

三波川変成岩類の上昇：メカニズムとプロセス

君波和雄¹⁾

Exhumation of the high P/T Sanbagawa metamorphic rocks: Mechanism and process

*Kazuo Kiminami*¹⁾

要旨

三波川変成岩類の上昇メカニズム・プロセスは十分に明らかになっていない。本論では、変成岩類の原岩の堆積年代、三波川変成帯から北部秩父帯の地質構造に基づき、三波川変成岩類上昇メカニズムを検討する。三波川変成岩類の上昇シナリオは、以下のように推定される。1) 三波川変成帯は四万十帯北帯の深部相であり、北部秩父帯は三波川変成帯の上載層をなす。2) 三波川変成帯緑泥石帯は、四万十帯北帯のKS-IIからおもに構成され、少量のKS-Iを含む。3) KS-IIの主要堆積期であるカンパニアン期-前期マーストリヒチアン期に多量の陸源碎屑物が海溝に集積し、付加体深部で多量の底付けが行われた。4) KS-IIの底付けによって三波川変成帯から北部秩父帯の構成岩石が上昇した。KS-IとKS-IIは、初生的にほぼ水平に底付けした。底付けの進行によって焼山寺アンチフォームが形成され、その南翼を構成する三波川変成帯のKS-IとKS-IIおよび北部秩父帯が南傾斜、南フェーシングになった。5) 展張場となった三波川変成帯の北側と南側には白亜紀末-前期暁新世に正断層が形成され、上載層が除去された。

2022年5月05日受付

2022年6月22日受理

1) 北海道総合地質学研究センター

Hokkaido Research Center of Geology,

連絡先：753-0851 山口市黒川 807-3

Address: 807-3, Kurokawa, Yamaguchi 753-0851, Japan

Corresponding author: kimi@c-able.ne.jp

Keywords: Sanbagawa metamorphic belt, exhumation, Mikabu greenstones, Chichibu belt, Shimanto belt, underplating

はじめに

本論では、Platt (1986) や Platt・Wallis (1991) に従い、地球の表面が上がることを隆起 (uplift)、地下の岩体が地球の表面に近づくことを上昇 (exhumation) と表現する。高压変成岩類の上昇メカニズムとプロセスは、これまでに多方面から研究されてきた (例えば, Platt, 1986; Ring and Brandon, 2008; Konstantinovskaya and Malavieille, 2011; Graveleau et al., 2012; 丸山

ほか, 2004; Ruh, 2020)。Platt (1986) によれば、地下深くにあった変成岩の上昇メカニズムには、外からの力による“押し出し”、浮力による浮き上がり、付加体中の上向きの流れ、付加体の伸張などがあり、さらに変成岩の上にあった岩石 (overburden, 上載層) が地表の剝離により取り除かれることも必要である。また、Ring and Brandon (2008) は、沈み込み帯における上昇の要因として正断層、垂直的なダクティル薄化、およ

び浸食をあげている。個々の沈み込み帯における高压変成岩の上昇メカニズムは、Platt (1986) および Ring and Brandon (2008) によって指摘されたこれらの要因の一つまたは複数に由来しているのだろう。

三波川変成帯 (Fig. 1) は、九州から関東地方まで線状に分布し、地質構造や変成作用、放射年代、構造層序などに関する多数の研究がこれまでに行われている。三波川変成帯は、プレートの収束域で深部に沈み込んだ海洋地殻や海洋底堆積物、海溝堆積物などを原岩とする変成付加体と考えられている (例えば、Banno et al., 1978; Isozaki and Itaya, 1990; Kiminami et al., 1999; Okamoto et al., 2000)。三波川変成岩類の温度-圧力 (-時間) 経路に関しては、これまでに多くの議論 (例えば、Banno and Sakai, 1989; Takasu and Dallmeyer, 1990; Shinjoe and Tagami, 1994) がある。しかし、上昇メカニズムに関する言及は少ない。磯崎 (1988) や Shinjoe and Tagami (1994) は、後期白亜紀における海溝堆積物の大量付加が三波川変成岩類の上昇に関与した可能性を示唆している。磯崎・丸山 (1991) や Hara et al. (1992), Isozaki (1996) は、後期白亜紀におけるクラ-太平洋海嶺の沈み込みが三波川変成帯の上昇に関与したと推定した。Wallis (1998) は、浮力に駆動された大歩危ナップの貫入が別子ナップの上昇に重要な役割を演じていた可能性を指摘している。

一方、Maruyama et al. (1996) および丸山ほか (2004) は、世界の衝突型および太平洋型の造山帯の (超) 高压型変成岩に関して、上昇時の加水の重要性、温度・圧力履歴や変成年代、変成岩の上限と下限の構造的特性などに着目し、新たな上昇モデルを提案した。Maruyama et al. (1996) および丸山ほか (2004) は、三波川変成岩類の上昇に関して、海嶺沈み込みに伴うスラブの低角化によってウェッジの一部が薄い板状に絞り出されると考えた。しかし、阿部ほか (2001) は、関東地方の三波川変成岩類の剪断センスから、絞り出しモデルを否定している。丸山ほか (2004) の三波川変成岩類の上昇メカニズムは、低変成度 (緑泥石帯) の大歩危ユニットを三波川変成帯から除外しており、より高変成度の変成岩類を念頭においている。

本論では、三波川変成帯に最も広く分布する低変成度 (緑泥石帯) の変成岩類に焦点を絞り、四国東部の三波川変成帯、御荷鉾緑色岩類、北部秩父帯、黒瀬川帯の地質構造、形成年代、上昇年代、削剥年代などから変成岩類の上昇のメカニズムとプロセスを考察する。

地 質

ここでは領家帯から四万十帯北帯にかけての地質の概略および三波川変成帯から四万十帯北帯にかけての付加体の形成年代を説明し、付加年代の空間的な変化傾向に関しても言及する。

1. 領家帯

領家帯は、中央構造線に沿ってその北側に分布する (Fig. 1)。高温型の領家変成岩類と花こう岩からなり、後期白亜紀の和泉層群に不整合に覆われる。領家変成岩は、チャートや泥質岩などを原岩とする片岩や片麻岩からなる。Suzuki and Adachi (1998) は、山口県の柳井地域および愛知県の設楽を主とする地域の片麻岩に含まれるモナザイトの CHIME 年代として、102–98 Ma を報告した。また、柳井地域と設楽地域の深成岩類の CHIME 年代として、それぞれ 95–85 Ma と 95–68 Ma を報告している。そして、東側の設楽地域でより後まで深成活動が続いていたことを指摘した。一方、Takatsuka et al. (2018) は、愛知県の設楽地域で変成岩類および深成岩類のジルコン U–Pb 年代を検討し、それぞれ 97–89 Ma および 99–69 Ma を得た。この年代は、Suzuki and Adachi (1998) に報告された同地域の領家帯の CHIME 年代と大局的に一致している。

領家帯は、四国から紀伊半島にかけて分布する後期白亜紀の和泉層群によって不整合に覆われる。和泉層群は、西から東に向かって全体的に若くなる。四国西部の同層群の年代は、産出化石から前期-中期カンパニアン期、四国東部ではカンパニアン期最後期-マーストリヒチアン期初期と推定されている (西村, 2016)。Noda and Sato (2018) は、四国西部の和泉層群下部に挟まれる凝灰岩から 82.7 Ma (カンパニアン期初期) のジルコン U–Pb 年代を報告した。

2. 三波川変成帯

三波川変成帯は、北側の領家帯と南側の北部秩父帯とに挟まれた高压低温型の広域変成帯である。北側の境界が中央構造線であることに関してはコンセンサスが得られているが、南側については御荷鉾緑色岩類の帰属に関して議論がある。御荷鉾緑色岩類を三波川変成帯の南縁部の構成要素とする見解 (例えば、岩崎ほか, 1991) が一般的であるが、松岡ほか (1998) や村田・前川 (2009) のように、御荷鉾緑色岩類を北部秩父帯の北縁部の構成要素とする研究者も多い。Suzuki and Ishizuka (1998) も御荷鉾緑色岩類と北部秩父帯の北部とが変成作用の点で共通性が高いとしている。本論では御荷鉾緑色岩類を独立した地質単位として扱う。

三波川変成帯は、四国に典型的に分布し、多くの研究

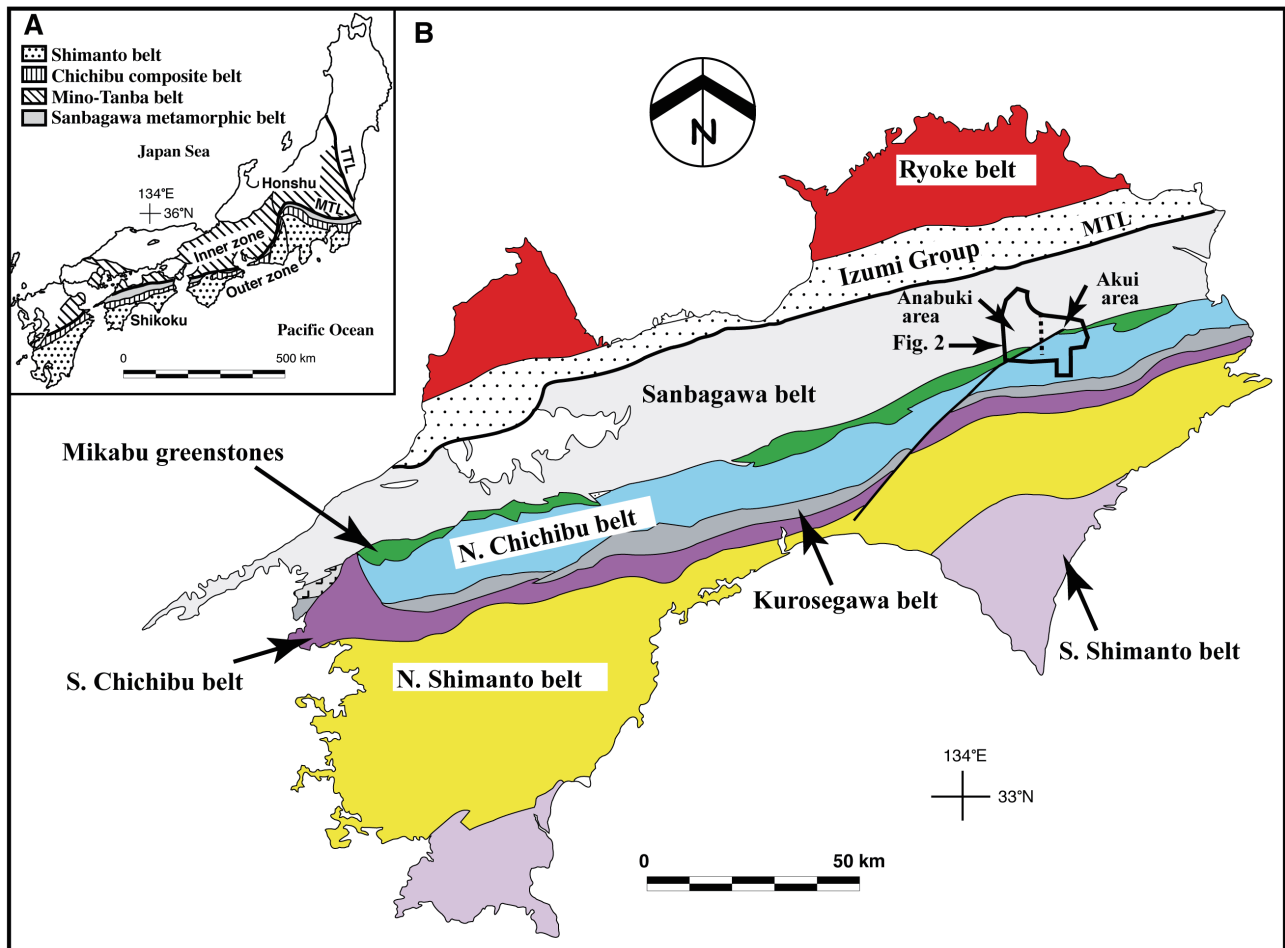


Fig. 1. Jurassic-Paleogene accretionary complexes in Southwest Japan (A), and geotectonic division of Shikoku and locations of mapped areas (Anabuki and Akui areas) (B). TTL: Tanakura Tectonic Line and MTL: Median Tectonic Line.

