



《総説》

北海道-サハリンの始新世火成活動は海嶺沈み込みに 起因するか？

君波和雄^{1)†}・池田保夫²⁾

Was the Eocene magmatism in Hokkaido-Sakhalin caused by ridge subduction?

Kazuo Kiminami^{1)†} and Yasuo Ikeda²⁾

(要旨)

北海道からサハリンへと続く始新世深成岩類の造構場は、現在も未解決である。我々は、始新世深成岩類がイザナギ-太平洋海嶺の沈み込みによって形成されたことを提案する。北海道北部からサハリンの始新世深成岩類は、アムールプレートの縁辺に形成された付加体に貫入している。深成岩の年代と周辺の付加体の年代との差は小さく、深成岩類が前弧域に貫入したことを示唆する。これらの深成岩類は、北に若くなる年代トレンドを示す (70 km/my)。この事実は、アムールプレート縁辺の古海溝に沿って熱源 (イザナギ-太平洋海嶺) が北方に移動したことを示唆する。北海道南部 (日高変成帯) の始新世深成岩類は、オホーツクブロック縁辺の付加体中に貫入した。この地域の深成岩類が北海道北部-サハリンの年代トレンドから外れるのは、形成場が違った為と考えられる。本論では、さらに環オホーツク海地域の後期白亜紀-古第三紀発達史のなかでの海嶺沈み込みの役割を検討する。

2019 年 5 月 27 日受付

2017 年 8 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

²⁾ 連絡先: 252-0206 相模原市中央区淵野辺
1-6-1-729

Address: 1-6-1-729, Fuchinobe, Chuo-ku,

Sagamihara 252-0206, Japan

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

Keywords: Eocene, Hidaka, Hokkaido,
ridge subduction, Sakhaline, Sikhote-Alin

はじめに

北海道の日高帯やサハリン中南部に始新世や中新世の深成岩類が分布することが以前から知られており (Fig. 1), 北海道におけるこれらの分布域に関しては、前田 (1986) により

“日高火成活動帯”と名付けられた。北海道におけるこの火成活動帯の始新世火成活動の造構場については、通常の火成弧とする見解 (Komatsu et al., 1983 ; 小松ほか, 1986) と活動的海嶺の沈み込みに起因する前弧域の火成

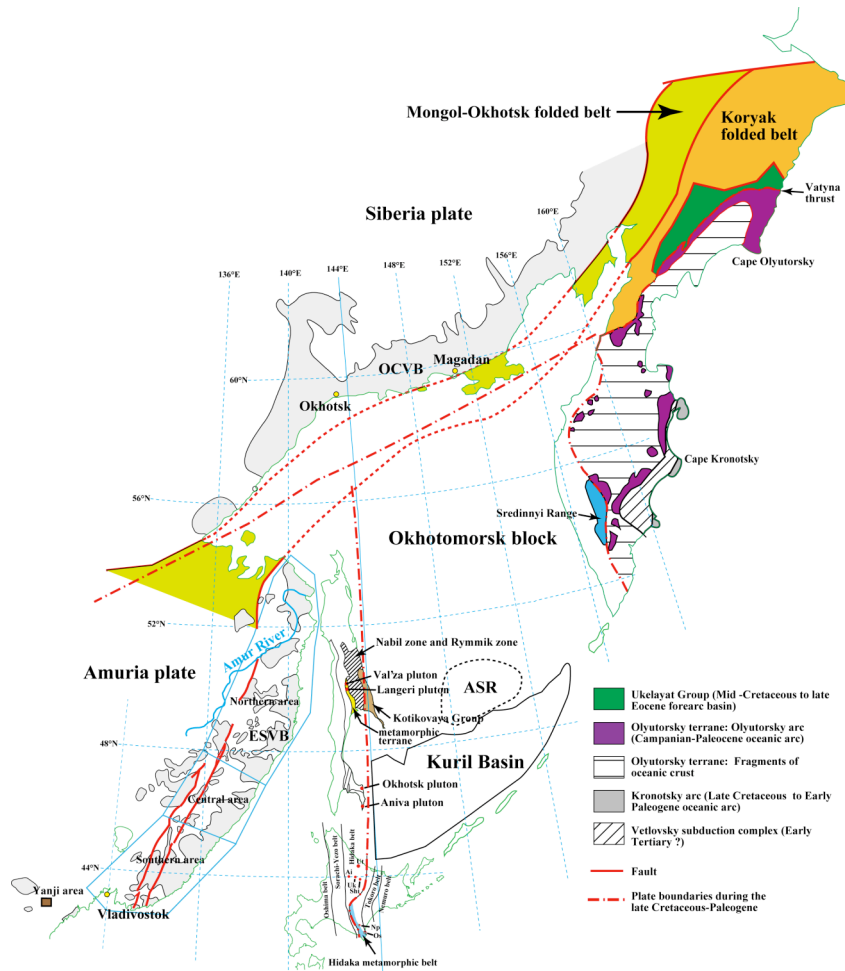


Fig. 1. Distribution of the Eocene granitoids in Hokkaido and Sakhalin, and simplified geotectonic divisions of circum-Okhotsk Sea regions (compiled from Kiminami et al., 1986; Hourigan, 2009; Tikhomirov et al., 2011; Jahan et al., 2015; Pospelov et al., 2016; Glorie et al., 2017; Zhao et al., 2017). Names of plutons: Os=Oshirabetsu, Np=Nupinai, Shi=Shirataki, Ai=Aibetsu, Uk=Ukishima, and Ut=Uttu. ESVB=East Sikhote-Alin volcanic belt, OCVB=Okhotsk-Chukotka volcanic belt, ASR=Academy of Sciences Rise.

東シホテアリン火山帯

活動とする見解(前田, 1989; Maeda, and Kagami, 1996; 君波, 1989; Toyoshima, 1991)が示されてきた。しかし, 始新世深成岩類の造構場は, いまだ未解決である。最近, これらの深成岩類の年代が高精度で決定されたことにより (Kemp et al., 2007; Jahan et al., 2014; Liao et al., 2018; Alexandrov et al., 2018; Zhao et al., 2018, 2019), より精密な議論が可能になってきた。

本論では, 東シホテアリン火山帯(East Sikhote-Alin Volcanic Belt=ESVB)やオホーツク-チュコト火山帯(Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt=OCVB), カムチャッカの最近の研究成果を踏まえ, 北海道とサハリンの始新世深成岩類の位置づけ, その造構場を議論する。始新世深成岩類が定置した場をここでは“北海道-サハリン火成活動帯”と呼ぶ。

東シホテアリン火山帯(ESVB)は, 南のウラジオストクから北のアムール川河口付近まで総延長 1,400 km に達する白亜紀-中新世の火山帯である (Fig. 1)。同火山帯には, 白亜紀-暁新世の深成岩と火山岩が広く分布する。本論では説明の便宜上, ESVB を南部, 中部および北部に区分する (Fig. 1)。後期白亜紀から暁新世にかけては, 石英安山岩や流紋岩質凝灰岩, イグニンプライトが ESVB 全域にわたり広く分布する (例えば, Alenicheva and Sakhno, 2008; Grebennikov and Popov, 2014; Grebennikov et al., 2016; Martynov et al., 2017)。これらの岩石は, 共に産出する花こう岩類とともに海洋プレートの沈み込みに起因して形成されたと考えられている (Jahan et al., 2015)。また, Martynov et

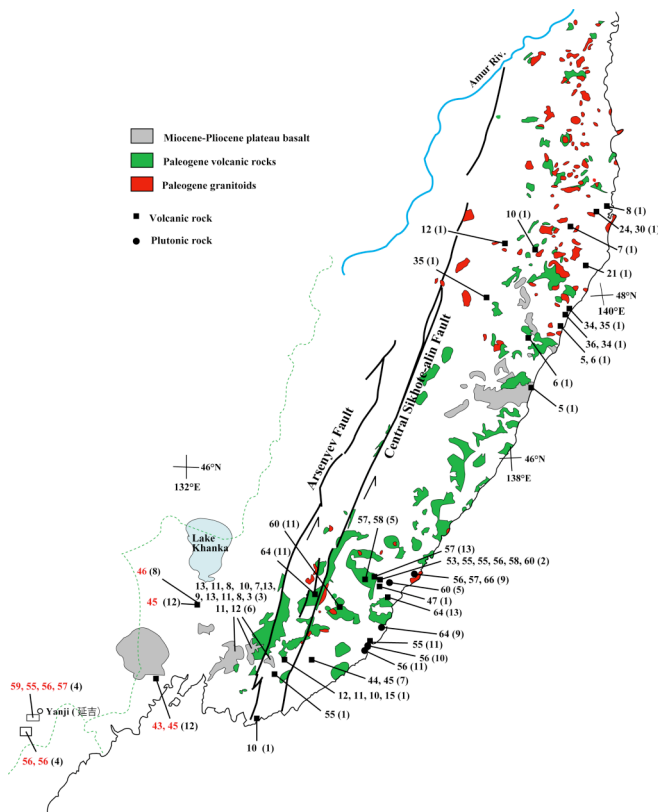


Fig. 2. Distribution of Paleogene granitoids and Paleogene – Miocene volcanic rocks in East Sikhote-Alin (Compiled from Jahn et al., 2015 and Grebennikov et al., 2016). Numbers indicate radiometric ages. Red numbers show adakitic volcanic rocks. Data sources are given in parentheses. 1: Okamura et al. (1998), 2: Grebennikov and Maksimov (2006), 3: Chashchin et al. (2007), 4: Guo et al. (2007), 5: Alenicheva and Sakhno (2008), 6: Nechaev et al. (2009), 7: Chekryzhov et al. (2010), 8: Chashchin et al. (2011), 9: Jahn et al. (2015), 10: Tang et al. (2016), 11: Tsutsumi et al. (2016), 12: Wu et al. (2017), and 13: Zhao et al. (2017).

al. (2017)によれば、シホテアリンのマーストリヒチアン–ダニアン–の安山岩は、典型的な沈み込みタイプであり、アダカイトを含まない。Martynov and Khanchuk (2013)は、東シホテアリンの始新世–漸新世–前中新世の玄武岩がスラブの破断によるアセノスフェアの上昇によって大陸下のリソスフェアが溶融して形成されたとした。Grebennikov and Popov (2014)は、東シホテアリンの火山岩類が S-type や A-type の特徴を示し、古第三紀火山活動の最終段階で A-type の鉄ガラス質イグニンプライト (ferroan hyaloignimbrite) が産出するとしている。シホテアリンの花こう岩類の地球化学的検討を行

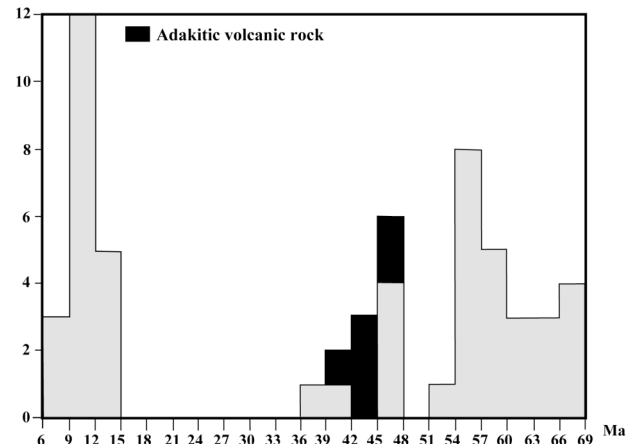


Fig. 3. Frequency diagram of compiled radiometric ages for Paleogene–Miocene igneous rocks in the southern Area of ESVB (Data sources: Okamura et al., 1998; Grebennikov and Maksimov, 2006; Alenicheva and Sakhno, 2008; Chekryzhov et al., 2010; Chashchin et al., 2011; Jahn et al., 2015; Tang et al., 2016; Tsutsumi et al., 2016; Martynov et al., 2017; Wu et al., 2017; Zhao et al., 2017).

