西南日本古第三紀前弧での碎屑物分配パターンと テクトニクスへの新制限

—四国西部四万十帯，百笑層の碎屑性ジルコン U-Pb 年代—

中 野 智 仁* 磯 崎 行 雄* 堤 之 恭**

New Constraints on the Distributary Pattern of Clastics in Fore-arc and Tectonics in Paleogene SW Japan: U-Pb Ages of Detrital Zircons of the Domeki Formation in the Shimanto Belt, Western Shikoku

Tomohito NAKANO*, Yukio ISOZAKI* and Yukiyasu TSUTSUMI**

[Received 9 March, 2021; Accepted 27 May, 2021]

Abstract

U-Pb ages of detrital zircons are measured for two sandstones of the Domeki Formation (Fm) in the Shimanto belt, western Kochi, which represent bench deposits on the Paleogene fore-arc slope in SW Japan. The results show that both samples are replete with Paleocene and Late Cretaceous zircons, and they have extremely small quantities of pre-Cretaceous grains. This indicates that the provenance of the Domeki Fm was occupied mainly by felsic igneous rocks of the San-in belt in SW Japan, i.e., coeval volcanic arc. The age spectrum of zircons in the Domeki Fm is almost identical to those of coeval sandstones deposited in the main fore-arc basin (uppermost Izumi Group in the Kii peninsula, and Kanohara Conglomerate/Yorii Fm in Kanto). This suggests the ubiquitous supply of terrigenous clastics of the monotonous composition into the Paleocene fore-arc domain, including both the main fore-arc basin at the continent side and minor bench basins at the trench side, for more than 80 km across the arc from the southern margin of the Ryoke belt to the central Shimanto belt. Also confirmed is the stable and continuous deposition of voluminous arc-derived clastics on the fore-arc of SW Japan from the Late Cretaceous to Paleocene for more than 1000 km along the arc. The present data constrain the timings of two large-scale tectonic episodes in Paleogene SW Japan, i.e., the initiation of the Median Tectonic Line between the Ryoke and Sanbagawa belts and the first surface exposure of high-P/T Sanbagawa schists, to have been no earlier than the Paleocene/Eocene boundary (*ca.* 56 Ma).

Key words : Paleocene, fore-arc, San-in belt, Ryoke-Sanyo belt, Sanbagawa belt, Median Tectonic Line

キーワード : 暁新世, 前弧, 山陰帯, 領家-山陽帯, 三波川帯, 中央構造線

* 東京大学大学院総合文化研究科宇宙地球科学教室

** 国立科学博物館地学研究部

* Department of Earth Science and Astronomy, 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

現在の日本列島の形態の大枠を決定した中新世の日本海拡大 (Otofuji *et al.*, 1985; Tamaki, 1985) 前後の古地理変遷を正確に復元する上で、日本列島に産する古第三紀表層堆積岩類の空間的配列やそれらの後背地の経年変化は重要である。とくに、白亜紀弧-海溝系内で互いに離れた場所で形成された弧花崗岩類 (領家帯) と低温高压型変成岩類 (三波川帯) とが、中央構造線 (Median Tectonic Line; 以下 MTL) を介して直接したのが古第三紀であったことが最近再確認され (長谷川ほか, 2019, 2020a; 磯崎ほか, 2020), 日本列島の古第三紀テクトニクスの詳細解明が不可避となっている。

挟炭層を伴う非海成-陸成古第三系が九州北部や中国地方西部に広範に分布するのに対して、同じ弧-海溝系内の前弧域海洋側で堆積した古第三系は、付加体を除くと、わずかしが残されていない。後者については、漸新統の微化石層序や、海溝付近での大規模崩落テクトニクスに関する研究 (Nishi, 1985; 酒井, 1988) などがあるものの、古第三紀前半の堆積場やその後背地の変遷理解に必要な前弧域大陸側の同年代層との構成粒子の詳細比較は不十分であった。

近年、年代測定技術・機器の開発が進み、碎屑性ジルコン粒子の個別 U-Pb 年代測定が可能となったため、日本列島においても、示準化石を欠く年代未詳碎屑岩類について堆積年代が確定される例が報告されるようになった (中畑ほか, 2015, 2016 など)。古第三系に関しても、西南日本中軸帯の領家帯南縁に産し、全て上部白亜系とされてきた和泉層群およびその相当層中から、新たに複数の古第三系砂岩・礫岩が識別された (長谷川ほか, 2020a; 磯崎ほか, 2020)。これらは、白亜紀後期から古第三紀前期にかけての西南日本の弧-海溝系における碎屑物の後背地解析に新知見をもたらした。

本研究では、西南日本の古第三系前弧堆積岩のなかでももっとも古く、またもっとも海洋側に位置する四国西南部、高知県中村-宿毛地域の暁

新統砂岩から分離した碎屑性ジルコンについて U-Pb 年代測定を行なった。本稿はその結果を報告し、同時期の前弧域大陸側で堆積した地層の碎屑性ジルコン年代スペクトルとの比較を通して、西南日本の暁新世前弧における碎屑物の供給パターンを議論する。また、当時の前弧域表層地殻の地質構造を大規模に改変した白亜紀三波川変成岩の最初の表層露出と中央構造線の活動開始時期について年代制限を試みる。

II. 地質概要

四万十帯は、西南日本の带状地体構造配列のなかでもっとも海洋側に産する単元をなし、同帯北帯の白亜紀付加体と南帯の古第三紀付加体から構成される (平ほか, 1980 など; 図 1A)。四国西部、高知県四万十市から宿毛市にかけての狭長な地形的低地帯は、北帯/南帯の境界部にあたる。この領域は伝統的に「中筋地溝帯」と呼ばれ (鈴木, 1938; 甲藤, 1952; 図 1B), そこには白亜紀 (チューロニアンからマーストリヒチアン) 付加体の一部である有岡層と、それを不整合に覆う斜面相古第三系が産する (平ほか, 1980; 岡村ほか, 1991; 鹿納, 2001)。この古第三系は二枚貝および放散虫化石に基づき暁新統から漸新統に対比されてきた (甲藤, 1952; 田中, 1980; 田代, 1980; 野田, 1980; 松本, 1980; 岡村ほか, 1991; 山崎・須槍, 1990; 鹿納, 2001)。これまで多様な層序区分が提案されたが、化石年代の評価や層序関係の解釈の違いに由来する地層名の不統一があった。鹿納 (2001) によるもっとも新しい層序区分に従うと、本地域の古第三系は、百笑層 (暁新統-始新統下部) とその上位の平田層 (始新統中-上部) からなる。