が行われているので、ここでは四国の三波川変成帯の概要を説明する。四国では原岩層序に基づく区分が古くから行われてきた。小島（1951）は、吉野川流域の三波川変成帯を下位から大歩危層、川口層、小歩危層、三縄層に区分した。さらに、小島ほか（1956a）は、三縄層の上位に大生院層を設定した。また、剣山研究グループ（1984）は、小島（1951）の調査地域を下位から川口層、小歩危層、三縄層に区分し、川口層と小歩危層を一部同時異相とした。剣山研究グループ（1984）の小歩危層は、小島（1951）の大歩危層と小歩危層に相当する。

これらの層序区分は、変成岩の原岩の相違に基づいて、堆積岩の場合と同様に行われている。しかし、三波川変成岩類がナップの積み重なりであることが明らかになり、ナップを単位とした構造層序区分が行われるようになった（例えば、Takasu and Dallmeyer, 1990; Hara et al., 1992）。本論では Takasu and Dallmeyer (1990) による上位の別子ユニット（ナップ）（三縄層と大生院層に相当）と下位の大歩危ユニット（ナップ）（川口層と小歩危層に相当）の名称をおもに用いる。

東野（1990）は、四国中央部汗見川沿いの三波川変成岩類を泥質片岩の鉱物共生に基づき、低温側から緑泥石帯、ザクロ石帯および黒雲母帯に分帯した。別子ユニットは緑泥石帯、ザクロ石帯および黒雲母帯からなり、大歩危ユニットは緑泥石帯からなる (Ernst et al., 1970)。榎並（1982）は、黒雲母帯をさらに曹長石-黒雲母帯と灰長石-黒雲母帯に細分した。

三波川変成帯を構成する諸岩石について、Rb-Sr 年代や K-Ar 年代、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代、U-Pb 年代、FT 年代などがこれまでに多数報告されている。四国中央部の別子ユニットのザクロ石帯～灰曹長石-黒雲母帯の白雲母 K-Ar 年代 (Itaya and Takasugi, 1988) と白雲母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代 (Takasu and Dallmeyer, 1990) はほぼ一致しており、多くが 85–75 Ma を示す。別子ユニットの緑泥石帯では、Itaya and Takasugi (1988) の白雲母 K-Ar 年代が 80–64 Ma を示すのに対して、Takasu and Dallmeyer (1990) の全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が 94–85 Ma を示す。大歩危ユニットでは、Itaya and Takasugi (1988) の白雲母 K-Ar 年代が 68–63 Ma を示すの対

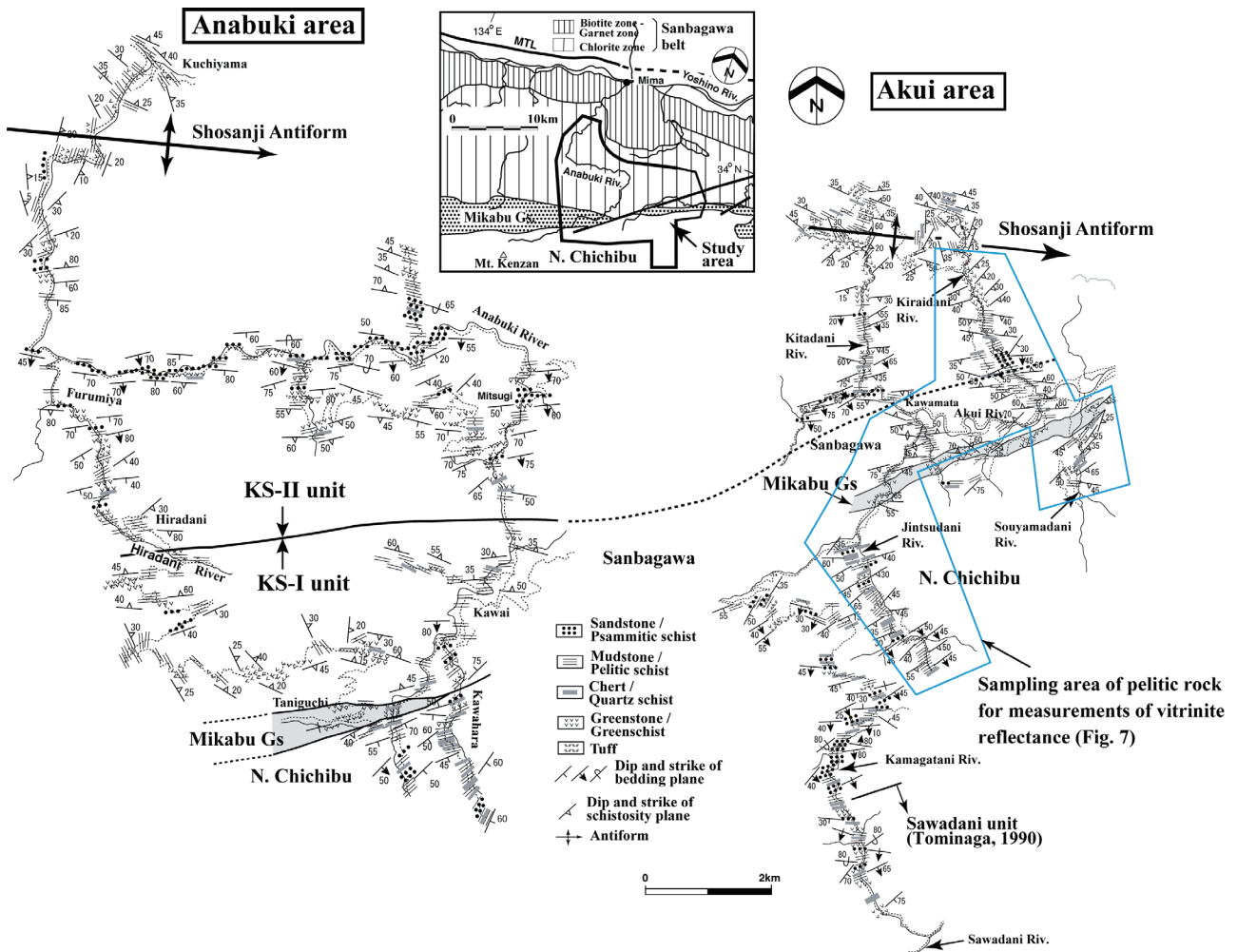


Fig. 2. Geologic map of the Anabuki and Akui areas, eastern Shikoku (modified from Kiminami and Toda, 2007 and Kiminami et al., 2007). See Fig. 1 for the location.

して、Takasu and Dallmeyer (1990) の全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が 77–70 Ma を示す。緑泥石帯においては白雲母 K–Ar 年代に比べて全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代の方が 20–5 my 程度古い。

以前、三波川変成岩類の原岩層の年代はジュラ紀（すなわち秩父累帯）と推定されていた（例えば、Banno and Sakai, 1989）。これは、三波川変成帯の一部と考えられていた御荷鉾緑色岩類のいくつかの地点から後期ジュラ紀の放散虫化石（岩崎ほか, 1984；Faure et al., 1991）が見いだされたことによるのだろう。Kiminami et al. (1999) は、四国中央部の大歩危ユニット中の砂質片岩の全岩化学組成と四国西部・東部の四万十帯北帯の砂岩の全岩化学組成を比較し、大歩危ユニットが四国東部の日和佐ユニット（カンパニアン期–前期マーストリヒチアン期）の深部相であると推定した。石濱・君波 (2000a) および Kiminami and Ishihama (2003) は、四国中央部の三波川変成帯緑泥石帯の砂質・泥質片岩の全岩化学組成と四国東部の四万十帯北帯の砂岩・泥岩の

全岩化学組成を比較し、緑泥石帯の中部・北部が四万十帯の KS-II ユニットに、南部が KS-I ユニットに対比される可能性を示した。さらに、君波・戸田 (2007) は、四国東部の三波川変成帯緑泥石帯（穴吹地域）と四万十帯北帯を同様の手法により比較検討し、三波川変成帯の北部が KS-II に、南部が KS-I に対比されることを示した (Fig. 2)。これらの結果は、四国三波川変成帯の緑泥石帯の多くが四万十帯北帯の深部相であることを示している。

一方、Aoki et al. (2007) や 大藤ほか (2010)、Knittel et al. (2014, 2018), Endo et al. (2018) は、三波川変成帯中の碎屑性ジルコンの U–Pb 年代と既に報告されている K–Ar 年代や $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代に基づき、緑泥石帯の原岩が後期白亜紀であると推定した。大藤ほか (2010) は、ジルコン U–Pb 年代や君波らによる一連の研究結果を考慮して、緑泥石帯を構造的低位の下部ユニットと構造的上位の上部ユニットに分け、上部ユニットが四万十帯北帯の北部、下部ユニットが四万十帯

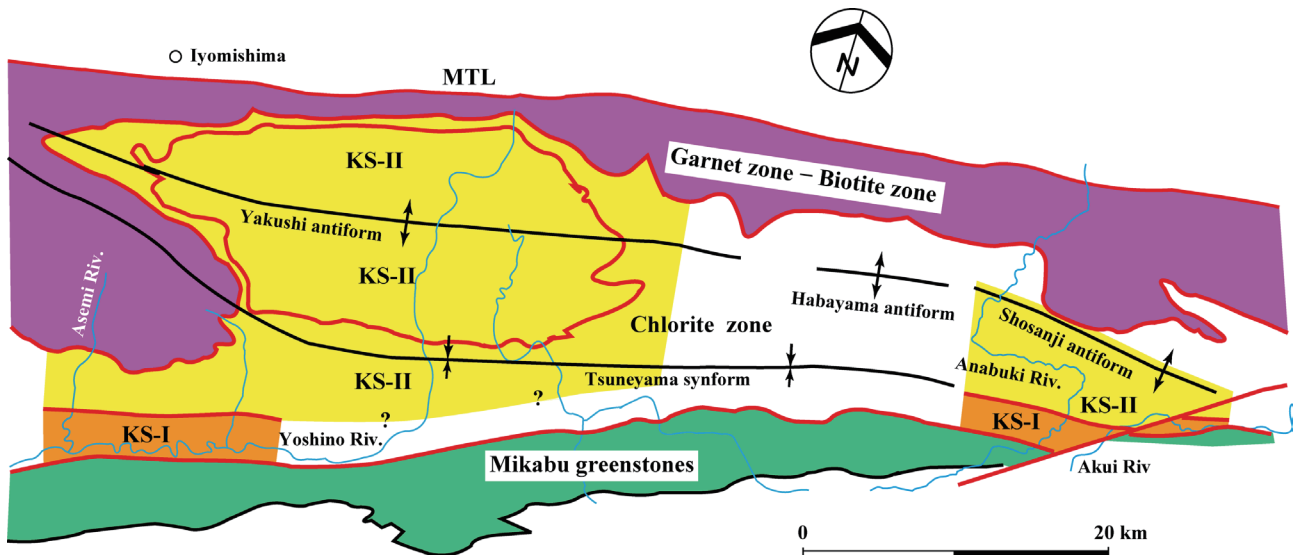


Fig. 3. Geotectonic division of the Sanbagawa belt for central and eastern Shikoku (after Hara et al., 1992) and areal distributions of the metamorphosed KS-I and KS-II units in the Sanbagawa belt.