った Grebennikov et al. (2016)は、沈み込むスラブの分離 (breakoff) とそれに起因するアセノスフェアの上昇によって暁新世–始新世 (60–45 Ma) の A-type 花崗岩やアルカリ超塩基性岩、鉄かんらん石流紋岩などが形成されたとしている。

東シホテアリン南部の火成岩の地球化学的・年代学的研究は、比較的多い (Fig. 2)。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代やジルコンを用いた U–Pb 年代が多く報告されており、それらの年代精度は高いと推定される。東シホテアリン火山帯南部の火成岩の年代頻度分布 (Fig. 3) では、51–48 Ma および 36–15 Ma の年代が欠如しており、この時期における火成活動の休止を示唆している。また、48–39 Ma にアダカイトが特徴的に産出する (Fig. 3)。48–45 Ma の 4 試料は、非アダカイトに塗色されているが、これらは地球化学的な検討が行われていない試料である。Wu et al. (2017)は、東シホテアリン南部の古第三紀アダカイトの産出が 46–39 Ma であるとしている。Chashchin et al. (2011)は、東シホテアリン南部のアダカイトがスラブウィンドーの形成とアセノスフェアの上昇に由来するとしている。Wu et al. (2017)はこれらのアダカイトが当時沈み込んでいた太平洋プレートのロールバックにより、大陸下の下部地殻もしくはマントルが

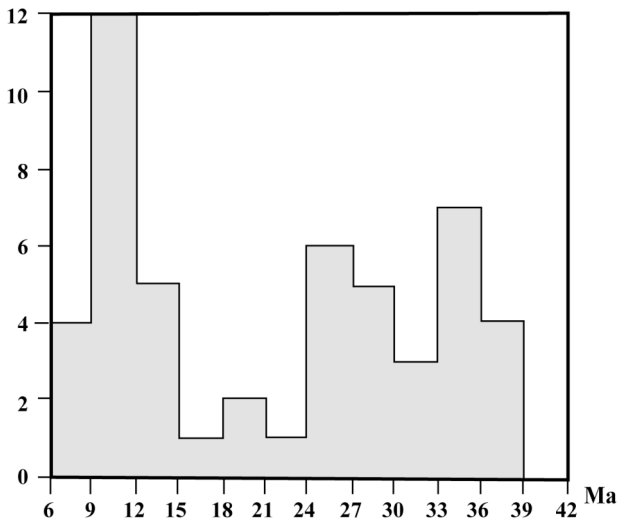


Fig. 4. Frequency diagram of compiled radiometric ages for Paleogene–Miocene basalt and basaltic andesite in the northern Area of ESVB (Data sources: Okamura et al., 1998; Sato et al., 2003).

溶融して形成されたと推定している。また、Martynov et al. (2017)はこの時期のアダカイトの形成をスラブの分離に伴うスラブウィンドーの形成とアセノスフェアの上昇に起因するエクログャイト化した玄武岩の溶融によると推定している。

Chashchin et al. (2011)と Wu et al. (2017)により報告された東シホテアリン南部のアダカイト分布域 (Fig. 2) から約 200 km 南西方の延吉 (Yanji) 地域 (Fig. 1) でも Guo et al. (2007)や Li et al. (2007)によってアダカイト様の安山岩が報告されている。これらの安山岩の ^{40}Ar – ^{39}Ar 年代は、59–55 Ma (6 地点、平均: 56.3 Ma; 暁新世末–始新世初期) である。Guo et al. (2007) は、延吉周辺のアダカイト様安山岩の成因をスラブのロールバックに起因するアセノスフェアの上昇によって、沈み込みで汚染したリソスフェアマントルが溶融して形成されたと推定している。

ESVB 中部の研究は、ほとんど見あたらない。ESVB 北部では Okamura et al. (1998)や Sato et al. (2003)による玄武岩と玄武岩質安山岩を対象とした全岩 K–Ar 年代の報告がある。北部の火山岩の年代頻度分布 (Fig. 4) は、39 Ma よりも古い年代および 24–15 Ma の火山岩が欠如もしくは乏しいことを示している。Tatsumi et al. (2000)および Sato et al. (2003)は、25–20 Ma に火成活動の休止期があり、この休止期をはさんで、

火成活動が沈み込みタイプからプレート内タイプに変化したとしている。また、この休止期が日本海の主要な拡大期と同期していることを指摘している。玄武岩の地球化学と同位体を検討した Okamura et al. (2005)は、北部の火成活動を 55–24 Ma の沈み込みタイプ、23–15 Ma の日本海拡大に起因するアセノスフェアの上昇と沈み込みの影響をうけた火成活動、15 Ma 以降の日本海拡大後のアルカリ玄武岩の活動に区分した。

オホーツク–チュコト火山帯

オホーツク海に面したシベリアプレート南縁部からベーリング海峡西側のチュコト半島にいたる地域には、総延長 3,000 km に達する白亜紀のオホーツク–チュコト火山帯 (OCVB) (例えば、Hourigan and Akinin, 2004; Tikhomirov et al., 2006) が分布する (Fig. 1)。OCVB のオホーツクセグメントでは、後期白亜紀の沈み込みタイプの火山岩の上に 80–74 Ma のプレート内玄武岩 (Mygdykit 層) の組成を示す台地玄武岩 (plateau basalt) が重なり、これが火成活動の終焉になる (Hourigan and Akinin, 2004; Akinin et al., 2014)。OCVB の火成活動の終焉は、オホーツクブロックのシベリアプレートへの衝突に起因すると考えられていた (例えば、木村, 1985; Parfenov and Natal'in, 1986; Şengör and Natal'in, 1996; Maruyama et al., 1989, 1997)。しかし、Hourigan and Akinin (2004)は、OCVB が強い変形を受けておらず、水平に近い地質構造を保持していること、最終段階のプレート内玄武岩の形成場が展張と考えられることから、火成活動の終焉をオホーツクブロックの衝突で説明する見解を否定している。カムチャッカ北部の Vatyana スラスト (Fig. 1) は、後期白亜紀–暁新世のオリュートルスキー (Olyutorsky) 島弧と海洋地殻がシベリアプレート (カムチャッカ西部) に衝突して形成された縫合線とされている (Hourigan et al., 2009)。Akinin and Miller (2011)は、OCVB 最上部のプレート内玄武岩の位置づけをオホーツク海北縁部のプレート境界が沈み込みからトランスフォームに転換したためとしている。また、Akinin et al. (2014)は、プレート内玄武岩の形成をスラブウィンドーもしくは走向移動断層に沿う局

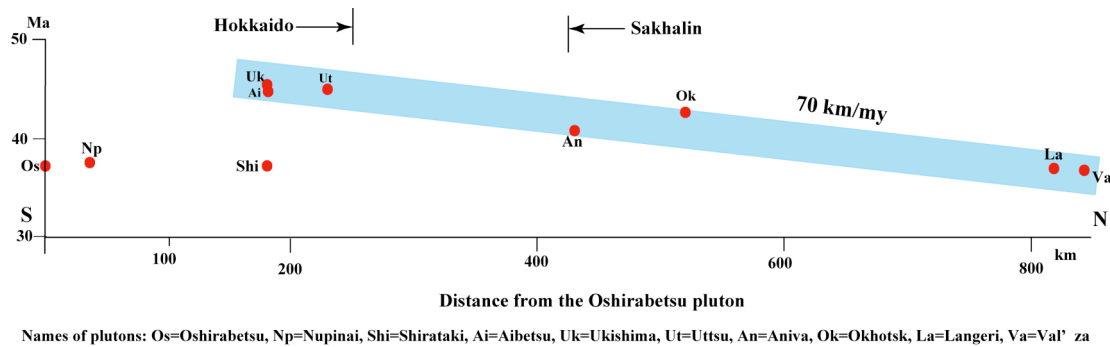


Fig. 5. Plot of available radiometric ages versus distance (km) from the Oshirabetsu (Os) pluton projected onto a meridian for the Paleogene plutons in Hokkaido and Sakhalin with indication of migration rate (Data sources: Kemp et al., 2007; Jahn et al., 2017; Liao et al., 2018; Zhao et al., 2018, 2019). Data in Sakhalin are average values. Analytical errors of ages for plutons in Hokkaido are very small, so we do not show error bars.

所的な展張場に起因する火成活動と推定した。

日高-サハリン火成活動帯の位置づけ

1. 深成岩体の年代とその空間的变化

始新世の日高火成活動帯を狩勝峠付近を境にして南部と北側に分ける。日高火成活動帯の南部や北部に始新世深成岩類が存在することは、古くから知られていた(河野・植田, 1967; Shibata, 1968; 柴田・石原, 1981)。これらの始新世花こう岩については、島弧火成活動の産物とする見解(例えば, Komatsu et al., 1983; 小松, 1985; 小松ほか, 1989)と、活動的海嶺の沈み込みに起因するとする見解(前田, 1989; 君波, 1989; Toyoshima, 1991)とがある。ここでは最近の知見を踏まえながら、この時期の火成活動が海嶺の沈み込みに由来する可能性を吟味する。

最近、日高-サハリン火成活動帯の始新世深成岩 (Fig. 1) に関して、ジルコンの U-Pb 年代がいくつか報告され、同火成活動帯の各地における活動時期が明瞭になってきた。日高火成活動帯南部では、Kemp et al. (2007)により、ヌピナイ花こう岩体から 37.5 Ma のジルコン U-Pb 年代が報告されている。また、小島ほか (2015) は、音調津地域のかんらん石はんれい岩、ノーライト-閃緑岩および花崗閃緑岩から 37.2 Ma のジルコン U-Pb 年代を報告している。高橋ほか (2018) は、日高変成帯の片麻岩中のジルコンの U-Pb 年代を検討し、再結晶リムから 39.6 Ma の年代を報告している。この事実は、深成岩を形成した熱イベントが ca. 40 Ma にさかのぼることを示唆している。同帯北部では、Jhan

et al. (2014)が^{うつつ}嶺岳岩体から 45.0 Ma、浮島岩体から 44.8 Ma、愛別岩体から 45.7 Ma、白滝岩体から 37.0 Ma のジルコン U-Pb 年代を報告している。

日高-サハリン火成活動帯に属するサハリンの始新世深成岩の分布 (Fig. 1) は、南からアニワ (Aniva) 深成岩体、オホーツク (Okhotsk) 深成岩体、ランゲリ (Langeri) 深成岩体となる。

アニワ深成岩体は、サハリン南東端のアニワ半島に分布し、トニノ-アニワ (Tonin-Aniva) 付加体の Utesna 層 (アプチアン-セノマニアン) に貫入する S-type の花こう岩である (Glorie et al., 2017)。Liao et al. (2018)によると、アニワ深成岩体のジルコン U-Pb 年代は、40.7 Ma (9 地点の平均値) である。

アニワ深成岩体の北側に位置し、オホーツク海に面して分布するオホーツク深成岩体は、カンパニアン-前期始新世の Ozersk 付加体の Kedrovka 層 (前期白亜紀) と Chaika 層 (カンパニアン-暁新世) に貫入する A-type, I/S-type の花こう閃緑岩・石英閃緑岩である (Liao et al., 2018)。Chaika 層には流紋岩や石英安山岩の脈岩が多数貫入する (Glorie et al., 2017)。オホーツク深成岩体のジルコン U-Pb 年代は、43.0 Ma (7 地点の平均値)、流紋岩 2 地点と石英安山岩 1 地点から測定された U-Pb 年代は、それぞれ 42.9, 42.7, 44.4 Ma であった (Liao et al., 2018)。

サハリン中部に分布するランゲリ深成岩体は、南側のランゲリ深成岩とそこから 10 km ほど北側に位置する Val'za 深成岩からなる (Fig. 1)。両深成岩とも複数の岩体から構成され、多くが S-type の特徴を示す (Zhao et al., 2019)。

ランゲリ岩体は、原岩堆積年代が後期白亜紀- 暁新世の Verhnelangeri 変成コンプレックスの泥質片岩や雲母-石英岩に貫入する (Glorie, 2017). 両深成岩の周辺には多くの脈岩が存在する. ランゲリ深成岩のジルコン U-Pb 年代は, 37.0 Ma (4 地点の平均, Zhao et al., 2018, 2019), Val'za 深成岩のジルコン U-Pb 年代は, 36.7 Ma (6 地点の平均, Zhao et al., 2018, 2019) である.

