西北海道の白亜紀-古第三紀前弧の後背地変遷 —蝦夷層群の碎屑性ジルコン U-Pb 年代測定—

石坂湧人* 磯崎行雄* 堤之恭**

Provenance Change in Cretaceous–Paleogene Fore-arc in Western Hokkaido: U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Yezo Group

Yuto ISHIZAKA*, Yukio ISOZAKI* and Yukiyasu TSUTSUMI**

[Received 1 July, 2020; Accepted 30 September, 2020]

Abstract

To reconstruct the tectono-sedimentary history of the Cretaceous–Paleogene arc-trench system in western Hokkaido, U-Pb ages were measured of detrital zircons in 11 Cretaceous and Paleogene fore-arc sandstones of the Yezo Group in the Oyubari and Mikasa areas. Age spectra of dated zircons demonstrate that Aptian sandstones of the basal Yezo Group are characterized by the dominant occurrence of Early Cretaceous grains with small amounts of Jurassic, Triassic, Permian, and Precambrian grains (Type 1). In contrast, those of Cenomanian to Paleocene sandstones of the middle to upper Yezo Group are dominated almost totally by mid- to Late Cretaceous grains (Type 2). This remarkable change from Type 1 to Type 2 occurred irreversibly during the Albian, indicating that the surface crust in the provenance in western Hokkaido was significantly renewed then. Among nine sandstones of Type 2, a positive correlation exists between zircon peak age and stratigraphic age, suggesting the unidirectional/gradual replacement of exposed magmatic rocks in the provenance, in particular, new volcanics/intrusives (Rebun–Kabato belt to the west). The pre-Cretaceous zircons in Type 1 sandstones were probably recycled from sandstones in the Jurassic accretionary complexes of the Oshima belt to the west. The coeval and identical turnover in zircon age spectra of the Cretaceous fore-arc sandstones recognized in Southwest Japan, from Kyushu to Kanto district, suggests that the fore-arc basin and its provenance with monotonous arc crustal rocks have ubiquitously developed along the Cretaceous East Asian margin over more than 1,500 km before the Miocene opening of the Japan Sea.

Key words : detrital zircon, U-Pb age, Cretaceous, sandstone, fore-arc

キーワード : 碎屑性ジルコン, ウラン-鉛年代, 白亜紀, 砂岩, 前弧

* 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系宇宙地球科学教室

** 国立科学博物館地学研究部

* Department of Earth Science and Astronomy, The University of Tokyo, Tokyo, 153-8902, Japan

** Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science, Tsukuba, 305-0005, Japan

I. はじめに

日本列島は約 5 億年に及んで成長した太平洋型（都城型）造山帯の一部にあたるが、その構成地質体が今日まで継続するテクトニクスの影響で、より古期の要素から順次改変を被った結果、現在の日本列島の地殻は白亜紀以降の地質体で占められ、先白亜紀地質体は表層にごく小規模に残存するのみである (Isozaki *et al.*, 2010 など)。とくに、中新世におきた背弧地殻展張による日本海形成は、アジア東縁から日本列島を独立させ、また西南日本と東北日本との分断など日本列島地殻に大きな改変を加えた (Otofujii *et al.*, 1985; 中嶋, 2018 など)。ただし、日本列島には白亜紀の弧-海溝系の構成要素（弧花崗岩類、低温・高圧型変成岩類、および前弧堆積体）が断片化した地質体として比較的多く保存されており、それらの配列に基づき先日本海の古地理復元が試みられてきた (Maruyama *et al.*, 1997; Isozaki *et al.*, 2010 など)。

近年、白亜紀前弧砂岩の碎屑性ジルコン U-Pb 年代測定に基づく後背地解析と古地理復元の研究が西南日本を中心に進められている (Aoki *et al.*, 2012; 中畑ほか, 2016a, b; Ikeda *et al.*, 2016; Shunori *et al.*, 2018; 長谷川ほか, 2019, 2020 など)。その結果、(1) ほぼ同様の後背地を共有する一連の白亜紀前弧堆積盆地が西南日本だけで総延長 1,000 km 以上連続していたこと、また (2) 白亜紀中葉アルビアン頃に後背地の表層地殻岩石構成の改変が、西南日本ではほぼ同時に起きたことが解明された (長谷川ほか, 2020)。一方、日本海拡大時に西南日本とは別のブロックとして挙動した東北日本については、北上山地の宮古地域において予察的報告がある (長谷川ほか, 2018) もの、まだ情報が不足している。

北海道には、上述の西南日本の白亜紀前弧堆積体に対比される厚い碎屑岩相白亜系蝦夷層群が知られており (Matsumoto, 1942; Ando, 2003; Takashima *et al.*, 2004 など)、白亜紀の神居古潭低温・高圧型変成岩や空知オフィオライトと共に南北方向に伸びる空知-蝦夷帯を構成する (図

1A; 君波ほか, 1985; Ueda *et al.*, 2000)。同帯は西側の白亜紀火山弧に相当する礼文-樺戸帯と、東側の白亜紀海溝域に相当するイドンナップ帯に挟まれ、白亜紀の前弧地殻から構成される (君波ほか, 1985; 木村, 1985; 紀藤ほか, 1986; 新井田・紀藤, 1986 など)。

蝦夷層群は豊富に産する化石（アンモナイトや有孔虫など）や凝灰岩の放射性年代測定に基づき、下部白亜系アプチアン階から古第三系暁新統に対比される (Obradovich *et al.*, 2002; Nishi *et al.*, 2003; Quidellur *et al.*, 2011; Takashima *et al.*, 2019; Kuwabara *et al.*, 2019 など)。砂岩の粒子組成や古流向、礫の放散虫化石群集に基づき、後背地は西隣の礼文-樺戸帯やジュラ紀付加体からなる渡島帯であったと推定されている (田中・角, 1981; 紀藤ほか, 1986; 君波ほか, 1992; 高嶋ほか, 1997, 2001)。しかし、砂岩中の碎屑性ジルコン U-Pb 年代測定の報告例は少なく、後背地の岩石構成や経年変化の詳細は不明である。

本研究では、日本海形成前の白亜紀弧-海溝系の詳細な古地理復元のため、日本列島の中でもっとも北に産する白亜紀前弧堆積体である蝦夷層群を対象に、砂岩中の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代を測定した。その結果、西北海道の白亜紀弧-海溝系で起きた後背地地殻の変遷や西南日本からの地体構造上の連続性について新知見が得られた。本稿ではその結果を報告し、白亜紀東アジアの古地理について考察する。

II. 地質概説

北海道の地体構造単元のなかで、渡島帯からイドンナップ帯までの北海道西部は本州弧の北方延長部に、一方、日高帯（西縁部を除く）から根室帯にかけての北海道東部は千島弧の西方延長部にあたるとされる (図 1A)。西北海道の 4 つの地体構造単位、すなわち、西から渡島帯（ジュラ紀付加体および白亜紀後期花崗岩類）、礼文-樺戸帯（白亜紀前期火山岩類）、空知-蝦夷帯（ジュラ紀-白亜紀前期オフィオライト、白亜系-暁新統碎屑岩類、および低温高圧型変成岩）、そしてイドンナップ帯（白亜紀後期-古第三紀付加体）は、い

図 1 西北北海道の地体構造区分 (A) と白亜紀の弧-海溝系の模式断面図 (B) (君波ほか, 1985; Ueda *et al.*, 2000 を改変). A: 西北北海道の地体構造単位は、西より順に渡島帯 (ジュラ紀付加体), 礼文-樺戸帯 (白亜紀前期火山岩類), 空知-蝦夷帯 (ジュラ系-下部白亜系火山岩および火山碎屑岩類, 上部白亜系-晩新統碎屑岩類), そしてイドンナップ帯 (白亜紀後期-古第三紀付加体) からなる。これらは南北方向に帯状配列し、東北地方へと連続する本州弧の構成要素をなす (君波ほか, 1985)。蝦夷層群は空知-蝦夷帯に産し、北から中頓別, 天塩中川, 大夕張および三笠地域に主要な分布域をもつ。B: 渡島帯および礼文-樺戸帯は白亜紀の火山弧の領域で、またイドンナップ帯は海溝域で形成された地質体でおおの構成される。それらの間に挟まれる空知-蝦夷帯には、当時の前弧域で形成された、低温高压型神居古潭変成岩や前弧盆地に堆積した蝦夷層群が産する。これらの配列は、白亜紀のアジア東縁における西向きプレート沈み込みを記録している。

Fig. 1 Geotectonic subdivision of western Hokkaido (A) and schematic profile of Cretaceous arc-trench system (B) (modified from Kiminami *et al.*, 1985; Ueda *et al.*, 2000). A: Western Hokkaido consists of four belts; i.e., from west to east, Oshima belt (Jurassic accretionary complex), Rebun-Kabato belt (Early Cretaceous volcanics), Sorachi-Yezo belt (Jurassic to Lower Cretaceous ophiolite, Cretaceous blueschists, and Cretaceous-Paleocene shallow marine to non-marine clastics), and Idonnappu belt (Upper Cretaceous-Paleogene accretionary complex). These belts aligned in the N-S direction correlate with those on Honshu island to the south. Cretaceous-Paleocene strata in the Sorachi-Yezo belt, Yezo Group, occur in the Nakatonbetsu, Teshionakagawa, Oyubari, and Mikasa areas from north to south. B: Oshima and Rebun-Kabato belts correspond to Cretaceous volcanic arc, whereas Idonnappu belt corresponds to coeval trench with active accretion. Between them, Cretaceous blueschists, ophiolite, and Yezo Group of the Sorachi-Yezo belt represent the fore-arc domain of the same arc-trench system in western Hokkaido. Their current spatial arrangement (A) suggests the westward subduction of an oceanic plate along Cretaceous east Asia.

図 2 三笠地域および大夕張地域に分布する蝦夷層群の層序表 (Takashima *et al.*, 2004 を簡略化) および砂岩試料の採取層準。各層の地質年代および地域間対比に関しては, Takashima *et al.* (2004) および Cohen *et al.* (2013) にしたがう。

Fig. 2 Stratigraphic chart of Yezo Group in Mikasa and Oyubari areas (simplified from Takashima *et al.*, 2004) with horizons of dated samples (star). Global and local correlation of Yezo Group are compiled from Takashima *et al.* (2004) and Cohen *et al.* (2013).

