^(3–6)	4 ⁽⁷⁾	196
South America (Central Peru) [§]	1b	7162 ^(1,2)	6911–7413	1400	11,000 ± 1000 ⁽²⁾	200 (be)	191–210 ^(3–6)	8 ⁽⁷⁾	192
South America (Central Chile) [¶]	1c	7570 ^(1,2)	7212–7928	2400	11,000 ± 1000 ⁽²⁾	200 (be)	191–210 ^(3–6)	20 ⁽⁸⁾	180
Mexico-Central America (Mexico) [¶]	2a	11,250 ^(9,10)	10,500–12,000	2100	~5800 ⁽⁶⁾ or 11,000 ± 1000 ⁽²⁾	220 (be)	174–201 ⁽¹¹⁾ or 220 ⁽¹²⁾	30–25 ^(13–15)	190
With past flat slab									
South America (Central Andes) [§]	3	12,500 ^(9,10)	10,500–14,500	3800	11,000 ± 1000 ⁽²⁾	200 (be)	191–210 ^(3–6)	35 ⁽¹⁶⁾	165
South China ⁺	4	10,784 ⁽¹⁷⁾	7421–14,146	3000	10,000 ± 2000 ⁽¹⁷⁾	360 (av)	330–390 ^(17,18)	230 ⁽¹⁹⁾	130
Farallon [§]	5	11,900 ^(9,10)	11,500–12,300	1700–2700	13,000 ± 2000 ⁽²⁾	185 (av)	160–210 ^(20,21)	85–65 ^(22–24)	100–120

* Slab width is based on the average of the estimated minimum and maximum slab width at the time of inception of flat slab subduction. It is derived from tectonic reconstructions presented in Gordon and Jurdy (1986); Collins (2003); Schellart et al. (2007, 2010); Domeier and Torsvik (2014) and Seton et al. (2012). [^] Trench-parallel distance from flat slab segment to closest lateral slab edge at the time of flat slab inception. [†] Subduction zone age (time of subduction zone initiation) based on the best estimate (be) or average (av) of the estimated minimum and maximum age. [‡] Age of the subduction zone at the time of inception of flat slab subduction. [§] Southern Peru flat slab spatially correlated with the subducting Nazca Ridge (Pilger, 1981; Gutscher et al., 2000). [¶] Central Peru flat slab possibly related to subduction of the Inca plateau (Gutscher et al., 2000). ⁺ Central Chile flat slab spatially correlated with the subducting Juan Fernandez Ridge (Pilger, 1981; Gutscher et al., 2000). [¶] Mexican flat slab, not spatially associated with any ridge or plateau (Skinner and Clayton, 2011). Note that a flat slab subduction initiation age of 30–25 Ma is chosen, based on the timing of migration of arc magmatism from the Sierra Madre del Sur to the Trans-Mexican Volcanic Belt (Ferrari et al., 1999; Morán-Zenteno et al., 1999; Kim et al., 2010), and not a younger initiation age of 16–9 Ma proposed more recently (Manea et al., 2017). A consequence of adopting the older age is that the slab width then includes the South American segment and Mexico-Central America segment (and possibly the Baja California segment), because the Nazca and Cocos plates still formed one single plate until ~23 Ma (Lonsdale, 2005). [§] Central Andes (southern Peru–northernmost Chile) flat slab in the latest Eocene–Oligocene (Ramos and Folguera, 2009). ⁺ South China flat slab in the Middle Triassic–Early Jurassic (Li and Li, 2007). [¶] Farallon flat slab in western North America, thought to be responsible for the Laramide orogeny and eastward migration of the magmatic arc (Dickinson and Snyder, 1978; Henderson et al., 1984). The numbers in between the brackets refer to the following references: ¹ Schellart et al. (2007), ² Seton et al. (2012), ³ Coira et al. (1982), ⁴ Vásquez et al. (2011), ⁵ Scheuber et al. (1994), ⁶ van der Meer et al. (2018), ⁷ Rosenbaum et al. (2005), ⁸ Kay and Abbruzzi (1996), ⁹ Schellart et al. (2010), ¹⁰ Gordon and Jurdy (1986), ¹¹ Centeno-García (2017), ¹² Boshman et al. (2018), ¹³ Kim et al. (2010), ¹⁴ Morán-Zenteno et al. (1999), ¹⁵ Ferrari et al. (1999), ¹⁶ Ramos and Folguera (2009), ¹⁷ Domeier and Torsvik (2014), ¹⁸ Collins (2003), ¹⁹ Li and Li (2007), ²⁰ Burchfiel and Davis (1975), ²¹ DeCelles (2004), ²² Henderson et al. (1984), ²³ Liu et al. (2010), ²⁴ Copeland et al. (2017).