日高火成活動帯北部からランゲリ深成岩体にかけての年代は, 北側に向かって大局的に若くなり (Fig. 5), その変化トレンドは, およそ 70 km/my である. 日高火成活動帯南部の深成岩と北部の白滝岩体がこのトレンドからはずれ, 年代が若い. 火成弧に沿った方向の年代の定向変化は, アラスカ半島の Sanak-Baranof 深成岩帯でよく知られており, 海嶺-海溝-海溝三重点の移動で説明されている (Farris et al., 2006). イザナギ-太平洋海嶺 (Seton et al., 2015) もしくはクラ (Kula) -レザレクション (Resurrection) 海嶺 (Madsen et al., 2006) の沈み込みによって, 前弧域の海溝近傍に形成されたとされる暁新世の Sanak-Baranof 深成岩帯の一部をなすコーディアク島のコーディアクバソリスは, 西から東に向かって若くなり, その変化トレンドは, およそ 130 km/my である (Farris et al., 2006). コーディアク島における変化トレンドの方が大きい, 三重点の移動速度は, 同一の海嶺であっても海嶺と海溝との成す角度によって違ってくる.

2. 北海道-サハリンの2つの沈み込み帯と縫合線

Kiminami and Kontani (1983)は, 北海道の白亜紀地質体が2つの弧海溝系で形成されたことを指摘した. 一つは西側のアムールプレート縁辺の弧海溝系であり, 北海道におけるその構成要素は前弧海盆堆積物の蝦夷層群や付加体の日高層群である. もう一つの弧海溝系は, オホーツクブロックの縁辺に形成され, その構成要素は前弧海盆堆積物の根室層群と佐呂間層群, 付加体の湧別層群と仁頃層群である. なお, 本論ではオホーツクブロックをオホーツク海, カムチャッカ西部 (スレディニー地域を含む), 北海道からサハリンに抜ける縫合線の東側 (Fig. 1) と規定する. 日高帯北部の付加体は,

大局的に東側に向かって若くなることから (カンパニアンから始新世), 西向きの沈み込みにより形成されたと考えられる (君波ほか, 1986). 田近 (1989) は, 日高帯北部を北北西-南南東の断層で接する A-E (西から東) の5つの帯に区分した. 始新世の深成岩類は, 最も広い分布域をもつ E 帯に分布し, 陸源砕屑物の堆積場で噴出・貫入した MORB を特徴的に含む (宮下, 1989). E 帯の東側には常呂帯の湧別層群や仁頃層群が分布する. 湧別層群は大局的に東上位の地層から構成され, 東側の仁頃層群の方が湧別層群よりも早期に付加している, 東向きの沈み込みにより形成されたと推定される (Kiminami and Kontani, 1983; 紺谷ほか, 1986; 田近, 1988).

日高変成帯は, 東に向かって変成度が低下しており, 東側に分布する中の川層群に漸移する (紺谷, 1978; 小山内, 1985; Komatsu et al., 1989). Kontani and Kiminami (1980)および紺谷ほか (1986) は, 中の川層群の砂岩組成が常呂帯の湧別群や佐呂間層群に類似することから, 中の川層群と湧別層群が対比されるとした. Nanayama et al. (1993)は, 中の川層群の砂岩組成がオホーツクブロック縁辺の組成とアムールプレート縁辺の組成の両方の特徴を併せもつことを明らかにし, 2つの海溝系の会合部に堆積した可能性を示した. 七山ほか (1993) は, 湧別層群, 佐呂間層群, 根室層群および中の川層群の砂岩に含まれるクロムスピネルの組成を検討し, 中の川層群のクロムスピネルが湧別層群や佐呂間層群, 根室層群のクロムスピネルと組成的に類似することを示した. 七山 (1992) は, 中の川層群中のタービダイトにおいて, 南南東→北北西の卓越した軸流とともに, 東→西や南東→北西の側方流を認めている. また, 七山・君波 (1989) は, 中の川層群を構成するタービダイトが基本的に東上位であることを指摘している. 山崎ほか (2018) は, 中の川層群広尾コンプレックス中の火山岩礫が始新統浦幌層群別保層に含まれる 65-61 Ma (K-Ar 年代) の花こう岩礫 (小笠原ほか, 1998) と化学組成が類似することから, 両者が同一の供給源に由来する可能性を指摘した. 長浜ほか (1980) は, 堆積構造から浦幌層群別保層が北や東から供給されたと推定している. Geodekyan et al.

(1977) は、千島海盆の北側の科学アカデミー海台からドレッジされた火成岩類（閃緑岩，花こう閃緑岩，花こう岩，石英安山岩など）から 95–75 Ma の K-Ar 年代を報告している．また，Emel'yanova et al. (2006) は，科学アカデミー海台からドレッジされた火山岩（流紋岩，石英安山岩，安山岩）から 57–46 Ma の K-Ar 年代を報告している．科学アカデミー海台は，中の川層群中の火山岩礫や浦幌層群別保層中の花こう岩礫の給源として有力な候補である．小松ほか (1989) は，日高変成帯の形成初期（ステージ 0）に原岩堆積層の構造的厚化があり，「この構造的厚化は，東西の島弧-海溝系が接近し，東系の付加体が西系付加体にのし上げることによっている，と考えるのが最も合理的のよう」に思われる」と指摘している．この場合の「東系の付加体」は，オホーツクブロック縁辺の付加体を指していると思われ，具体的には中の川層群であろう．これらから，北海道におけるアムールプレートとオホーツクブロックとの縫合線は，北部では日高帯と常呂帯との境界を通り，南部ではこれが日高変成帯主帯の西縁に連続することを提案する．これに従えば，日高火成活動帯北部の始新世深成岩類はアムール側の，日高変成帯の始新世深成岩類はオホーツク側の構成要素ということになる．

サハリン中部のランゲリ岩体を含む変成岩地域とサハリン東部の Kotikovaya 層群（後期白亜紀-始新世）との間には，西側の Nabil 帯と東側の Rymmik 帯からなる付加体が分布する (Fig. 1)．Zyabrev (2011) による放散虫化石の検討に基づけば，この付加体中の海溝充填タービダイトの年代は，東側に若くなる（アプチアン-アルビアンからセノマニアンもしくはチューロニアン）．この事実は，この付加体が西向きの沈み込みによって形成されたことを示唆する．一方，サハリン東部に分布する Kotikovaya 層群 (Tosy et al., 2005) は，最下部層（Uchir 層）が火山砕屑岩や砂岩・泥岩からなり，イノセラムスを含む．佐々・西田 (1937) は，本層群の下部から *Inoceramus schmidtii* を報告している．Tosy et al. (2005) は，放散虫化石や花粉化石，植物化石などから，Kotikovaya 層群の年代をマーストリヒチアンから始新世としている．*Inoceramus schmidtii* は，北海道東部の根室層群

最下部の火山角礫岩を主とするノッカマップ層や佐呂間層群下部からも報告されている（榊原・田中，1986；長谷川・三谷，1959）．根室層群の堆積年代は，カンパニアン（松本，1970；Okada et al., 1987）から始新世（Okada et al., 1987）とされる．Kotikovaya 層群は，岩相や年代が根室層群に類似しており，根室層群と同様に前弧海盆の堆積物と推定される．これらから，Kotikovaya 層群の西側の Nabil 帯と Rymmik 帯はアムール側の，Kotikovaya 層群はオホーツク側の構成要素と考えられる．ランゲリ岩体は，Nabil 帯の西側の変成岩コンプレックス中に含まれるので (Fig. 1)，アムールプレートの縁辺に貫入したとするのが適切であろう．

Zharov (2005) は，地質構造や放散虫年代から，アニワ岩体やオホーツク岩体を含むサハリン南部の付加体が西向きの沈み込み帯で形成されたとしている．Zyabrev (2011) は，Kotikovaya 層群が島弧の断片を伴うとしており，Zharov (2005) は，この古島弧を常呂帯の北方延長と考え，西に移動してアムールプレートに衝突したとしている．

以上から，サハリンにおけるアムールプレートとオホーツクブロックとの縫合線は，サハリン東部の Kotikovaya 層群の西縁を通り，アニワ岩体があるアニワ半島の東側のオホーツク海西縁部に抜けると推定される (Fig. 1)．

3. 深成岩の年代と被貫入岩との年代差

日高火成活動帯南部の始新世深成岩類は，付加した中の川層群の深部に定置したと推定される．中の川層群からは，暁新世の放散虫化石（七山・雁澤，1997）とともに，砕屑性ジルコンの最も若いグループのピーク年代として ca. 57 Ma (Nanayama et al., 2017) が得られている．この事実は，南部の始新世深成岩類の形成に関与した熱イベントが付加して間もない（17 my 以下）中の川層群中で起こったことを示唆する．

日高火成活動帯北部の髯岳岩体は，砂岩および泥岩からなる日高累層群瑠椽層を貫いている．瑠椽層は，放散虫化石から始新世（56–33.9 Ma）に堆積したと推定されている（君波ほか，1990）．すなわち，髯岳岩体は，堆積してから 11 my 以内の極めて若い付加体を貫いて定置したと考えられる．また，瑠椽層は，陸源砕屑物

が堆積する海溝近傍で噴出・貫入した MORB を含み、始新世には海溝に極めて近い位置に活動的海嶺が存在したことを示唆する (宮下, 1989; 君波ほか, 1999; 宮下・君波, 1999). 瑠璃層分布域の南方に位置するトムラウシ緑色岩体も MORB 組成を示し、砕屑岩の堆積場で噴出・貫入している (Miyashita and Katsushima, 1986; 今中・宮下, 1999). トムラウシ岩体の周辺からは、始新世の放散虫化石が報告されている (君波ほか, 1990). こういった事実から、Kiminami et al. (1994)は、始新世における海嶺-海溝-海溝三重点の北海道通過を推定した. Miyashita and Yoshida (1994)や宮下ほか (1997)によっても付加体に貫入した MORB の存在から海嶺-海溝-海溝三重点の北海道通過が議論されている. 極めて若い付加体を貫く日高火成活動帯北部の始新世深成岩類と海溝近傍で噴出・貫入した一連の MORB とは、相互に近接して産出することから、それらが定置した地質的背景は、同一の熱イベントに起因する可能性が考えられる.

サハリンのオホーツク岩体もカンパニアン-暁新世の Chaika 層に貫入することから、貫入年代と被貫入岩の堆積年代との差が小さい. Zhao et al. (2018)は、ランゲリ深成岩が貫入する泥質片岩中の砕屑性ジルコンの U-Pb 年代を検討し、51 Ma の最も若いピーク年代を報告している. ランゲリ深成岩の年代が 37 Ma なので、その差は 14 my である. この事実は、ランゲリ深成岩が極めて若い付加体中に貫入したことを示している.