百笑層はおもに四万十市の百笑地区周辺と宿毛市の小深浦地区に分布し (図 1B), 全層厚が 3,500 m 以上の厚い碎屑岩層からなる (岡村ほか, 1991; 鹿納, 2001)。百笑層は白亜系有岡層と断層で接するが、その岩相に基づき、初生的には有岡層を不整合に覆って炭酸塩補償深度 (CCD) 以浅で堆積した海溝陸側斜面上のベンチ碎屑岩層とみなされている (平ほか, 1980; 鹿納, 2001)。

図 1 四国南西部，中筋地溝帯に産する暁新統-始新統百笑層の分布および試料採取地点．A：位置図，B：試料採取地（地質図は鹿納，2001 を簡略化）．

Fig. 1 Geologic sketch map and sample localities of Paleocene-Eocene Domeki Formation in Nakasuji graben, SW Shikoku, Japan. A: index map, B: sample localities (geologic map simplified from Kano, 2001).

下限は不明だが，本層は上位の始新統平田層に不整合に覆われる。

百笑層は暗灰色から暗緑灰色の泥質岩優勢の凝灰質砂岩・泥岩交互層を主体とし，灰白色から淡黄灰色の凝灰岩を複数の層準にはさむ。地層面は高角度で傾斜するものの，隣接する白亜系有岡層の著しく変形した泥質メランジュとは異なり，強い変形を被っていない。鹿納（2001）は，本層を DM1 から DM8 までの 8 部層に区分し，放散虫化石の産出と年代を報告した。それに従うと，百笑層下半の DM3 部層からは暁新世を示す放散虫が，また上部の DM6 部層からは始新世中期の放散虫が産する。

III. U-Pb 年代測定

1) 試料と年代測定

碎屑性ジルコンの U-Pb 年代測定は，暁新世放散虫化石を産する百笑層下部，DM3 部層の砂岩を対象とした。四万十市百笑地区の四万十川東岸道路沿いに露出する粗粒-中粒砂岩（DMK2：鹿納，2001 の試料 TN-1 と TN-8 の間の層準；

32°59'53.7"N，132°55'21.1"E）と宿毛市小深浦地区の採石場西側崖に露出する凝灰質泥岩中の砂質葉理卓越部（SKM2：鹿納，2001 の試料 SK-4 直上の層準；32°55'55"N，132°41'52.6"E）から碎屑性ジルコンを分離した（図 1B）。

2 試料について，それぞれ約 300 g を粉砕し，150 粒以上のジルコンを分離・選別した。分離したジルコン粒子を樹脂に埋め，その研磨面について国立科学博物館地学研究部の走査型電子顕微鏡（SEM）を用いてカソードルミネッセンス像を観察した。分離したジルコン粒子のほとんどは自形で，オシラトリー累帯組織をもつ。これらの粒子の累帯部分のみについて同館のレーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計（LA-ICPMS）を用いて U および Pb 同位体比を測定した。鉱物分離および年代測定手法の詳細・測定条件を電子付録 1 に，年代測定したジルコン粒子のカソードルミネッセンス像の例を電子付録 2 に，測定値の表を電子付録 3 および 4 に，そして二次標準試料（OD-3）の測定結果を電子付録 5 に，おのおの示す。

2) 測定結果

試料 DMK2 から分離した碎屑性ジルコン 90 粒について年代測定し、そのなかの 85 粒がコンコードディア曲線上にプロットされた（電子付録 3, 6）。試料中の最若ジルコン粒子の年代を、YSG（最若単一粒子年代）と YC1 σ （最若年代と 1 σ の誤差範囲内で重なる 2 つ以上の年代）で示す（電子付録 7；試料 SKM2 についても同様）。試料 DMK2 の YSG は 56.4 ± 0.9 Ma, また YC1 σ は 57.4 ± 0.4 Ma（いずれも暁新世後期サネチアン；Cohen *et al.*, 2013 updated; 以下同様）であった。したがって本試料の堆積年代はサネチアンないしそれ以降とみなされる。

試料 SKM2 から分離した碎屑性ジルコン 105 粒について年代測定し、そのなかの 92 粒がコンコードディア曲線上にプロットされた（電子付録 4, 8）。YSG は 55.2 ± 1.2 Ma（始新世最前期イプレシアン），また YC1 σ は 59.6 ± 0.4 Ma（暁新世中期セランディアン）であった。したがってその堆積年代はセランディアン–イプレシアンないしそれ以降と推定される。

ちなみに、これらの年代は、U-Pb 年代が 1000 Ma 未満のものについては U-Pb 年代を、1000 Ma 以上のものについては Pb-Pb 年代を適用している。コンコードアントの認定に際しては、前者（< 1000 Ma）ではコンコードディア曲線と 2 σ の範囲で重複すること、後者（ $\geq$ 1000 Ma）では discordancy が 15% 以下であることを基準とした。

両試料の採取地点は同層の走向方向に約 30 km 離れているが、本年代測定によって得られた 2 試料の年代スペクトルは互いによく類似する（図 2）。すなわち、両試料ともに、約 70–55 Ma（白亜紀最末期から暁新世）の区間に約 60% の粒子が集中し、その他に約 30% の粒子が約 100–70 Ma（白亜紀後期）の範囲に散在する。一方、先白亜紀粒子は少なく、先カンブリア時代粒子はきわめて少ない（電子付録 3, 4, 6, 8）。両砂岩の碎屑性ジルコン年代は、いずれも暁新世後半から始新世最前期を示し、DM3 部層から報告された暁新世放散虫化石の年代（鹿納, 2001）と整合

図 2 百笑層砂岩（試料 DMK2 と SKM2）中の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代スペクトル。スペクトルはヒストグラムと確率曲線で表示。集中する年代範囲と随伴する年代範囲を、おのの淡桃色および淡緑色で示す（図 3 も同様）。

Fig. 2 U-Pb age spectra of detrital zircons in sandstones (samples DMK2 and SKM2) of the Domeki Formation. Age spectra are composed of age histogram and probability age frequency curve. Light pink and light green colored domains represent ranges of concentrated ages and associated ages, respectively (the same for Fig. 3).