み込みを終わらせて, 通常の沈み込みに転換させるのに重要であると考えられる. 水平沈み込みにおいては, 一般にホットなアセノスフェアを欠き, 水平スラブセグメントが冷たい大陸リソスフェアと接するので, 沈み込む玄武岩質岩のエクロジヤイト化が遅れると考えられている (例えば, Gutscher et al., 2000b; van Hunen et al., 2002b; Arrial and Billen, 2013). Pampean flat-slab や Peruvian flat-slab では, 水平スラブセグメントの深さが 100 km 程度であり, 一般的な沈み込み帯におけるこの深さではスラブ上部の玄武岩質岩はエクロジヤイト化している. 前述したように, Bishop et al. (2017) は, Pampean flat-slab の水平スラブセグメントがエクロジヤイト化してもさらに水平に沈み込んでいると主張している. Currie and Beaumont (2011) は, 計算モデルの結果から, 海嶺や海台のような厚い海洋地殻を暖めるのには時間がかかり, 玄武岩質岩からエクロジヤイトへの転移が遅れが生じるとしている. 一方, McGary et al. (2014) は, カスケード地域 (ワシントン州中央部) の地磁気地電流のデータから, 深さ 40–45 km で上部地殻の玄武岩がエクロジヤイトに, 深さ 75–90 km で下部地殻のハンレイ岩がエクロジヤイトに転移していることを明らかにした. このように, 海洋地殻全体がエクロジヤイト化するには, かなりの時間がかかる. 海溝に直交する方向の収束速度を 30 km/my とすると, カスケードの海洋地殻が全体的にエクロジヤイト化するのに少なくとも 3 my を要する. 海嶺や海台などの厚い地殻ではさらに長い時間が必要になるだろう. Schepers et al. (2017) は, エクロジヤイト化が 3 my 遅れることで長さ 250 km の Pampean flat slab を説明しようとして

いる. また, van Hunen et al. (2004) は, 400–800 °C においても玄武岩質岩が準安定の状態が存在できるとしている. エクロジヤイト化と水平沈み込みとの関係は, 今なお十分に解明されていないが, 水平沈み込みから通常沈み込みへの転換過程の解明にとってエクロジヤイト化はキーポイントと考えられる.

むすび

水平沈み込みと低角沈み込みの成因的關係が明確ではないことおよび両沈み込みスタイルの特徴の違いから, Pérez-Gussinyé et al. (2008) や Schellart and Strak (2021) が主張するように, 両者を分けて扱うのが適切と考えられる. また, 水平沈み込みにおいても Mexican flat-slab は, Pampean flat-slab や Peruvian flat-slab といくつかの基本的特徴が異なる. 前述した個々の水平・低角沈み込みの特徴と成因についてのレビューは, 水平沈み込みと低角沈み込みが単一の要因に支配されているのではなく, 複数の要因によって, またそれら要因の組み合わせによって, しかも各要因が作用する程度によって異なった沈み込み形態が出現することを示唆している. それでも水平沈み込みや低角沈み込みを生み出す基本的な要因はかなり明らかになっている. プレートの沈み込みに関連するパラメータは多数存在し, スラブ傾斜角の支配要因を決定することは容易ではないが, 浮揚性地塊の沈み込みがスラブ傾斜角に影響を及ぼすことは, 現世水平沈み込み帯における観察および計算モデルやアナログ実験の結果などから間違いないだろう. しかし, 浮揚性地塊が小さいと十分な浮力が発生しない. また, 上盤プレートの前進 (海溝の後退) がス

ラブ傾斜角を小さくすることは、計算モデルやアナログ実験が示しているが、Pérez-Gussinyé et al. (2008) が指摘するように、上盤プレートの前進だけで flat-slab を形成するのは困難だと考えられる。Pérez-Gussinyé et al. (2008) は、吸引力が強化される要因として、沈み込み速度の増大、マントルウェッジの粘性の増大、マントルウェッジが狭くなるなどを挙げている。Continental root の存在が吸引力を増大させる (O'Driscoll et al., 2009) といった計算モデルの結果は、マントルウェッジの広さ (とくに先端部の) が吸引力に影響しているということだろう。上盤プレートが厚くて強い (すなわち、冷たい) とマントルウェッジは狭くなり、粘性が増大し、吸引力が大きくなるのだろう。このように、吸引力の大きさを支配する要因は複数あると考えられ、これが水平沈み込みの成因を特定することを難しくしていると考えられる。

マントルの流れがスラブ傾斜角に影響を与えているといった見解も少なからずある (Doglioni et al., 2009; O'Driscoll et al., 2009; Jadamec and Billen, 2012; Cramer and Tackley, 2014; Taramón et al., 2015; Huangfu et al., 2016; Ficini et al., 2017)。水平沈み込みもしくは低角沈み込みとそれに関係したスラブのロールバックは、スラブの垂直切断 (例えば, Rosenbaum et al., 2008; Dilek and Altunakaynak, 2009) や delamination (例えば, Wells and Hoisch, 2008; Kay and Coira, 2009; Ramos and Folguera, 2009), アダカイトの形成 (例えば, Beate et al., 2001; Bourdon et al., 2003) などとも密接にかかわっており、水平・低角沈み込みに関連した地質現象の広がり大きい。本論でレビューした論文や地質現象は、多くの関連論文と関連事象の一部であり、それらをすべて網羅することは、筆者の力量を超えている。