4. 始新世の日高-サハリン火成活動帯は、海嶺衝突の産物か？

日高-サハリン火成活動帯の始新世深成岩体の定置年代は、被貫入付加体の堆積年代と非常に近接しており、その年代差は 10 数 my 以下である. 現世火山フロントと海溝との距離は、中位 50 %が 275-180 km の範囲に入る (Syracuse and Abers, 2006). 若い付加体は、海溝の近くに分布するため、新第三紀の付加体 (23 Ma 以降)の多くは、大陸斜面の下に分布している (Plafker et al., 1994; von Huene et al., 1996; Fuis, 1998; Fuis et al., 2008; Ito et al., 2009). すなわち、非常に若い付加体を貫く火成岩は、通常の

火成弧の構成物ではなく、前弧域での海溝近傍火成活動の産物である可能性が高い. 活動的海嶺の沈み込みによって火成弧の活動が停止し、前弧域の火成活動に移行することがチリ南部やウッドラーク盆の現世海嶺沈み込み場や北米西岸の新生代の海嶺沈み込み場で知られている (例えば, Cross and Pilger, 1982; Forsythe et al., 1986; Cande and Leslie, 1986; Taylor and Exon, 1987; Madsen et al., 2006). これらから、日高-サハリン火成活動帯の深成岩類は、前弧域に貫入したと考えられる. 深成岩類の年代は、それぞれの地域で年代幅が非常に小さく、極めて短期間の活動であったことを示唆しており、何らかの熱パルスが原因と考えられる. さらに、日高火成活動帯北部からサハリン中部にかけて明瞭に若くなるトレンドを示す. これは熱源が北方に移動していったことを示しているのだろう.

Whittaker et al. (2007)や Seton et al. (2012, 2015), Müller et al. (2016)による古太平洋のプレート復元に基けば、イザナギ (もしくはファラロン) -太平洋海嶺が古第三紀初期に北西太平洋の縁辺に沈み込んだとされる. Seton et al. (2015)は、イザナギ-太平洋海嶺が 55 Ma から 43 Ma にかけて東アジアの下に沈み込み、その結果として、スラブの分離が起こり、60 Ma 以前に南西方向であった太平洋下のマントル流が 50 Ma 以後に北北東方向に変化したと地質学的な証拠から推定した. 沈み込んだ活動的海嶺は、地下での温度上昇のため、海嶺としての形態を保持できず、スラブウィンドーを形成する (例えば, Thorkelson, 1996; Breitsprecher et al., 2003; Groome and Thorkelson, 2009). スラブウィンドーの形成に伴って、アダカイトや MORB, アルカリ玄武岩の活動が前弧域で起こると考えられている (Thorkelen, 1996; Breitsprecher and Thorkelen, 2009; Thorkelen et al., 2011).

日高-サハリン火成活動帯の花こう岩類は、多くが S-type である (大和田・小山内, 1989; Jhan et al., 2014; Liao, 2018; Zhao et al., 2019). Zhao et al. (2019)は、これらの S-type 花こう岩が、付加した堆積岩の溶融によって形成された可能性を指摘しており、付加体を溶融するための熱源が必要になる. Ayuso et al. (2009)は、Sanak-Baranof 深成岩帯の暁新世花崗岩類が活

動的海嶺の沈み込みによって形成されたスラブウィンドーから上昇した苦鉄質マグマが付加体底面にアンダープレATINGし、付加堆積岩を溶融してできた可能性を花崗岩類の地球化学や同位体の検討から推定した。海嶺沈み込みにともなう苦鉄質マグマのアンダープレATINGの重要性は、Harris et al. (1996)やScharman et al. (2012)によっても強調されている。日高火成活動帯南部では 37.2 Ma の MORB 組成のはんれい岩（小島ほか, 2015）とともに S-type の花こう岩質岩が産出する。このはんれい岩は、海嶺沈み込みによって形成されたスラブウィンドーにおいてアンダープレATINGした MORB マグマに由来するのであろう。ESVB 南部に産出するアダカイトは、スラブウィンドーのスラブエッジが溶融して、もしくはスラブウィンドーの上の厚い地殻の下部が溶融して（Chashchin et al., 2011; Wu et al., 2017）形成されたのだろう。

宮下ほか（1990）は、地質構造の特徴から日高帯北部において中新世以前に左ずれの運動があったことを指摘している。Lagabriele et al. (2000)やScharman et al. (2012)は、海嶺の沈み込みによって前弧域に走向移動断層が形成されることを指摘している。宮下ほか（1990）によって指摘された左ずれ運動は、海嶺の沈み込みに起因する可能性がある。

Zhao et al. (2019)は、北海道-サハリン南部の始新世花こう岩類の形成をクラ-太平洋海嶺のアムールプレート下への沈み込みによる走向移動断層とプリアパート盆の形成に求めたが、Zhao et al. (2018)では、オホーツクブロックとアムールプレートの衝突に起因すると推定している。そして、それらの周辺の付加体の年代も考慮し、その衝突年代を 49-38 Ma としている。しかし、北海道中央部では、この年代の主要部で石狩層群や幌内層の前弧海盆堆積物（Ito et al., 2014）が堆積しており、衝突を示唆する地質学的証拠は見いだせない。また、Okamura et al. (1998, 2005)によれば、サハリン南西部に分布する後期始新世-前期漸新世のドレイイト (38.7 Ma および 30.7 Ma ; Arakai Formation) は、その化学組成が沈み込みに由来することを示しており、前期漸新世までアムールプレート下で沈み込みが継続していたことを示唆する。これ

らから始新世におけるオホーツクブロックとアムールプレートとの衝突は、なかったと推定される。

以上に述べたとおり、北海道とサハリンの始新世深成岩類は、活動的な海嶺がアムールプレートおよびオホーツクブロックの下に沈み込むことによって形成されたと考えられる。海嶺沈み込みを示唆する地質現象とそれらの解釈を整理すると以下のようになる： 1) 始新世深成岩類と貫入されている付加体との年代差が非常に小さく、始新世深成岩類は前弧域での火成活動と考えられる、2) 日高-サハリン火成活動帯の始新世深成岩類の年代は、北に向かって若くなる傾向にあり、熱源の北方移動が推定される、3) ESVB の南部において、51-48 Ma に弧火成活動の休止（もしくは衰退）が、48-39 Ma にアダカイトの産出が認められ、スラブウィンドーの存在を示唆する、4) ESVB 北部において 39 Ma より古い年代が欠如するのは、スラブウィンドーが北方に移動したことを示す可能性があるが、年代データが玄武岩質岩に限定されているので、年代欠如に不確実性が残る、5) 海溝近傍の陸源砕屑物堆積場で噴出したと推定される始新世の MORB が深成岩類の近くの付加体中に分布し、海溝の近くに活動的な海嶺が存在したことを示唆する、6) 日高火成活動帯南部に認められる始新世の MORB 組成のはんれい岩（小島ほか, 2015）は、海嶺沈み込みに由来する MORB マグマのアンダープレATINGに由来する可能性がある、7) 古太平洋のプレート復元は、暁新世-始新世にイザナギ-太平洋海嶺が北西太平洋縁から沈み込んだことを示している。

日高火成活動帯南部（日高変成帯）の始新世深成岩と同北部の白滝岩体の年代は、北に若くなる全体的トレンドから外れる。前述したように、日高変成帯の始新世花こう岩や MORB 組成のはんれい岩は、アムール側の構成員ではなく、オホーツク側の構成員であったと考えられる。アムールプレートの縁辺に形成された付加体に貫入している日高火成活動帯北部からサハリンにかけての始新世花こう岩類が示す年代トレンドから日高火成活動帯南部の深成岩類の年代が外れる理由は、貫入した場が異なっていたためと考えられる。白滝花こう岩の年

代は日高火成活動帯南部の深成岩類とほぼ同じ年代を示す。白滝花こう岩もオホーツクブロックの縁辺で貫入した可能性があるが、前述したように、縫合線は、紋別の東側に位置し、日高変成帯主体の西縁に続くと考えられ、白滝花こう岩は、アムール側に位置する可能性が高い。しかし、若い火山岩類が被覆する北部においては縫合線の位置の設定が難しく、白滝花こう岩が縫合線の東西どちら側に位置するのか不明である。

白亜紀末から古第三紀の発達史

日高-サハリン火成活動帯を北西太平洋地域の発達史の中で位置づけるために、環オホーツク地域の後期白亜紀-古第三紀の発達史を考察する。ここでポイントとなるのは、ESVB や OCVB の発達史、カムチャッカの形成過程などである。白亜紀末には、火成弧としての ESVB や OCVB が活動的であり、北海道からサハリン、さらにオホーツク海北縁へと続く海溝にイザナギプレートが沈み込んでいたことを示している (Fig. 1a)。Kiminami and Kontani (1983) が指摘したように、この時期にはオホーツクブロックの西縁に形成された弧海溝系が“古日高海”を挟んで東側に存在し (Fig. 6a)、付加体である湧別層群-中の川層群や仁頃層群、前弧海盆堆積物である佐呂間層群、島弧火成岩 (Ikeda and Goto, 2018) を含む前弧海盆堆積物 (Kiminami, 1983) である根室層群とサハリン東部に分布する Kotikovaya 層群 (Tosy et al., 2005) などがここで形成された。

Hourigan and Akinin (2004) や Akinin et al. (2014) によれば、通常の火成弧としての OCVB の活動は、ca. 80 Ma に終了し、80-74 Ma にプレート内玄武岩の活動に移行した。Akinin and Miller (2011) は、OCVB におけるこの変化をオホーツク海北縁部のプレート境界が沈み込みタイプからトランスフォームタイプに転換したためとし、Akinin et al. (2014) は、プレート内玄武岩の活動をスラブウィンドーの形成によるとした。すなわち、オホーツク海北縁部の収束境界は、ca. 80 Ma に沈み込み境界からトランスフォーム境界に転換し、それに伴いスラブが分離して、スラブウィンドーが形成されたと考えられる。北海道東部の根室層群最下部のノッ

カムマップ層からは、カンパニアン中・上部を示すナノ化石 (Okada et al., 1987) が報告されており、同層群の堆積は、ca. 80 Ma に開始されたと考えられる。オホーツクブロックが ca. 80 Ma にシベリアプレートに接合し、収束境界がオホーツクブロックの南側にジャンプして千島弧の沈み込み帯が新たに形成されたのだろう。

カムチャッカでは古地磁気の研究が多く行われている。Pechersky et al. (1997) は、東カムチャッカに分布する後期白亜紀-前期暁新世の古島弧火山岩 (Hourigan et al., 2009 の地質図に従えば、オリュトルスキー古島弧) の古地磁気を検討し、上位に向かって古緯度が 30° から 53° に変化すること、30°-70° 時計回りに回転したことを明らかにした。そして、この古島弧が北上し、中期始新世にカムチャッカ西部に衝突したと推定した。Harbert et al. (2009) は、カムチャッカ東部のクロノツキー古島弧 (後期白亜紀-前期古第三紀; Fig. 1) の後期白亜紀火山岩の古地磁気を検討し、その古緯度が約 30° であることを明らかにするとともに、この検討結果が過去の多くの古地磁気の研究結果と調和的であることを指摘している。そして、この古島弧がおおよそ 40 Ma にカムチャッカに接合したと推定した。カムチャッカの古地磁気研究を総括した Shapiro and Solov'ev (2009) は、カムチャッカの各地質体の北方移動の歴史をまとめ、トランスフォーム断層に切断された古島弧が始新世から中新世にかけて次々とカムチャッカからコリャクに衝突したとしている。Konstantinovskaya (2011) は、カムチャッカ各地の層序・年代および地質構造解析などから、カムチャッカ東部の Ozernoy-Valagina (Olutorsky) 島弧が前期始新世に北側のシベリアプレートに衝突したとしている。Domeier et al. (2017) は、トモグラフィーや古地磁気、地質に基づき、オリュトルスキー古島弧と常呂古島弧からなる弧海溝系とクロノツキー古島弧からなる弧海溝系の移動経路と古第三紀におけるこれらの大陸への衝突を示した。