ずれも白亜紀の弧-海溝系の要素から構成される (図 1B)。すなわち、渡島帯/礼文-樺戸帯は白亜紀の火山弧に、そしてイドンナップ帯は当時の海溝におおの相当し、それらの南北方向の帯状配列は東アジア東縁での西向きのプレート沈み込みを記録している (図 1B; 君波ほか, 1985; 木村, 1985; 紀藤ほか, 1986; 新井田・紀藤, 1986; Ueda *et al.*, 2000 など)。その間に挟まれる空知-蝦夷帯には、白亜紀の低温・高圧型神居古潭変成岩、ジュラ紀の幌加内オフィオライト、そして厚い浅海-非海成碎屑岩相白亜系-古第三系が産し、同帯は白亜紀の前弧域とみなされている。

空知-蝦夷帯の白亜系-古第三系の半深海-非海成碎屑岩相は、下位から順に空知層群、蝦夷層群、そして石狩層群からなる (図 2)。蝦夷層群は、厚いタービダイト層からなり、その積算層厚 10,000 m に達する。その分布は、北から中頓別、

天塩中川、苫前、大夕張、三笠、そして浦河地域まで南北に約 380 km、東西に約 70 km の幅に及ぶ。同層群は、幌加内オフィオライトおよびその被覆層である上部ジュラ系-下部白亜系空知層群を不整合に覆う一方 (紀藤ほか, 1986; 君波ほか, 1992; 高嶋ほか, 2001)、古第三系始新統の石狩層群に不整合に覆われる (Takashima *et al.*, 2004)。蝦夷層群が堆積した前弧盆地は前期白亜紀アプチアンから古第三系暁新世まで存続したが、盆地の規模が最大に及んだのは後期白亜紀の前半で、その後白亜紀末から暁新世には縮小し、堆積相も海成層に代わって非海成層主体となった (Ando, 2003)。

蝦夷層群は保存良好な海棲生物化石 (アンモナイト、二枚貝、浮遊性・底生有孔虫、放散虫、石灰質ナノプランクトンなど) を多産し、その層序は永年詳しく検討されてきた (Matsumoto, 1942;

図 3 三笠および大夕張地域における蝦夷層群砂岩の試料採取位置図 (Takashima *et al.*, 2004 を簡略化；より詳細は電子付録 1 を参照)。

Fig. 3 Geological maps of Mikasa and Oyubari areas (simplified from Takashima *et al.*, 2004), showing sample localities (refer to Electronic Appendix 1 for more details).

本山ほか, 1991; Nishi *et al.*, 2003; Koyasu *et al.*, 2019 など)。本稿では、より詳細な岩相層序の対比に基づいた Takashima *et al.* (2004) の層序区分ならびに地層名を用いる (図 2)。

蝦夷層群の主要分布域である大夕張地域および三笠地域 (図 3) では、南西-北東方向の衝上断層によって、蝦夷層群の分布が西半と東半に二分される (Takashima *et al.*, 2004)。大夕張地域では、蝦夷層群は次の 7 層から構成される。すなわち、下位より、惣芦別川層 (アプチアン下部泥岩卓越層)、シューパロ川層 (アプチアン下部-アルビアン上部砂岩卓越層)、丸山層 (アルビアン上部凝灰質砂岩層)、日陰の沢層 (アルビアン上部-セノマニアン上部泥岩卓越層)、佐久層 (セノマニアン上部-チューロニアン中部砂岩泥岩互層卓越層)、鹿島層 (チューロニアン上部-カンパニアン泥岩卓越層)、そして函淵層 (カンパニアン-

暁新世後期砂岩卓越層) である (図 2)。一方、三笠地域では、三笠層 (セノマニアン-チューロニアン砂岩卓越層) および羽幌川層 (コニアシアン-カンパニアン泥岩卓越層) が、大夕張地域の佐久層および鹿島層とおのの同時異相の関係にあるとされる (図 2; Takashima *et al.*, 2004)。

本研究では蝦夷層群の砂岩に含まれる碎屑性ジルコンの U-Pb 年代組成とその経年変化を解明するために、同層群のほぼ全層準を対象に、三笠地域から 8 試料 (蝦夷層群の日陰の沢層、三笠層、羽幌川層、および函淵層) と大夕張地域から 3 試料 (惣芦別川層、シューパロ川層、および鹿島層)、合計 11 試料の砂岩を採取した (図 2)。各試料採取地点を図 3 に、またその詳細を電子付録 1 および 2 に示す。

III. 碎屑性ジルコンの U-Pb 年代

上述の砂岩 11 試料から碎屑性ジルコンを分離し、国立科学博物館の LA-ICPMS を用いて U-Pb 年代測定を行った。ジルコン分離および測定手法の詳細、コンコダントの判定基準は電子付録 3 に示す。すべての砂岩試料から多数の碎屑性ジルコン粒子が分離され、カソードルミネッセンス像の観察により明瞭なオシラトリー累帯構造をもつ粒子（電子付録 4）のみを年代測定した。また累帯構造をもつジルコン粒子の Th/U 比はすべて 0.1 以上である。Tsutsumi and Horie (2019) にしたがうとこれらの値は測定したジルコンが火成起源であることを支持する。おのおのの砂岩試料から得られた碎屑性ジルコンの $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年代の分析表およびコンコーディア図を電子付録 5 および 6 に示す。本稿ではコンコダントと判断された測定値のみを有効なジルコン U-Pb 年代値として採用した。各試料のジルコン年代スペクトルをヒストグラムおよび確率頻度曲線として図 4 に示す。各試料について記した YSG は最若粒子年代であり、また YC1 σ は最若年代と 1 σ の誤差範囲内で重なる 2 つ以上の年代（最若年代が孤立している場合は順次若い年代が算出の起点となる）の加重平均 (Dickinson and Gehrels, 2009) であり、おのおのの誤差表記は 1 σ とする。YSG および YC1 σ の算出に用いたデータを電子付録 7 に、各試料分析時の二次標準試料測定結果を電子付録 8 に示す。得られたジルコン年代の地質年代との対比は Cohen *et al.* (2013; updated in 2020) に従う。以下、各試料の年代スペクトルについて、層序学的下位の試料から順に記述する。

1) シューパロ川^{れふれつぷ}層礼振峰砂岩部層

16HK2: 明瞭なオシラトリー累帯構造をもつ 53 粒のなかで、コンコダント年代をもつと判定された粒子は 42 粒であった。それらの年代範囲は 1971–127.56 Ma と幅広い（電子付録 5B, 6B）。229–128 Ma（三畳紀後期から白亜紀前期）の粒子が卓越し、YSG は 127.6 ± 1.9 Ma, YC1 σ は 128.6 ± 1.2 Ma で、白亜紀前期バレミアンに

あたる。顕生代以前の古期粒子として 1971–1875 Ma（古原生代）の 4 粒と 836 Ma（新原生代）の 1 粒を含む。

16HK1: 明瞭なオシラトリー累帯構造を呈する 90 粒のうちコンコダント年代をもつと判定された粒子は 79 粒であった。それらの年代範囲は 2539–119.9 Ma に及ぶ（電子付録 5A, 6A）。183–120 Ma（ジュラ紀前期から白亜紀前期）の粒子が卓越し、266–216 Ma（ペルム紀中期から三畳紀後期）の粒子を伴う。YSG は 119.9 ± 2.4 Ma, YC1 σ は 122.7 ± 0.9 Ma で、白亜紀前期アプチアンにあたる。古期粒子として 2539 Ma（新太古代）の 1 粒と 2277–1850 Ma（古原生代）の 4 粒を含む。

2) 日陰の沢層

16HK8: 明瞭なオシラトリー累帯構造を呈する 96 粒のなかでコンコダント年代をもつと判定された粒子は 93 粒であり、それらの年代範囲は 2027–95.78 Ma と幅広い（電子付録 5H, 6H）。147–96 Ma（ジュラ紀後期から白亜紀後期初期）の粒子が卓越し、YSG は 95.8 ± 1.2 Ma, YC1 σ は 97.3 ± 0.8 Ma で、白亜紀中葉セノマニアンにあたる。古期粒子として 2027–1841 Ma（古原生代）の 7 粒と 760 Ma（新原生代）の 1 粒を含む。

16HK9: 明瞭なオシラトリー累帯構造を呈する 92 粒のなかでコンコダント年代をもつと判定された粒子は 81 粒であり、それらの年代範囲は 2204–91.71 Ma と幅広い（電子付録 5I, 6I）。138–92 Ma（白亜紀前期から白亜紀後期初期）の粒子が卓越し、272–149 Ma（ペルム紀中期からジュラ紀後期）の粒子を伴う。YSG は 91.7 ± 2.7 Ma, YC1 σ は 97.7 ± 0.9 Ma で、セノマニアン–チューロニアンにあたる。古期粒子として 2204–1831 Ma（古原生代）の 9 粒を含む。

3) 三笠層

16HK7: 明瞭なオシラトリー累帯構造を呈する 97 粒のなかでコンコダント年代をもつと判定された粒子は 92 粒であり、それらの年代範囲は 2060–86.98 Ma と幅広い（電子付録 5G, 6G）。148–87 Ma（ジュラ紀後期から白亜紀後期）の粒子が卓越し、253–160 Ma（ペルム紀後期から

図 4 蝦夷層群砂岩に含まれる碎屑性ジルコンのU-Pb年代スペクトル（ヒストグラムと確率分布曲線で示す）。A：蝦夷層群最下部，シュエバロ川層下部の富間砂岩（16HK1，16HK2），B：同層群主部，日陰の沢層（16HK8，16HK9）および三笠層（16HK7，16HK6）の砂岩，C：同層群主部および上部の羽幌川層（16HK12，16HK10，16HK5），鹿島層上部（16HK11），および函淵層上部（16HK4）の砂岩。分析値の表は電子付録5を参照。

Fig. 4 U-Pb age spectra of detrital zircons in sandstones of Yezo Group (shown by histograms and probability distribution curves). A: Tomitai sandstone, lower part of Shuparogawa Formation, lowermost part of Yezo Group (16HK1, 16HK2), B: Hikagenosawa Formation (16HK8, 16HK9) and Mikasa Formation (16HK7, 16HK6), main part of Yezo Group, C: Haborogawa Formation (16HK12, 16HK10, 16HK5), upper part of Kashima Formation (16HK11) and upper part of Hakobuchi Formation (16HK4), main and upper part of Yezo Group. Refer to Appendix 5 for tables of analytical values.