謝辞: 査読者の川村信人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

- Abers, G.A., van Keken, P.E. and Hacker, B.R., 2017, The cold and relatively dry nature of mantle forearcs in subduction zones. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/NGEO2922.
- Arrial, P.-A. and Billen, M.I., 2013, Influence of geometry and eclogitization on oceanic plateau subduction. *Earth Planet. Sci. Letts.*, **363**, 34–43.
- Artemieva, I.M., Thybo, H. and Shulgin, A., 2016, Geophysical constraints on geodynamic processes at convergent margins: A global perspective. *Gondwana Res.*, **33**, 4–23.
- Barazangi, M. and Isacks, B.L., 1976, Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America. *Geology*, **4**, 686–692.
- Baudino, R. and Hermoza, W., 2014, Subduction consequences along the Andean margin: Thermal and topographic signature of an ancient ridge subduction in the Marañón Basin of Perú. *Geologica Acta*, **12**, 287–306.
- Beate, B., Monzier, M., Spikings, R., Cotton, J., Silva, J., 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. Letts.*, **192**, 561–570.
- Bedle, H. and van der Lee, S., 2006, Fossil flat-slab subduction beneath the Illinois basin, USA. *Tectonophys.*, **424**, 53–68.
- Ben-Avraham, Z., 1989, Oceanic plateaus and the Pacific Ocean margins. In Ben-Avraham, Z., ed., *The Evolution of the Pacific Ocean Margins*. Oxford Univ. Press, New York, 7–19.
- Bird, P., 1988, Formation of the Rocky Mountains, western United States: A continuum computer model. *Science*, **239**, 1501–1507.
- Bishop, B.T., Beck, S.L., Zandt, G., Wagner, L., Long, M., Antonijevic, S.K., Kumar, A. and Tevera, H., 2017, Causes and consequences of flat-slab subduction in southern Peru. *Geosphere*, **13**, 1392–1407.
- 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. Letts.*, **205**, 123–138.
- Bourdon, E., Eissen, J.-P., Monzier, M., Robin, C., Martin, H., Cotton, J. and Hall, M., 2002, Adakite-like lavas from Antisana volcano (Ecuador): Evidence for slab melt metamorphism beneath the Andean northern volcanic belt. *Jour. Petrol.*, **43**, 199–217.
- Calvert, A.J., Fisher, M.A., Ramachandran, K. and Trehu, A.M., 2003, Possible emplacement of crustal rocks into the forearc mantle of the Cascadia Subduction Zone. *Geophys. Res. Letts.*, **30**, doi:10.1029/2003GL018541.
- Calvert, A.J., Ramachandran, K., Kao, H. and Fisher, A., 2006, Local thickening of the Cascadia forearc crust and the origin of seismic reflectors in the uppermost mantle. *Tectonophys.*, **420**, 175–188.
- 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.
- Capaldi, T.N., Horton, B.K., McKenzie, N.R., Mackaman-Lofland, C., Stockli, D.F., Ortiz, G. and Alvarado, P., 2020, Neogene retroarc foreland basin evolution, sediment provenance, and magmatism in response to flat slab subduction, western Argentina. *Tectonics*, 10.1029/2019TC005958.
- Chapin, C.E., Wilks, M. and McIntosh, W.C., 2004, Spacetime patterns of Late Cretaceous to present magmatism in New Mexico: comparison with Andean volcanism and potential for future volcanism. *New Mexico Bureau Geol. Min. Resou. Bull.*, **160**, 13–400.
- Chen, C.-H., Lee, C.-Y. and Shinjo, R., 2008, Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: Constraints from ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating, elemental and Sr–Nd–Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts. *Lithos*, **106**, 83–92.
- Cheong, A.C.-sik and Jo, H.J., 2020, Tectonomagmatic evolution of a Jurassic Cordilleran flare-up along the Korean Peninsula: Geochronological and geochemical constraints from granitoid rocks. *Gondwana Res.*, **88**, 21–44.
- Cheong, A.C.-sik, Jung, M.-J., Jo, H.J., Kim, J., Lee, S. and Jeong, Y.-J., 2023, Lithospheric thinning and ignition of a Cordilleran magmatic flare-up: Geochemical and O–Hf isotopic constraints from Cretaceous plutons in southern Korea. *Sci. Front.*, **14**, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101492>
- Coney, P.J. and Reynolds, S.J., 1977, Cordilleran Benioff zones. *Nature*, **270**, 403–406.
- Cramer, F. and Tackley, P.J., 2014, Spontaneous development of arcuate single-sided subduction in global 3-D mantle convection models with a free surface. *Jour. Geophys. Res.*, **119**, doi:10.1002/2014JB010939.
- Cross, T.A. and Pilger, Jr. R.H.P. 1979, Controls of subduction geometry, location of magmatic arcs, and tectonics of arc and back-arc regions. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **93**, 545–562.
- Currie, C.A. and Beaumont, C., 2011, Are diamond-bearing Cretaceous kimberlites related to low-angle subduction beneath western North America? *Earth Planet. Sci. Letts.*, **303**, 59–70.
- Dai, L., Wang, L., Lou, D., Li, Z.-H., Dong, H., Ma, F., Li, F., Li, S. and Yu S., 2020, Slab rollback versus delamination: Contrasting fates of flat-slab subduction and implications for South China evolution in the Mesozoic. *Jour. Geophys. Res.*, **125**, doi:10.1029/2019JB019164.
- 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.
- Dogliani, C., Tonarini, S. and Innocenti, F., 2009, Mantle wedge asymmetries and geochemical signatures along W- and E–NE-directed subduction zones. *Lithos*, **113**, 179–189.
- Dumitru, T.A., Gans, P.B., Foster, D.A. and Miller, E.L., 1991, Refrigeration of the western Cordilleran lithosphere during Laramide shallow-angle subduction. *Geology*, **19**, 1145–1148.
- England, P., Engdahl, R. and Thatcher, W., 2004, Systematic variation in the depths of slabs beneath volcanos. *Geophys. Jour. Int.*, **156**, 377–408.
- English, J.M. and Johnston, S.T., 2004, The Laramide orogeny: What were the driving forces? *Internat. Geol. Rev.*, **46**, 833–838.
- English, J.M., Johnston, S.T. and Wang K., 2003, Thermal modelling of the Laramide orogeny: Testing the flat-slab subduction hypothesis. *Earth Planet. Sci. Letts.*, **214**, 619–632.
- Espurt, N., Funicello, F., Martinod, J., Guillaume, B., Regard, V., Faccenna, C. and Brusset, S., 2008, Flat subduction dynamics and deformation of the South American plate: Insights from analog modeling. *Tectonics*, **27**, doi:10.1029/2007TC002175.
- Espurt, N., Baby, P., Brusset, S., Roddaz, M., Hermoza, W., Regard, V., Antoine, P.-O., Galas-Gismondini, R. and Bolanos, R., 2007, How does the Nazca Ridge subduction influence the modern Amazonian foreland basin? *Geology*, **35**, 515–518.
- Ferrari, L., 2004, Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, **32**, 77–80.
- Ficini, E., Dal Zilio, L., Dogliani, C. and Gerya, T.V., 2017, Horizontal mantle flow controls subduction dynamics. *Sci. Rep.*, **7**, doi:10.1038/s41598-017-06551-y.
- Finzel, E.S., Trop, J.M., Ridgway, K.D. and Enkelmann, E., 2011, Upper plate proxies for flat-slab subduction processes in southern Alaska. *Earth Planet. Sci.*