約 80 Ma にシベリアプレートに接合したオホーツクブロックは、その北側がトランスフォーム断層に転化し、スラブが分離した。北側のスラブを切り離されたオホーツクブロックは、

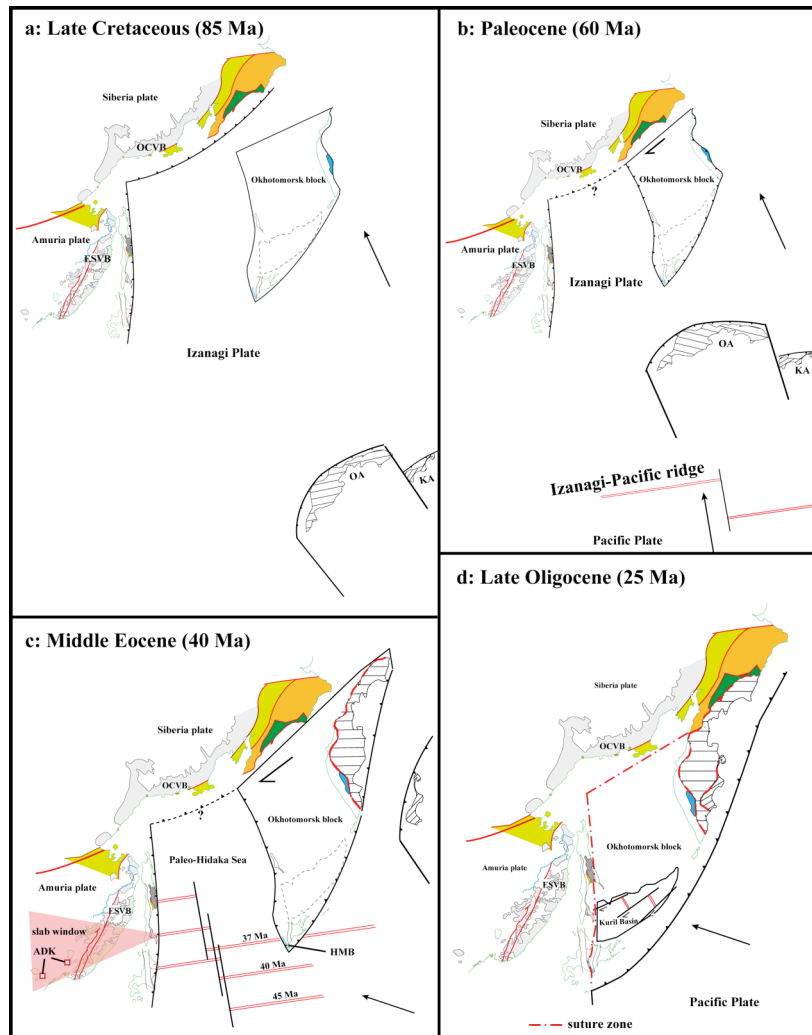


Fig. 6. Paleogeographic reconstructions of circum-Okhotsk Sea regions from the Late Cretaceous to Late Oligocene. OA= Olyutorsky paleoarc, KA= Kronotsky paleoarc, ADK= adakitic volcanic rock, and HMB= Hidaka metamorphic belt. See text for details.

北北西向きのイザナギプレートに押され、西側に移動する。スラブが切り離され、アンカーがなくなったことにより、移動しやすくなったのであろう。西向きの移動をしたことにより、オホーツクブロックの西側に沈み込み帯が形成され (Fig. 6b), 常呂海山や湧別層群の付加が進行した。

47 Ma になると、太平洋プレートの移動方向が北北西向きから西北西向きに変化する (Torsvik et al., 2017)。シベリアに接合したオホーツクブロックは、西北西向きの太平洋プレートの動きに押されて、さらに西側に移動する。オホーツクブロックとアムールプレートとの間にあった“古日高海”は次第に縮小する。北上してきたイザナギ-太平洋海嶺 (Seton et al., 2015) は、アムールプレート縁辺およびオホーツクブロック縁辺の海溝に沈み込む (Fig. 6c)。アムール

プレート縁辺では北側に若くなる一連の海溝近傍火成活動が生じ、日高-サハリン火成活動帯の始新世深成岩類が定置した。海溝の西側にスラブウィンドウが形成されたことにより、シホテアリン南部では 51–48 Ma に弧火成活動が停止し、スラブウィンドウの縁のスラブ溶融、もしくは下部地殻の溶融により 48–39 Ma のアダカイトを形成した (Fig. 6c)。シホテアリンの主要断層である中央シホテアリン断層 (左ずれの走向移動断層; Fig. 2) は、古第三紀の火山岩を切断しており (Liu et al., 2017), シホテアリン南部の古第三紀火成岩類が北海道やサハリンに対して現在と同じ位置関係にあったかどうかは不明である。

日高変成帯における 37 Ma の火成活動 (MORB マグマのアンダープレートの付加体の溶融) は、オホーツクブロックの縁辺

で進行した (Fig. 6c). 片桐ほか (2016) は、北海道東部の浦幌層群天寧層中の凝灰岩に含まれるジルコンから 39 Ma の U-Pb 年代を報告した。天寧層は、仁頃層群起源の粗粒砕屑物から構成され、前弧域の活発な上昇・削剥を示唆している。海嶺の沈み込みに伴って前弧域が大きく上昇することは、現世の海嶺沈み込み場で知られている (Cande and Leslie, 1986; Taylor and Fox, 1987; Nelson and Forsythe, 1989; Groome and Thorkelson, 2009). チリ海嶺の沈み込みを経験したタイタオ半島の南側では、海嶺の沈み込みによって前弧域が 2 km 以上上昇し、中新世と鮮新世との間に不整合を形成している (Cande and Leslie, 1986). タイタオ半島の東側でアパタイトのフィッシュ・トラック年代を検討した Haschke et al. (2006) は、熱いプレートとスラブウィンドーの沈み込みによって、上盤プレートが短縮し、前弧-弧域が 3-4 km 上昇したと推定した。また、ソロモン諸島沖の海嶺沈み込み場では、2.3-2.8 km の前弧域の上昇が見積もられている (Taylor and Exon, 1987). 39 Ma 頃の仁頃層群の上昇・削剥は、海嶺の沈み込みに起因する前弧域の上昇の可能性がある。高橋ほか (2018) は、日高変成帯の片麻岩中のジルコン再結晶リムの最も若い粒子群のピーク年代を 39.6 ± 0.9 Ma としている。この事実は、日高変成帯を形成した熱イベントの年代が ca. 40 Ma であったことを示唆しており、前弧域の上昇とほぼ一致している。

川上ほか (2002) は、北海道中央部の前期漸新世紅葉山層中の流紋岩質凝灰岩から、黒雲母やザクロ石を含むホルンフェルスや結晶片岩の岩片を多量に見いだした。ザクロ石の化学組成は、緑色片岩相-角閃岩相の変成度を示す。川上ほか (2002) は、これらの変成岩類の供給源として、日高変成帯の低変成度部の可能性を指摘している。川上ほか (2008) は、空知-エゾ帯南部の始新統-中新統の層序と地質構造を検討し、始新世のニセウ層 (熊谷ほか, 1995) が前期中新世以前に日高帯から空知-エゾ帯にナップとして移動し、変形したことを示した。在田ほか (2001) は、襟裳岬の西側に分布する後期漸新世の襟裳層 (栗田・楠, 1997) 中の花こう岩礫の K-Ar 年代から、漸新世に日高変成帯の急激な上昇があったことを示した。これら

の事実は、漸新世の日高帯が圧縮場にあったことを示唆する。また、Takano et al. (2013) は、北海道南部の夕張地域やその南方延長で漸新世中頃の顕著な不整合を指摘している。北海道東部では、前期漸新世音別層群の堆積後に広く不整合が認められ、一部の地域ではこの期間に中間質の火山活動 (二又安山岩類) があった (松井・雁沢, 1987). 馬淵 (1962) は、音別層群堆積後に褶曲・断層運動があったことを指摘している。この様に、北海道では漸新世中頃の造構運動が広い地域で確認されている。前述したように、シホテアリン北部では ca. 25 Ma までアムールプレート下で沈み込みが進行していたと推定される。以上の事実から、漸新世のある時期にオホーツクブロックとアムールプレートとが衝突した可能性が高いと考えられる (Fig. 6d).

オホーツク海の形成史は、掘削試料などの具体的データがないこともあり、不明な点が多い。オホーツク海の南縁を構成する千島海盆の形成に関しても十分に明らかになっていない。木村・玉木 (1985) は、オホーツクブロックが時計回りに回転することにより、扇形をした千島海盆の要をピボットとして、背弧側が後退して 30-20 Ma に同海盆が開いたと推定した。前田 (1989) や君波 (1989), Maeda (1990) は、千島海盆の西縁を画し、南北に延びた走向移動断層を想定して、この断層が 16-15 Ma もしくは 30 Ma に右ずれの運動をしたことにより、前弧域が海溝側に移動し、扇を開くように千島海盆が拡大したと推定した。小松ほか (1990) は、前田 (1989) や君波 (1989) と同様の見解をとっている。前田や君波の見解を採用した場合、千島海盆の西縁を画する断層に沿って 400 km 以上 (同海盆の西縁の幅) の右ずれが必要となる。この走向移動断層の北方延長は、OCVB を切ることになるが、OCVB にそれを示唆するオフセットは認められない。千島海盆の拡大時期に関しては、音響探査やドレッジ試料、地温勾配などのデータに基づいて議論されている。Verzhbitsky and Kononov (2006) は、千島海盆の熱流量からその年代を 36 Ma と見積もった。Karp et al. (2006) や Prokudin (2015) は、音響探査に基づく同海盆の層序から、形成時期を後期漸新世もしくは漸新世末と推定した。Terekhov et

al. (2008)は、千島海盆の北側斜面からドレッジされた試料に基づき、千島海盆が後期漸新世-前期中新世の下位の堆積層と後期中新世-鮮新世の上位の堆積層から構成されることを明らかにした。これらから、同海盆は後期漸新世に形成されたと推定される。一方、Baranov et al. (2002)は、択捉島とウルップの間の北側およびブッソール海峡の北側の千島海盆中に北西-南東方向の音響基盤の高まりを認め、これらを拡大軸と推定した。そして、32-15 Ma にこの拡大軸によって千島弧と平行な方向に拡大し、千島海盆が形成されたと主張した。Baranov et al. (2002)は、拡大のメカニズムとして、千島海盆の北縁、南縁および中央部の島弧方向の右ずれ断層に伴うプルアパート盆を提案している (Fig. 6d)。国後島の東部のトーナル岩-花崗閃緑岩から 31 Ma のジルコン U-Pb 年代が報告されており (Grave et al., 2016)、この花崗岩質岩は、千島海盆の拡大に起因して形成されたのかもしれない。

謝辞: 岡村 聡氏および佐藤佳子氏にはシホテアリンの地質に関してご教示いただくとともに、文献を送っていただいた。Viacheslav V. Akinin 氏, Igor Alexandrov 氏, Elena A. Konstantinovskaya 氏, Yurii A. Martynov 氏, B. Natal'in 氏, V.G. Prokudin 氏, P.L. Tikhomirov 氏, 臼杵 直氏, Pan Zhao 氏には文献を送っていただいた。査読者の岡村 聡氏および編集委員の宮下純夫氏には貴重なコメントをいただき、本稿は大幅に改善された。これらの方々に記して感謝する。

引用文献

Akinin, V.V., Layer, P., Benowitz, J. and Ntaflos, Th., 2014, Age and composition of final stage of volcanism in Okhotsk-Chukotka volcanic belt: An example from the Ola Plateau (Okhotsk Segment). *ICAM VI proceed.*, 171-193.