ジュラ紀後期)の粒子を伴う。YSGは 87.0 ± 1.3 Ma, $YC1\sigma$ は 88.4 ± 0.7 Maで，白亜紀後期コニアシアン-サントニアンにあたる。古期粒子と

して2060–1860 Ma（古原生代）の5粒を含む。

16HK6：明瞭なオシラトリ-累帯構造を呈する88粒のU-Pb年代を測定した。測定粒子のう

ちコンコードアント年代をもつと判定された粒子は 80 粒であり、それらの年代範囲は 1884-82.45 Ma と幅広い（電子付録 5F, 6F）。97-82 Ma（白亜紀後期）の粒子が卓越し、YSG は 82.4 ± 1.8 Ma, YC1 σ は 84.7 ± 0.3 Ma で、白亜紀後期サントニアン-カンパニアンにあたる。古期粒子として 1884 Ma（古原生代）の 1 粒を含む。

4) 羽幌川層

16HK12：明瞭なオシラトリ-累帯構造を呈する 96 粒のうちコンコードアント年代をもつと判定された粒子は 91 粒であり、それらの年代範囲は 1892-80.92 Ma と幅広い（電子付録 5L, 6L）。105-81 Ma（白亜紀前期末から後期）の粒子が卓越し、YSG は 80.9 ± 1.7 Ma, YC1 σ は 82.8 ± 0.5 Ma で、カンパニアンにあたる。古期粒子として 1892 Ma（古原生代）の 1 粒を含む。

16HK10：明瞭なオシラトリ-累帯構造を呈する 85 粒のうちコンコードアント年代をもつと判定された粒子は 84 粒であり、それらの年代範囲は 2345-85.20 Ma と幅広い（電子付録 5J, 6J）。118-85 Ma（白亜紀前期末から後期）の粒子が卓越し、YSG は 85.2 ± 1.4 Ma, YC1 σ は 86.3 ± 0.5 Ma で、コニアシアン-サントニアンにあたる。古期粒子として 2345-1816 Ma（古原生代）の 4 粒を含む。

16HK5：明瞭なオシラトリ-累帯構造を呈する 84 粒のうちコンコードアント年代をもつと判定された粒子は 79 粒であり、それらの年代範囲は 2419-77.60 Ma と幅広い（電子付録 5E, 6E）。112-78 Ma（白亜紀前期末から白亜紀後期）の粒子が卓越し、YSG は 77.6 ± 2.2 Ma, YC1 σ は 80.1 ± 0.5 Ma で、カンパニアンにあたる。古期粒子として 2419 Ma（古原生代）の 1 粒を含む。

5) 鹿島層

16HK11：明瞭なオシラトリ-累帯構造を呈する 91 粒のうちコンコードアント年代をもつと判定された粒子は 87 粒であり、それらの年代範囲は 2160-74.80 Ma と幅広い（電子付録 5K, 6K）。105-75 Ma（白亜紀前期末から後期）の粒子が卓越し、YSG は 74.8 ± 2.0 Ma, YC1 σ は 76.8 ± 0.5 Ma で、カンパニアンにあたる。古期粒子として、

2160 Ma（古原生代）のものが 1 粒、そして 729 Ma（新原生代）のものが 1 粒含まれる。

6) 函淵層上部

16HK4：明瞭なオシラトリ-累帯構造をもつ 83 粒のうちコンコードアント年代をもつと判定された粒子は 82 粒であり、それらの年代範囲は 496-61.76 Ma である（電子付録 5D, 6D）。122-62 Ma（白亜紀前期から古第三紀始新世）の粒子が卓越し、YSG は 61.8 ± 2.2 Ma, YC1 σ は 64.3 ± 1.1 Ma で、古第三紀暁新世ダニアンにあたる。先カンブリア時代粒子は含まない。

IV. 考 察

1) 白亜系-古第三系砂岩の堆積年代

まず碎屑性ジルコン U-Pb 年代に基づき、各砂岩試料の堆積年代を推定し、既報の化石年代（おもに浮遊性有孔虫・イノセラムス）および挟在する凝灰岩の放射性年代値と比較・検証する。以下、層序学的下位の試料から順に議論する。

シューパロ川層礼振峰砂岩部層最下部（16HK2）：YC1 σ は 128.6 ± 1.2 Ma（バレミアン）であり、本砂岩の堆積年代はバレミアンないしそれ以降に制限される。本層の模式地のシューパロ川流域の礼振峰砂岩部層からは、アプチアンの浮遊性有孔虫 *Leupoldina cabri* が産し（Ando *et al.*, 2002）、碎屑性ジルコン年代とも矛盾しない。以上のことから本試料の年代はアプチアンと判断される。

シューパロ川層礼振峰砂岩部層中部（富間砂岩層）（16HK1）：YC1 σ は 122.7 ± 0.9 Ma（アプチアン）であり、本砂岩の堆積年代はアプチアンないしそれ以降に制限される。同地域の同層凝灰岩中の火成ジルコンは 125-120 Ma の U-Pb 年代（アプチアン前期；幸田・植田, 2018）をもち、本試料の YC1 σ と整合的である。このジルコン年代は、上述の本層模式地の礼振峰砂岩部層から産する浮遊性有孔虫の年代と矛盾しない。以上のことから、本試料の年代はアプチアンと判断される。

日陰の沢層（16HK8・16HK9）：2 試料の YC1 σ はおのおの 97.3 ± 0.8 Ma および 97.7 ± 0.9 Ma（セノマニアン）であり、これら砂岩の堆積年代

はセノマニアンないしそれ以降に制限される。同地域の本層からはアルビアン後期からセノマニアン中期を示すアンモナイト *Mortoniceras rostratum*, *Mantelliceras saxbii*, そして *Cunningtoniceras cunningtoni* が (Kawabe *et al.*, 2003), また大夕張地域の本層からは *Biticinella breggionensis* 帯, *Pseudothalmaninella subticinensis*-*Pseudothalmaninella ticinensis* 帯, *Parathalmaninella appenninica* 帯, *Thalmaninella globotruncanoides* 帯, そして *Rotalipora cushmani* 帯の浮遊性有孔虫群集が産し, 本層はアルビアン上部からセノマニアン上部に対比されてきた (Nishi *et al.*, 2003)。また, 本層中の複数の凝灰岩から放射性年代が報告されており, 苦前地域の本層下部の凝灰岩中のサニディンは 99.16 ± 0.37 Ma および 98.98 ± 0.38 Ma という ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代 (Obradovich *et al.*, 2002) をもつ。また同地域の別の凝灰岩のジルコンは 99.7 ± 0.3 Ma, 大夕張地域の本層下部の凝灰岩のジルコンは 99.7 ± 1.1 Ma と 98.0 ± 2.1 Ma (Quidelleur *et al.*, 2011), さらに夕張地域の本層下部の凝灰岩のジルコンは 96.10 ± 0.61 Ma という U-Pb 年代 (Kuwabara *et al.*, 2019) をもつ。これらはいずれもセノマニアンにあたる。このように 2 試料の YC1 σ , 既報の化石年代, および凝灰岩の年代はすべて整合的であり, 2 試料の年代はセノマニアンと判断される。

三笠層 (16HK7・16HK6): 2 試料の YC1 σ はそれぞれ 88.4 ± 0.7 Ma (コニアシアン) および 84.7 ± 0.3 Ma (サントニアン) であり, おおのの堆積年代はそれ以降に限定される。これに対して同層中部の試料 16HK7 層準 (安藤, 1987 の Twb 部層) から年代決定に有効な化石は未報告だが, 下部 (Twa 部層) からセノマニアンとされる *Inoceramus yabei* が, また上部 (Twc 部層; 試料 16HK6 層準) からチューロニアン中期とされる *Inoceramus hobetsensis* が産し (安藤, 1987), これまで本層の年代はセノマニアンからチューロニアン中期と推定されていた。したがって, 2 試料の YC1 σ から推定される堆積年代はどちらも上部の化石年代より約 5-10 Myr 若く, 二

枚貝の年代と一致しない。

この不一致については以下のように考察される。そもそも三笠層は顕著な岩相の側方変化を示し, かつ鍵層となる凝灰岩に乏しいため, 他地域との対比が困難とされてきた (安藤, 1987)。また浮遊性微化石の産出が乏しく, 高分解能の微化石年代は不明である (Nishi *et al.*, 2003)。さらに本試料を採取した奔別川流域 (電子付録 1A) では, 三笠層に整合に累重する羽幌川層も化石に乏しい。一方で, 蝦夷層群全体の有機炭素同位体比曲線は, 北米や欧州の白亜系炭酸塩岩の無機炭素同位体比曲線と高解像度で対比されており, また浮遊性有孔虫の層序および年代推定も欧州の例とよく一致する (Takashima *et al.*, 2010, 2019) もの, 日本で伝統的に用いられてきたイノセラムス化石分帯については北米や欧州の例とは一致しないことが指摘され, 年代論の再評価が必要となっている (Takashima *et al.*, 2010; Hayakawa and Hirano, 2013 など)。以上のように, 三笠層の年代推定については不確定性が残されているが, 同層の対比に関する議論に於いて想定しうる不一致の年代幅は 5 Myr に及ばない。三笠層の堆積年代についてさらに検討が必要だが, 本稿ではジルコン年代に基づき, 三笠層上部の堆積年代をコニアシアン-サントニアンとしておく。

羽幌川層 (16HK10・16HK12・16HK5): 3 試料の YC1 σ はそれぞれ 82.8 ± 0.5 Ma (カンパニアン), 86.3 ± 0.5 Ma (サントニアン), そして 80.1 ± 0.5 Ma (カンパニアン) であり, おおのの砂岩の堆積年代を制限する。苦前地域の本層からは *Marginotruncana pseudolinneiana* 帯, *M. sinuosa* 帯, *Contusotruncana fornicata* 帯, そして *Globotruncana arca* 帯の浮遊性有孔虫群集が産し, コニアシアンからカンパニアンに対比される (Nishi *et al.*, 2003)。一方, 浦河地域の本層下部の凝灰岩中のジルコンは 89.9 ± 0.60 Ma (チューロニアン) という U-Pb 年代 (Kuwabara *et al.*, 2019) を, また苦前地域の本層下部の凝灰岩中のジルコンは 86.9 ± 0.60 Ma (コニアシアン), さらに本層上部の凝灰岩中のジルコンは 84.7 ± 0.7 Ma (サントニアン) という U-Pb 年