- Letts.*, **333**, 348–360.
- Gans, C.R., Beck, S.L., Zandt, G., Gilbert, H., Alvarado, P., Anderson, M. and Linkimer, L., 2011, Continental and oceanic crustal structure of the Pampean flat slab region, western Argentina, using receiver function analysis: New high-resolution results. *Geophys. Jour. Internat.*, **186**, 45–58.
- 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.
- Gérault, M., Husson, L., Miller, M.S. and Humphreys, E.D., 2015, Flat-slab subduction, topography, and mantle dynamics in southwestern Mexico. *Tectonics*, **34**, doi:10.1002/2015TC003908.
- Gerya, T.V., Fossati, D., Cantieni, C. and Seward, D., 2009, Dynamic effects of aseismic ridge subduction: Numerical modeling. *Eur. Jour. Mineral.*, **21**, 649–661.
- Gutscher, M.-A., 2002, Andean subduction styles and their effect on thermal structure and interplate coupling. *Jour. South Amer. Earth Sci.*, **15**, 3–10.
- Gutscher, M.-A., Maury, R.M., Eissen, J.-P. and Bourdon, E., 2000a, Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, **28**, 535–538.
- Gutscher, M.-A., Olivet, J.-L., Aslanian, D., Eissen, J.-P. and Maury, R., 1999, The “lost Inca Plateau”: Cause of flat subduction beneath Peru? *Earth Planet.Sci. Letts.*, **171**, 335–341.
- Gutscher, M.-A., Spakman, W., Bijwaard, H., and Engdahl, E.R., 2000b, Geodynamics of flat subduction: Seismicity and Geochemistry tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics*, **19**, 814–833.
- Hampel, A., 2002, The migration history of the Nazca Ridge along the Peruvian active margin: A re-evaluation. *Earth Planet.Sci. Letts*, **203**, 665–679.
- Hamza, V.M., Silva Dias, F.J.S., Gomes, A.J.L. and Delgadillo Terceros, Z.G., 2005, Numerical and functional representations of regional heat flow in South America. *Physics Earth Planet Inter.* **152**, 223–256.
- Hasebe, M., Tagami, T. and Nishimura, S., 1993, Evolution of the Shimanto accretionary complex: A fission-track thermochronologic study. In Underwood M.B., ed., *Thermal Evolution of the Tertiary Shimanto Belt, Southwest Japan: An Example of Ridge–Trench Interaction*. Geological Society of America Special Paper, **273**, 121–36.
- Hayes, G.P., Wald, G.P. and Johnson, R.L., 2012, A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, doi.org/10.1029/2011JB008524.
- He, Z.-Y. and Xu, X.-S., 2012, Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chem. Geol.*, **328**, 208–221.
- Heuret, A., Funiciello, F., Faccenna, C. and Lallemand, S., 2007, Plate kinematics, slab shape and back-arc stress: A comparison between laboratory models and current subduction zones. *Earth Planet.Sci. Letts.*, **256**, 473–483.
- 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.*, **13**, B09315, doi:10.1029/2007JB005274.
- Horton, B.K., Capaldi, T.M. and Perez, N.D., 2022, The role of flat slab subduction, ridge subduction, and tectonic inheritance in Andean deformation. *Geology*, **50**, 1007–1012.
- Hu, J., Liu, L., Hermosillo, A. and Zhou, Q., 2016, Simulation of late Cenozoic South American flat-slab subduction using geodynamic models with data assimilation. *Earth Planet.Sci. Letts.*, **438**, 1–13.
- 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.
- Huangfu, P., Wang, Y., Cawood, P.A., Li, Z.-H., Fan, W. and Gerya, T.V., 2016, Thermo-mechanical controls of flat subduction: Insights from numerical modeling. *Gondwana Res.*, **40**, 170–183.
- Humphreys, E.D., 1995, Post-Laramide removal of the Farallon slab, western United States. *Geology*, **23**, 987–990.
- Humphreys, E., 2009, Relation of flat subduction to magmatism and deformation in the western USA. In Kay, S.M., et al., eds., *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **204**, 85–98.
- Humphreys, E., Hessler, E., Dueker, K., Farmer, G.L., Erslev, E. and Atwater, T., 2003, How Laramide-age hydration of north American lithosphere by the Farallon slab controlled subsequent activity in the western United States. *Internat. Geol. Rev.*, **45**, 575–595.