Akinin, V.V. and Miller, E., 2011, Evolution of calc alkaline magmas of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt. *Petrology*, **19**, 237-277.

Alenicheva, A.A. and Sakhno, V.G., 2008, The U-Pb dating of extrusive-intrusive complexes

in ore districts in the southern part of the Eastern Sikhote-Alin Volcanic Belt (Russia). *Doklady Earth Sci.*, **419**, 217-221.

Alexandrov, I.A., Liao, J.-P., Jahn, B.-M., Golozoubou, V.V., Ivin, V.V. and Stepanova, YU.A., 2018, Eocene granitoids of the Okhotsk granodiorite complex (South Sakhalin). *Doklady Earth Sci.*, **483**, 1499-1503.

在田一則・雁沢好博・板谷徹丸, 2001, 日高山脈のテクトニクスと上昇過程—熱放射年代学からの検討. *地震彙報*, **76**, 93-104.

Ayuso, R.B., Haeussler, P.J., Bradley, D.C., Farris, D.W., Foley, N.K. and Wandless, G.A., 2009, The role of ridge subduction in determining the geochemistry and Nd-Sr-Pb isotopic evolution of the Kodiak batholith in southern Alaska. *Tectonophysics*, **464**, 137-163.

Baranov, B., Wong, H.K., Dozorova, K., Karp, B., Lüdmann, T., Karnaukh, V., 2002, Opening geometry of the Kurile Basin (Okhotsk Sea) as inferred from structural data. *Island Arc*, **11**, 206-219.

Breitsprecher, K. and Thorkelson, D.J., 2009, Neogene kinematic history of Nazca-Antarctic-Phoenix slab windows beneath Patagonia and the Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, **464**, 10-20.

Breitsprecher, K., Thorkelson, D.J., Groome, W.G. and Dostal, J., 2003, Geochemical confirmation of the Kula-Farallon slab window beneath the Pacific Northwest in Eocene time. *Geology*, **31**, 351-354.

Cande, S.C. and Leslie, R.B., 1986, Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 471-496.

Chashchin, A.A., Martynov, Yu.A., Rasskazov, S.V., Maksimov, S.O., Brandt, I.S. and Saranina, E.V., 2007, Isotopic and geochemical characteristics of the Late Miocene subalkali and alkali basalts of the southern part of the Russian Far East and the role of continental lithosphere in their genesis. *Petrology*, **15**, 575-598.

Chashchin, A.A., Nechaev, V.P., Nechaeva, E.V. and Blokhin, M.G., 2011, Discovery of Eocene

- Adakites in Primor'e. *Doklady Earth Sci.*, **438**, 744–749.
- Chekryzhov, I.YU., Popov, V.K., Panichev, A.N., Seredin, V.V. and E. V. Smirnova, E.V., 2010, New data on the stratigraphy, volcanism, and zeolite mineralization of the Cenozoic Vanchinskaya depression in Primorye. *Russian Jour. Pacific Geol.*, **4**, 314–330.
- Cross, T. A. and Pilger, R.H., 1982, Controls of subduction geometry, location of magmatic arcs, and tectonics of arc and back-arc regions. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **93**, 545–562.
- Domeier, M., Shephard, G., Jakob, J., Gaina, C., Doubrovine, P.V. and Torsvik, T.H., 2017, Intraoceanic subduction spanned the Pacific in the Late Cretaceous–Paleocene. *Science advances*, **3**, eaao2303, DOI: 10.1126/sciadv.aao2303.
- Emel'yanova, T.A., Lelikov, E.P. and S'edin, V.T., 2006, Geochemical features of the Okhotsk Sea Cenozoic volcanism. *Geo-Mar. Lett.*, **26**, 275–286.
- Farris, D.W., Haeussler, P., Friedman, R., Paterson, S.R., Saltus, R.W. and Ayuso, R., 2006, Emplacement of the Kodiak batholith and slab-window migration. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **118**, 1360–1376.
- Forsythe, R.D., Nelson, E.P., Carr, M.J., Kaeding, M.E., Herve', M., Mpodozis, C.M., Soffia, M.J., and Harnbour, S., 1986, Pliocene near trench magmatism in southern Chile: A possible manifestation of ridge collision. *Geology*, **14**, 23–27.
- Fuis, G.S., 1998, West margin of North America—a synthesis of recent seismic transects. *Tectonophys.*, **288**, 265–292.
- Fuis, G.S., Moore, T.E., Plafker, G., Brocher, T.M., Fisher, M.A., Mooney, W.D., Nokleberg, W.J., Page, R.A., Beaudoin, B.C., Christensen, N.I., Levander, A.R., Lutter, E.J., Saltus, R.W. and Ruppert, N.A., 2008, Trans-Alaska crustal transect and continental evolution involving subduction underplating and synchronous foreland thrusting. *Geology*, **36**, 267–270.
- Geodekyan, A.A., Udintsev, G.B., Baranov, B.V., Beresnev, A.F., Burk, C., Bogatkov, O.A., Gabov, V.V., Gnibidenko, G.S., Dmitriyev, Yu.I., Zonenshayn, L.P., Kurentsova, N.A., Raznitsin, Yu.N., Rudnik, G.B. and Sushchev-skaya, N.M., 1977, Solid rocks of the floor of the central part of the Sea of Okhotsk. *Internat. Geol. Rev.*, **19**, 817–834.
- Glorie, S., Alexandrov, I., Nixon, A., Jepson, G., Gillespie, J. and Jahn, B.-M., 2017, Thermal and exhumation history of Sakhalin Island (Russia) constrained by apatite U–Pb and fission track thermochronology. *Jour. Asian Earth Sci.*, **143**, 326–342.
- Grave, J.D., Zhimulev, F.I., Glorie, S., Kuznetsov, G.V., Evans, N. Vanhaecke, F. and McInnes, B., 2016, Late Palaeogene emplacement and late Neogene–Quaternary exhumation of the Kuril island-arc root (Kunashir island) constrained by multi-method thermochronometry. *Geosci. Frontiers*, **7**, 211–220.
- Grebennikov, A.V., Khanchuk, A.I., Gonevchuk, V.G. and Kovalenko, S.V., 2016, Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia): Geochemistry and tectonic implications. *Lithos*, **261**, 250–261.
- Grebennikov, A.V. and Maksimov, S.O., 2006, Fayalite rhyolites and a zoned magma chamber of the Paleocene Yakutinskaya volcanic depression in Primorye, Russia. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **101**, 69–88.
- Grebennikov, A.V. and Popov, V.K., 2014, Petrogeochemical aspects of the Late Cretaceous and Paleogene ignimbrite volcanism of East Sikhote-Alin. *Russian Jour. Pacific Geol.*, **8**, 38–55.
- Groome, W.G. and Thorkelson, D.J., 2009, The three-dimensional thermo-mechanical signature of ridge subduction and slab window migration. *Tectonophys.*, **464**, 70–83.
- Guo, F., Nakakura, E., Fan, W., Kobayashi, K. and Li, C., 2007, Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China. *Jour. Petrol.*, **48**, 661–692.
- Haschke, M., Sobel, E.R., Blisniuk, P., Strecker,

- M.R. and Warkus, F., 2006, Continental response to active ridge subduction. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L15315, doi:10.1029/2006GL025972.
- Harbert, W., Tsukanov, N.V., Alexeiev, D.V., Gaedicke, C., Freitag, R., Baranov, B.V., S. G. Skolotnev, S.G., W. Kramer, W. and Seifert, W., 2009, Paleomagnetism of the Cretaceous rocks from Cape Kronotskiy, East Kamchatka and reconstruction of terrane trajectories in the NE Pacific area. *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.*, **4**, 313–327.
- Harris, N.R., Sisson, V.B., Wright, J.E., Pavlis, T.L., 1996, Evidence for Eocene mafic underplating during fore-arc intrusive activity, eastern Chugach Mountains, Alaska. *Geology*, **24**, 263–266.
- 長谷川 潔・三谷勝利, 1959, 5万分の1地質図幅「根室北部」および同説明書. 北海道立地下資源調査所, 27p.
- Hourigan, J.K. and Akinin, V.V., 2004, Tectonic and chronostratigraphic implications of new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of the Arman and Maltan-Ola volcanic fields, Okhotsk-Chukotka volcanic belt, northeastern Russia. *GSA Bull.*, **116**, 637–654.
- Hourigan, J.K., Brandon, M.T., Soloviev, A.V., KirMasov, A.B., Garver, J.I., Stevenson, J. and Reiners, P.W., 2009. Eocene arc-continent collision and crustal consolidation in Kamchatka, Russian Far East. *Amer. Jour. Sci.*, **309**, 333–396.
- Ikeda, Y. and Goto, M., 2018, Late Cretaceous to early Paleogene forearc magmatism and subduction initiation in the Paleo-Kuril arc-trench system, eastern Hokkaido, Japan. *Jour. Geodyn.*, **122**, 41–53.
- 今中理華子・宮下純夫, 1999, 海嶺玄武岩と未固結堆積物の相互反応—日高帯トムラウシ緑色岩体における例—. 地質学論集, 52号, 125–137.
- Ito, T., Kojima, Y., Kodaira, S., Sato, H., Kaneda, Y., Iwasaki, T., et al., 2009, Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002. *Tectonophys.* **472**, 124–134.
- Itoh, Y., Takano, O., Kusumoto, S. and Tamaki, M., 2014, Mechanism of long-standing Cenozoic basinformation in central Hokkaido: an integrated basin study on an oblique convergent margin. *Prog. Earth Planet. Sci.*, <http://www.progearthplanet.com/content/1/1/6>.
- Jahn, B.-M., Usuki, M., Usuki, T. and Chung, S.-L., 2014, Generation of Cenozoic granitoids in Hokkaido (Japan): Constraints from Zircon geochronology, Sr–Nd–Hf isotopic and geochemical analyses, and implications for crustal growth. *Amer. Jour. Sci.*, **314**, 704–750.
- Jahn, B.-M., Valui, G., Kruk, N., Gonevchuk, V., Usuki, M. and Wu, J.T.J., 2015, Emplacement ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: Crustal growth and regional tectonic evolution. *Jour. Asian Earth Sci.*, **111**, 872–918.
- Karp, B.Ya., Karnaukh, V.N., Baranov, B.V. and Dozorova, K.A., 2006, Seismic stratigraphy and sedimentary processes on the Kurile Basin northern slope (Okhotsk Sea). *Marine Geol.*, **228**, 1–14.
- 片桐貴浩・成瀬 元・平田岳史・服部健太郎, 2016, 北海道東部に分布する浦幌層群に含まれる細粒凝灰岩層のU–Pb年代. 地質雑, **122**, 495–503.
- 川上源太郎・石丸 聡・田近 淳・大津 直・佐藤 創・阿部友幸・菅野正人・長坂晶子, 2008, 日高衝突帯前縁, 厚別川上流域の始新統ニセウ層および中部中新統の岩相と両者の関係 (予報). 地球科学, **62**, 17–28.
- 川上源太郎・川村信人・在田一則, 2002, 漸新統紅葉山層の流紋岩質凝灰岩中に見い出された変成岩片とその意義: 北海道中央部の古第三紀テクトニクスに関連して. 地質雑, **108**, 235–248.
- 河野義礼・植田良夫, 1967, 本邦火成岩のK–Ar dating (4)—花こう岩類, 総括—. 岩鉱, **57**, 177–187.
- Kemp, A.I.S., Shimura, T., Hawkesworth, C.J., 2007, Linking granulites, silicic magmatism, and crustal growth in arcs: Ion microprobe