代をもつ (Takashima *et al.*, 2019)。3 試料の YC1 σ は、化石年代および凝灰岩のジルコン U-Pb 年代と整合的であることから、羽幌川層の堆積年代は、16HK10・16HK12、そして 16HK5 がおのおのサントニアン、そしてカンパニアンと判断される。

鹿島層 (16HK11): YC1 σ は 76.8 ± 0.5 Ma (カンパニアン) であり、本試料の堆積年代はカンパニアンないしそれ以降に限定される。同地域の本層からは *Marginotruncana pseudolinneiana* 帯, *M. sinuosa* 帯, *Contusotruncana fornicata* 帯, そして *Globotruncana arca* 帯の浮遊性有孔虫群集が産し、本層はチューロニアン上部からカンパニアン下部に対比されてきた (Nishi *et al.*, 2003)。浦河地域の本層下部の凝灰岩中のジルコンは 89.94 ± 0.98 Ma (チューロニアン) (Kuwabara *et al.*, 2019) を、また富内地域 (大夕張地域の約 30 km 南方) の本層上部の凝灰岩中のジルコンは 84.9 ± 0.2 Ma (サントニアン) という U-Pb 年代 (Quidelleur *et al.*, 2011) をもつ。本試料の YC1 σ は化石年代および凝灰岩のジルコン U-Pb 年代と大きく矛盾せず、本試料の堆積年代はカンパニアンと判断される。

函淵層上部 (16HK4): YC1 σ は 64.3 ± 1.1 Ma (暁新世ダニアン) であり、本試料の堆積年代はダニアンないしそれ以降に制限される。中頓別地域の本層下部からカンパニアンの浮遊性有孔虫 *Globotruncana rugosa* (Yasuda, 1986)、本層上部から暁新世の浮遊性有孔虫 *Subbotina triloculinoides* (Yasuda, 1986)、そして暁新世の石灰質ナノ化石群集が産する (岡田ほか, 1998)。また、大夕張地域の本層上部から暁新世後期の渦鞭毛藻シスト化石 *Alisocysta margarita* の産出 (鈴木ほか, 1997) も報告されており、本層はカンパニアンから暁新世に及ぶとされてきた。本試料の YC1 σ はこれらの化石年代と矛盾せず、本試料の堆積年代は暁新世後期と判断される。

以上のように、蝦夷層群 11 試料の砂岩中の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代を測定した結果、ほとんどの試料について従来のアンモナイト化石および浮遊性有孔虫化石に基づく対比は妥当であった

と判断される。すなわち、従来の知見どおりシュエパロ川層はアプチアンに、日陰の沢層はセノマニアンに、羽幌川層はコニアシアン-サントニアンに、そして鹿島層はチューロニアン-カンパニアンに、おのおの対比されることが確認された。ただし三笠層については、碎屑性ジルコンの年代制限と従来の推定年代とが一致せず、さらなる検討が必要である。

2) 年代スペクトルの 2 タイプ

本研究で得られたジルコン年代スペクトルに基づき、蝦夷層群の堆積場の後背地について考察する。測定した全 11 試料の碎屑性ジルコン U-Pb 年代スペクトルを比較すると、次の 2 つのタイプが明瞭に識別される (図 5)。すなわち試料 16HK1 および 16HK2 の 2 試料からなるタイプ 1 (図 4A)、そして試料 16HK4 から 16HK12 までの 9 試料からなるタイプ 2 (図 4B, C) である。タイプ 1 の年代スペクトルは、白亜紀前期の粒子 (140–110 Ma) を主とするものの、その他にジュラ紀 (215–201 Ma)、三畳紀 (252–220 Ma)、ペルム紀 (260–252 Ma) および先カンブリア時代に及ぶ広い年代範囲の粒子を含むことを特徴とする。これに対して、タイプ 2 の年代スペクトルは、白亜紀中頃から後期の粒子 (100–70 Ma) のみが極端に卓越し、白亜紀以前の粒子はきわめて少なく (図 4B, C)、また集中する年代幅がきわめて狭いことが特徴である。

これらの 2 タイプの砂岩は、堆積年代の違いによって層序学的に明確に区別される (図 5)。すなわち、タイプ 1 は蝦夷層群底部の砂岩のみに、一方タイプ 2 は蝦夷層群上半の砂岩のみに認められる。したがって、蝦夷層群の堆積期間中に、堆積場に流入した碎屑粒子の種類が非可逆的に大きく変化したことが明らかになった。

この碎屑性ジルコンの年代スペクトルのタイプが示す経年変化は、西北海道の前堆積場の後背地の表層地殻組成の変化を記録している。また 2 つのタイプの変遷は漸移的ではなく、白亜紀中頃のアルビアンに急速におきたことから、後背地である火山弧での表層地殻組成の急変を反映していると考えられる。さらに、タイプ 2 のなかでも、

図 5 蝦夷層群砂岩の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代スペクトルが示す後背地の地殻構成の経年変化。年代スペクトルに 2 つのタイプが識別される。蝦夷層群下部のアプチアンの砂岩 (16HK1, 16HK2) は、白亜紀前期の他にジュラ紀、ペルム紀などの古期粒子を多数含み、なかには先カンブリア時代のものも含まれる (タイプ 1)。これに対し、同層群上部のセノマニアン以降晩新世までの砂岩はいずれも先白亜紀粒子をほとんど含まず、白亜紀中頃から後期の粒子がほぼ独占する (タイプ 2)。タイプ 1 から 2 への変化は、アルビアンに急激かつ非可逆的に起きたことから、堆積盆地の後背地に露出した表層地殻構成の大規模な更新が起きたことを示唆する。また、タイプ 2 のなかでの漸移的な経年変化が認められる。すなわち、もっとも多産するジルコン年代のピークが層序学的上位に向かって若くなる傾向がある。これらの碎屑性ジルコンの起源は白亜紀弧火山岩・貫入岩であり、同じ火山帯のなかで順次若い火山岩が表層に噴出し、削剝された過程が読み取れる。

Fig. 5 U-Pb age spectra of detrital zircons in sandstones of Yezo Group, indicating the secular change in provenance. Age spectra can be divided into two types. Aptian sandstones of the lowermost part of Yezo Group (16HK1, 16HK2) contain not only Early Cretaceous zircons, but also abundant older zircons of Jurassic, Permian, and minor Precambrian zircons (Type 1). In contrast, Cenomanian-Paleocene sandstones of the upper part of Yezo Group contain hardly any Pre-Cretaceous zircons and are dominated by mid- to Late Cretaceous zircons (Type 2). Changes from Type 1 to Type 2 occurred drastically and irreversibly in Albian, which indicates the large-scale renewal of the composition of the surface crust in provenance of depositional basin. Moreover, there are gradual and secular changes within Type 2, that is, a younging trend of abundant zircon-age along bed age. The origin of these detrital zircons is assumed to be Cretaceous arc volcanics; therefore, this indicates a process whereby younger volcanic rocks sequentially covered the surface and were eroded in the same volcanic arc.

砂岩の堆積年代がより若くなるにつれ、もっとも卓越するジルコン年代が系統的に若くなる傾向があり (図 5), 火山弧で起きた地殻変動の実態を考察する上で重要である。それらの背景テクトニクスの変化について議論する前に、まず各年代の

ジルコンの起源について次に考察する。

3) ジルコンの由来

砂岩中の碎屑性ジルコンの年代スペクトルは、堆積場へ碎屑物を供給した後背地の表層地殻構成を反映する (Dickinson and Gehrels, 2008 な

ど)。一般に、火成ジルコンは珪長質火成岩類に含まれ、とくに粗粒なものは花崗岩などの深成岩に豊富に含まれる。蝦夷層群のような前弧堆積岩の場合、その砂岩のジルコン年代スペクトルおよびその経年変化は、後背地となった弧地殻の地質体、特に同じ弧-海溝系で形成された火成岩類の表層削剝の記録とみなされる。

分析した蝦夷層群砂岩のすべては、白亜紀ジルコンを豊富に含んでおり、これらの地層が堆積した当時の西北海道には、白亜紀火成岩類が広く地表露出していたことを明示する。現在の北海道西部の渡島半島や奥尻島（渡島帯）には、白亜紀前期（バレミアンからアルビアン）花崗岩類が、小規模ながら広範囲に分布しており（図1）、本州北部の北上山地に産する同年代の花崗岩類の北方延長帯と見なされている（土谷, 2010）。これらの花崗岩体は、東アジア大陸縁に沿って形成された一連の広域弧花崗岩帯（Takahashi, 1983; Kruk *et al.*, 2014; Jahn *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017 など）の一部とみなされる。渡島帯には、さらに白亜紀後期（カンパニアン-マーストリヒチアン）花崗岩もきわめて小規模ながら分布し（土谷, 2010）、同様にアジア東縁で形成された弧マグマ活動域の一部とみなされる。蝦夷層群の砂岩に含まれる白亜紀の火成ジルコンの起源は、これらの白亜紀マグマ活動で生成された火成岩類とみなすのが自然である。

タイプ2のスペクトルはいずれも単一の明瞭な年代ピークで特徴づけられる（図4）。また、シューパロ川層、日陰の沢層、および羽幌川層で碎屑性ジルコンのピーク年代がおおの同層中の凝灰岩のジルコン年代とほぼ一致することや、三笠層および函淵層中の礫岩に酸性火山岩礫が豊富に含まれること（佐々ほか, 1964; 安藤ほか, 2001 など）は、同層中の碎屑性ジルコンも噴出岩起源であることを暗示する。一般に地殻深所で貫入・固結する花崗岩類が、その後地表露出して削剝されるまでには数-10 Myr 程度の時間を要することを考慮すれば、蝦夷層群のタイプ2砂岩中の白亜紀ジルコンは、おそらく同じマグマ活動産物のなかでも地表で噴出した火山岩類あるいは

地殻浅所で貫入した半深成岩類であった可能性が高いと判断される。また、タイプ2の9試料の年代ピークが系統的に上位に向かって順次若くなる傾向（図5）は、碎屑性ジルコンの起源を噴出岩とする解釈と調和的で、火山弧で断続的に噴出した火山岩類が順次表層を覆うたびに、後背地構成岩が順次若い世代の岩体に置き換えられていったと理解される。