北帯の南部に対比されたとした。Knittel et al. (2018) は、四国中央部の別子ユニットと大歩危ユニットの碎屑性ジルコンの U-Pb 年代を検討し、三波川変成帯全域が後期白亜紀に形成されたと結論づけた。Endo et al. (2018) や Aoki et al. (2019) による別子ユニットと大歩危ユニットの碎屑性ジルコン U-Pb 年代および既に報告されている K-Ar 年代や $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代も三波川変成帯のほぼ全域が後期白亜紀に形成されたことを示している。四国中央部の池田地域の別子ユニットおよび大歩危ユニットの碎屑ジルコンの U-Pb 年代と白雲母 K-Ar 年代を検討した Nagata et al. (2019) は、別子ユニットのザクロ石帯の碎屑性ジルコンの最も若い年代が 88.2–77.6 Ma (3 試料)、緑泥石帯の碎屑性ジルコンの最も若い年代が 74.3 Ma、大歩危ユニットの碎屑性ジルコンの最も若い年代が 86.3–71.1 Ma (4 試料)であることを示した。同時に報告された K-Ar 年代を考慮すると、この地域の別子ユニットおよび大歩危ユニットは、K-Ar 年代が白亜紀–古第三紀境界年代よりも若い一部の試料を除いて、後期白亜紀の四万十累層群を原岩としていると推定される。

これらの結果を整理すると、緑泥石帯の南縁部（御荷鉾緑色岩類の北側）の幅 4–2 km 程度は四万十帯の KS-I ユニットの深部相であり、その北側は KS-II ユニットの深部相であると推定される (Fig. 3)。

3. 御荷鉾緑色岩類

三波川変成帯と北部秩父帯との間に断続的に分布し (Fig. 1)、三波川変成岩類とは南に傾斜した断層で接する (榊原, 2016)。ここでは四国の御荷鉾緑色岩類の概要をおもに説明するが、必要に応じて他地域の御荷鉾緑

色岩類についても言及する。ハイアロクラスタイトやはんれい岩、はんれい岩質堆積物、チャート、石灰岩、赤色泥岩などから構成される。御荷鉾緑色岩類は、変成鉱物の組み合わせから、緑泥石帯に属し、三波川変成作用を受けたとされている (Banno and Sakai, 1989)。緑色岩に挟在された変成泥質岩からは、98–96 Ma の全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代が得られている (Dallmeyer et al., 1995)。

四国の御荷鉾緑色岩類の石灰岩から石炭紀およびトリアス紀のコノドントが報告 (須鎗ほか, 1980) されていることから、御荷鉾緑色岩類の付加年代は、トリアス紀以降と考えられる。岩崎ほか (1984) および Faure et al. (1991) は、御荷鉾緑色岩類の最上部を構成する赤色泥岩から後期ジュラ紀の放散虫化石を報告している。関東山地では御荷鉾緑色岩に整合的に重なる西御荷鉾層が知られており、同層も御荷鉾緑色岩類の一部とされている (関東山地団体研究グループ, 2002)。松岡 (1999) は、関東山地団体研究グループ (2002) が西御荷鉾層とした地層から後期ジュラ紀の放散虫化石を報告している。また、Sawada et al. (2019) は、紀伊半島西部の御荷鉾緑色岩類中の変塩基性岩のジルコン U-Pb 年代を測定し、 154.6 ± 1.6 Ma (キンメリジアン期) の年代を得た。以上の事実に基づけば、御荷鉾緑色岩類が付加したのはオックスフォードアン期とチューロニアン期との間と考えられる。

4. 秩父累帯

秩父累帯は、北から北部秩父帯、黒瀬川帯および南部秩父帯に区分される (松岡ほか, 1998 ; Fig. 1)。ここではおもに四国東部の秩父累帯の概要を説明する。

1) 北部秩父帯

北部秩父帯は、チャートや泥岩、砂岩、緑色岩、石灰岩からおもに構成される(須鎗ほか, 1982). 富永(1990)は、四国東部の北部秩父帯を北から(構造的低位から)剣山ユニット、東浦ユニットおよび沢谷ユニットに区分した。泥質岩の堆積年代はこの順序で古くなる。御荷鉾緑色岩類に近接した付近の泥岩は、片理もしくは劈開が顕著であり、片岩状から粘板岩状であるが、南側に向かって片理が弱くなる。層理面の走向は、大局的に東-西~東北東-西南西で、傾斜は60-30°Sである(Fig. 2). 泥岩と互層した砂岩の級化層理は、基本的に南フェーシングである。石田・香西(2003)は四国東部の北部秩父帯が全体的に南傾斜、南フェーシングであることを、辻・榊原(2008)は四国西部の北部秩父帯が広く北傾斜、南フェーシングであることを指摘している。

松岡ほか(1998)は、関東山地の研究(例えば、関東山地団体研究グループ, 1994)や四国西部の研究(山北, 1988)にもとづき、四国の北部秩父帯の構造層序を下位から柏木ユニット、上吉田ユニット、住居附ユニット、遊子川ユニットとした。松岡ほか(1998)によれば、柏木ユニットの形成年代が前期白亜紀前期、上吉田・住居附・遊子川ユニットの形成年代が前期ジュラ紀後期-後期ジュラ紀である。

一方、富永(1990)は、四国東部の北部秩父帯の堆積年代を放散虫化石から、剣山ユニットが中期ジュラ紀、東浦ユニットが前期ジュラ紀中期-後期、沢谷ユニットが前期ジュラ紀前期-中期とした。一般に北部秩父帯の北部は、変成作用を被っているために放散虫化石の保存が悪く、富永(1990)の剣山ユニットが北部秩父帯の北縁部をカバーしていないので、この地域の北部秩父帯の堆積年代はさらに若い年代にまで及ぶ可能性が高い。

北部秩父帯が南傾斜の衝上断層によっていくつかのユニットに区分されること、堆積年代が大局的に北に向かって若くなると推定されたことから、磯崎(1986)、Isozaki(1987)、富永(1990)およびTominaga(1990)は、この地域の付加体が南側にあった“黒瀬川古陸”の下に沈み込む収束域で形成されたと考えた。

2) 黒瀬川帯

黒瀬川帯と北部秩父帯との境界および黒瀬川帯の構成岩石に関しては、様々な議論がある(村田, 2016)。ここでは、黒瀬川帯を古期岩類(シルル系、デボン系、三滝火成岩類、寺野変成岩類)、浅海相ペルム系・トリアス系、蛇紋岩、ペルム紀メラランジュなどから構成される地帯とする。これらの岩石を不整合で覆って白亜紀堆積岩が分布する。古期岩類は、おもにレンズ状岩体として

産出する。

3) 南部秩父帯

四国東部の南部秩父帯は、北傾斜の魚成-神原谷スラストを介して北側の黒瀬川帯と接する(山北, 1998)。松岡ほか(1998)は、ジュラ紀付加体である南部秩父帯の統一的な構造層序を提案し、構造的低位から、多くの緑色岩と石灰岩から構成され、チャートや珪質泥岩、砂岩などを伴う三宝山ユニット、チャート・碎屑岩シーケンスの繰り返しからなる斗賀野ユニット、および混在岩相で特徴づけられる大平山ユニットに区分した。三宝山ユニットは、海山(列)の衝突・付加で形成されたと考えられている(松岡, 1998)。

松岡ほか(1998)によれば、南部秩父帯の各ユニットの堆積年代は、大平山ユニットが前期ジュラ紀ないし中期ジュラ紀、斗賀野ユニットが中期ジュラ紀後期~後期ジュラ紀前期、三宝山ユニットが後期ジュラ紀後期~白亜紀初期とされている。

5. 四万十帯北帯

四万十帯は、仏像構造線を介して北側の南部秩父帯と接し、安芸構造線によって北帯と南帯に区分される(Fig. 1)。四国東部の四万十帯北帯は、北から^{あき}榎谷ユニット、成瀬ユニット、古屋ユニット、日野谷ユニット、オソ谷ユニット、谷山ユニット(谷山メラランジュ)、日和佐ユニットおよび牟岐ユニット(牟岐メラランジュ)に区分される(石田, 1987; 君波ほか, 1998)。君波ほか(1998)の成瀬ユニットの分布域は、石田(1998)の榎谷ユニットの南部と重複する。石濱・君波(2000b)とKiminami and Ishihama(2003)は、この地域の四万十帯を砂岩のモード組成や化学組成に基づき、北側のKS-Iユニット(榎谷ユニットからオソ谷ユニット)と南側のKS-IIユニット(谷山ユニットから牟岐ユニット)に区分した。塊状砂岩と砂岩泥岩互層からなる成瀬ユニットの砂岩は、黒色を呈し、中間質から苦鉄質の火山岩岩片とともに、輝石、角閃石、緑泥石の結晶片を多量に含む。君波ほか(1998)は、成瀬ユニットの砂岩が関門層群の下関亜層群(アルビアン期)から供給されたと推定した。砂岩の化学組成も中間質から苦鉄質の火山岩からの供給を示唆する。KS-IユニットとKS-IIユニットの区分は、寺岡・奥村(1992)の佐伯亜帯と蒲江亜帯にほぼ相当する。KS-Iユニットの砂岩は、KS-IIユニットの砂岩に比べて一般に石英/長石比がより低く(KS-I: 0.63-1.02; KS-II: 1.27-1.95)、火山岩岩片に対する珪長質火山岩岩片の割合が低い傾向にある(Kiminami and Ishihama, 2003)。また、KS-IとKS-IIの砂岩は、SiO₂-Zr/TiO₂図上で異なった領域にプロットされる

(Kiminami and Ishihama, 2003). 君波ほか(1998)は、放散虫化石から KS-I の年代を後期アルビアン期から前期コニアシアン期, KS-II の年代をコニアシアン期からカンパニアン期と推定した. Hara et al. (2017) の碎屑性ジルコンの U-Pb 年代や成瀬ユニットと下関亜層群との対応関係を考慮すると, KS-I の年代はアルビアン期から前期コニアシアン期, KS-II の年代はコニアシアン期から暁新世と推定される.