- Isacks, B.L. and Barazangi, M., 1977, Geometry of Benioff zones: Lateral segmentation and downwards bending of the subducted lithosphere. In Talwani, M. and Pitman III, W.C. eds., *Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-Arc Basins*, Amer. Geophys. Union, Maurice Ewing Series 1, 99–114.
- Isacks, B. and Molnar, P., 1971, Distribution of stresses in the descending lithosphere from a global survey of focal-mechanism solutions of mantle earthquakes. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **9**, 103–174.
- Jadamec, M., Billen, M.I. and Roeske, S.M., 2013, Three-dimensional numerical models of flat slab subduction and the Denali fault driving deformation in south-central Alaska. *Earth Planet. Sci. Letts.*, **376**, 29–42.
- Jadamec, M.A. and Billen, M.I., 2012, The role of rheology and slab shape on rapid mantle flow: Three-dimensional numerical models of the Alaska slab edge. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2011JB008563,
- Jarrard, R.D., 1986, Relations among subduction parameters. *Rev. Geophys.*, **24**, 217–284.
- Ji, Z., Meng, Q.-A., Wan, C.-B., Zhu, D.-F., Ge, W.-C., Zhang, Y.-L., Yang, H., Dong, Y. and Jing, Y., 2019, Generation of late Mesozoic felsic volcanic rocks in the Hailar Basin, northeastern China in response to overprinting of multiple tectonic regimes. *Science Reports*, 9, doi.org/ 10.1038/s41598-019-52181-x.
- Jiang, Y.-H., Jiang, S.-Y., Dai, B.-Z., Liao, S.-Y., Zhao, K.-D. and Ling, H.-F., 2009, Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, **107**, 185–204.
- Jones, C.H., Farmer, G.L., Sageman, B. and Zhong, S., 2011, Hydrodynamic mechanism for the Laramide orogeny. *Geosphere*, **7**, 183–201.
- Kay, S.M. and Coira, B.L., 2009, Shallowing and steepening subduction zones, continental lithospheric loss, magmatism, and crustal flow under the Central Andean Altiplano-Puna Plateau. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, 204, 229–259.
- Kay, S.M. and Mopodosis, C., 2001, Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction systems and thickening crust. *GSA Today*, **11**, 4–9.
- Kay, S.M. and Mopodosis, C., 2002, Magmatism as a probe to the Neogene shallowing of Nazca plate beneath the modern Chilean flat-slab. *South Amer. Earth Sci.*, **15**, 39–57.
- Kee, W.-S., Kim, S.W., Jeong, Y.-J. and Kwon, S., 2010, Characteristics of Jurassic continental arc magmatism in south Korea: Tectonic implications. *Jour. Geol.*, **118**, 305–323.
- Kim, Y.H., Miller, M.S., Pearce, F., Clayton, R.W., 2012, Seismic imaging of the Cocos plate subduction zone system in central Mexico. *Geochem. Geophys. Geosysts.*, **13**, doi:10.1029/ 2012GC004033.
- Kim, S.W., Kwon, S., Park, S.-I., Lee, C., Cho, D.-L., Lee, H.-J., Ko, K. and Kim, S.J., 2016, SHRIMP U–Pb dating and geochemistry of the Cretaceous plutonic rocks in the Korean Peninsula: A new tectonic model of the Cretaceous Korean Peninsula. *Lithos*, **262**, 88–106.
- 君波和雄, 2021, 日本海の拡大と中新世瀬戸内火山帯の高 Mg 安山岩火成活動とを関連づける造構モデル. *総合地質*, **5**, 1–12.
- Kiminami, K. and Imaoka, T., 2013, Spatiotemporal variations of Jurassic–Cretaceous magmatism in eastern Asia (Tan-Lu Fault to SW Japan): Evidence for flat-slab subduction and slab rollback. *Terra Nova*, **25**, 414–422.
- 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.
- 君波和雄・木下生一・今岡照喜, 2009, 西南日本のジュラ紀付加体砂岩におけるジュラ紀中世の組成変化とその意義. *地質雑*, **115**, 578–596.
- Kimura, J.-I., Stern, R.J. and Yoshida, T., 2005, Reinitiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **117**, 969–986.
- Lallemand, S., Heuret, A. and Boutelier, D., 2005, On the relationships between slab dip, back-arc stress, upper plate absolute motion, and crustal nature in subduction zones. *Geochem. Geophys. Geosysts.*, **6**, doi:10.1029/2005GC000917.
- Lee, C.-T. A., 2005, Trace element evidence for hydrous metasomatism at the base of the North American lithosphere and possible association with Laramide low-angle subduction. *Jour. Geol.*, **113**, 673–685.
- Lee, S., Oh, C. and Jung, S., 2021, Jurassic igneous activity in the Yuseong area on the southern margin of the Gyeonggi Massif, Korean Peninsula, and its implications for the tectonic evolution of northeast Asia during the Jurassic. *Minerals*, **11**, doi.org/10.3390/min11050466.
- Li, Z.-X., Li, X.-H., Chung, S.-L., Lo, C.-H., Xu, X. and