一方、タイプ1の砂岩は幅広い年代スペクトルをもつことから、後背地の構成岩類の種類はタイプ2のものと大きく異なっていたと推定される。とくに先白亜紀ジルコン粒子の起源については、2つの可能性を考える必要がある。1つはアジア大陸の東側縁辺の大陸内側に産する白亜紀以前の火成岩類からの直接供給であり、他方はジュラ紀付加体の砂岩からのリサイクルである。

先カンブリア時代の例はもとより、ジュラ紀、三疊紀、そしてペルム紀花崗岩類は、現在の日本列島には飛騨帯を除いてほとんど産しない（Tsutsumi *et al.*, 2017）が、アジア東縁のロシア沿海州や韓半島北部には広範囲に分布する（Takahashi, 1983; Khanchuk *et al.*, 2010; Tsutsumi *et al.*, 2014; Jahn *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2019）。日本海の形成前に日本列島がロシア沿海州と密接に連結していたことは古生代-中生代のオフィオライト、浅海-非海成層、さらに付加体や高压変成岩類などの対比（Kojima *et al.*, 2000; Ishiwatari and Tsujimori, 2003; Isozaki *et al.*, 2017）から疑いがない。西北海道が日本海の拡大時にアジア東縁からどの程度の距離を変位したのかについての詳細は不明だが、日本海の拡大中心となった西南日本主部に比べると、大陸に対する空知-蝦夷帯の相対的移動距離はさほど大きくなかったと推定される。碎屑物の運搬経路の詳細は不明ながら、西北海道のジュラ紀、三疊紀、そしてペルム紀の碎屑性ジルコンが沿海州や韓半島北部の花崗岩類から直接由来した可能性がある。

一方で、西隣の渡島帯にはジュラ紀付加体が広く分布し、上述の白亜紀花崗岩類に貫入されている（土谷, 2010）。日本のジュラ紀付加体の砂岩がジュラ紀、三疊紀、ペルム紀、そして先カンブ

図 6 西北海道の白亜紀前弧盆地と後背地の模式断面図。A：白亜紀前期後半（アルビアン）までの前弧域には、火山弧の領域にあった後背地から年代幅の広い碎屑性ジルコンが供給された。後背地の表層地殻は、先白亜紀付加体（おもに渡島帯のジュラ紀付加体）とそれらに貫入した白亜紀前期花崗岩類で構成されていた。B：白亜紀後期（セノマニアン）以降晩新世までは、活発化したマグマ活動を反映して火山弧の地殻が肥大した。次々と噴出した火山岩のため先白亜紀付加体はほとんど被覆され、代わって白亜紀中頃から後期の表層には火山岩類が広く露出するようになり、急速に隆起した火山弧から大量の碎屑物を前弧に独占的に供給した。

Fig. 6 Schematic diagrams of reconstructed across-arc profile for the Cretaceous fore-arc domain in western Hokkaido. A: Provenance area around volcanic arc supplied widely age-ranged detrital zircons to the fore-arc area until the latter half of Early Cretaceous (up to Albian). Surface crust of provenance area was composed of pre-Cretaceous accretionary complexes (mainly Jurassic accretionary complexes of Oshima belt) and Early Cretaceous granitoids, which intruded into these accretionary complexes. B: In the Late Cretaceous (Cenomanian) and Paleocene, magmatism was more activated to generate large-scale volcanism on the surface. Along with the rapid uplift of arc crust, widely exposed mid- to Late Cretaceous volcanics concealed underlying pre-Cretaceous accretionary complexes, supplying large amounts of clastics exclusively to the fore-arc region.

リア時代の碎屑性ジルコン粒子を含むことは、渡島帯のみならずそれに対比される北部北上帯や西南日本の美濃・丹波帯のジュラ紀付加体砂岩において普遍的に確認されている（川村ほか, 2000; Aoki *et al.*, 2012; Fujisaki *et al.*, 2014; 内野, 2018; Ueda *et al.*, 2018 など）。さらに先カンブリア時代粒子のなかで 2500–1800 Ma（原生代前期–中期）のジルコンが卓越することも、日本列島に産するジュラ紀付加体砂岩がもつ共通の特徴である。タイプ 1 砂岩中の先白亜紀粒子の年代スペクトルとジュラ紀付加体砂岩のそれとの類似性は、白亜紀火成岩類の主要露出以前にジュラ紀付加体が広く後背地に露出して、砂岩中の碎屑性ジルコンが大量に前弧半深海–浅海域へリサイクルした可能性を強く示唆する。

ジルコンの供給場と前弧堆積場との間の距離を

考慮すると、大陸内の古期地殻から弧を横断して長距離運搬するのに比べて、付加体からのリサイクルの可能性が高そうだが、大陸からの供給があった可能性も完全には否定できない。いずれにしても、先白亜紀粒子の前弧への流入はアルビアンを境に途絶えたことから、大陸内からの直接供給のみならず、先白亜紀付加体からのリサイクルも完全に停止したことになる。その原因としては、白亜紀中頃にマグマ活動によって火山弧地殻が増大し、その表層隆起によって弧に沿って長大な地形的障壁が出現したことが想定される（図 6）。

4) 白亜紀–古第三紀始新世における堆積場と後背地の変遷

以上の考察に基づくと、白亜紀中頃から古第三紀に太平洋側（東側）からの海洋プレート沈み込みが継続した西北海道（君波ほか, 1985）では、

前弧域およびその後背地にかけて次のような変遷がおきたことが推定される。

アプチアン：白亜紀前期に形成された前弧域へ、西側の後背地（渡島帯および礼文-樺戸帯；図1）から白亜紀前期弧火成岩類とジュラ紀付加体由来の大量の碎屑物が運ばれ、やや深い堆積相の蝦夷層群が厚く堆積しはじめた。

アルビアン：白亜紀前期末から活発化した弧マグマ活動に伴い、火山弧表層に露出していたジュラ紀付加体は白亜紀火山岩類で広く覆われるようになり、前弧域では火山弧の隆起に呼応した堆積レジームの変化が起きて、局所的な不整合が形成された。

セノマニアンからサントニアン：アルビアン以前まで後背地に広く露出していたジュラ紀付加体は白亜紀中頃の弧火山岩・貫入岩類によってほぼ被覆され、代わって後者が大量の碎屑物を前弧へ供給しはじめた。

カンパニアンから暁新世：白亜紀後期の若い火山岩類・貫入岩類が順次前弧域にその碎屑物を独占的に供給し続けた。この時期には、前弧堆積場は徐々に縮小・浅海化しはじめ、白亜紀/古第三紀境界をまたいで不整合が形成され、また海成層が非海成層に置き換えられていった。暁新世になっても後背地の状況は変わらず、前弧堆積盆地はさらに縮小し、おそらく暁新世末までに埋積された。

本研究によって、前弧盆地全体の発達・消滅過程とは独立に、白亜紀中葉アルビアン頃に後背地の表層地殻に明瞭な変化が起きたことが判明した（図5）。このタイミングは地質学的研究から指摘された蝦夷前弧盆地内でのハイアタス形成期にほぼ対応する。かつて「中蝦夷事変」という白亜紀中葉のテクトニクス事件が想定され（猪間, 1969）、基盤の高圧型変成岩類の上昇・剝削と蝦夷層群内での不整合の形成との関連が議論された（川村ほか, 1999; Ueda *et al.*, 2002）。その後、この時期の不整合形成は堆積盆地全域に及ばないことが確認され、アルビアン事変の実態はアルビアン最初期の大規模なオリストストロームの堆積と、アルビアン後期の大規模な火成活動であった

と再解釈された（高嶋・西, 1999）。

しかし、本研究で示した碎屑性ジルコンの年代データは、蝦夷層群の堆積盆地自体だけでなく、その後背地である火山弧周辺の表層地殻でおきた明瞭な非可逆的变化を記録している。とくにアルビアン後期に鍵層となる特徴的な珪長質凝灰岩層（KY2）が同層群分布域のほぼ全域で堆積したこと（Takashima *et al.*, 2004）は、当時の火山弧での活発なマグマ活動を示唆し、本研究が示した後背地の表層地殻の変化と調和的である。おそらく火山弧での活発なマグマ活動に伴って、先白亜紀付加体が若い火山岩類・貫入岩類によって広く被覆され、代わってそれらから大量の碎屑物が前弧に供給されはじめたと推定される。アルビアン以降に蝦夷層群の堆積場の縮小化が起きた（新井田・紀藤, 1986 など）が、それとは無関係に、後背地では火山岩類の追加が継続的に暁新世まで続いたこと（図5）を考慮すると、西北海道でのアルビアン事変は前弧盆地内の局所的な堆積イベントではなく、当時の火山弧で顕在化した広域のテクトニクス転換事件と評価すべきである。

5) 西南日本および東北日本との比較

ほぼ同様の後背地の地殻構成変化が同じタイミングでおきたことが、西南日本の白亜系前弧砂岩の解析から最近明らかにされている（中畑ほか, 2016a, b; Shunori *et al.*, 2018; 長谷川ほか, 2018, 2020）。すなわち、九州中部から四国、近畿、そして関東まで断続的に続く西南日本秩父累帯の物部川-外和泉系列の浅海成白亜系砂岩の碎屑性ジルコン年代測定（Aoki *et al.*, 2012; 中畑ほか, 2016a, 2016b; Ikeda *et al.*, 2016; Shunori *et al.*, 2018; 長谷川ほか, 2020）の結果、白亜紀前弧砂岩のジルコン年代スペクトルがアルビアンを境に非可逆的に変化したことが明示された（中畑ほか, 2016a; 長谷川ほか, 2020）。とくにアプチアンまで多産した先白亜紀ジルコン粒子がほぼ消滅し、代わって白亜紀中頃・後期粒子が独占する状態に移行し、その体制が白亜紀末まで継続した経年変化は、本研究が示した蝦夷層群での変化（図5）とよく一致する（図7）。蝦夷層群のタイプ1からタイプ2への変化は、長谷川ほか

図 7 西南日本秩父累帯に産する白亜紀前弧堆積体（領石-物部川層群、外和泉層群、およびそれらの相当層）の砂岩がもつ碎屑性ジルコン年代スペクトルとの比較（中畑ほか, 2016a; Shunori *et al.*, 2018; 長谷川ほか, 2020）。蝦夷層群の砂岩がもつ碎屑性ジルコン年代スペクトルは、同時代の西南日本の前弧堆積体砂岩のそれと基本的に共通である。紀伊半島や関東の砂岩と、蝦夷層群の砂岩のパターンとが年代ごとによく類似することから、遠く離れた地域にありながら、ほぼ同じ地殻構成をもつ後背地を共有していたことは明らかである。またスペクトルのパターンが大きく変わるタイミングは、西南日本でも西北海道でもアルビアンであったことから、白亜紀日本を通じて共通の地殻改変が当時の前弧盆の後背地（火山弧）で起きたと想定される（図 8 参照）。

Fig. 7 Comparison of age spectra of detrital zircons in Cretaceous fore-arc sandstones between Sorachi-Yezo belt and Chichibu belt in SW Japan (Monobegawa-Sotoizumi Group, and their correlatives; Nakahata *et al.*, 2016a; Shunori *et al.*, 2018; Hasegawa *et al.*, 2020). Age spectra of sandstones of Yezo Group fundamentally resemble those of coeval fore-arc sandstones in SW Japan. The similarity of secular change in age spectra between western Hokkaido and SW Japan indicates that the Cretaceous fore-arc basin developed over a long distance along the arc with the same responsible provenance for terrigenous clastics. In addition, the significant change in age spectra during the Albian in both western Hokkaido and SW Japan implies the same crustal modification occurred over the extensive provenance for the Cretaceous fore-arc domain in East Asia (refer to Fig. 8).