6. 堆積 (付加) 年代の定向変化

三波川変成帯緑泥石帯から北部秩父帯は、級化層理が南フェーシングを示すが、ユニット単位の堆積 (付加) 年代は基本的に南側に向かって古くなる. 三波川変成帯の焼山寺アンチフォームの南側が最も若く、変成した KS-II ユニット (コニアシアン期-暁新世), その南側が変成した KS-I ユニット (アルビアン期から前期コニアシアン期), その南側に御荷鉾緑色岩類 (オックスフォード期とチューロニアン期との間), さらに南側に北部秩父帯柏木ユニット (前期白亜紀前期), 上吉田・住居附・遊子川ユニット (後期ジュラ紀-前期ジュラ紀後期) が続く. 御荷鉾緑色岩類の付加年代と柏木ユニットの付加年代の順序関係は不明であるが、黒瀬川帯の北側においては、基本的に南側に古くなる定向変化が認められる.

三波川変成岩類はいつ上昇したか？

三波川変成岩類の上昇年代や露出年代に関しては、放射年代および三波川変成帯由来の碎屑物の堆積年代から議論されている. ジルコンの FT 年代は、閉止温度が 240–210°C であり (Shinjoe and Tagami, 1994), 三波川変成帯緑泥石帯の変成温度 (300–250°C, Banno and Sakai, 1989) よりも低い. Shinjoe and Tagami (1994) は、大歩危ユニットが ca. 60 Ma にジルコン FT の閉止温度を通過して上昇したと推定した.

三波川変成岩由来の碎屑物を含む地層が四国にはいくつか知られている. 吉倉ほか (1991) は、四国東部の大山岬層中の結晶片岩礫から 78–71 Ma の K-Ar 年代を報告し、それらの起源を三波川変成帯に求めた. 大山岬層の堆積年代は、放散虫化石から中期始新世と推定されている (山崎ほか, 1993). 成田ほか (1999) は、従来の久万層群が下部始新統と中新統に区分され、三波川変成帯を不整合に覆っているひわだ峠層が下部始新統であることを明らかにした. 四国西部における三波川変成帯の地表への露出は、前期始新世以前である.

小柳津・君波 (2004) は、四国西部の四万十帯北帯・南帯の砂岩モード組成・化学組成を検討し、伊田層中の

砂岩が千枚岩、片岩および変成チャートの岩片を多量に含むことを明らかにした. 片岩は泥質片岩と石英片岩からおもに構成され、少量の塩基性片岩を含む. 砂岩によっては岩片の 60 % 以上が片岩から構成される. また、伊田層の砂岩は、全石英に対する複結晶石英の割合がほかの地層中の砂岩に比べて高い. 複結晶石英の割合が増えると変成岩片の含有量も増えるので、これらの複結晶石英の多くは、変成岩中の石英脈に由来している可能性が高い. また、伊田層砂岩は白雲母含有量もほかの地層の砂岩に比べて高い. 粗粒砂岩や細礫岩の鏡下観察では、ハリサイト構造を示した直径 1.5–0.5 mm 程度の斜長石の斑状変晶を含んだ片岩の岩片がときに認められる. これらの片岩の岩片は、いわゆる点紋片岩に由来すると考えられ、比較的変成度の高い変成岩からの供給を示唆している. 伊田層の砂岩は、 TiO_2 や TFe_2O_3 (Fe_2O_3 に換算した全鉄), MgO , Cr , Ni , V などの苦鉄質岩石に多く含まれる元素に富む. 小柳津ほか (2002) は、放散虫化石から伊田層の堆積年代を後期暁新世としている. 小柳津・君波 (2000, 2004) は、伊田層の主要な供給源が三波川変成帯であったと推定した. 小柳津・君波 (2004) は、この地域の前期-中期始新世加持層の砂岩が珪長質火山岩の岩片を多く含むことから、その供給源を内帯と推定した.

これらのデータに基づき、三波川変成岩類は、後期暁新世 (61.5–56 Ma) には一部の地域で地表に露出し、剝削をうけたと考えられる.

三波川変成帯から北部秩父帯の地質構造

三波川変成帯の低度変成堆積岩中にさまざまな堆積構造が保存されていることが古くから知られている (Kawachi, 1968). 君波ほか (2007) と君波・戸田 (2007) は、四国東部美馬市南部の穴吹川流域 (穴吹地域) と神山町西部の鮎喰川流域 (鮎喰地域) の三波川変成帯から多くの級化した砂質片岩を見いだした (Fig. 2). 両地域は、ザクロ石帯-黒雲母帯の南側に分布する緑泥石帯に該当し (Hara et al., 1992), 泥質片岩および砂質片岩からおもに構成され、少量の石英片岩を含む. 砂質片岩と泥質片岩の互層は、非変成のタービダイト砂岩と同様に砂質片岩の下底面はシャープな境界で泥質片岩と接し、上部では漸移的に泥質片岩に移行する. 両地域の北部に認められる焼山寺アンチフォームは、東南東方向に 20–15° プランジした西北西-東南東の軸を有する (Fig. 2). 焼山寺アンチフォームの南側に分布する三波川変成岩類は、御荷鉾緑色岩類に隣接した南部 (幅 3–1 km 程度) と軸部をのぞいて南傾斜、南フェーシングで安定

している。南部は、おもに北傾斜であるが、全体的に走向・傾斜が乱れている。穴吹地域では東側にブランチしたシンフォームが存在する可能性がある。少数ながら南上位が確認される。構造的特徴を異にするこの北部と南部について穴吹地域では砂質・泥質片岩の全岩化学組成が検討されており、北部は四国東部の四万十帯のKS-IIに、南部はKS-Iに対比される。北部と南部の泥質片岩の化学組成上の特徴が異なること、北部と南部の構造が両者の境界付近で急変することから、両者の境界は断層と推定される。Hara et al. (1992)の地質図によれば、津根山シンフォームの東方延長がKS-IとKS-IIとの境界に連続するようにみえる (Fig. 3)。これは、KS-IIが南傾斜、KS-Iがおもに北傾斜の地層からなるために生じた誤認と推定される。津根山シンフォームの少なくとも一部に関しては、再検討が必要だろう。穴吹地域のKS-IとKS-IIの境界は、構造的特徴から鮎喰地域に追跡される (Fig. 2)。

この南側には三波川変成岩の構造的上位に累重する (武田ほか, 1977; Hara et al., 1992) 露出幅数 100 m の御荷鉾緑色岩類が露出する。御荷鉾緑色岩類中の地層の傾斜は、南落ちもしくは北落ちである。岩崎 (1979) は、四国東部の三波川変成帯と御荷鉾緑色岩類との境界が南傾斜の衝上断層とした。村田・前川 (2009) や村田ほか (2010) は、四国中央部の御荷鉾緑色岩類とその北側の三波川変成帯との境界の断層を清水構造線きよみづとしたが、本来の清水構造線 (小島ほか, 1956b) は、より北側に設定されている。岩崎ほか (1991) は、御荷鉾緑色岩類中に観察される級化層理がすべて南フェーシングを示すとしている。関東山地の御荷鉾緑色岩類は、玄武岩の枕状構造から南フェーシングとされている (関東山地団体研究グループ, 2002)。また、御荷鉾緑色岩類の一部とされている西御荷鉾層の級化層は、南傾斜、南フェーシングである (関東山地団体研究グループ, 2002)。

御荷鉾緑色岩類の南側には北部秩父帯の砂岩や泥岩、チャートが露出する。石田・香西 (2003) は、四国東部の御荷鉾緑色岩類と北部秩父帯との境界を南落ちの正断層としている。鮎喰地域の北部秩父帯の調査域 (Fig. 2) は、沢谷ユニットの北部を含む。北部秩父帯の北縁部の泥岩は、スレート劈開が顕著である。同帯を構成する地層は、一部に北傾斜の逆転層が存在するものの、多くが南側に数十度で傾斜し、南フェーシングを示す。この地域で南フェーシングの地層が卓越することは、須館ほか (1982) や石田・香西 (2003) によっても指摘されている。

焼山寺アンチフォームの南側の三波川変成帯、御荷鉾

緑色岩類および北部秩父帯は、基本的に南傾斜、南フェーシングである。御荷鉾緑色岩類および北部秩父帯の構成岩石は、三波川変成帯の上載層を構成していたと推定される。焼山寺アンチフォームは、三波川変成帯だけではなく、北部秩父帯の基本構造も規定している。

底付け作用 (underplating) と変成岩類の上昇：

メカニズムとプロセス

1. 白亜系四万十累層群の底付け作用

付加体中の高圧型変成岩類が上昇する営力として、押し出し (2つの剛体に挟まれた変形しやすい物質が圧縮を受けて上昇)、浮力、走向移動断層、コーナー流、ダクタイルな薄化、浸食、展張に伴う正断層などが考えられてきた (Platt, 1993; Ring and Brandon, 2008)。高圧型変成岩類の地表への露出を考えるのにあたっては、隆起と上載層の除去に分けて考える必要がある。三波川変成帯緑泥石帯の変成岩の隆起は、北部秩父帯までを巻き込んでいると考えられる。広域的に隆起しているので、押し出しが主要な要因とは考えがたい。沈み込んだ堆積物は、より上位にある堆積物よりも密度が大きいと考えられるので、浮力による上昇は無理だろう。走向移動断層による上昇はPlatt (1993)によって説明されたように困難だと考えられる。穴吹-鮎喰地域のKS-IIユニットは、全体的に低角であり、構造的に安定していて、堆積構造もよく保存されていることから、流動による上昇を支持していない。ダクタイルな薄化は、地下の物質を相対的に上昇させることはできるが、山脈地域をつくるには不適切である。これらを考慮すると、何らかの原因で隆起し、展張に伴う正断層の形成もしくは (および) 浸食で三波川変成岩類が地表に露出した可能性が考えられる。まず、変成岩地域の隆起に関して検討する。

Scholl (2019) は、南米・北米西岸の沈み込み帯の前弧下における付加体深部 (30–10 km) で底付け作用が一般的であることを地震学的データから示した。Moore et al. (1991) は、アリューシャン弧-海溝系に直交する方向の地震波反射断面を作成し、コーディアク・アンチフォームの下の深さおよそ 35–10 km のところに層状の内部構造をもった厚さ約 15 km のほぼ水平の地質体を見いだした (Fig. 4)。Moore et al. (1991) は、この地質体を始新世-漸新世に底付けしたデュープレックスと推定した。これは底付け作用によって地表部にアンチフォームが形成された具体例である。ファンデフカプレートが沈み込むカスケード前弧 (Calvert et al., 2003, 2006) やフィリピン海プレートが沈み込む房総半島下 (Kimura et al., 2010)、ニュージーランド

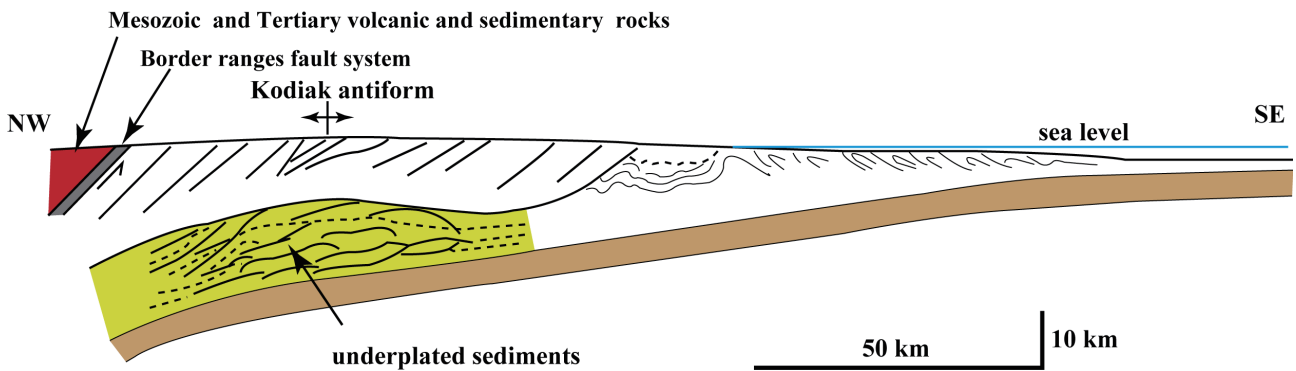


Fig. 4. Schematic illustration of subsurface structure showing the emplacement of layered reflectors by underplating of sediments in the eastern Aleutian arc-trench (after Moore et al., 1991).