- Li, W.-X., 2012, Magmatic switch-on and switch-off along the South China continental margin since the Permian: Transition from an Andean-type to a Western Pacific-type plate boundary. *Tectonophysics*, **532–535**, 271–290.
- Li, H.-H., Li, Z.-X., Li, W.-X., Liu, Y., Yuan, C., Wei, G. and Qi, C., 2007, U–Pb zircon, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, **96**, 186–204.
- Li, Z.-X. and Li, X.-H., 2007, Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, **35**, 179–182.
- Lin, Y., Zhang, C., Li, C., Deng, H., 2020, From dextral contraction to sinistral extension of intracontinental transform structures in the Yanshan and northern Taihang Mountain belts during Early Cretaceous: Implications to the destruction of the North China Craton. *Jour. Asian Earth Sci.*, **189**, doi.org/10.1016/j.jseas.2019.104139.
- Litvak, V.D., Poma, S. and Kay, S.M., 2007, Paleogene and Neogene magmatism in the Valle del Cura region: New perspective on the evolution of the Pampean flat slab, San Juan province, Argentina. *Jour. South Amer. Earth Sci.*, **24**, 117–137.
- Liu, L., Spasojecić, S. and Gurnis, M., 2008, Reconstructing Farallon plate subduction beneath north America back to the Late Cretaceous. *Science*, **322**, 934–938.
- Liu, L., Gurnis, M., Seton, M., Saleeby, J., Müller, D. and Jackson, M., 2010, The role of oceanic plateau subduction in the Laramide orogeny. *Nature Geosci.*, doi: 10.1038/NGE0829.
- Liu, L., Liu, L. and Xu, Y.-G., 2021, Mesozoic intraplate tectonism of East Asia due to flat subduction of a composite terrane slab. *Eart-Sci. Rev.* **241**, doi.org/10.1016/j.earscirev. 2021.103505.
- Livaccari, R.F., Burke, K. and Sengór, M.C., 1981, Was the Laramide orogeny related to subduction of oceanic plates? *Nature*, **289**, 276–278.
- Livaccari, R.F. and Perry, F.V., 1993, Isotopic evidence for preservation of Cordilleran lithospheric mantle during the Sevier-Laramide orogeny, west United States. *Geology*, **21**, 719–722.
- Ma, Q. and Xu, Y.-G., 2021, Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia. *Eart-Sci. Rev.* **213**, doi.org/10.1016/j.earscirev. 2020.103473.
- Manea, V. and Gurnis, M., 2007, Subduction zone evolution and low viscosity wedges and channels. *Earth Planet.Sci. Letts*, **246**, 22–45.
- Manea, V. and Manea, M., 2011, Flat-slab thermal structure and evolution beneath central Mexico. *Pure Appl. Geophys.*, **168**, 1475–1487.
- Manea, V.C., Manea, M. and Ferrari, L., 2013, A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath Mexico and Central America. *Tectonophysics*, **609**, 56–81.
- Manea, V.C., Pérez-Gussinyé, M., Manea, M., 2012, Chilean flat slab subduction controlled by overriding plate thickness and trench rollback. *Geology*, **40**, 35–38.
- Marot, M., Monfret, T., Gerbault, M., Nolet, G., Ranalli, G. and Pardo, M., 2014, Flat versus normal subduction zones: A comparison based on 3-D regional travelttime tomography and petrological modeling of central Chile and western Argentina (29°–35° S). *Geophys. Jour. Int.*, **199**, 1633–1654.
- Martinod, J., Husson, L., Roperch, P., Guillaume, B. and Espurt, N., 2010, Horizontal subduction zones, convergence velocity and the building of the Andes. *Earth Planet.Sci. Letts*, **299**, 299–309.
- McCrorry, P.A., Blair, J.L., Waldhauser, F. and Oppenheimer, D.H., 2012, Juan de Fuca slab geometry and its relation to Wadati-Benioff zone seismicity. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2012JB009407.
- McGary, R.S., Evans, R.L., Wannamaker, P.E., Elsenbeck, J. and Rondenay, S., 2014, Pathway from subducting slab to surface for melt and fluids beneath Mount Rainier. *Nature*, **511**, 338–340
- Meng, L., Li, Z.-X., Chen, H., Li, X.-H., Wang, X.-C., 2012, Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the flat-slab subduction model. *Lithos*, **132–133**, 127–140.
- Menzies, M., Xu, Y., Zhang, H. and Fan, W., 2007, Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, **96**, 1–21.
- 溝口秀治・君波和雄・今岡照喜・亀井淳志, 2009, 室戸地域における中新世の海溝近傍火成活動. *地質雑*, **115**, 17–30.
- Mori, L., Gómez-Tuena, A., Cai, Y. and Goldstein, S.L., 2007, Effects of prolonged flat subduction of the