(2020) の B2 タイプから C タイプへの変化に対応する。

蝦夷層群の南方延長は、北上山地を経て西南日本の東縁である関東地方の銚子地域へと断続的に

連続し、さらに西南日本の領石-物部川列の前弧堆積層へと延長するとされている（Ando, 2003 など）。北上山地太平洋岸の宮古地域などに点在する浅海成白亜系砂岩についても、同様な変化が

図 8 白亜紀における日本弧-海溝系の古地理図と前弧で堆積した碎屑岩相白亜系の分布 (中畑ほか, 2016b を改変). 西北海道の新潟層群は、九州から関東までの西南日本秩父累帯の白亜系 (領石物部川層群, 外和泉層群, およびその相当層) と同様に、当時の東アジア大陸縁に発達した弧-海溝系の前弧盆地の地層として堆積した。それらの現在の分布は断続的だが、本研究で、それらに大量の碎屑物をもたらした後背地に、ほぼ共通の地殻岩石が露出していたこと、また白亜紀中葉アルビアンに起きた構成岩の構成変更も、全域で同様の非可逆的変化としておきたことが確認された。日本海形成以前の古地理の復元がより確実になった。

Fig. 8 Paleogeography of Cretaceous arc-trench system in East Asia, showing the distribution of Cretaceous fore-arc clastics in Japan (modified from Nakahata *et al.*, 2016b). Yezo Group exposed in Western Hokkaido was deposited in the fore-arc basin developed in the arc-trench system of the eastern margin of the Asian continent, just like the Cretaceous deposits of the Chichibu belt from Kyushu to Kanto (Monobegawa-Sotoizumi Group and their counterparts). This study reveals that largely the same crustal rocks were exposed in their provenance of abundant clastics, and the mid-Cretaceous (Albian) change of crustal composition occurred synchronously in a homogenous and irreversible manner, although their distribution is now dissected. This reconstruction provides more reliable constraints to the pre-Japan Sea paleogeography of Japan and East Asia.

予察的に報告されている (長谷川ほか, 2018)。本研究により、アジア東縁沿いにおいて共通の堆積史をもつ一連の前弧堆積盆地が少なくとも 1500 km 連続していたことが示された (図 8)。

一方、蝦夷層群の北方延長はロシア・サハリン島中部まで追跡され、北海道・サハリンでの南北方向の総延長は 800 km に達する (Salnikov and Tikhomolov, 1987 など)。したがって日本海形成以前のアジア大陸縁では、九州から四国・本州・北海道を経てサハリン中部まで、総延長が 2300 km 以上に及んだ前弧堆積盆地が発達していたと推定される。サハリンの白亜系砂岩からのジルコ

ン年代データはまだ報告されていないが、少なくともアジア東縁の弧-海溝系に沿う一連の白亜紀前弧堆積場の後背地において、白亜紀中葉アルビアンに共通の堆積・造構作用が進行したことが示唆される。

V. ま と め

白亜紀の西北海道に発達した前弧盆地の後背地の変遷史を解明するため、大夕張・三笠地域に分布する白亜系-暁新統蝦夷層群について、底部から最上部に至る 11 層準の砂岩試料から碎屑性ジルコンを抽出し、粒子ごとの U-Pb 年代を測定し

た。その結果、以下の新知見が得られた。

1. 蝦夷層群底部のシューパロ川層のアプチアン砂岩は、おもに白亜紀前期のジルコン粒子を含み、その他にジュラ紀、三畳紀、ペルム紀、さらに先カンブリア時代の粒子を伴う。
2. 蝦夷層群の上半をなす日陰沢層（アルビアン-セノマニアン）、三笠層（セノマニアン-チューロニアン）、羽幌川層（コニアシアン-サントニアン）、鹿島層（サントニアン）、そして函淵層群（暁新世）の砂岩は、ほぼ白亜紀中期および後期の碎屑性ジルコンのみを含み、それ以前の古期粒子を含まない。
3. 日陰沢層から函淵層群まで、層序学的上位に向かって、ジルコンの集中する年代のピークが系統的により若くなる傾向が認められる。
4. 碎屑性ジルコンの年代スペクトルが白亜紀中期アルビアンに急激にかつ非可逆的に変化したことは、蝦夷層群の後背地である火山弧周辺の表層地殻構成の大きな更新がその時期に起きたことを示す。
5. 日陰沢層から函淵層群までの砂岩に含まれる碎屑性ジルコンのほとんどは、西隣の渡島帯および礼文-樺戸帯で活動した白亜紀火山岩類・貫入岩類から直接由来したと推定される。
6. シューパロ川層に多く含まれる先白亜紀ジルコン粒子は、おもに渡島帯および礼文-樺戸帯の白亜紀花崗岩類に貫入されたジュラ紀付加体砂岩からリサイクルされたと推定される。
7. 西北海道の前白亜紀前弧砂岩が記録するアルビアンに起きた後背地の構成岩の更新記録は、西南日本および北関東・東北地方に産する同年代の前弧砂岩の記録と共通であり、1,500 km以上に及ぶ白亜紀アジア東縁の弧-海溝系で共通の堆積・造構作用が同時に進行したことを記録している。

謝 辞

本稿の執筆にあたり、東北大学の高嶋礼詩教授および国立科学博物館の谷 健一郎博士から重要なご指摘とご教示を賜った。また、東京大学大学院総合文化研究科の小宮 剛教授、小河正基准教授、澤木佑介博士、鹿

山雅弘博士、ならびに同研究科駒場地球科学セミナーのメンバーからは有益なご教示をいただいた。試料採取および一部の年代測定について同セミナー OB の梅村佑介氏および長谷川 遼氏の協力を得た。金沢大学の長谷川 卓教授には文献収集にご協力くださった。また石坂は早稲田大学教育学部在籍時に守屋和佳准教授から蝦夷層群についてご教示いただいた。これらの方々に感謝する。本研究には文部科学省科学技術振興会 JSPS の科学研究補助金 (no. 19H00711 to YI) を使用した。

文 献

- Ando, A., Kakegawa, T., Takashima, R. and Saito, T. (2002): New perspective on Aptian carbon isotope stratigraphy: Data from $\delta^{13}\text{C}$ records of terrestrial organic matter. *Geology*, **30**, 227-230.
- 安藤寿男 (1987): 北海道中部の中中部蝦夷層群三笠層に見られる浅海成堆積物—ハンモック状斜交層理に着目して—。早稲田大学教育学部学術研究: 生物学・地学編, **36**, 20-32. [Ando, H. (1987): Shallow marine deposits in the Mikasa Formation of the Middle Yezo Group in Central Hokkaido—With special reference to hummocky cross stratification. *Gakujutsu Kenkyu, School of Education, Waseda University, Series of Biology and Geology*, **36**, 20-32. (in Japanese with English abstract)]
- Ando, H. (2003): Stratigraphic correlation of Upper Cretaceous to Paleocene forearc basin sediments in northeast Japan: Cyclic sedimentation and basin evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, **21**, 919-933.
- 安藤寿男・友杉貴茂・金久保 勉 (2001): 北海道中頓別地域における上部白亜系～暁新統函淵層群の岩相層序と大型化石層序。地質学雑誌, **107**, 142-162. [Ando, H., Tomosugi, T. and Kanakubo, T. (2001): Upper Cretaceous to Paleocene Hakobuchi Group, Nakatonbetsu area, northern Hokkaido—Lithostratigraphy and megafossil biostratigraphy. *Journal of the Geological Society of Japan*, **107**, 142-162. (in Japanese with English abstract)]
- Aoki, K., Isozaki, Y., Yamamoto, S., Maki, K., Yokoyama, T. and Hirata, T. (2012): Tectonic erosion in a Pacific-type orogen: Detrital zircon response to Cretaceous tectonics in Japan. *Geology*, **40**, 1087-1090.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.-X. (2013): The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, **36**, 199-204. <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.pdf> (updated in 2020) [Cited 2020/7/1].
- Dickinson, W.R. and Gehrels, G.E. (2008): U-Pb ages of detrital zircons in relation to paleogeography: Triassic paleodrainage networks and sediment dis-