(NZ) 北島東方でヒクラング海溝から太平洋プレートが沈み込む地域 (Bassett et al., 2010), アラビアプレートが沈み込むイランのマ克蘭 (Makran) 沈み込み帯 (Haberland et al., 2020) においても底付けした地質体の存在が知られている。カスケードのバンクーバー島の下では底付けした地質体の厚さは約 10 km, 房総半島の下では約 13 km, NZ 北島東方では数 km, マ克蘭沈み込み帯の前弧下では約 20 km である。NZ 北島東方の底付け地質体の上方は海底の隆起帯をつくっている。これらの地域の海溝は、いずれも陸源砕屑物の供給量が非常に高い (Scholl et al., 2015)。以上のとおり、太平洋の縁辺では、堆積物のアンダースラストに由来する底付け作用が極めて一般的である。アリューシャンやカスケード、房総半島などで確認されている底付けした地質体は、全体として低角であり、その中の反射面も低角である。

Graveleau et al. (2012) によってレビューされたように、付加体の構造や成長過程を理解するために多数のアナログ実験が行われている。それらの実験では付加体のレオロジー、デコルマの数、デコルマの摩擦、沈み込みの方向、沈み込みの速度、堆積物の供給、表面のプロセス（浸食と堆積）などが重要なファクターとして扱われてきた。付加体深部での底付けは、沈み込み境界のステップダウン (Kimura et al., 1996) によって起こり、その過程で2つのデコルマ（下位のデコルマ＝沈み込み境界はフローアデコルマ、上位のデコルマはルーフデコルマと呼ばれている）の間でデュープレックスが形成される。アナログ実験（例えば、Konstantinovskaya and Malavieille, 2005; Malavieille and Konstantinovskaya, 2010）や計算モデル (Ruh et al., 2020; Zilio et al., 2020) を通じて、デュープレックスの形成が付加体を厚化する様子が明らかにされてきた。Feng et al. (2015) は、デコルマに発展する

ような2つの弱い層の空間的配置がスラスト形成に与える影響を計算モデルで検討した。この実験によれば、2つのデコルマが上下に配置されている距離が長い場合にその間でデュープレックスの形成が顕著であった。Konstantinovskaya and Malavieille (2005, 2011) のアナログ実験は、フローアデコルマの摩擦が大きいと、底付けを起こしやすく、付加体後部におけるデュープレックスの形成が顕著になることを示している。Menant et al. (2020) による計算モデルは、深さ 30–15 km における継続的な底付け作用がドーム状の構造をつくり、前弧の広い地域を隆起させることを示した。また、多くの実験的研究は、底付けがバックストップ (backstop) に近い付加ウェッジの後部で起こることを示している（例えば、Feng et al., 2015; Ruh et al., 2000）。底付けが活発に進行するためには、海溝に堆積物が厚く堆積し、アンダースラストする海溝堆積物の厚さが厚く、フローアデコルマの摩擦が大きいのが必要と考えられる。

Figure 3 は、四国中部・東部の三波川変成帯の黒雲母–ザクロ石帯の分布 (Hara et al., 1992) および緑泥石帯における KS-I ユニットと KS-II ユニットの分布 (Kiminami et al., 1999; Kiminami and Ishihama, 2003; 君波・戸田, 2007; Kiminami, 2010) を示している。四国東部の焼山寺アンチフォームは西に向かってはばやま端山アンチフォーム、薬師アンチフォームに続くと推定され、これらは三波川変成帯の基本構造をつくるアンチフォームである。KS-I ユニットは、御荷鉾緑色岩類の北側に幅狭く分布するのみであり、緑泥石帯の多くは KS-II ユニットに占められる。この事実は、アルビアン期–前期コニアシアン期にはコニアシアン期–前期暁新世に比べて底付け作用が不活発であったことを示唆している。Figure 5 は、四国東部の四万十帯北帯の放散虫年代 (石田, 1987; 君波ほか, 1998) と碎屑性ジルコンの U–Pb 年代 (Hara et al., 2017) から、白亜紀

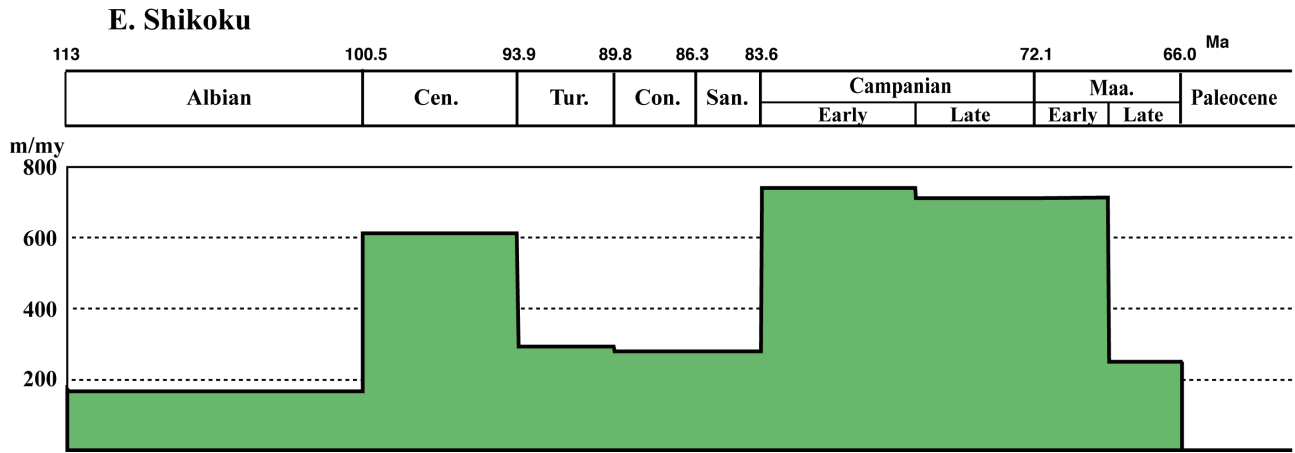


Fig. 5. Average apparent thickness per million years for each stage of the Cretaceous in the Northern Shimanto belt, eastern Shikoku.

の各ステージにおける単位時間の見かけの厚さを見積もった図である。この図は、セノマニアン期とカンパニアン期-前期マーストリヒチアン期に単位時間の見かけの厚さが大きいことを示している。セノマニアン期は多くの砂岩を含む日野谷ユニットの堆積期、カンパニアン期-前期マーストリヒチアン期は砂岩を主とする日和佐ユニットの堆積期に該当する。日和佐ユニットは、碎屑岩の化学組成の特徴から四国中央部の大歩危ユニットに対比された (Kiminami et al., 1999)。日和佐ユニットの見かけの厚さは、7-6 km に達し、四万十帯北帯分布幅の 1/2 から 1/3 を占める。付加体の見かけの厚さは、その堆積時における海溝の堆積速度を推測する目安になるだろう。海溝に供給される堆積物の量が増えるとアンダースラストする堆積物の量も増大する (Clift and Vannucchi, 2004)。カンパニアン期-前期マーストリヒチアン期における四万十海溝は、堆積速度が非常に大きかったので、多くの堆積物がアンダースラストしたと推定され、底付けが活発に進行したと考えられる。

Kiminami and Ishihama (2003) は、四国中央部の三波川変成帯別子ユニットの緑泥石帯と四国東部の四万十帯北帯の砂質岩と泥質岩の全岩化学組成を検討し、非変成の KS-I ユニットと KS-II ユニットが変成した KS-I ユニットと KS-II ユニットよりも砂質岩に非常に富むことを明らかにした。そして、非変成ユニットと変成ユニットとの岩相的な相違を海溝の外側に堆積した半遠洋性泥質堆積物と海溝に堆積した砂質堆積物との間にデコルマが形成され、粗い堆積物が浅部で付加し、細粒堆積物がアンダースラストして深部で底付けしたと推定した。日和佐ユニットの堆積時には、活動的の海嶺が海溝に近い位置に存在していた (Kiminami et al., 1994) 点で現在の北米西岸のカスケードやチリ南部西岸の沈み込み帯と類似している。両地域の海溝は、堆積物に非常に富

む。カスケードの海溝堆積物の厚さは 3-2 km (Davis and Hyndma, 1989; Gutscher et al., 2001; Syracuse et al., 2010)、チリ南部の海溝堆積物の厚さは 2.5 km (Scholl et al., 2015) である。Scholl et al. (2015) のコンパイルによって示された海溝堆積物の厚さは、スマトラ海溝北部のような特殊な場所を除くと、最大の厚さが 2.5 km である。

三波川変成帯から北部秩父帯の地層に認められる南傾斜、南フェーシングの構造は、Konstantinovskaya and Malavieille (2005, 2011) や Malavieille (2020) のアナログ実験で示された背斜状スタックのデュープレックスとシンフォーマル・クリップの形成 (Fig. 6) によって説明可能である。Haberland et al. (2020) は、マクラン沈み込み帯の底付け地質体が背斜状スタック (厚さ約 20 km, 海溝に直交する方向の幅約 50 km) のデュープレックスを形成していると推定した。KS-I と KS-II は、初生的にほぼ水平な底付け地質体だったと推定される。また、北部秩父帯も南部秩父帯と同じように初生的に北傾斜、北フェーシングだったと推定される。三波川変成帯の KS-II からなる背斜状スタックによって焼山寺アンチフォームが形成され、黒瀬川帯を軸にしてシーソーの片側 (北側) が持ち上がるように隆起し、三波川変成帯から北部秩父帯にかけての地域が南傾斜、南フェーシングの構造になったと考えられる。磯崎ほか (1992) や石田・香西 (2003) も三波川変成帯変成岩類が上昇することによってその上位にあったジュラ紀付加体 (北部秩父帯) の傾斜が南方向へと変化したと推定した。