的である。百笑層の下半が暁新統上部を含むことが碎屑性ジルコンの年代測定からも確認された。

IV. 考 察

1) 暁新統百笑層の後背地

測定した百笑層 DM3 部層砂岩中の碎屑性ジルコンの約半数は、白亜紀末–古第三紀初頭（70–55 Ma）粒子が占め、その他に白亜紀後期（100–70 Ma）粒子を伴う（図 2）。これは百笑層の堆積場の後背地に、白亜紀末–古第三紀初頭の火成ジルコンを多く含む岩石が広範に露出していたことを記録している。

アジア東縁では白亜紀後期から古第三紀にかけてプレート沈み込みによる大規模な珪長質マグマ活動が生じた (Takahashi, 1983)。西南日本では中国地方から九州北部にその産物である火成岩類が広範囲に産し、白亜紀末-古第三紀の火成岩類の主要分布範囲は山陰帯と呼ばれている (飯泉・今岡, 2009)。また、白亜紀後期前半の火成岩類は、山陰帯のみならず中国地方の瀬戸内海側に分布し、その領域は領家帯・山陽帯と呼ばれている (同上)。これらの火成岩地帯と四万十帯との相対的位置から判断して、百笑層の後背地には山陰帯や領家-山陽帯に代表されるアジア東縁の白亜紀後期-古第三紀火成岩類が広範囲に露出していたことは疑いがない。

一方、百笑層の2試料の砂岩が先白亜紀粒子をほとんど含まないことは、その後背地を考察する上で注目に値する。百笑層は、下位の白亜紀付加体を不整合に覆って堆積した整然層とされ、古第三紀の西南日本弧-海溝系の前弧域のなかではもっとも海洋側で堆積した海溝陸側斜面上のベンチ堆積物である (平ほか, 1980; 岡村ほか, 1991; 鹿納, 2001 など)。本層直下に産する四万十帯付加体の砂岩には、先白亜紀 (とくにジュラ紀やペルム-三畳紀, さらに 18 億年前や 25 億年前) の古期ジルコンが少なからず含まれる (Aoki *et al.*, 2012, 2015b; Hara *et al.*, 2017; 常盤ほか, 2018; Shimura *et al.*, 2019; Knittel *et al.*, 2020; Jia and Takeuchi, 2020)。また四万十帯の大陸側の表層地殻は、暁新世以前の古期地質体、すなわち美濃・丹波帯 (= 秩父帯) のジュラ紀付加体、秋吉帯のペルム紀付加体、周防帯・蓮華帯の三畳紀および石炭-ペルム紀高圧型変成岩類、先白亜紀花崗岩類、そしてそれらの外座地質体をなす黒瀬川帯内の小断片などで構成されており、それらにも先白亜紀ジルコンが豊富に含まれる (中間ほか, 2010; 磯崎ほか, 2010b; Tsutsumi *et al.*, 2011; Yoshimoto *et al.*, 2013; Fujisaki *et al.*, 2014; Aoki *et al.*, 2015a など多数)。

それにも関わらず、百笑層砂岩がそれらの古期ジルコン粒子をほとんど含まないことは、百笑層の堆積場には基盤の付加体や古期地質体群由来の

碎屑粒子がほとんど供給されなかったことを明示する。おそらく暁新世前弧盆地の後背地ではおもに山陰帯の、また領家帯・山陽帯の火成岩類が広範囲に露出・剝削され、それに由来する大量の粗粒碎屑物が前弧域へ供給されたために、既存の古期地質体群はほとんど剝削されず、古期碎屑物の前弧域外側へのリサイクル供給が抑制されたと推定される。

2) 大陸側の暁新統砂岩との類似性

西南日本では、九州北部から中国地方に、また本稿で扱う四国西部には古第三系の限定的・散在的分布が知られていたものの、とくに暁新統の産出報告例はきわめて少なかった。ところが最近になって、碎屑性ジルコンの年代測定が行われ、紀伊半島および関東地方の西南日本中軸域の年代未詳層のなかから暁新統が続けて発見された。1つは、紀伊半島西部和泉山地の和泉層群最上部をなす粉河層上部と名手層であり、他方は関東山地北縁の神農原礫岩および寄居層、そして北関東の大洗礫岩である。前者は、従来すべて上部白亜系マーストリヒティアン統からなるとされてきたが、少なくとも暁新世後期ないしそれ以降の最上位層を含むことが確認された (磯崎ほか, 2020)。また後者は、領家帯南縁に産する暁新世中期-後期ないしそれ以降の地層で、それらのジルコン年代スペクトルの一致に基づき、和泉層群最上部の東方延長とみなされる (長谷川ほか, 2020a)。これらの事実は、四国・紀伊半島の和泉層群および東方の相当層が白亜紀-古第三紀火山弧に沿って 1000 km 以上連続して形成された大規模な前弧盆地堆積体の一部をなすことを示している。これらの暁新統は、いずれも領家帯・山陽帯の白亜紀火成岩類に近接して分布し、一部では確実にそれを不整合に覆うことから、暁新世前弧堆積盆地のなかでも火山弧に近接した側で堆積した地層と判断される。

これに対して、本研究で扱った百笑層は、和泉層群の堆積場から大きく海洋側に離れた斜面で堆積した地層である。百笑層が産する四国南西部の中筋地溝帯は、現在、上述の領家帯の同年代層が産する紀伊半島西部や関東地方からは各々 300

km そして 1000 km 離れており、四国西部松山市周辺の和泉層群の分布南限からも約 80 km 南方に位置する (図 1A)。

図 3 に百笑層 (試料 DMK2) と上述の領家帯南縁の暁新統砂岩 4 例 (和泉層群最上部の粉河層上部と名手層, 神農原礫岩, そして寄居層; 長谷川ほか, 2020a; 磯崎ほか, 2020) との碎屑性ジルコン年代スペクトルの比較を示す。和泉層群最上部, 神農原礫岩, そして寄居層の砂岩がもつスペクトルの年代幅および年代分布パターンは互によく類似している。いずれも白亜紀末から暁新世 (72–60 Ma) のジルコン粒子が大半を占め, 白亜紀後期 (100–70 Ma) 粒子を伴い, 一方で先白亜紀粒子をほとんど含んでおらず, 百笑層の砂岩とはほぼ共通の特徴をもつ。この年代スペクトルの一致は, 少なくとも当時の四国西部や関東地方を含む広大な暁新世前弧域に, ほぼ均質な年代の碎屑性ジルコンが普遍的に供給されていたことを記録している。他の碎屑粒子の起源までは特定できないものの, おそらく山陰帯の珪長質火成岩類が後背地に広く露出していたと推定され, そこから由来した碎屑物がほぼ前弧の全域を均質に埋積したことを示唆する。