- Miocene magmatic record of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Chem. Geol.*, **244**, 452–473.
- Müller, R.D., Sdrolias, M., Gaina, C. and Roest, W.R., 2008, Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosystems.*, **9**, doi:10.1029/2007GC001743.
- Murphy, J.B., Hynes, A.J., Johnston, S.T. and Keppie, J.D., 2003, Reconstructing the ancestral Yellowstone plume from accreted seamounts and its relationship to flat-slab subduction. *Tectonophysics.*, **365**, 185–194.
- Murphy, J.B., van Staal, C.R. and Keppie, J.D., 1999, Middle to late Paleozoic Acadian orogeny in the northern Appalachians: A Laramide-style plume-modified orogeny? *Geology*, **27**, 653–656.
- Nakajima, J. and Hasegawa, A., 2007, Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism. *Jour. Geophys. Res.*, **112**, doi:10.1029/2006JB004770.
- Obara, K., 2011, Characteristics and interactions between non-volcanic tremor and related slow earthquakes in the Nankai subduction zone, southwest Japan. *Jour. Geodynam.*, **52**, 229–248.
- O'Driscoll, L.J., Humphreys, E.D. and Saucier, F., 2009, Subduction adjacent to deep continental roots: Enhanced negative pressure in the mantle wedge, mountain building and continental motion. *Earth Planet. Sci. Letts.*, **280**, 61–70.
- O'Driscoll, L.J., Richaards, M.A. and Humphreys, E.D., 2012, Nazca–South America interactions and the late Eocene–late Oligocene flat-slab episode in the central Andes. *Tectonics*, **31**, doi:10.1029/2011TC003036.
- Pardo, M. and Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Jour. Geophys. Res.*, **100**, 12357–12373.
- Park, S.-I., Kwon, S., Kim, S.W., Hong, P.S. and Santosh, M., 2018, A Mesozoic orogenic cycle from post-collision to subduction in the southwestern Korean Peninsula: New structural, geochemical, and chronological evidence. *Jour. Asian Earth Sci.*, **157**, 166–186.
- Park, S.-I., Noh, J., Cheong, H.J., Kwon, S., Song, Y., Kim, S.W. and Santosh, M., 2019, Inversion of two-phase extensional basin systems during subduction of the Paleo-Pacific Plate in the SW Korean Peninsula: Implication for the Mesozoic “Laramide-style” orogeny along East Asian continental margin. *Geosci. Frontiers*, **10**, 909–925.
- Pérez-Campos, Kim, Y.H., Husker, A., Davis, P.M., Clayton, R.W., Iglesias, A., Pacheco, J.F., Singh, S.K., Menea, V.C. and Gurnis, M., 2008, Horizontal subduction and truncation of the Cocos Plate beneath central Mexico. *Geophys. Res. Letts.*, **35**, doi:10.1029/2008GL035127.
- Pérez-Gussinyé, M., Lowry, A.R., Morgan, J.P. and Tassara, A., 2008, Effective elastic thickness variations along the Andean margin and their relationship to subduction geometry. *Geochem. Geophys. Geosystems.*, **9**, doi:10.1029/2007GC001786.
- Pilger, R.H. Jr., 1981, Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **92**, 448–456.
- Ramos, V.A., 1999, Plate tectonic setting of the Andean Cordillera. *Episodes*, **22**, 183–190.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. and Pérez, D.J., 2002, The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Jour. South Amer. Earth Sci.*, **15**, 59–78.
- Ramos, V.A. and Folguera, A., 2009, Andean flat-slab subduction through time. In Murphy, J.B., Keppie, J.D. and Hynes, A.J. eds., *Ancient Orogens and Modern Analogues*. Geol. Soc., London, Spec. Publ., **327**, 31–54.
- Roda, M., Marotta, A.M. and Spalla, M.I., 2011, The effects of the overriding plate thermal state on the slab dip in an ocean-continent subduction system. *C. R. Geosci.*, **343**, 323–330.
- 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**, doi:10.1029/2007TC002143.
- Rosenbaum, G., Giles, D., Saxon, M., Betts, P.G., Weinberg, R.F. and Duboz, C., 2005, Subduction of the Nazca Ridge and the Inca Plateau: Insights into the formation of ore deposits in Peru. *Earth Planet. Sci. Letts.*, **239**, 18–32.
- Rosenbaum, G. and Mo, W., 2010, Tectonic and magmatic responses to the subduction of high bathymetric relief. *Gondwana Res.*, **19**, 571–582.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, **24**, TC5002.
- Saleeby, J., 2003, Segmentation of the Laramide Slab—evidence from the southern Sierra Nevada region. *GSA Bull.*, **115**, 655–668.
- Schellart, W.P., 2020, Control of subduction zone age and size on flat slab subduction. *Frontiers Sci.*, **8**, doi:10.3389/feart.2020.00026.

- Schellart, W.P., Freeman, J., Stegman, D.R., Moresi, L. and May, D., 2007, Evolution and diversity of subduction zones controlled by slab width. *Nature*, **446**, doi:10.1038/nature05615.
- Schellart, W.P. and Strak, V., 2021, Geodynamic models of short-lived, long-lived and periodic flat slab subduction. *Geophys. Jour. Internat.*, **226**, 1517–1541.
- Schepers, G., van Hinsbergen, D.J.J., Spakman, W., Kesters, M.E., Boschman, L.M. and McQuarrie, N., 2017, South-American plate advance and forced Andean trench retreat as drivers for transient flat subduction episodes. *Nature Comms.*, doi: 10.1038/ncomms15249.
- Seton, M., Muller, R.D., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S. and Chandler, M., 2012, Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth-Sci. Rev.*, **113**, 212–270.
- 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. Internat.*, **173**, 1018–1029.
- Skinner, S.M. and Clayton, R.W., 2011, An evaluation of proposed mechanisms of slab flattening in Central Mexico. *Pure Appl. Geophys.*, **168**, 1461–1474.
- Smith, D. and Griffin, W.L., 2005, Garnetite xenoliths and mantle–water interactions below the Colorado Plateau, southwestern United States. *Jour. Petrol.*, **46**, 1901–1924.
- Stevenson, J.T. and Turner, J.S., 1977, Angle of subduction. *Nature*, **270**, 334–336.
- Stubailo, I., Beghein, C. and Davis, P.M., 2012, Structure and anisotropy of the Mexico subduction zone based on Rayleigh-wave analysis and implications for the geometry of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Jour. Geophys. Res.*, **117**, doi:10.1029/2011JB008631.
- Sun, M., Chen, H., Milan, L.A., Wild, S.M., Jourdan, F. and Xu, Y., 2018, Continental arc and back-arc migration in eastern NE China: New constraints on Cretaceous paleo-Pacific subduction and rollback. *Tectonics*, **37**, doi.org/10.1029/2018TC005170.
- Sun, W.D., Ling, M.X., Yang, X.Y., Fan, W.M., Ding, X. and Liang, H.Y., 2010, Ridge subduction and porphyry copper-gold mineralization: An overview. *Sci. China Earth Sci.*, **53**, 475–484.
- Syracuse, E.M. and Abers, G.A., 2006, Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, doi:10.1029/2005GC001045.
- Syracuse, E.M., van Keken, P.E. and Abers, G.A., 2010, The global range of subduction zone thermal models. *Physics Earth Planet. Inter.*, **183**, 73–90.
- Tagami, T., Hasebe, N. and Shimada, C., 1995, Episodic exhumation of accretionary complexes: Fission-track thermochronologic evidence from the Shimanto Belt and its vicinities, southwest Japan. *The Island Arc*, **4**, 209–230.
- Taramón, J.M., Rodriguez-González, J., Negrodo, A.M. and Billen, M.I., 2015, Influence of cratonic lithosphere on the formation and evolution of flat slabs: Insights from 3-D time-dependent modeling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **16**, 2933–2948.
- Tassara, A., Götze, H.-J., Schmidt, S. and Hackney, R., 2006, Three-dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin. *Jour. Geophys. Res.*, **111**, doi:10.1029/2005JB003976.
- Uyeda, S., 1983, Comparative subductology. *Episodes*, **1983**, 19–24.
- 上田誠也, 1989, プレート・テクトニクス. 岩波書店, 1–268.
- Valencia-Moreno, M., Iriondo, A. and González-León, C., 2006, Temporal constraints on the eastward migration of the Late Cretaceous–early Tertiary magmatic arc of NW Mexico based on new ⁴⁰Ar/³⁹Ar hornblende geochronology of granitic rocks. *Jour. South Amer. Earth Sci.*, **22**, 22–38.
- van Hunen, J., van den Berg, A.P. and Vlaar, N.J., 2004, Various mechanisms to induce present-day shallow flat subduction and implications for the younger Earth: A numerical parameter study. *Physics Earth Planet. Inter.*, **146**, 179–194.
- van Hunen, J., van den Berg, A.P. and Vlaar, N.J., 2002a, The impact of the South-American plate motion and the Nazca Ridge subduction on the flat subduction below South Peru. *Geophys. Res. Letts.*, **29**, doi: 10.1029/2001GL014004.
- van Hunen, J., van den Berg, A.P. and Vlaar, N.J., 2002b, On the role of subducting oceanic plateaus in the development of shallow flat subduction. *Tectonophys.*, **352**, 317–333.
- Wada, I. and Wang, K., 2009, Common depth of slab–mantle decoupling: Reconciling diversity and uniformity of subduction zones. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**, doi:10.1029/2009GC002570.
- Wagner, L.S., Beck, S., Zandt, G. and Ducea, M.N., 2006, Depleted lithosphere, cold, trapped asthenosphere,