- (zircon) U-Pb ages from the Hidaka metamorphic belt, Japan. *Geology*, **35**, 807-810.
- 君波和雄, 1989, 北海道周辺のテクトニクスに関するいくつかの新提案. 月刊地球, **11**, 309-315.
- Kiminami, K., 1983, Sedimentary history of the late Cretaceous-Paleogene Nemuro Group, Hokkaido, Japan: A forearc basin of the Paleo-Kuril arc-trench system. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **89**, 607-624.
- 君波和雄・川端清司・宮下純夫, 1990, 日高累層群中からの古第三紀放射状化石の発見とその意義, 特に海嶺の沈み込みについて. 地質雑, **996**, 323-326.
- Kiminami, K. and Kontani, Y., 1983, Mesozoic arc-trench systems in Hokkaido, Japan. In Hashimoto, M. and Uyeda, S., eds, *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions*. Terra Sci. Publ., Tokyo, 107-122.
- Kiminami, K., Miyashita, S. and Kawabata, K., 1994, Ridge collision and in-situ greenstones in accretionary complexes: An example from the Late Cretaceous Ryukyu Islands and southwest Japan margin. *Island Arc*, **3**, 103-111.
- 君波和雄・宮下純夫・木村 学・田近 淳・岩田圭示・酒井 彰・吉田昭彦・加藤幸弘・渡辺 寧・江崎洋一・紺谷吉弘・勝島尚美, 1986, 日高帯の中生界—日高累層群. 地団研専報, 31 号, 137-155.
- 木村 学, 1985, 白亜紀北海道の沈み込み様式. 科学, **55**, 24-31.
- 木村 学・玉木賢策, 1985, 千島弧と千島海盆—上盤プレートの回転, 後退と背弧海盆の拡大—. 地学雑誌, **94**, 1-15.
- 小島 萌・Kemp, A.I.S.・大橋美由希・志村俊昭, 2015, 日高変成帯の形成テクトニクス (2): 二度の火成活動. 日本地質学会第 122 年学術大会講演要旨, 65.
- 小松正幸, 1985, 北海道中軸部の構造帯—その構成, 性格および造構運動—. 地質学論集, 25 号, 137-155.
- 小松正幸・宮下純夫・在田一則, 1986, 日高変成帯の構成. 地団研専報, 31 号, 189-203.
- Komatsu, M., Miyashita, S., Maeda, J., Osanai, Y. and Toyoshima, T., 1983, Disclosing of a deepest section of continental-type crust up-thrust as the final event of collision of arcs in Hokkaido, North Japan. In Hashimoto, M. and Uyeda, S., eds., *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions*, TERRAPUB, Tokyo, 149-165.
- 小松正幸・小山内康人・豊島剛志, 1989, 日高変成帯の温度-圧力-変形史. 月刊地球, **11**, 239-244.
- Komatsu, M., Osanai, Y., Toyoshima, T. and Miyashita, S., 1989, Evolution of the Hidaka metamorphic belt, northern Japan. In Cliff, J.S. and Yardley, B.W.D., eds., *Evolution of Metamorphic Belts*, Geol. Soc. Spec. Publ., **43**, 487-493.
- 小松正幸・榊原正幸・福沢仁之・豊島剛志, 1990, 千島海盆の拡大と日高変成帯の構造運動. 月刊地球, **12**, 501-506.
- Konstantinovskaya, E., 2011, Early Eocene arc-continent collision in Kamchatka, Russia: Structural evolution and geodynamic model. In Brown, D. and Ryan, P.D., eds., *Arc-Continent Collision*, Springer-Verlag, Berlin, 247-277.
- 紺谷吉弘, 1978, 日高帯南東部の日高累層群について—その 1, 層序と構造—. 地質雑, **84**, 1-14.
- Kontani, Y. and Kiminami, K., 1980, Petrological study of the sandstone in the Pre-Cretaceous Yubetsu Group, north-eastern Hidaka Belt, Hokkaido, Japan. *Earth Sci. (Chikyū-Kagaku)*, **34**, 307-319.
- 紺谷吉弘・君波和雄・田近 淳・間庭 賢, 1986, 常呂帯・根室帯の白亜紀堆積岩類. 地団研専報, no.31, 157-161.
- 熊谷琢磨・紀藤典夫・雁沢好博, 1995, 北海道中軸部ニセウ層から産出した始新世放射状化石とフィッション・トラック年代. 地質雑, **101**, 965-969.
- 栗田裕司・楠 香織, 1997, 北海道中央部, 襟裳層の渦鞭毛藻化石年代 (後期漸新世) とその意義. 地質雑, **103**, 1179-1182.
- Lagabriele, Y., Guivel, C., Maury, R.C., Bourgois, J., Fourcade, S. and Martin, H., 2000, Magmatic-tectonic effects of high thermal

- regime at the site of active ridge subduction: the Chile Triple Junction model. *Tectonophysics*, **326**, 255-268.
- Li, C.W., Guo, F., Fan, W.M. and Gao, X.F., 2007, Ar - Ar geochronology of Late Mesozoic volcanic rocks from the Yanji area, NE China and tectonic implications. *Sci. China Ser. D: Earth Sci.*, **50**, 505-518.
- Liao, J.-P., Jahn, B.-M., Alexandrov, I., Chung, S.-L., Zhao, P., Ivin, V. and Usuki, T., 2018, Petrogenesis of Mid-Eocene granites in South Sakhalin, Russian Far East: Juvenile crustal growth and comparison with granitic magmatism in Hokkaido and Sikhote-Alin. *Jour. Asian Earth Sci.*, **167**, 103-129.
- Liu, K., Zhang, J., Wilde, S.A., Liu, S., Guo, F., Kasatkin, S.A., Golozoubov, V.V., Ge, M., Wang, M. and Wang, J., 2017, U-Pb Dating and Lu-Hf Isotopes of Detrital Zircons From the Southern Sikhote-Alin Orogenic Belt, Russian Far East: Tectonic Implications for the Early Cretaceous Evolution of the Northwest Pacific Margin. *Tectonics*, **36**, 2555-2598.
- 馬淵精一, 1962, 釧路炭田古第三系に関する堆積並びに造構発達史的考察. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, **56**, 1-42.
- Madsen, J.L., Thorkelson, D.J., Friedman, R.M. and Marshall, D.D., 2006, Cenozoic to recent plate configurations in the Pacific Basin: Ridge subduction and slab window magmatism in western North America. *Geosphere*, **2**, 11-34.
- 前田仁一郎, 1986, 日高火成活動帯の形成と千島海盆の拡大およびユーラシア・北米プレートの衝突. 地団研専報, 31 号, 459-473.
- 前田仁一郎, 1989, 日高火成活動帯の形成—海嶺の沈み込みによる上盤プレート内の古海嶺の復活. 月刊地球, **11**, 265-270.
- Maeda J. and Kagami, H., 1996, Interaction of a spreading ridge and an accretionary prism: Implications from MORB magmatism in the Hidaka magmatic zone, Hokkaido, Japan. *Geology*, **24**, 31-43.
- Martynov, Yu.A. and Khanchuk, A.I., 2013, Cenozoic volcanism of the eastern Sikhote Alin: Petrological studies and outlooks. *Petrology*, **21**, 85-99.
- Martynov Yu.A., Khanchuk, A.I., Grebennikov, A.V., Chashchin, A.A. and Popov, V.K., 2017, Late Mesozoic and Cenozoic volcanism of the East Sikhote-Alin area (Russian Far East): A new synthesis of geological and petrological data. *Gondwana Res.*, **47**, 358-371.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island Arc*, **6**, 121-142.
- Maruyama, S., Liou, J.G. and Seno, T., 1989, Mesozoic and Cenozoic evolution of Asia. In Ben-Avraham, Z., ed., *The Evolution of the Pacific Ocean Margins*, Oxford Monogr. Geol. Geophys. No. 8, 75-99.
- 松井 愈・雁沢好博, 1987, 東部北海道の漸新—中新統・川上層群: 足寄動物群の産出層と地質時代. 松井 愈教授祈念論文集. 137-143.
- 松本達郎, 1970, 中生界の地質年代. 科学, **40**, 248-255.
- 宮下純夫, 1989, 日高帯の緑色岩帯の形成場とテクトニクス. 月刊地球, **11**, 336-344.
- 宮下純夫・新井孝志・長橋 徹, 1997, 日高帯の緑色岩の意義: 海嶺の多重衝突帯. 地質学論集, **47**, 307-323.
- Miyashita, S. and Katushima, T., 1986, The Tomuraushi greenstone complex: contemporaneous occurrence of abyssal tholeiite and terrigenous sediments. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **93**, 535-557.
- 宮下純夫・君波和雄, 1999, 日高帯北部瑠璃層中の緑色岩の岩石学. 地質学論集, 52 号, 113-124.
- 宮下純夫・渡辺 寧・田近 淳・君波和雄・木村 学, 1990, 日高帯の大構造—左横ずれ・右横ずれ変動帯. 月刊地球, **12**, 515-520.
- Miyashita, S. and Yoshida, A., 1994, Geology and petrology of the Shimokawa ophiolite (Hokkaido, Japan): ophiolite possibly generated near R-T-T triple junction. In Ishiwatari, A. et al., eds., *Circum-Pacific Ophiolites*, Proc. 29th

- IGC Ophiolite Symposium, Part D, VSP Publ., Netherlands. 163-182.
- Müller, R.D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, A.E., Matthews, K.J., Wright, N.M., Shephard, G., Maloney, K.T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D.J. and Cannon, J., 2016, Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **44**, 107-138.
- 長浜晴夫・照井一明・長沼幸男・佐藤松男, 1980, 斜層理・礫からみた浦幌層群の供給源. 日本地質学会第 87 年学術大会講演要旨, 200.
- 七山 太, 1992, 北海道中軸部, 日高帯・中の川層群において認められる 3 帯の petroprovince とその意義. 地質学論集, 38 号, 27-42.
- 七山 太・雁澤好博, 1997, 日高帯中の中の川層群北部ユニットの堆積層序, 堆積環境および堆積年代. 地質学論集, 47 号, 279-293.
- Nanayama, F., Kanamatsu, T. and Fujiwara, Y., 1993, Sedimentary petrology and paleotectonic analysis of the arc-arc junction: the Paleocene Nakanogawa Group in the Hidaka Belt, central Hokkaido, Japan., *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, **105**, 53-69.
- 七山 太・君波和雄, 1989, 北海道中軸帯“中の川層群”の堆積場・形成場. 月刊地球, **11**, 328-335.
- 七山 太・中川 充・加藤孝幸, 1993, 北海道東部, 最上部白亜系へ古第三系暁新世の碎屑性クロムスピネル. 地質雑, **99**, 629-642.
- Nanayama, F., Takahashi, Y., Yamasaki, T., Nakagawa, M., Iwao, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2017, U-Pb zircon ages of the Nakanogawa Group in the Hidaka Belt, northern Japan: Implications for its provenance and the protolith of the Hidaka metamorphic rocks. *Island Arc*, <https://doi.org/10.1111/iar.12234>.
- Nelson, E.P. and Forsythe, R.D., 1989, Ridge collision at convergent margins: implications for Archean and post-Archean crustal growth. *Tectonophys.*, **161**, 307-315.
- 小笠原正継・柴田 賢・内海 茂, 1998, 北海道釧路地域の始新統浦幌層群別保層中の花崗岩質岩礫の K-Ar 年代と岩石学的特徴. 地質雑, **104**, 516-524.
- Okada H., Yamada, M., Matsuoka H., Murota, T. and Isobe, T., 1987, Calcareous nannofossils and biostratigraphy of the Upper Cretaceous and lower Paleogene Nemuro Group, eastern Hokkaido, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **93**, 329-348.
- Okamura, S., Arculus, R.J. and Martynov, Yu.A., 2005, Cenozoic magmatism of the north-eastern Eurasian margin: The role of lithosphere versus asthenosphere. *Jour. Petrol.*, **46**, 221-253.
- Okamura, S., Martynov, Y.A., Furuyama, K. and Nagao, K., 1998, K-Ar ages of the basaltic rocks from Far East Russia: constraints on the tectono-magmatism associated with the Japan Sea opening. *Island Arc*, **7**, 271-282.
- 大和田正明・小山内康人, 1989, 日高変成帯における花崗岩類の成因. 月刊地球, **11**, 252-257.
- 小山内康人, 1985, 静内川上流域における日高変成帯主 帯変成岩類の地質と変成分帯. 地質雑, **91**, 259-278.
- Parfenov, L.M. and Natal'in, B.A., 1986, Mesozoic tectonic evolution of northeastern Asia. *Tectonophys.*, **127**, 291-304.
- Pechersky, D.M., Shapiro, M.N. and Sharonova, Z.V., 1997, Palaeomagnetic study of the eastern Kamchatka Cretaceous-Palaeocene island arc: new evidence concerning palaeosubduction zone absolute motion. *Geophys. Jour. Int.*, **130**, 606-622.
- Plafker, G., Moore, J.C. and Winkler, G.R., 1994, Geology of the southern Alaska margin. *The Geology of North America Vol. G-1, The Geology of Alaska*. Geol. Soc. Amer., 389-449.
- Pospelov, I., Petrov, O., Shokalsky, S., Li, T.D. and Dong, S.W., 2016, New tectonic map of northern-central-eastern Asia: Position and evolution of Mesozoic sedimentary basins. *Global Geol.*, **19**, 261-276.
- 榊原正幸・田中啓策, 1986, 常呂帯佐呂間層群から発見されたイノセラムス. 地球科学,