上述の紀伊半島西部の和泉層群最上部や関東山地の暁新統はいずれも低角度 MTL で分布南限を画されている (長谷川ほか, 2020a; 磯崎ほか,

図 3 百笑層砂岩と他地域の前弧盆地陸側縁の同年代砂岩 (紀伊半島西部の和泉層群最上部, 磯崎ほか, 2020; 関東山地の神農原礫岩と寄居層, 長谷川ほか, 2020a) とのジルコン年代スペクトル比較。現在弧横断方向に 80 km 以上離れている領家帯南縁と四万十帯中部に産する同年代砂岩中の年代スペクトルはよく類似する。

Fig. 3 Comparison of zircon age spectra in sandstone between the Domeki Fm and co-eval fore-arc formations in other regions (topmost Izumi Group of main fore-arc basin facies, Isozaki *et al.*, 2020; Kanohara conglomerate and Yorii Fm in Kanto district, Hasegawa *et al.*, 2020a). Their age spectra are similar, although their localities are currently for more than 80 km from each other in the across-arc direction between southern Ryoke belt and mid-Shimanto belt, SW Japan.

図 4 暁新世西南日本の弧-海溝系と百笑層堆積場の模式断面図。主要な前弧盆地（和泉層群）と同様に、ベンチ盆地（百笑層）へ碎屑物を供給した後背地は同時期の弧火成岩類ではほぼ占められていたこと、また先白亜紀ジルコンの流入が阻まれていたことに注目。

Fig. 4 Schematic profile of Paleocene arc-trench system of SW Japan with depositional site of Domeki Formation. Note that the detritus-feeding provenance for the bench basin of the Domeki Formation, as well as that for the main fore-arc basin of the Izumi Group, were occupied mostly by coeval arc igneous rocks, and that the flux of pre-Cretaceous zircons was totally restricted.

2020)。この低角度 MTL は、大陸側の白亜紀後期花崗岩類（領家帯・山陽帯）およびそれを覆う前弧堆積体（古第三系を含む和泉層群）を海洋側の三波川変成岩の上に衝上させており、その運動像の本質は暁新世以降におきた弧横断方向の地殻短縮にある（磯崎・丸山, 1991; Isozaki, 1996; 長谷川ほか, 2019, 2020a)。したがって、それ以前の暁新世弧-海溝系のなかで、和泉層群上部と百笑層とは、互いに弧横断方向に現在の隔離距離以上に離れて堆積したと推定される。暁新世の火山弧周辺で生産された火成岩由来の膨大な量の粗粒碎屑物は、おそらく幅が 100 km 近くに及ぶ当時の前弧全域に均質に配給されたと推定される（図 4）。

暁新世直前の白亜紀中頃-末期の前弧盆地についても、同様な弧火成岩由来の碎屑物配給パターンが報告されている。すなわち九州から北海道に至るまでの広領域に産する日本の浅海成上部白亜系砂岩は、いずれも直前の時期の火成岩由来の碎屑性ジルコンのみで特徴づけられ、一貫して白亜紀前期ないしそれ以前の粒子をほとんど伴わない（Aoki *et al.*, 2012; 中畑ほか, 2016; 長谷川ほか,

2020b; 石坂ほか, 2021)。これらの事実は、白亜紀中頃から古第三紀暁新世までの日本、そして東アジアの前弧域では火山弧由来碎屑物の独占的供給を受け続けた堆積場が 5000 万年間以上の長期にわたって安定に継続存在したことを記録している。また、砂岩の年代が若くなるにつれて、年代ピークも順次若くなることから、その後背地に露出した火成岩（火山岩）類の年代は新規火成活動に伴って順次更新されていったことを物語っている。

3) 白亜紀後期-暁新世テクトニクスへの新制限

上述の前弧堆積盆地における堆積作用および碎屑物組成の安定継続は、その期間を通じて後背地では表層地殻の大きな変更をもたらす大規模造構運動は起きなかったことを暗示する。古第三紀の西南日本前弧で起きた重要な地質学的事件として、三波川高压変成岩（三波川片岩）の地表露出および最初期 MTL の形成が想定されている。最後に、本研究結果が示唆するこれらのテクトニクス事件のタイミングに関する意義を議論する。

3-1) 三波川片岩の地表露出

三波川片岩はプレート沈み込みに伴い、おもに

付加体が地下深部で変成作用を被ってできた白亜紀の低温高压型変成岩であり、変成ピーク年代が異なる3つの変成岩からなる複合地質体の総称である (Aoki *et al.*, 2019; Knittel, 2019; Jia and Takeuchi, 2020)。これらは白亜紀末期 (マーストリヒティアン) までに変成場から前弧地殻の中部へと二次的に上昇・定置したが、最終的に地表露出したのは、最古の不整合関係に基づいて、始新世前期ないしそれ以前とされている (永井, 1972; 成田ほか, 1999)。三波川片岩を地表露出させるためには、もともと変成時にその上位に存在した (最大で約 40 km 厚) 地殻岩石 (古期地質体) の効率的な除去と表層削剝が不可欠となる。

現在の三波川片岩の構造的上位に累重する秩父累帯の多様な古生代-ジュラ紀付加体ナップ群の砂岩には相当量の先白亜紀粒子が含まれる (中間ほか, 2010; Isozaki *et al.*, 2010a など)。しかし、上述のように前弧盆地およびベンチ盆地の暁新世砂岩は、白亜紀以前の古期粒子をほとんど含まない (図 2)。また、先行して堆積した白亜紀後期の前弧砂岩も同様であった (長谷川ほか, 2020b)。したがって、三波川片岩の上盤をなした古期地質体の最終的除去すなわち三波川片岩の地表到達は、安定した碎屑物供給が終了した後、暁新世末-始新世初期 (およそ 56 Ma 頃) のきわめて短期間に起きたと推定される。三波川変成岩の東北延長とされる北海道の神居古潭変成岩についても、隣接する前弧盆地の地層である蝦夷層群から暁新世函淵層群に至るまで、同様に後背地の構成には大きな変化が認められない (石坂ほか, 2021)。このような広域にわたる白亜紀後期-暁新世の前弧砂岩中の碎屑性ジルコン年代の均質性は、アジア東縁の沈み込み帯で形成された白亜紀低温高压型変成岩が上昇し、最初に地表露出した時期が白亜紀まで遡ることはなく、暁新世/始新世境界頃に制限されることを強く示唆する。