- persal across southwest Laurentia. *Journal of Sedimentary Research*, **78**, 745–764.
- Dickinson, W.R. and Gehrels, G.E. (2009): Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, **288**, 115–125.
- Dong, Y., Ge, W., Yang, H., Liu, X., Bi, J., Ji, Z. and Xu, W. (2019): Geochemical and SIMS U-Pb rutile and LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronological evidence of the tectonic evolution of the Mudanjia-Ocean from amphibolites of the Helongjiang Complex, NE China. *Gondwana Research*, **69**, 25–44.
- Fujisaki, W., Isozaki, Y., Maki, K., Sakata, S., Hirata, T. and Maruyama, S. (2014): Age spectra of detrital zircon of the Jurassic clastic rocks of the Mino-Tanba AC belt in SW Japan: Constraints to the provenance of the mid-Mesozoic trench in East Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **88**, 62–73.
- 長谷川 遼・磯崎行雄・堤 之恭 (2018): 北関東および東北南部の浅海成白亜系の後背地: 碎屑性ジルコンの U-Pb 年代. 日本地質学会第 125 年学術大会講演要旨, T3-O-8. [Hasegawa, R., Isozaki, Y. and Tsutsumi, Y. (2018): Provenance of shallow marine Cretaceous strata in northern Kanto and southern Tohoku, Japan: U-Pb dating of detrital zircons. *125th Annual Meeting of the Geological Society of Japan*, T3-O-8. (in Japanese)]
- 長谷川 遼・磯崎行雄・大友幸子・堤 之恭 (2019): 中央構造線 (MTL) の活動開始時期—三河大野-伊平地域の低角度 MTL に隣接する三種類の白亜系砂岩の碎屑性ジルコン年代からの制限—. 地学雑誌, **128**, 391–417. [Hasegawa, R., Isozaki, Y., Ohtomo, Y. and Tsutsumi, Y. (2019): Onset timing of Median Tectonic Line (MTL): Constraints from U-Pb ages of detrital zircons from 3 distinct Cretaceous sandstone units adjacent to the low-angle MTL in the Mikawa-Ono/Idaira Area, central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **128**, 391–417. (in Japanese with English abstract)]
- 長谷川 遼・磯崎行雄・山本純之・堤 之恭 (2020): 白亜紀西南日本の前弧砂岩と後背地の経年変化—碎屑性ジルコンの U-Pb 年代測定—. 地学雑誌, **129**, 397–421. [Hasegawa, R., Isozaki, Y., Yamamoto, A. and Tsutsumi, Y. (2020a): Secular changes in forearc sandstones and their provenance in Cretaceous Southwest Japan: U-Pb dating of detrital zircons. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **129**, 397–421. (in Japanese with English abstract)]
- Hayakawa, T. and Hirano, H. (2013): A revised inoceramid biozonation for the Upper Cretaceous based on high-resolution carbon isotope stratigraphy in northwestern Hokkaido, Japan. *Acta Geologica Polonica*, **63**, 239–263.
- Ikeda, T., Harada, T., Kouchi, Y., Morita, S., Yokogawa, M., Yamamoto, K. and Otoh, S. (2016): Provenance analysis based on detrital zirconage spectra of the Lower Cretaceous formations in the Ryoseki-Monobe Area, outer zone of Southwest Japan. *Memoir of Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, **15**, 33–84.
- 猪間明俊 (1969): 中蝦夷地変と中部蝦夷層群の堆積 (上). 石油技術協会誌, **34**, 178–197. [Inoma, A. (1969): The Intra-Yezo disturbance and sedimentation of the middle Yezo Group. *Journal of the Japanese Association of Petroleum Technologists*, **105**, 178–197. (in Japanese with English abstract)]
- Ishiwatari, A. and Tsujimori, T. (2003): Paleozoic ophiolites and blueschists in Japan and Russian Primorye in the tectonic framework of East Asia: A synthesis. *Island Arc*, **12**, 190–206.
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T. and Yanai, S. (2010): New insight into a subduction-related orogen: Reappraisal on geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, **18**, 82–105.
- Isozaki, Y., Nakahata, H., Zakharov, Y., Popov, A.D., Sakata, S. and Hirata, T. (2017): Greater South China extended to the Khanka block: Detrital zircon chronology of the middle-upper Paleozoic sandstones of the Sergeevka belt, Far East Russia. *Journal of Asian Earth Sciences*, **145**, 565–575.
- 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. *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**, 872–918.
- Kawabe, F., Takashima, R., Wani, R., Nishi, H. and Moriya, K. (2003): Upper Albian to Lower Cenomanian biostratigraphy in the Oyubari area, Hokkaido, Japan: Toward a Cretaceous biochronology for the North Pacific. *Acta Geologica Polonica*, **53**, 81–91.
- 川村信人・植田勇人・鳴島 勤 (1999): 前弧海盆堆積物中の不整合とスランプ体—中部蝦夷層群基底部の層位学的現象—. 地質学論集, **52**, 37–52. [Kawamura, M., Uyeda, H. and Narushima, T. (1999): Unconformities and slump bodies recognized in forearc sediments stratigraphic phenomena at the basal part of the Middle Yezo Group, Sorachi Yezo Belt, central Hokkaido. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **52**, 37–52. (in Japanese with English abstract)]
- 川村信人・安田直樹・渡辺暉夫・Mark Fanning・寺田剛 (2000): 渡島帯ジュラ紀石英長石質砂岩の組成と供給地質体. 地質学論集, **57**, 63–72. [Kawamura, M., Yasuda, N., Watanabe, T., Mark, F. and Terada, T. (2000): Composition and provenance of the Jurassic quartzofeldspathic sandstones of the Oshima Accretionary Belt, SW Hokkaido, Japan. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **57**, 63–72. (in Japanese with English abstract)]

- Khanchuk, A.I., Vovna, G.M., Kiselev, V.I., Mishkin, M.A. and Lavrik, S.N. (2010): First results of zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the rocks from the granulite complex of Khanka massif in the Primorye region. *Doklady Earth Sciences*, **434**, 212–215.
- 君波和雄・紀藤典夫・田近 淳 (1985): 北海道の中生界一層序・年代とその意義. 地球科学, **39**, 1–17. [Kiminami, K., Kito, N. and Tajika, J. (1985): Mesozoic Group in Hokkaido—Stratigraphy and age, and their significance. *Geosciences*, **39**, 1–17. (in Japanese with English abstract)]
- 君波和雄・小松正幸・川端清司 (1992): 士別市犬牛別川地域の空知層群および下部蝦夷層群の碎屑岩組成とその意義. 地質学論集, **38**, 1–11. [Kiminami, K., Komatsu, M. and Kawabata, K. (1992): Composition of the Sorachi Group and the Lower Yezo Group in the Inushibetsu area, Hokkaido, Japan, and their significance. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **38**, 1–11. (in Japanese with English abstract)]
- 木村 学 (1985): 白亜紀北海道の沈み込み様式. 科学, **55**, 24–31. [Kimura, G. (1985): Subduction style of the Cretaceous Hokkaido. *Kagaku*, **55**, 24–31. (in Japanese with English abstract)]
- 紀藤典夫・君波和雄・新井田清信・蟹江康光・渡辺暉夫・川口通世 (1986): 空知層群と蝦夷層群—北海道中軸帯の後期中生代オフィオライトと前弧海盆堆積物. 地団研専報, **31**, 81–96. [Kito, N., Kiminami, K., Niida, K., Kanie, Y., Watanabe, T. and Kawaguchi, M. (1986): The Sorachi Group and the Yezo Supergroup: Late Mesozoic ophiolites and forearc sediments in the axial zone of Hokkaido. *Monograph the Association for Geological Collaboration in Japan*, **31**, 81–96. (in Japanese with English abstract)]
- Kojima, S., Kemkin, I.G., Kametaka, M., and Ando, A. (2000): A correlation of accretionary complexes of southern Sikhote-Alin of Russia and the inner zone of Southwest Japan. *Geoscience Journal*, **4**, 175–185.
- 幸田龍星・植田勇人 (2018): 北海道富良野・芦別地域に分布する空知層群・蝦夷層群の層序と海洋プレートの復元. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会講演予稿集, MIS20-P02. [Kota, R. and Ueda, H. (2018): Stratigraphy of the Sorachi and Yezo groups in the Furano-Ashibetsu area, Hokkaido, Japan: Another oceanic plate in the NW Pacific. *Abstracts of the Japan Geoscience Union 2018*, MIS20-P02. (in Japanese)]
- Koyasu, H., Nishi, H., Takashima, R. and Suzuki, N. (2019): Cretaceous radiolarian biostratigraphy in the Yezo Group, Hokkaido, Northeast Japan. *Newsletters on Stratigraphy*, **52**, 297–319.
- Kruk, N.N., Simanenko, V.P., Gvozdev, V.I., Golozubov, V.V., Kovach, V.P., Serov, P.I., Kholodnov, V.V., Moskalenko, E.Y. and Kuibida, M.L. (2014): Early Cretaceous granitoids of the Samarka terrane (Sikhote-Alin): Geochemistry and sources of melts. *Russian Geology and Geophysics*, **55**, 216–236.
- Kuwabara, S., Takashima, R., Orihashi, Y., Nishi, H., Satoh, T. and Hayashi, K. (2019): Preliminary tephrochronological study of the Yezo Group (uppermost Albian–basal Campanian) in north Japan. *Cretaceous Research*, **103**, 104–158.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M. (1997): Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to present. *Island Arc*, **6**, 121–142.
- Matsumoto, T. (1942): Fundamentals in the Cretaceous stratigraphy of Japan, Part I. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University. Series D*, **2**, 98–237.
- 本山 功・藤原 治・海保邦夫・室田 隆 (1991): 北海道大夕張地域の白亜系の層序と石灰質微化石年代. 地質学雑誌, **97**, 507–527. [Motoyama, I., Fujiwara, O., Kaiho, K., Murota, T. (1991): Lithostratigraphy and calcareous microfossil biochronology of the Cretaceous strata in the Oyubari area, Hokkaido, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **97**, 507–527. (in Japanese with English abstract)]
- 中嶋 健 (2018): 日本海拡大以来の日本列島の堆積盆テクトニクス. 地質学雑誌, **124**, 693–722. [Nakajima, T. (2018): Tectonics of sedimentary basins in and around Japan since the opening of the Sea of Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **124**, 693–722. (in Japanese with English abstract)]
- 中畑浩基・磯崎行雄・堤 之恭・岩本直哉 (2016a): 関東南部の浅海成白亜系の碎屑性ジルコン年代スペクトル—後背地表層地殻の更新に伴う前弧域砂岩組成変化—. 地学雑誌, **125**, 353–380. [Nakahata, H., Isozaki, Y., Tsutsumi, Y., and Iwamoto, N. (2016a): Age spectra of detrital zircons from shallow marine Cretaceous in Southern Kanto, SW Japan: Change in composition of fore-arc sandstones in response to the rejuvenation of provenance crust. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 353–380. (in Japanese with English abstract)]
- 中畑浩基・磯崎行雄・堤 之恭 (2016b): 四国西部の 3 種の浅海性白亜系と碎屑性ジルコン U-Pb 年代スペクトル—白亜紀日本の前弧・背弧砂岩の識別—. 地学雑誌, **125**, 717–745. [Nakahata, H., Isozaki, Y. and Tsutsumi, Y. (2016b): Three distinct shallow marine Cretaceous units in Western Shikoku and the U-Pb age spectra of their detrital zircons: Identifying fore-arc and back-arc sandstones in central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **125**, 717–745. (in Japanese with English abstract)]
- 新井田清信・紀藤典夫 (1986): 北海道における白亜紀島弧-海溝系—その地質構成と構造史—. 地団研専報, **31**, 379–402. [Niida, K. and Kito, N. (1986): Cretaceous arc-trench systems in Hokkaido. *Monograph the Association for Geological Collaboration in Japan*, **31**, 379–402. (in Japanese with English abstract)]
- Nishi, H., Takashima, R., Hatsugai, T., Saito, T.,