- 40, 205–206.
- 佐々保雄・西田彰一, 1937, 南樺太東北部沿岸地域の地質に就いて. 地質雑, **44**, 1053–1086.
- Sato, K., Tatsumi, Y. and Prikhodko, V., 2003, Cenozoic volcanism in northern Sikhote Alin, Far East Russia, and its implication for the opening of the Japan Sea. *Frontier Res. Earth Evolut.*, **1**, 349–356.
- Scharman, M.R., Pavlis, T.L. and Ruppert, N., 2012, Crustal stabilization through the processes of ridge subduction: Examples from the Chugach metamorphic complex, southern Alaska. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **329–330**, 122–132.
- Şengör, A.M.C. and Natal'in, B.A., 1996, Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis. In Yin, A. and Harrison, T.M., eds, *The Tectonic Evolution of Asia*, Cambridge Univ. Press, New York, 486–640.
- Seton, M., Flament, N., Whittaker, J., Müller, R.D., Gurnis, M. and Bower, D.J., 2015, Ridge subduction sparked reorganization of the Pacific plate–mantle system 60–50 million years ago. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 1732–1740.
- Seton, M., Müller, R.D., Zahirovic, S., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Flament, N., Gurnis, M., Maus, S. and Chandler, M., 2012, Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth-Sci. Rev.*, **113**, 212–270.
- Shapiro, M.N. and Solov'ev, A.V., 2009, Formation of the Olyutorsky–Kamchatka foldbelt: a kinematic model. *Russian Geol. Geophys.*, **50**, 668–3681.
- Shibata, K., 1968, K–Ar age determinations on granitic and metamorphic rocks in Japan. *Rep. Geol. Surv. Japan*, **227**, 1–73.
- 柴田 賢・石原舜三, 1981, 北海道日高帯の花崗岩類の K–Ar 年代. 日本地質学会第 88 年学術大会講演要旨, 342.
- Syracuse, E.M. and Abers, G.A., 2006, Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **7**, Q05017, doi:10.1029/2005GC001045.
- 田近 淳, 1988, 北海道東部, 常呂帯の上部白亜系湧別層群の層序と構造—海溝付加体モデルの適用—. 地質雑, **94**, 817–836.
- 田近 淳, 1989, 日高帯北部の白亜紀「付加体」. 月刊地球, **11**, 323–327.
- 高橋 浩・志村俊昭・加藤聡美, 2018, 日高変成帯南部の深成変成岩類. 地質雑, **124**, 399–411.
- Takano, O., Itoh, Y. and Kusumoto, S., 2013, Variation in forearc basin configuration and basin-filling depositional systems as a function of trench slope break development and strike-slip movement: examples from the Cenozoic Ishikari–Sanriku–Oki and Tokai–Oki–Kumano–Nada forearc basins, Japan. In Itoh, Y. ed. *Mechanism of sedimentary basin formation: multidisciplinary approach on active plate margins*. InTech, Rijeka, <http://dx.doi.org/10.5772/56751>.
- Tang, J., Xu, W., Niu, Y., Wang, F., Ge, W., Sorokin, A.A. and Chekrtzhov, I.Y., 2016, Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous–Paleocene granitoids in the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Petrogenesis and implications for the oblique subduction of the paleo-Pacific plate. *Lithos*, **266–267**, 202–212.
- Tatsumi, Y., Sato, K. and Sano, T., 2000, Transition from arc to intraplate magmatism associated with backarc rifting: evolution of the Sikhote Alin volcanism. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1587–1590.
- Taylor, B. and Exon, N.F., 1987, An investigation of ridge subduction in the Woodlark–Solomons region: Introduction and overview. In Taylor, B. and Exon, N.F., eds, *Marine Geology, Geophysics, and Geochemistry of the Woodlark Basin – Solomon Islands*, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series, **7**, 1–24.
- Terekhov, E.P., Tsoy, I.B., Vashchenkova, N.G., Mozherovskii, A.V. and Gorovaya, M.T., 2008, Sedimentation settings and evolution history of the Kuril Basin (Sea of Okhotsk) in the Cenozoic. *Oceanology*, **48**, 609–617.
- Thorkelson, D.J., 1996, Subduction of diverging plates and the principles of slab window

- formation. *Tectonophys.*, **255**, 47-63.
- Thorkelson, D.J., Madsen, J.K. and Sluggett, C.L., 2011, Mantle flow through the Northern Cordilleran slab window revealed by volcanic geochemistry. *Geology*, **39**, 267-270.
- Tikhomirov, P.L., Akinin, V.V., Ispolatov, V.O., Alexander, P., Cherepanova, I.Yu. and Zagoskin, V.V., 2006, The Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt: Age of its northern part according to new Ar-Ar and U-Pb geochronological data. *Stratigr. Geol. Correl.*, **14**, 524-537.
- Torsvik, T.H., Doubrovine, P.V., Steinberger, B., Gaina, C., Spakman, W. and Domeier, M., 2017, Pacific plate motion change caused the Hawaiian-Emperor Bend. *Nature Commun.*, DOI: 10.1038/ncomms15660.
- Tosy, I.B., Terekhov, E.P., Shastinat, V.V., Gorovaya, M.T. and Mozherovskii, A.V., 2005, Age of the Kotikovaya Group in the Terpeniya Peninsula (Eastern Sakhalin). *Stratigr. Geol. Correl.*, **13**, 632-643.
- Toyoshima, T., 1991, Tectonic evolution of the Hidaka metamorphic belt and its implication in the Late Cretaceous-middle Tertiary tectonics of Hokkaido, Japan. *Sci. Rep. Niigata Univ., Ser. E*, **8**, 1-107.
- Verzhbitsky, E.V. and Kononov, M.V., 2006, Geodynamic evolution of the lithosphere of the sea of Okhotsk region from geophysical data. *Physcs Solid Earth*, **42**, 490-501.
- von Huene, R., Pecher, L.A. and Gutscher, M.-A., 1996, Development of the accretionary prism along Peru and material flux after subduction of Nazca Ridge. *Tectonics*, **15**, 19-33.
- Whittaker, J.M., Müller R.D., Leitchenkov, G., Stagg, H., Sdrolias, M., Gaina, C. and Goncharov, A., 2007, Major Australian-Antarctic plate reorganization at Hawaiian-Emperor bend time. *Science*, **318**, 83-86.
- Wu, J.T.-J., Jahn, B.-M., Nechaev, V., Chashchin, A., Popov, V., Yokoyama, K., Tsutsumi, Y., 2017, Geochemical characteristics and petrogenesis of adakites in the Sikhote-Alin area, Russian Far East. *Jour. Asian Earth Sci.*, **145**, 512-529.
- 山崎 徹・七山 太・高橋 浩・山下康平, 2018, 20 万分の1 地質図幅「広尾」及び関連地域に産する火成岩源岩石の全岩化学組成. 地質調査研究報告, **69**, 47-79.
- Zhao, P., Alexandrov, I., Jahn, B.-M. and Ivin, V., 2018, Timing of Okhotsk Sea Plate collision with Eurasia Plate: Zircon U-Pb age constraints from the Sakhalin Island, Russian Far East. *Jour. Geophys. Res.*, **123**, 8279-8293.
- Zhao, P., Alexandrov, I., Jahn, B.-M., Liao, J.-P. and Ivin, V., 2019, Late Eocene granites in the Central Sakhalin Island (Russian Far East) and its implication for evolution of the Sakhalin-Hokkaido orogenic belt. *Lithos*, **324-325**, 684-698.
- Zhao, P., Jahan, B.-M. and Xu, B., 2017, Elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Cretaceous to Early Paleogene granites and volcanic rocks in the Sikhote-Alin Orogenic Belt (Russian Far East): implications for the regional tectonic evolution. *Jour. Asian Earth Sci.*, **146**, 383-401.
- Zharov, A.E., 2005, Soth Sakhalin tectonics and geodynamics: A model for the Cretaceous-Paleogene accretion of the East Asian continental margin. *Russian Jour. Earth Sci.*, **7**, ES5002, doi:10.2205/2005ES000190.
- Zyabrev, S.V., 2011, Stratigraphy and structure of the central East Sakhalin accretionary wedge (eastern Russia). *Russian Jour. Pacific Geol.*, **5**, 313-225.

Abstract

The geotectonic setting of Eocene plutons in Hokkaido and Sakhalin remains poorly constrained. Here, we propose that the plutons are a geological manifestation of subduction of the Izanagi–Pacific ridge beneath the Amurian plate and the Okhotsk block. The Eocene plutons in northern Hokkaido and Sakhalin were emplaced in accretionary complexes formed at the eastern margin of the Amurian Plate. The differences in age of the plutons and the surrounding accretionary complexes are very small (under ten and several million years), suggesting that the Eocene emplacement of the plutons was a consequence of forearc magmatism. The Eocene accretionary complex in northern Hokkaido includes many MORB-type greenstones that were extruded on and intruded into unconsolidated terrigenous clastic sediments, implying the presence of active spreading ridge close to the trench. Our compilation of ages clearly reveals that the plutons from northern Hokkaido and Sakhalin show a northward-younging trend (70 km/my). This evidence suggests a northward migration of a heat source along the eastern margin of the Amurian Plate. The heat source is presumed to be subducted Izanagi–Pacific ridge. A magmatic hiatus at 51–48 Ma and extrusion of adakitic volcanic rocks at 46–39 Ma in the southern area of the East Shikhoté–Alin volcanic belt could be resulted from slab window caused by the subduction of the Izanagi–Pacific ridge. Because the plutons in southern Hokkaido were emplaced in an accretionary complex formed at the western margin of the Okhotsk Block but not the eastern margin of the Amurian plate, they deviate from the younging trend shown by the plutons in northern Hokkaido and Sakhalin. Additionally, we examine the geodynamic development of the circum-Okhotsk Sea regions from the Late Cretaceous to the Late Oligocene in order to shed light on the role of Eocene ridge-subduction in the history.