3-2) MTL の出現時期

伝統的に最古の MTL 活動の証拠は中部地方の領家帯南縁部に産する鹿塩^{かしお}マイロナイトとされ、その黒雲母 K-Ar 年代に基づき MTL の出現は白亜紀後期まで遡るとされてきた (Hayama

and Yamada, 1980 など)。しかし、山本・増田 (1990) や小野 (2002) らが指摘した通り、鹿塩マイロナイト内部の水平な地質構造は高角度 MTL によって明瞭に切断されていることから、花崗岩類の一部が地殻深所で初生的にマイロナイト化された後に現在の領家/三波川帯間、すなわち MTL 沿に定置された地質体とみなされる。おそらく地殻深部の花崗岩体中に発達した水平デタッチメント面で形成されたマイロナイトの一部が、二次的に表層へ運ばれ、局所的に地表露出したものである可能性が高い (柳井ほか, 2010)。

一方で、現在観察される MTL は、古第三紀に活動した Paleo-MTL の低角度断層と第四紀に活動中である Neo-MTL の高角度断層からなり (磯崎・丸山, 1991; 山北ほか, 1995)、前者は後者に先行して形成されたことが、紀伊半島西部 (磯崎ほか, 2020)、三河地域 (Ohtomo, 1993; 長谷川ほか, 2019)、そして関東山地 (長谷川ほか, 2020a) で確認されている。そもそも同年代の花崗岩類と高压型変成岩とが密着隣接して形成されることはありえず、両者が二次的に接したことは疑いが無い。Paleo-MTL の活動開始時期については、それによって切断された領家花崗岩類の冷却固結年代 (白亜紀後期)、同花崗岩を不整合におおう和泉層群最上部の堆積年代 (暁新統)、あるいは三波川変成岩の再結晶化年代 (白亜紀末期) によって制限され、少なくともそれらの年代よりも若い暁新世ないしそれ以降と推定される。

さらに、筆者らの研究グループの一連の研究結果 (中畑ほか, 2016; 長谷川ほか, 2019, 2020a; 磯崎ほか, 2020; 石坂ほか, 2021; 本報告) は、白亜紀中頃のアルビアンから暁新世まで (少なくとも 5000 万年間程度) 前弧域の堆積場と後背地が長期間安定したテクトニクス場におかれていたことを示しており、MTL の活動開始が暁新世以降であったとする見解と調和的である。

大局的には、領家帯南縁の和泉層群およびその相当層は典型的な前弧盆地で堆積した地層とみなされる (Noda and Sato, 2017)。現在の分布総延長 (300 km 以上) と幅 (最大で 15 km) との比が異常に大きいことから、その堆積場として、

白亜紀後期に MTL が大規模な（数百 km 以上の変位）左横ずれ運動をした際に、それに伴って生じたプルアパート盆地を想定するモデルがかつて提案された（平ほか, 1981; Miyata *et al.*, 1992 など）。しかし、最近になって和泉層群およびその相当層が中部地方や関東北部でも確認され（長谷川ほか, 2019, 2020a）、その初生的延長は 1000 km 以上に及ぶこと、すなわちプルアパート盆地としては非現実的に長く、むしろ通常の前弧盆地のサイズに相当することが判明した。

本研究で確認された白亜紀-古第三紀前弧域での安定した堆積過程は、白亜紀の大規模横ずれ運動の想定とは非調和であり、中新世の日本海拡大事件に先行した西南日本の主要テクトニクス事件が起きたのは始新世-漸新世であったと考えられる（Isozaki *et al.*, 2021）。日本列島の白亜紀末-古第三紀のテクトニクスの詳細については、別稿で改めて議論する。

V. 結 論

古第三紀西南日本において前弧斜面上のベンチ盆地に堆積した暁新統百笑層の砂岩について碎屑性ジルコンの U-Pb 年代を測定した。その結果、ジルコンの大半は白亜紀後期から古第三紀粒子からなり、先白亜紀粒子をほとんど伴わないことが判明した。四万十帯北帯南縁の百笑層の後背地にはおもに山陰帯や領家帯・山陽帯の珪長質火成岩類が露出していたと推定される。同層砂岩のジルコン年代スペクトルは、領家帯南縁で堆積した同時期の大陸側前弧堆積体（紀伊半島の和泉層群最上部粉河層上部と名手層、さらに関東地方の神農原礫岩、寄居層、および大洗礫岩）のものと酷似する。領家帯南縁（主要前弧盆地の北縁）から四万十帯中央部（斜面ベンチ）に至るまで弧横断方向に 80 km 以上に及ぶ広範囲に渡って、暁新世前弧域へ供給された碎屑物はきわめて均質であったことが判明した。少なくとも白亜紀後期から暁新世末頃までの西南日本の前弧域には背後の火山弧から大量の碎屑物が供給される堆積場が長期間安定的に存在し、大きな地殻改変事件は起きなかったと推定される。三波川高圧変成岩のはじ

めての地表露出時期は暁新世末から始新世初頭（56 Ma 前後）の短期間に、また Paleo-MTL の低角度断層運動の時期も始新世以降に限定されることが確認された。

謝 辞

本研究を行うにあたって、駒場地球科学セミナーのメンバーから貴重な御意見をいただいた。また、粗稿について 2 名の匿名査読者から有用で建設的なコメントをいただいた。本研究には文部科学省科学研究補助金（no. 19H00711）を使用した。これらの援助に感謝する。