- Moriya, K., Ennyu, A. and Sakai, T. (2003): Planktonic foraminiferal zonation in the Cretaceous Yezo Group, Central Hokkaido, Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, **21**, 867–886.
- Obradovich, J.D., Matsumoto, T., Nishida, T. and Inoue, Y. (2002): Integrated biostratigraphic and radiometric study on the Lower Cenomanian (Cretaceous) of Hokkaido, Japan. *Proceedings of the Japan Academy. Series B: Physical and Biological Sciences*, **78**, 149–153.
- 岡田尚武・久万田 敦・諏訪 健・栗田裕司・重田康成 (1998): 蝦夷層群上位層からの石灰質ナノ化石群集 (予報). 日本古生物学会 1998 年々会講演予稿集, 13. [Okada, H., Kumada, A., Suwa, T., Kurita, H. and Shigeta, Y. (1998): Calcareous nannofossil assemblage from the Yezo Supergroup and its upper strata (preliminary report). *Abstracts with Programs, 1998 Annual Meeting of the Paleontological Society of Japan*, 13. (in Japanese)]
- Otofujii, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985): Opening mode of the Japan Sea inferred from paleomagnetism of the Japan arc. *Nature*, **317**, 603–604.
- Quidelleur, X., Paquette, J.L., Fiet, N., Takashima, R., Tiepolo, M., Desmares, D., Nishi, H. and Grosheny, D. (2011): New U–Pb (ID-TIMS and LA-ICPMS) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints of the Cretaceous geologic time scale calibration from Hokkaido (Japan). *Chemical Geology*, **286**, 72–83.
- Salnikov, B.A. and Tikhomolov, Y.I. (1987): A description of the section. in *Reference Section of Cretaceous Deposits in Sakhalin (Naiba Section)* edited by Poyarkova, Z. Transactions of the USSR Academy of Sciences, Leningrad, 13–49.
- 佐々保雄・田中啓策・秦 光男 (1964): 5 万分の 1 地質図幅説明書「夕張」および同説明書. 北海道開発庁, 213p. [Sasa, Y., Tanaka, K. and Shin, M. (1964): *1:50,000 Geological Map of Japan, Yubari with Explanatory Text*. Hokkaido Development Agency, 213p. (in Japanese)]
- Shunori, R., Takeuchi, M. and Yamamoto, K. (2018): Late Cretaceous uplift history of the Cretaceous volcanic arc in Southwest Japan: Provenance analysis of the Yuasa–Aridagawa basin based on U–Pb zircon ages. *Island Arc*, **27**, e12253.
- 鈴木弘明・栗田裕司・保柳康一・安藤寿男・牧野 彰・伝井 哲 (1997): 北海道夕張地域での海成暁新統の発見. 日本地質学会第 104 年学術大会講演要旨, 136. [Suzuki, H., Kurita, Y., Hoyanagi, K., Ando, Y., Makino, A. and Tsutai, S. (1997): Paleocene Strata found at YUBARI area and their sedimentary environments. *104th Annual Meeting of the Geological Society of Japan*, 136. (in Japanese)]
- Takahashi, M. (1983): Space-time distribution of late Mesozoic to early Cenozoic magmatism in East Asia and its tectonic implications. in *Accretion Tectonics in the Circum-Pacific Regions* edited by Hashimoto, M. and Uyeda, S., Terrapub, Tokyo, 69–88.
- 高嶋礼詩・西 弘嗣 (1999): 中蝦夷地変の再検討と北海道の白亜紀テクトニクス. 地質学雑誌, **105**, 711–728. [Takashima, R. and Nishi, H. (1999): Re-evaluation of the intra-Yezo disturbance and the Cretaceous tectonics in Hokkaido, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **105**, 711–728. (in Japanese with English abstract)]
- 高嶋礼詩・鈴木紀毅・小池敏夫・斎藤常正 (1997): 北海道双珠別地域における下部・中部蝦夷層群境界の不整合の再検討とその地史的意義—中蝦夷地変の再検討—. 地質学雑誌, **103**, 489–492. [Takashima, R., Suzuki, N., Koike, T. and Saito, T. (1997): Re-examination of the unconformity proposed at the boundary between the Lower and Middle Yezo Groups in the Soshubetsu area, Hokkaido, and its geological significance—Re-evaluation of the intra-Yezo disturbance—. *Journal of the Geological Society of Japan*, **103**, 489–492. (in Japanese with English abstract)]
- 高嶋礼詩・吉田武義・西 弘嗣 (2001): 北海道夕張・芦別地域に分布する空知層群・蝦夷層群の層序と堆積環境. 地質学雑誌, **107**, 359–378. [Takashima, R., Yoshida, T. and Nishi, H. (2001): Stratigraphy and sedimentary environment of the Sorachi and Yezo groups in the Yubari–Ashibetsu area, Hokkaido, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **107**, 359–378. (in Japanese with English abstract)]
- Takashima, R., Kawabe, F., Nishi, H., Moriya, K., Wani, R. and Ando, H. (2004): Geology and stratigraphy of forearc basin sediments in Hokkaido, Japan: Cretaceous environmental events on the north-west Pacific margin. *Cretaceous Research*, **25**, 365–390.
- Takashima, R., Nishi, H., Yamanaka, T., Hayashi, K., Waseda, A., Obuse, A., Tomosugi, T., Deguchi, N. and Mochizuki, S. (2010): High-resolution terrestrial carbon isotope and planktic foraminiferal records of the Upper Cenomanian to the Lower Campanian in the Northwest Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, **289**, 570–582.
- Takashima, R., Nishi, H., Yamanaka, T., Orihashi, Y., Tsujino, Y., Quidelleur, X., Hayashi, K., Sawada, K., Nakamura, H. and Ando, T. (2019): Establishment of Upper Cretaceous bio- and carbon isotope stratigraphy in the northwest Pacific Ocean and radiometric ages around the Albian/Cenomanian, Coniacian/Santonian and Santonian/Campanian boundaries. *Newsletters on Stratigraphy*, **52**, 341–376.
- 田中啓策・角 靖夫 (1981): 北海道中軸帯白亜系の古流系. 地調月報, **32**, 65–127. [Tanaka, K. and Sumi, M. (1981): Cretaceous paleocurrents in the central zone of Hokkaido, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **32**, 65–127. (in Japanese with English abstract)]
- 土谷信高 (2010): 渡島帯の白亜紀火成岩類. 日本地質学会編: 日本地方地質誌 1 (北海道地方). 朝倉書店,

- 87–91. [Tsuchiya, N. (2010): Cretaceous igneous rocks in Oshima belt. in *Regional Geology of Japan 1: Hokkaido District (Nihon Chiho Chishitsushi 1 Hokkaido Chiho)* edited by Geological Society of Japan, Asakura Shoten, 87–91. (in Japanese)*]
- Tsutsumi, Y. and Horie, K. (2019): Zircon U–Pb age of the granitic tectonic block between the Suo Metamorphic Belt and Nagasaki Metamorphic Complex, Nagasaki Peninsula, southwest Japan. *Bulletin of the Natural Museum of Nature and Science, Series C*, **45**, 7–12.
- Tsutsumi, Y., Yokoyama, K., Kasatkin, S. and Golozubov, V.V. (2014): Zircon U–Pb age of granitoids in the Maizuru Belt, southwest Japan and the southernmost Khanka Massif, Far East Russia. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **109**, 97–102.
- Tsutsumi, Y., Isozaki, Y. and Terabayashi, M. (2017): The most continent-sided occurrence of the Phanerozoic subduction-related orogens in SW Japan: Zircon U–Pb dating of the Mizoguchi gneiss on the western foothill of Mt. Daisen volcano in Tottori. *Journal of Asian Earth Sciences*, **145**, 530–541.
- 内野隆之 (2018): 下北半島北東部大森地域に分布するジュラ紀付加体砂岩中の碎屑性ジルコン U–Pb 年代. 地質調査所研究報告, **69**, 125–133. [Uchino, T. (2018): Detrital zircon U–Pb age of sandstone within the Jurassic accretionary complex in the Omori area, northeastern Shimokita Peninsula, Northeast Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **69**, 125–133. (in Japanese with English abstract)]
- Ueda, H., Kawamura, M. and Niida, K. (2000): Accretion and tectonic erosion processes revealed by the mode of occurrence and geochemistry of greenstones in the Cretaceous accretionary complexes of the Idonnappu Zone, southern central Hokkaido, Japan. *Island Arc*, **9**, 237–257.
- Ueda, H., Kawamura, M. and Yoshida, K. (2002): Blueschist-bearing fluvial conglomerate and unconformity in the Cretaceous forearc sequence, south central Hokkaido, northern Japan: Rapid exhumation of a high-P/T metamorphic accretionary complex. *Journal of the Geological Society of Japan*, **108**, 133–152.
- Ueda, H., Kimura, S., Saito, T., Takano, Y., Izuka, N. and Orihashi, Y. (2018): Material recycling in a sediment-starved trench recorded in the Early Cretaceous Shiriya accretionary complex, Northeast Japan. *Island Arc*, **27**, e12272.
- Wu, J.T.J., Jahn, B.M., Nechaev, V., Chashchin, A., Popov, V., Yokoyama, K. and Tsutsumi, Y. (2017): Geochemical characteristics and petrogenesis of adakites in the Sikhote-Alin area, Russian Far East. *Journal of Asian Sciences*, **145**, 512–529.
- Yasuda, N. (1986): Cretaceous and Paleocene foraminifera from northern Hokkaido, Japan. *Scientific Reports, Tohoku University, 2nd Series (Geology)*, **57**, 1–101.
- * Title etc. translated by Y.I.