世界各地の (超) 高压変成岩の上昇速度をコンパイルした Guillot et al. (2009) によれば、付加型の沈み込み帯における堆積岩を主とした高压変成岩の上昇速度は、0.6 mm/y から 5 mm/y の範囲である。Berger et al. (2008) によれば、南アラスカの St. Elias 造山における

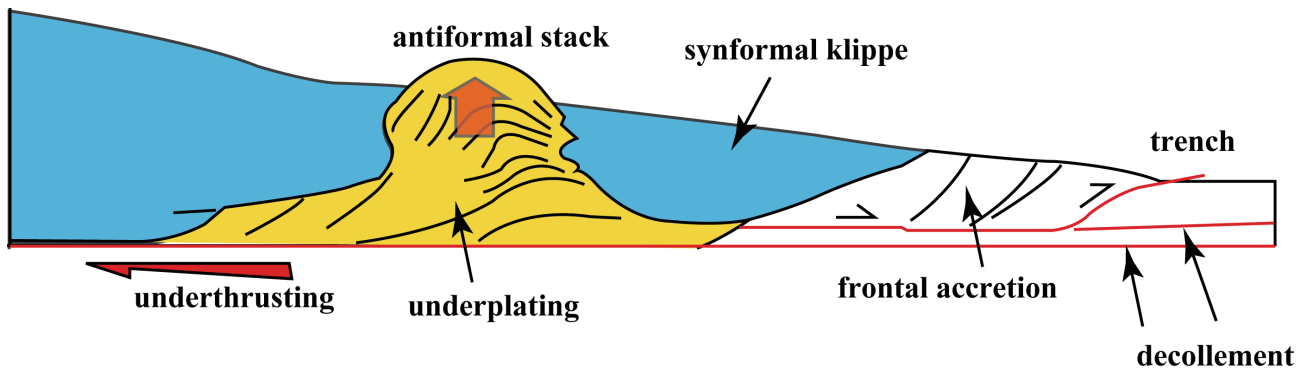


Fig. 6. Highly exhumed dome-like antiformal stack of underthrust layers at the rear of the wedge and a synformal klippe composed of overburden in front of the growing antiformal stack above the roof decollement were recreated in sandbox models (after Malavieille, 2020).

付加と氷食に起因する上昇速度は、0.4 mm/y である。また、Menant et al. (2020) の計算モデルは、長期間(100 万年オーダー) の活動的底付けに由来する地表の最大隆起は、1–5 mm/y であることを示している。これらの結果に基づけば、底付け起因する上昇速度は 0.4 mm/y から 5 mm/y と考えられる。三波川変成帯における主要な底付け期間をカンパニアン期–前期マーストリヒチアン期 (83.6–69.0 Ma)、この期間の底付け地質体である KS-II の形成深度を 20 km、地表への露出を暁新世と始新世の境界付近 (56 Ma) とすると、KSII の上昇速度は、0.7 mm/y から 1.5 mm/y になる。この上昇速度は、世界各地の底付け作用による上昇速度と調和的である。

2. 浸食による上載層の除去

隆起地域において、地下深部の岩石が上昇する重要な要因の一つは浸食である (例えば、Platt, 1986; Berger et al., 2008)。地表の浸食の程度は、隆起速度、起伏のサイズ・形態、岩石の硬度、気温や雨量などの気候的要素などに支配される (Willett, 1999)。Burbank (2002) は、既報の浸食速度を整理し、地表のプロセスによって持続的に削剥される速度は、5 mm/y (5 km/my) を超えると結論した。Ring et al. (1999) によれば、ニュージーランド・アルプスやヒマラヤ、パキスタンの Salt Range、中央アラスカ、南スペインなどの造山同時的な長期間におよぶ浸食速度は 15–1 km/my である。

大歩危ユニットの白雲母 K–Ar 年代 (Itaya and Takasugi, 1988) や全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代 (Takasu and Dallmeyer, 1990) は、同ユニットがおおよそ 70 Ma に最高変成度に達したことを示唆する。大歩危ユニットのジルコン FT 年代 (Shinjoe and Tagami, 1994) がおおよそ 60 Ma なので、大歩危ユニットは 60 Ma に上昇途中であり、240–210°C (Shinjoe and Tagami, 1994)

まで温度が低下した。そして、61.6–56 Ma (後期暁新世) には一部が地表に露出し、浸食を受けた。田中ほか (1999) は、深さ 300 m 以上の日本の坑井から得られた地温勾配をコンパイルしている。それに基づけば、深さ 6,000–4,000 m の坑井から得られた地温勾配の多くが 20°C/km から 30°C/km に収まる。前弧域の地温勾配は一般に小さいので、20°C/km を採用するとジルコン FT の閉止温度 240–210°C は、深さ 12 km から 10.5 km になる。緑泥石帯の温度・圧力条件は、300–250°C、6–5 kb (深さ約 20 km) と推定されている (Banno and Sakai, 1989)。大歩危ユニットが最高変成度に達してからジルコン FT の閉止温度 (深さ約 11 km) になるまでの 10 my の間に厚さ 9 km 程度の上載層が除去されたことになる。この期間における平均除去率は、0.9 km/my になる。また、大歩危ユニットの削剥開始を 56 Ma とすると、ジルコン FT の閉止温度から地表に達するまでの期間の平均除去率は、2.75 km/my になる。緑泥石帯が 70 Ma に深さ 20 km で最高変成度に到達し、削剥開始が 56 Ma であったとすると、この期間における平均除去率は、1.4 km/my になる。造山同時的な長期間におよぶ浸食速度が 15–1 km/my と見積もられているので、大歩危ユニットの上載層の平均除去率は、浸食作用で十分に説明可能である。厚さ 20 km に及ぶ付加体からなる上載層が削剥されると、その周辺や海溝には堆積岩に由来する碎屑物が多量に供給されることになる。

一方、四国西部の後期暁新世伊田層中には点紋片岩由来の碎屑物を含むので、緑泥石帯よりも構造的上位に位置したより高変成度の岩石がこの時期に露出した可能性がある。三波川変成帯で最も変成度の高いオリゴクレーヌ–黒雲母帯の温度・圧力条件は、610°C、10 kb (深さ約 30 km) と見積もられている (榎並, 1982)。

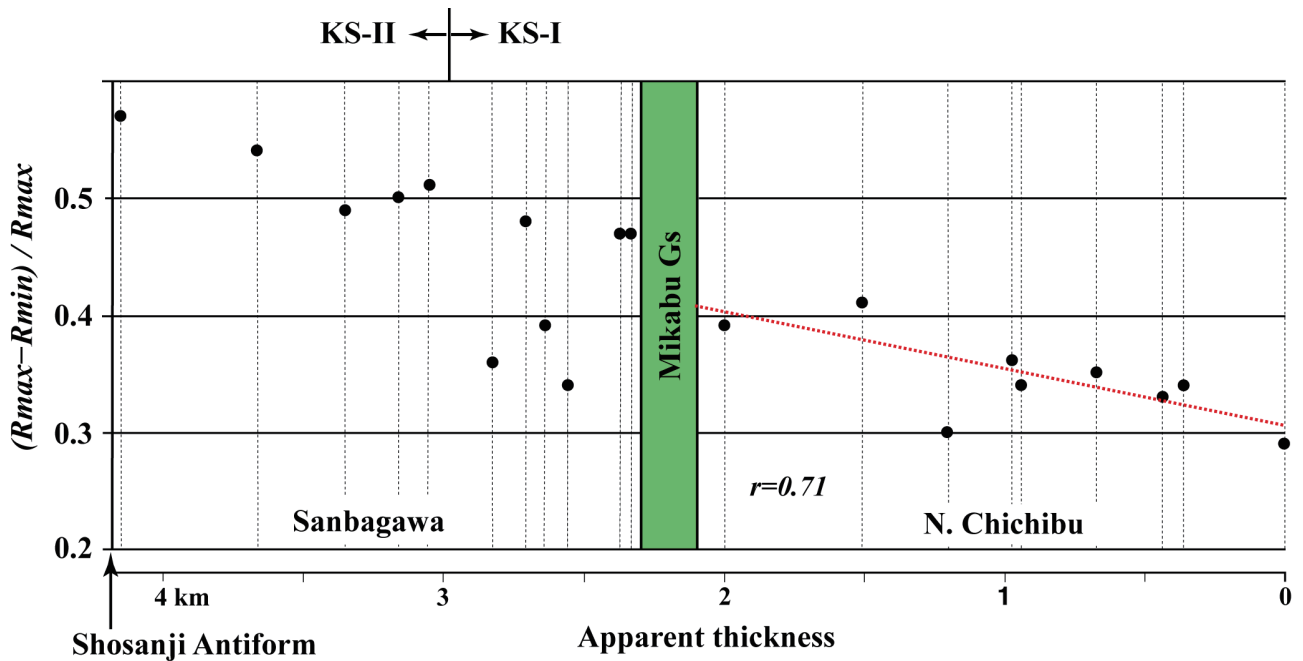


Fig. 7. Plot of the values of $(R_{\max}-R_{\min}) / R_{\max}$ versus apparent thickness for the Sanbagawa and Northern Chichibu belts, with regression line for the Northern Chichibu belt, the Akui area, eastern Shikoku (modified from Kiminami et al., 2007). $R_{\max}$ and $R_{\min}$ are maximum and minimum vitrinite reflectances. Dotted red line is regression line. r =correlation coefficient. See Fig. 2 for the sampling area.

四国中央部の三波川変成帯のオリゴクレス-黒雲母帯の白雲母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は、84.3 Ma (Takasu and Dallmeyer, 1990) である。白雲母のアルゴンに対する閉止温度が 400°C なので、この $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は冷却年代と考えられる。四国中央部のオリゴクレス-黒雲母帯の3試料の碎屑性ジルコンから得られた最も若い U-Pb 年代は、107.6 Ma, 97.7 Ma, 96 Ma (Aoki et al., 2019) である。この事実は、オリゴクレス-黒雲母帯が 96 Ma から 84.3 Ma の間に変成作用のピークを迎えたことを示している。仮に 90 Ma にピークを迎えたこととすると、34 my の間に厚さ 30 km の上載層が除去されたことになる。これがすべて浸食作用で除去されたとすると、平均浸食速度は、0.9 km/my になる。このケースにおいてもオリゴクレス-黒雲母帯の上載層の除去を浸食だけで説明することが可能である。しかし、マーストリヒチアン期から暁新世の堆積物には、非変成～弱変成の付加体を起源とする碎屑物があまりに少ない（例えば、君波ほか, 1998；小柳津・君波, 2004）。

3. 正断層による上載層の除去

高圧変成岩の隆起部に生じた展張場で正断層が形成され、上載層が除去されることがある (Platt, 1986, 1993; Willett et al., 1999; Selverstone, 2005; Ring and Brandon, 2008; Konstantinovskaya and Malavieille, 2011; Malavieille, 2020)。三波川変成帯の北側の領家帯は、ジュラ紀付加体を原岩とする高温

低圧型変成岩類と花こう岩から構成される。Okudaira et al. (2001) による柳井地域の深成岩類の冷却史に基づけば、この地域の深成岩類は 80 Ma 頃には 250°C まで冷却しており、四国の三波川変成帯緑泥石帯のピーク変成時 (ca. 74 Ma) には領家帯の深成岩類の多くがほぼ固化していたと考えられる。この事実は、四万十累層群が最も活発に底付けしていたカンパニアン期-前期マーストリヒチアン期には領家帯がバックストップ (backstop) をなしていたことを示している。