文 献

- Aoki, K., Isozaki, Y., Yamamoto, S., Maki, K., Yokoyama, T. and Hirata, T. (2012): Tectonic erosion of in Pacific-type orogen: Cetaceous tectonics in Japan. *Geology*, **40**, 1087-1090.
- Aoki, K., Isozaki, Y., Yamamoto, A., Sakata, S. and Hirata, T. (2015a): Mid-Paleozoic arc granitoids in SW Japan with Neoproterozoic xenocrysts from South China: New zircon U-Pb ages by LA-ICP-MS. *Journal of Asian Earth Sciences*, **97**, 125-135.
- Aoki, K., Isozaki, Y., Sakata, S., Sato, T., Yamamoto, S. and Hirata, T. (2015b): Detrital zircon geochronology of sandstones from Jurassic and Cretaceous accretionary complexes in the Kanto Mountains, Japan: Implications for arc provenance. *Engineering Geology of Japan*, **5**, 11-27.
- Aoki, K., Seo, Y., Sakata, S., Obayashim H., Tsuchiya, Y., Imayama, T., Yamamoto, S. and Hirata, T. (2019): U-Pb zircon dating of the Sanbagawa metamorphic rocks in the Besshi-Asemi-gawa region, central Shikoku, Japan, and tectono-stratigraphic consequences. *Journal of the Geological Society of Japan*, **125**, 183-194.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. and Fan, J.-X. (2013): The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, **36**, 199-204. <https://stratigraphy.org/chart> (updated in 2021) [Cited 2021/6/14].
- 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.
- Hara, H., Nakamura, Y., Hara, K., Kurihara, T., Mori, H., Iwano, H., Danhara, T., Sakata, S. and Hirata, T. (2017): Detrital zircon multi-chronology, provenance, and low-grade metamorphism of the Cretaceous Shimanto accretionary complex, eastern

- Shikoku, Southwest Japan: Tectonic evolution in response to igneous activity within a subduction zone. *Island Arc*, **26**, e12218.
- 長谷川 遼・磯崎行雄・大友幸子・堤 之恭 (2019): 中央構造線の活動開始時期: 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約. 地学雑誌, **128**, 391-417. [Hasegawa, T., Isozaki, Y., Ohtomo, Y. and Tsutsumi, Y. (2019): Onset timing of the Median Tectonic Line (MTL): Constraints from U-Pb ages of detrital zircons from 3 distinct Cretaceous sandstones 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・堤 之恭 (2020a): 破片化した過去の前弧碎屑岩類の地体構造上の帰属: 関東に散在する浅海/河川成白亜系・古第三系砂岩の碎屑性ジルコン U-Pb 年代測定. 地学雑誌, **129**, 49-70. [Hasegawa, T., Isozaki, Y. and Tsutsumi, Y. (2020a): Fragmented ancient fore-arc basin: Cretaceous-Paleogene sandstones sporadically found in Kanto and Southern Tohoku, Japan, as eastern extensions of the Izumi Group. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **129**, 49-70. (in Japanese with English abstract)]
- 長谷川 遼・磯崎行雄・山本純之・堤 之恭 (2020b): 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, T., Isozaki, Y., Yamamoto, A. and Tsutsumi, Y. (2020b): Secular changes in fore-arc 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)]
- Hayama, Y. and Yamada, N. (1980): Median tectonic Line at the stage of its origin in relation to plutonism and mylonitization in the Ryoke belt. *Memoir of the Geological Society of Japan*, **18**, 5-26.
- 飯泉 滋・今岡照喜 (2009): 白亜紀古第三紀の火成活動, 5.5 火成活動の時間的・空間的变化. 日本地質学会編: 日本地方地質誌 6 (中国地方). 朝倉書店, 324-327. [Iizumi, S. and Imaoka, T. (2010): Cretaceous-Paleogene igneous activities; 5.5 spatio-temporal changes. in *Regional Geology of Japan 6: Chugoku District (Nihon Chiho Chishitsushi 6 Chugoku Chiho)* edited by Geological Society of Japan, Asakura Shoten, 324-327. (in Japanese)*]
- 石坂湧人・磯崎行雄・堤 之恭 (2021): 西北海道の白亜系-古第三系前弧の後背地変遷—蝦夷層群の碎屑性ジルコン U-Pb 年代測定—. 地学雑誌, **130**, 63-83. [Ishizaka, Y., Isozaki, Y. and Tsutsumi, Y. (2021): Provenance change in cretaceous-Paleogene fore-arc in Western Hokkaido: U-Pb Dating of Detrital Zircons from the Yezo Group. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **130**, 63-83. (in Japanese with English abstract)]
- Isozaki, Y. (1996): Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: A new view of geotectonic subdivision and evolution of the Japanese Islands. *Island Arc*, **5**, 289-320.
- 磯崎行雄・丸山茂徳 (1991): 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地体構造区分. 地学雑誌, **100**, 697-761. [Isozaki, Y. and Maruyama, S. (1991): Studies on orogeny based on plate tectonics in Japan and new geotectonic subdivision of the Japanese Islands. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **100**, 697-761. (in Japanese with English abstract)]
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T. and Yanai, S. (2010a): New insight into a subduction-related orogen: Reappraisal on geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Research*, **18**, 82-105.
- 磯崎行雄・丸山茂徳・青木一勝・中間隆晃・宮下 敦・大藤 茂 (2010b): 日本列島の地体構造区分再訪—太平洋型 (都城型) 造山帯構成单元および境界の分類・定義—. 地学雑誌, **119**, 999-1053. [Isozaki, Y., Maruyama, S., Aoki, K., Nakama, T., Miyashita, A. and Otoh, S. (2010b): Geotectonic subdivision of the Japanese Islands revisited: Categorization and definition of elements and boundaries of Pacific-type (Miyashiro-type) orogen. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 999-1053. (in Japanese with English abstract)]
- 磯崎行雄・長谷川 遼・益田晴恵・堤 之恭 (2020): 紀伊半島西部, 和泉層群最上部からの古第三系の発見. 地質学雑誌, **126**, 639-644. [Isozaki, Y., Hasegawa, R., Masuda, H., and Tsutsumi, Y. (2020): Finding Paleogene beds in the uppermost Izumi Group in western Kii Peninsula, SW Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **126**, 639-644. (in Japanese with English abstract)]
- Isozaki, Y., Tsutsumi, Y. and Nakano, T. (2021): Age spectra of detrital zircons in Paleogene fore-arc sandstones in Japan and the mid-Eocene irreversible change: The onset timing of Median Tectonic Line. *Abstract 2021 Japan Geoscience Union*, SGL23-1.
- Jia, S. and Takeuchi, M. (2020): Sedimentary history and provenance analysis of the Sanbagawa belt in eastern Kii peninsula, Southwest Japan, based on detrital zircon U-Pb ages. *Journal of Asian Earth Sciences*, **196**, 104342.
- 鹿納晴尚 (2001): 高知県百笑層から産出する暁新世-始新世放散虫化石群集. 大阪微化石研究会誌特別号, **12**, 321-336. [Kano, H. (2001): Paleocene and Eocene radiolarians from the Domeki Formation, Shikoku, Southwest Japan. *Newsletter Osaka Micropaleontologists, Special Volume*, **12**, 321-336. (in Japanese with English abstract)]
- 甲藤次郎 (1952): 四国外帯の時代未詳層群に関する研究 第一報—四国西南部の中筋地溝帯における新観察. 高知大学学術研報・自然科学, **2**, 1-10. [Katto, J. (1952): Study on undated strata of the Outer