- and frozen melt puddles above the flat slab in central Chile and Argentina. *Earth Planet.Sci. Letts*, **245**, 289–301.
- Wang, S. and Yan, J., 2021, Coexisting Early Cretaceous arc-type and OIB-type mafic magmatic rocks in the eastern Jiangnan Orogen, South China Block: Implications for paleo-Pacific plate subduction. *Lithos*, **400–401**, doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106421.
- Wells, M. and Hoisch, T.D., 2008, The role of mantle delamination in widespread Late Cretaceous extension and Magatism in the Cordilleran orogen, western United States. *GSA Bull.*, 120, 515–530.
- Wu, G.-L., Meng, Q.-R., Zhu, R.-X., Fan, L.-G., Meng, K., Wei, H.-H., Duan, L. and Zhu, J.-C., 2021, Middle Jurassic orogeny in the northern North China block. *Tectonophys.*, 801, doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228713.
- Xu, Y.-G., 2001, Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino- Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth (A)*, **26**, 747–757.
- Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C. and Selles, D., 2002, The Challenger–Juan Fernandez–Maipo major tectonic transition of the Nazca–Andean subduction system at 33–34°S: geodynamic evidence and implications. *Jour. South Amr. Earth Sci.*, 15, 23–38.
- Zhang, J.-J., Zheng, Y.-F. and Zhao, Z.-F., 2009, Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, **110**, 305–326.
- Zhang, J.-H., Gao, S., Ge, W.-C., Wu, F.-Y., Yang, J.-H., Wilde, S.A. and Li, M., 2010, Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination. *Chem. Geol.*, 276, 144–165.
- Zhou, X.M. and Li, W.X., 2000, Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophys.*, **326**, 269–287.
- Zhu, G., Niu, M., Xie, C. and Wang, Y., 2009, Sinistral to normal faulting along the Tan-Lu fault zone: Evidence for geodynamic switching of the east China continental margin. *Jour. Geol.*, **28**, 277–293.

Abstract

Flat (low-angle) subduction is an enigmatic style of subduction where the slab attains a horizontal (low-angle) orientation for up to several hundred kilometers below the base of the overriding plate. Flat or low-angle subduction occurs in 10% of the subduction zones present-day. I herein review geological features and manifestations, and causes of present-day flat-slab and low-angle subductions, as well as ancient examples. Flat-slab subduction has equated with low-angle subduction in general, although, it is more appropriate to distinguish between the two subduction styles, because there are some different features in the both. Typical flat-slab subduction is well established beneath South America, in central Chile (Pampean flat-slab) and Peru (Peruvian flat-slab), and beneath Mexico (Mexican flat-slab). Pampean flat-slab and Peruvian flat-slab are associated with overthickened oceanic crust. Low angle subduction is found beneath Cascadia, south Alaska, and SW Japan. A number of possible hypotheses have been proposed to explain the formation of flat-slab (low-angle) subduction, although, the origin remains controversial. These hypotheses include: 1) subduction of anomalously buoyant oceanic crust such as aseismic ridges and oceanic plateaus, 2) rapid trenchward motion of the overriding plate, 3) increased suction force (a large negative pressure above the slab interface which is enhanced by the existence of continental root), 4) preferentially occurs at wide and prolonged subduction zones. Two or more of these would be responsible for the formation of flat-slab (low-angle) subduction. A change in subduction style from flat (shallow) to steep (normal) would depend largely on the basalt-to-eclogite transition of the subducting slab with overthickened oceanic crust, although, the relationship between eclogitization and flat-slab subduction is still unclear.