Fukunari and Wallis (2007) は、四国や紀伊半島の中央構造線が広域的に正断層の特徴をもつことを構造解析から明らかにし、中央構造線が三波川変成帯の上昇に関わっていたとした。Kubota and Takeshita (2008) は、四国西部の中央構造線の地質構造を検討し、三波川変成帯が最終的に上昇した 63-58 Ma (暁新世) に中央構造線が正断層として活動したことを明らかにした。そして、深部での底付けによる地殻の厚化と地表付近での展張によって正断層の形成を説明した。

御荷鉾緑色岩類と三波川変成帯との境界は断層と推定される (岩崎, 1979；村田・前川, 2009)。また、御荷鉾緑色岩類と北部秩父帯との境界断層 (飯谷断層, 南山断層) は、南傾斜の正断層とされている (石田・香西, 2003)。君波ほか (2007) は、四国東部の三波川変成帯南部と北部秩父帯北部のビトリナイト反射率を検討し、(最大反射率-最小反射率) / 最大反射率 (ビトリ

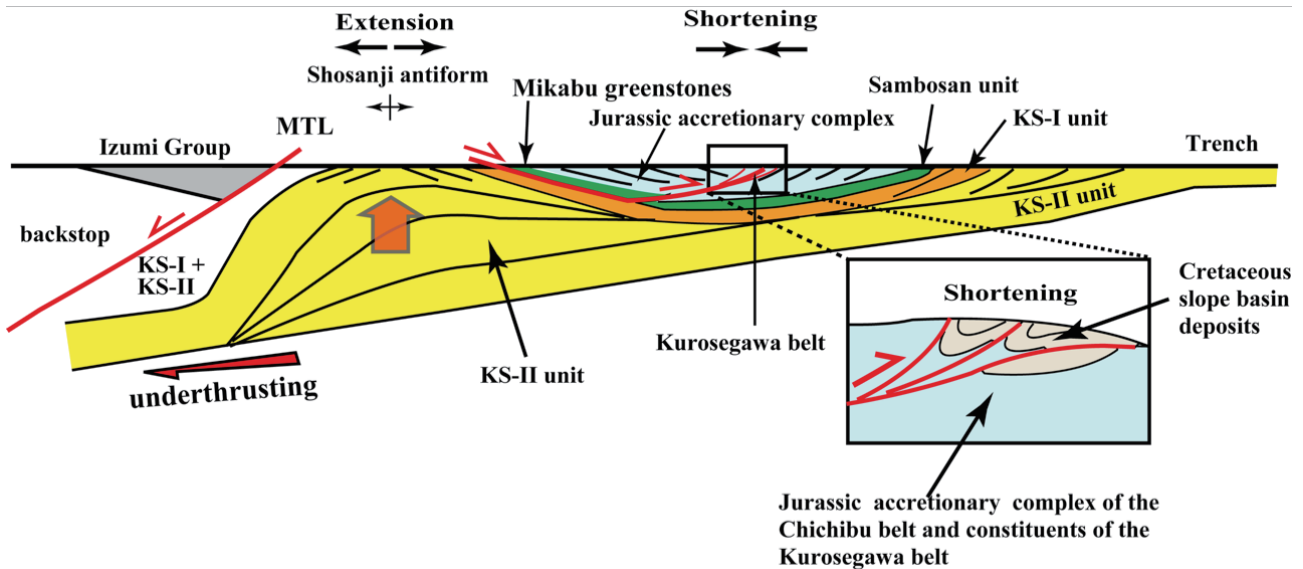


Fig. 8. Schematic cross-section along a N-S trend from the ancient Shimanto trench to the Ryoke belt in eastern Shikoku during the latest Cretaceous and early Paleogene showing the relation among the geologic units and geologic structure. See text for details. Not to scale.

ナイト反射率の3軸がつくる楕円体の扁平率)が埋没深度の指標(構造的低位に向かって扁平率が增大)になる可能性を指摘した。KS-IIの領域では焼山寺アンチフォームから南に向かって扁平率が小さくなる(Fig. 7)。KS-Iの領域では扁平率が変化に富むものの、その南縁部の扁平率は、北部秩父帯北縁部のそれよりも有意に大きい。北部秩父帯における見かけ厚さと扁平率の相関係数(r)は0.71であり(Fig. 7)、南に向かって(構造的上位に向かって)扁平率が小さくなる。これは、北部秩父帯北部の中では北側がより大きく上昇したことを示唆する。三波川変成帯と北部秩父帯の扁平率のギャップは、御荷鉾緑色岩類と三波川変成帯との境界、もしくは御荷鉾緑色岩類と北部秩父帯との境界が正断層であることを示唆する。松岡ほか(1998)や松岡(2013)の研究に基づけば、四国や関東山地における御荷鉾緑色岩類と北部秩父帯の構造的最低部の柏木ユニットとは分布や岩相が密接に関係しており、基本的に一連の地質体とされている。これらの見解を考慮すると、三波川変成帯と御荷鉾緑色岩類との間の断層が主要な断層と推定される。この断層は、三波川変成帯の上昇によって白亜紀末から古第三紀初期に形成された正断層と推定される。三波川変成帯と御荷鉾緑色岩類の境界を成す正断層および中央構造線は、三波川変成帯の上載層の除去に重要な役割を演じたのだろう(Fig. 8)。Selverstone(2005)は、造山帯における正断層による上載層の除去は、浸食による上載層の除去と同じ程度としている。

Tominaga and Hara(2021)は、関東山地の御荷鉾緑色岩中の斜長岩から 157.0 ± 0.9 Ma(後期ジュラ紀)

のジルコン U-Pb 年代を得た。この年代は、御荷鉾緑色岩類から得られている放散虫年代(岩崎ほか, 1984; 松岡, 1999)と調和的である。小澤ほか(1999)は、四国東部の御荷鉾緑色岩類の化学組成を検討し、ハワイの玄武岩やポリネシアの HIMU に類似するとした。これは御荷鉾緑色岩類が海台や海山起源であることを示している。南部秩父帯の南縁を構成する三宝山ユニットは、緑色岩や石灰岩、チャートなどから構成され、海山の衝突付加によって形成されたと考えられており(松岡ほか, 1998; 石塚ほか, 2003)、その付加年代は後期ジュラ紀から白亜紀初期とされている(松岡ほか, 1998)。御荷鉾緑色岩類と三宝山ユニットはそれぞれ北部秩父帯と南部秩父帯の構造的最低位を構成し、四万十帯と接している。これらの事実を考慮し、大藤ほか(2010)は、御荷鉾緑色岩類が三宝山ユニットの深部相と考えた。そして、御荷鉾緑色岩類と三波川変成岩との境界の断層を仏像構造線と解釈した。Isozaki et al.(2010)も御荷鉾緑色岩類と三波川変成帯との境界の断層を仏像構造線と解釈している。しかし、上述したように、御荷鉾緑色岩類と三波川変成帯との境界を仏像構造線とする見解は支持できないが、御荷鉾緑色岩類を三宝山ユニットの深部相であるとする見解には同意できる。

小川(1974)は、四国東部の秩父累帯の地質構造を検討し、黒瀬川帯(中帯)の基本構造が南フェルゲンツの閉じた褶曲と北に傾斜した断層で特徴づけられるとした。そして、これらの構造がカンパニアン期の地層を巻き込んでいるとした。Tominaga(1990)によって示された四国東部の木沢村坂州地域の地質図によれば、黒瀬

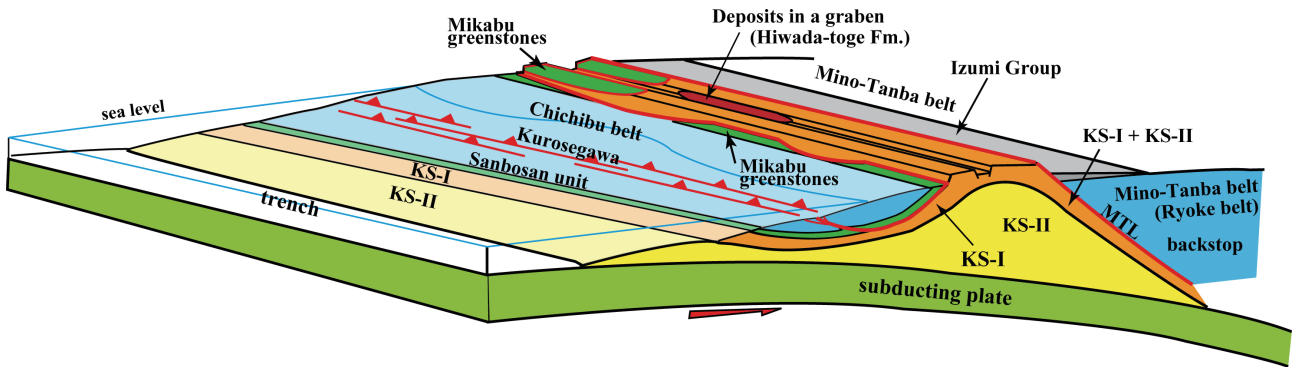


Fig. 9. 3D schematic view in Shikoku during the latest Cretaceous and early Paleogene showing the relation among the geologic units. See text for details. Not to scale.

川帯の北側に位置する北部秩父帯沢谷ユニットは、南に倒れた等斜褶曲や北落ちの衝上断層群によって特徴付けられる。これらの衝上断層と同系統の断層は、下部白亜系の南海層群を切っている（平山ほか，1956）のでその形成は後期白亜紀以降である。四国中央部の北部秩父帯沢谷ユニットを不整合で覆う物部川層群領石層（山北，1998）は、御在所山衝上断層を介して北側の北部秩父帯の構成岩石と接する（宮本，1980）。御在所山衝上断層は、北へ30–80°傾斜した逆断層である（伊熊，1980；村田，2014）。伊熊（1980）によれば、物部川層群とその上位の外泉層群は、複向斜構造をなしており、その北翼部の地層が逆転している。この褶曲群にはチューロニアン期–カンパニアン期の^{かしさこ}楮佐古層が参加しているので、褶曲の形成は白亜紀末以降になる。この地域の白亜系の一般走向にほぼ平行にのびる楮佐古構造線は、北もしくは南に高角度で傾斜し、北側のブロックが相対的に上昇している。この断層は、チューロニアン期–カンパニアン期の楮佐古層を切っているので、その形成時期は白亜紀末以降と推定される。伊熊（1980）は、この地域の構造解析に基づき、白亜紀堆積盆に直交する方向（北西–南東）に側方圧縮力が作用して褶曲構造が形成されたとした。北部秩父帯南縁に認められる断層群と褶曲群は、この地域が白亜紀末（もしくは以降）に圧縮場にあったことを示唆している。また、この地域の断層群は、一つの逆断層から派生したスプレー断層の可能性がある。

三波川変成帯と御荷鉾緑色岩類との境界の断層は、三波川変成帯の上昇によって形成された正断層である可能性が高く、その形成年代は白亜紀末から古第三紀初期と推定される。また、北部秩父帯南縁部の断層群はカンパニアン期以降に形成されており、御荷鉾緑色岩類北縁の断層と同じ年代に形成された可能性がある。三波川変成帯と御荷鉾緑色岩類との境界の正断層と北