- belt of Shikoku, part 1: New observations in the Nakasuji graben, SW Shikoku. *Research Reports of Kochi University, Natural Science*, **2**, 1-10. (in Japanese with English abstract)]
- Knittel, U. (2019): Late Cretaceous age of eclogite facies metamorphism of the Sanbagawa belt in Asemi River area, Shikoku (SW Japan): Evidence from detrital zircon. *Journal of Asian Earth Sciences*, **177**, 48-51.
- Knittel, U., Walia, M., Suzuki, S., Lee, Y.H., Takesue, N. and Lee, H.Y. (2020): U-Pb ages and Hf isotope composition of zircon from the Shimanto accretionary complex: Evidence for heterogeneous sources. *Geochemical Journal*, **54**, 277-288.
- 松本達郎 (1980): 高知県四万十帯の頭足類化石. 平朝彦・田代正之編: 四万十帯の地質学と古生物学, 林野弘済会高知支部, 283-298. [Matsumoto, T. (1980): Cephalopods from the Shimanto belt of Kochi prefecture (Shikoku). in *Geology and Paleontology of the Shimanto Belt* edited by Taira, A. and Tashiro, M., Rinya-Kyosaikai, Kochi Branch, 283-298. (in Japanese with English abstract)]
- Miyata, T., Nishimura, T., Maejima, W. and Tanaka, J. (1992): Cretaceous strike-slip basin along the Median Tectonic Line. *29th International Geological Congress Fieldtrip Guidebook*, **1**, 213-223.
- 永井浩三 (1972): 四国, 始新統久万層群. 愛媛大学紀要, 自然科学Dシリーズ, **7**, 1-7. [Nagai, K. (1972): The Eocene Kuma Group, Shikoku. *Memoirs of the Ehime University, Natural Science, Series D*, **7**, 1-7. (in Japanese with English abstract)]
- 中畑浩基・磯崎行雄・小坂和夫・坂田周平・平田岳史 (2015): 関東山地北縁, 上部白亜系跡倉層・栃谷層の碎屑性ジルコン年代パターン—飛騨帯と中央構造線南縁との弧横断方向の関連—. 地学雑誌, **124**, 633-656. [Nakahata, H., Isozaki, Y., Kosaka, K., Sakata, S. and Hirata, T. (2015): Detrital zircon age spectra of the Upper Cretaceous Atogura and Tochiya formations in the northern Kanto Mountains, SW Japan: Evidence of across-arc link to the Hida Belt. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 633-656. (in Japanese with English abstract)]
- 中畑浩基・磯崎行雄・堤之恭 (2016): 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. (2016): 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)]
- 中間隆晃・平田岳史・大藤 茂・青木一勝・柳井修一・丸山茂徳 (2010): 日本列島の古地理学—碎屑性ジルコン年代頻度分布と造山帯後背地の変遷—. 地学雑誌, **119**, 1161-1172. [Nakama, T., Hirata, T., Otoh, S., Aoki, K., Yanai, S. and Maruyama, S. (2010): Paleogeography of the Japanese Islands: Age spectra of detrital zircon and provenance history of the orogen. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 1161-1172. (in Japanese with English abstract)]
- 成田耕一郎・山路 敦・田上高広・栗田裕司・小布施明子・松岡数充 (1999): 四国の第三系久万層群の堆積年代とその意義. 地質学雑誌, **105**, 305-308. [Narita, K., Yamaji, A., Tagami, T., Kurita, Y., Obuse, A. and Matsuoka, K. (1999): Depositional age of the Tertiary Kuma Group, Shikoku, and its significance. *Journal of the Geological Society of Japan*, **105**, 305-308. (in Japanese with English abstract)]
- Nishi, H. (1985): Litho- and biostratigraphy of the Oligocene-Miocene Nichinan Group in Miyazaki prefecture, Kyushu. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University, Series D (Geology)*, **25**, 289-317.
- Noda, A. and Sato, D. (2017): Submarine slope-fan sedimentation in an ancient forearc related to contemporaneous magmatism: The Upper Cretaceous Izumi Group, southwestern Japan. *Island Arc*, **27**, e12240.
- 野田雅之 (1980): 高知県宿毛中村地域の四万十帯から産するイノセラムス. 平朝彦・田代正之編: 四万十帯の地質学と古生物学. 林野弘済会高知支部, 265-282. [Noda, M. (1980): Some inoceramid species (Cretaceous Bivalvia) from the Sukumo-Nakamura are, Shikoku. in *Geology and Paleontology of the Shimanto Belt* edited by Taira, A. and Tashiro, M., Rinya-Kyosaikai, Kochi Branch, 265-282. (in Japanese with English abstract)]
- Ohtomo, Y. (1993): Origin of the Median Tectonic Line. *Journal of Science of Hiroshima University Ser. C*, **9**, 611-669.
- 岡村 眞・梅村隼夫・安田尚登 (1991): 四国中・西部の四万十帯の主要 Facies と変形. 日本地質学会第58年学術大会見学案内書, 85-119. [Okamura, M., Umemura, H. and Yasuda, H. (1991): Lithofacies and deformation of the Shimanto Belt, southwestern part of Shikoku. *Excursion guidebook of 98th Annual Meeting, Geological Society of Japan*, 85-119. (in Japanese)]
- 小野 晃 (2002): 鹿塩構造帯の地質構造と中央構造線. 地質学雑誌, **108**, 733-745. [Ono, A. (2002): Geological structure of the Kashio tectonic belt and the Median Tectonic Line: A study in the Ichinose region, Nagano prefecture, central Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **108**, 733-745. (in Japanese with English abstract)]
- Otofuji, Y., Matsuda, T. and Nohda, S. (1985): Opening mode of the Japan Sea inferred from paleomagnetism of the Japan arc. *Nature*, **317**, 603-604.
- 酒井治孝 (1988): 岬オリストストローム帯の成員と高千穂変動の再検討. 地質学雑誌, **94**, 945-961. [Sakai, H. (1988): Origin of the Misaki Olistos-

- trome belt and re-examination of the Takachiho orogeny. *Journal of the Geological Society of Japan*, **94**, 945–961. (in Japanese with English abstract)]
- Shimura, Y., Tokiwa, T., Takeuchi, M., Mori, H. and Yamamoto, K. (2019): Lithological, structural, and chronological relationships between the Sanbagawa metamorphic complex and the Cretaceous Shimanto accretionary complex on the central Kii peninsula, SW Japan. *Island Arc*, **28**, e12325.
- 鈴木達夫 (1938): 7万5千分の一地質図幅「宿毛」および同説明書. 地質調査所, 31p. [Sukuki, T. (1938): *1/75,000 Map Sheet Sukumo and Its Explanation*. Geological Survey of Japan, 31p.]
- 平 朝彦・田代正之・岡村 眞・甲藤次郎 (1980): 高知県四万十帯の地質と起源. 平 朝彦・田代正之編: 四万十帯の地質学と古生物学. 林野弘済会高知支部, 319–389. [Taira, A., Tashiro, M., Okamura, M. and Katto, J. (1980): The geology of the Shimanto belt in Kochi prefecture, Shikoku, Japan. in *Geology and Paleontology of the Shimanto Belt* edited by Taira, A. and Tashiro, M., Rinya-Kyosaikai, Kochi Branch, 319–389. (in Japanese with English abstract)]
- 平 朝彦・橋本光男・斎藤靖二 (1981): 日本列島形成の基本プロセス—プレートの斜め沈み込みと横ずれ運動. 科学, **51**, 508–515. [Taira, A., Hashimoto, M. and Saito, Y. (1981): Fundamental process of building Japanese Islands: Oblique subduction of plate and strike-slip movement. *Kagaku (Science)*, **51**, 508–515 (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, 69–88.
- Tamaki, K. (1985): Two modes of back-arc spreading. *Geology*, **13**, 475–478.
- 田中啓策 (1980): 地域地質研究報告 1/50000 図幅「伊予鹿島および宿毛地域の地質」. 地質調査所, 56p. [Tanaka, K. (1980): *Geology of the Iyokashima and Sukumo District, Quadrangle Series Scale 1:50000*. Geological Survey of Japan, 56p.]
- 田代正之 (1980): 高知県の四万十帯の二枚貝化石とその生層位. 平 朝彦・田代正之編: 四万十帯の地質学と古生物学. 林野弘済会高知支部, 241–264. [Tashiro, M. (1980): The bivalve fossils from the Shimanto belt of Kochi prefecture and their biostratigraphic implications. in *Geology and Paleontology of the Shimanto Belt* edited by Taira, A. and Tashiro, M., Rinya-Kyosaikai, Kochi Branch, 241–264. (in Japanese with English abstract)]
- 常盤哲也・市谷和也・志村侑亮・竹内 誠・山本鋼志 (2018): 赤石山地四万十帯白亜系赤石層群から得られた碎屑性ジルコン U-Pb 年代. 地質学雑誌, **124**, 539–544. [Tokiwa, T., Ichitani, K., Shimura, Y., Takeuchi, M. and Yamamoto, K. (2018): Detrital zircon U-Pb ages of the Cretaceous Akaishi Group in the Shimanto belt, Akaishi Mountains. *Journal of the Geological Society of Japan*, **124**, 539–544. (in Japanese with English abstract)]
- Tsutsumi, Y., Yokoyama, K., Terada, K. and Hidaka, H. (2011): SHRIMP dating of detrital zircons from the Sangun-Renge Belt of Sangun metamorphic rocks, northern Kyushu, Southwest Japan. *Bulletin National Museum Nature Science, Ser. C*, **37**, 5–16.
- 山北 聡・伊藤谷生・田中秀実・渡辺弘樹 (1995): 古期中央構造線としての佐志生断層の前期漸新世における top-to-the-west 斜め衝上運動. 地質学雑誌, **101**, 978–988. [Yamakita, S., Ito, T., Tanaka, H. and Wagtanabe, H. (1995): Early Oligocene top-to-the-west motion along the Sashu fault, a low-angle thrust of the Paleo-Median Tectonic Line, east Kyushu, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **101**, 978–988. (in Japanese with English abstract)]
- 山本啓司・増田俊明 (1990): 静岡県北西部水窪地域の領家帯マイロナイトの水平剪断変形. 静岡大学地球科学研究報告, **16**, 25–47. [Yamamoto, H. and Masuda, T. (1990): Sub-horizontal ductile shearing in mylonites of the Ryoike belt in the Misakubo district northwest Shizuoka Prefecture. *Geoscience Reports of Shizuoka University*, **16**, 25–47. (in Japanese with English abstract)]
- 山崎哲司・須槍和巳 (1990): 高知県宿毛市周辺の四万十帯南帯の微化石年代. 愛媛大学教育学部紀要 III 自然科学, **10**, 7–17. [Yamazaki, T. and Suyari, K. (1990): Micorfossil ages of the Southern Shimanto belt in the vicinity of Sukumo city, Kochi prefecture. *Memoirs of the Faculty of Education, Ehime University, Series III Natural Science*, **10**, 7–17. (in Japanese with English abstract)]
- 柳井修一・青木一勝・赤堀良光 (2010): 日本海の拡大と構造線—MTL, TTL そしてフォッサマグナ—. 地学雑誌, **119**, 1079–1124. [Yanai, S., Aoki, K. and Akahori, Y. (2010): Opening of Japan Sea and major tectonic lines of Japan MTL, TTL and Fossa Magna. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **119**, 1079–1124. (in Japanese with English abstract)]
- Yoshimoto, A., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Yonemura, K. and Ishizuka, H. (2013): U-Pb detrital zircon dating of pelitic schists and quartzite from the Kurosegawa Tectonic Zone, Southwest Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **108**, 178–183.

* Title etc. translated by N.T.