部秩父帯南縁部の逆断層群が連続した断層と仮定すると（Fig. 8, 9），この断層は、Platt（1986）によって示されたフランシスカン・コンプレックス上昇モデルにおける正断層–逆断層とよく似た断層になる。また、この断層は、Konstantinovskaya and Malavieille（2011）や Malavieille（2020）のアナログ実験で形成された向斜状クリップの底部の断層に該当する。ヨーロッパアルプスにおいても、上昇域中心部における展張とその海溝側側面における同時的な短縮が推定されている（Selverstone, 2005）。

本論では白亜紀末から古第三紀初期における三波川変成帯の展張場と北部秩父帯南縁部における圧縮場がセットになっていた可能性、および御荷鉾緑色岩類と三波川変成帯の境界をなす正断層および中央構造線が三波川変成帯の上昇に関与した可能性を提案する。

4. まとめ：三波川変成岩類の上昇プロセス

白亜紀末–暁新世における三波川変成帯から海溝にいたる模式的な地質断面を Fig. 8 に示した。三波川変成岩類の上昇のシナリオは、以下のようにまとめられる。

- 1) アルビアン期から前期コニアシアン期の四万十海溝に KS-I ユニットが堆積した。三波川変成帯では変成した KS-I が底付けされたが、底付け作用は活発ではなかった。
- 2) カンパニアン期–前期マーストリヒチアン期に火成岩起源の陸源碎屑物が海溝に多量に運ばれた。それらの一部が浅部で付加して四万十帯北帯の KS-II ユニットの主要部をつくった。また、一部はアンダースラストして、付加体後部の深部で厚いデュープレックス（背斜状スタック）を形成した。変成したジュラ紀付加体や花こう岩類からなる領家帯は、四万十付加体のバックストップであった。
- 3) KS-II ユニットからなる厚い底付け地質体が形成され、三波川変成帯から北部秩父帯までの地域が大きく隆

起した。隆起量は北側でより大きかった。焼山寺アンチフォーム-端山アンチフォーム-薬師アンチフォームと続く地域が最も大きく隆起したと推定される。初生的にほぼ水平に底付けしたKS-IとKS-IIは、この隆起によって焼山寺アンチフォームの南側が南傾斜、南フェーシングになった。変成したKS-IとKS-IIの上には御荷鉾緑色岩類と北部秩父帯の構成岩石があったが、変成岩類が上昇する過程で除去された。北部秩父帯は、南部秩父帯と同様に初生的に北傾斜、北フェーシングであったが、北側がより大きく上昇したことにより、南傾斜、南フェーシングの構造に転換した。隆起によって展張場となった三波川変成帯の北側と南側には白亜紀末から前期暁新世にかけて正断層（中央構造線と御荷鉾緑色岩類北縁の断層）が形成された。中央構造線の北側には和泉層群が堆積した。同層群の堆積が東側に進行したのは、三波川変成岩類の上昇や中央構造線の断層活動が東側に進行したためかもしれない。三波川変成帯と御荷鉾緑色岩類の境界をなす正断層は、北部秩父帯南縁に分布する北傾斜の逆断層群（スプレー断層）に連続している可能性がある。この断層活動で北部秩父帯が向斜状のクリップとして南部秩父帯から切り離された。

4) 三波川変成帯緑泥石帯の上載層であった御荷鉾緑色岩類、北部秩父帯構成岩石、黒瀬川帯構成岩石は、正断層および浸食によって除去され、後期暁新世から前期始新世に変成岩類が地表に露出した。三波川変成帯の上に堆積した下部始新統ひわだ峠層は、展張場であった変成帯の上に形成された地溝に堆積したのだろう（Fig. 9）。
5) ザクロ石帯から黒雲母帯のより高度の変成岩類については本論で触れてこなかった。これに関して簡単に触れておく。

Endo et al. (2018), Knittel et al. (2018) および Aoki et al. (2019) により報告された四国中央部汗見川沿いの津根山シンフォーム（Fig. 3）の南側に分布するザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の碎屑性ジルコンの最も若いU-Pb年代は、Knittel et al. (2019) のエクロジャイトユニットの年代を除くと、107.6–90.3 Ma（10試料）であり、90 Ma よりも若い年代が見いだされないことから、この地域のザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の原岩が四万十帯のKS-Iユニットである可能性を示唆している。しかし、津根山シンフォームの北側に分布するアルバイト-黒雲母帯から85 Ma および80 Ma のジルコンU-Pb年代がKnittel et al. (2018) により得られており、一部がKS-IIユニットを原岩としている可能性を示唆している。また、Nagata et al. (2019) による中央構造線に近接した池田地域の別子ユニットザ

クロ石帯の白雲母K-Ar年代および碎屑性ジルコンのU-Pb年代は、この地域のザクロ石帯が四万十帯のKS-IIユニットの堆積岩を原岩としていることを示している。これらから、別子ユニットのザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の変成堆積岩は、KS-IとKS-IIの両ユニットを原岩としていると考えられる。別子ユニットのザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の一部は、御荷鉾緑色岩類に接して産出する変成KS-Iのさらに深部相になる。Brizzi et al. (2021) の計算モデルは、海溝堆積物が厚いと、堆積物がより深部まで沈み込むことを示している。ザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の変成岩類の一部は、四万十帯北帯のKS-Iユニット堆積期において堆積が最も活発であった日野谷ユニットを原岩としている可能性がある。四国中央部のザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の白雲母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代（Takasu and Dallmeyer, 1990）は、変成度に関係なく、89.3 Ma から79.3 Ma の範囲（12試料：av=83.0 Ma）に収まる。年代値が少し離れている89.3 Ma を除外すると84.2 Ma から79.3 Ma（11試料：av=82.4 Ma）といった狭い範囲に収まる。この年代を冷却年代とすると（Takasu and Dallmeyer, 1990）、ザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の変成岩類はカンパニアン期初期に上昇途上であったと考えられる。一方、この北東側に位置する池田地域のザクロ石帯のK-Ar年代（Nagata et al., 2019）は、より若いカンパニアン期後期に上昇途中にあったことを示している。ザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の原岩年代や $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代とK-Ar年代によって示される冷却年代は、北側ほど若くなる可能性があるが、さらに詳細な検討が必要だろう。

青矢・遠藤（2017）は、四国三波川変成帯中における超塩基性岩の産出がザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯に限定されることから、その産出が沈み込みの深さに依存しているとした。その場合、ザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の変成岩類は、マントル・ウエッジと沈み込むプレートとの境界付近に存在したサブダクション・チャネル（subduction channel）中の変成岩類が上昇したことになる。付加体の下で堆積物の底付けによっておもに形成された緑泥石帯のKS-IとKS-IIは、スラブがマントル・ウエッジに到達する以前に付加したと推定される。ザクロ石帯からオリゴクレーヌ-黒雲母帯の変成岩類の上昇メカニズムは、底付けで上昇した変成岩類（主に緑泥石帯）とは異なったメカニズムになるだろう。西南日本のカンパニアン期-マーストリヒチアン期は、活動的海嶺が海溝に接近しつつあったので（例えば、Kiminami et al., 1994; Muller et al.,

2016; Wu and Wu, 2019), スラブの低角化が起こり, サブダクション・チャネル (subduction channel) の変成堆積物が絞り出されてより高圧の変成岩類が上昇した可能性もある.

ここで述べた三波川変成岩類の上昇プロセスは, おもに四国東部の地質データに基づいており, 他地域への適用に関してはさらに検討が必要である.

謝辞: 本論は, 筆者が山口大学在任中に卒論生・大学院生とともに進めた研究に負うところが大きい. 査読者の大藤 茂博士 (富山大学) には, 多くの建設的なご意見をいただき, 本稿は大幅に改善された. 以上の方々に記して厚く感謝する.

文 献

- 阿部龍巳・高木秀雄・島田耕史・木村慎治・池山恵介・宮下 敦, 2001, 関東山地三波川変成岩類の延性剪断変形. 地質雑, **107**, 337–353.
- Aoki, K., Maruyama, S., Isozaki, Y., Otoh, S. and Yanai, S., 2011, Recognition of the Shimanto HP metamorphic belt within the traditional Sanbagawa HP metamorphic belt: New perspectives of the Cretaceous–Paleogene tectonics in Japan. *Jour. Asian Earth Sci.*, **42**, 355–369.
- Aoki, K., Iizuka, T., Hirata, T., Maruyama, S. and Terabayashi, M., 2007, Tectonic boundary between the Sanbagawa belt and Shimanto belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 171–183.
- Aoki, K., Seo, Y., Sakata, S., Obayashi, 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 tectonostratigraphic consequences. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **125**, 183–194.
- 青矢陸月・遠藤俊祐, 2017, 初期三波川変成作用の認識, 及び後期白亜紀三波川沈み込み帯の描像. 地質雑, **123**, 677–698.
- Banno, S., Higashino, T., Otsuki, M., Itaya, T. and Nakajima, T., 1978, Thermal structure of the Sanbagawa belt in central Shikoku. *Jour. Phys. Earth Suppl.*, **26**, 345–356.
- Banno, S. and Sakai, C., 1989, Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa belt, Japan. In: Daly, J.S., Cliff, R.A., Yardley, B.W.D. (Eds.), *Evolution of Metamorphic Belts. Spec. Publ., Geol. Soc.*, **43**, 519–532.
- Bassett, D., Sutherland, R., Henrys, S., Stern, T., Scherwath, M., Benson, A., et al., 2010, Three-dimensional velocity structure of the northern Hikurangi margin, Raukumara, New Zealand: Implications for the growth of continental crust by subduction erosion and tectonic underplating. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **11**, <https://doi.org/10.1029/2010gc0003137>.
- Berger, A.L., Spotila, J.A., Chapman, J.B., Pavlis, T.L., Enkelemann, E., Ruppert, N. and Buscher, J.T., 2008, Architecture, kinematics, and exhumation of a convergent orogenic wedge: A thermochronological investigation of tectonic–climatic interactions within the central St. Elias orogen, Alaska. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **270**, 13–24.
- Brizzi, S., Becker, T.W., Faccenna, C., Behr, W., van Zelst, I., Zilio, L.D. and van Dinther, Y., 2021, The Role of Sediment Accretion and Buoyancy on Subduction Dynamics and Geometry. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL096266.
- Burbank, D., 2002, Rates of erosion and their implications for exhumation. *Mineral. Mag.*, **66**, 25–52.
- Calvert, A.J., Fisher, M.A., Ramachandran, K. and Trehu, A.M., 2003, Possible emplacement of crustal rocks into the forearc mantle of the Cascadia Subduction Zone. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, doi:10.1029/2003GL018541.
- Calvert, A.J., Ramachandran, K., Kao, H. and Fisher, A., 2006, Local thickening of the Cascadia forearc crust and the origin of seismic reflectors in the uppermost mantle. *Tectonophysics*, **420**, 175–188.
- Clift, P.D. and Vannucchi, P., 2004, Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones; implications for the origin and recycling of the continental crust. *Rev. Geophys.*, **42**, doi: 10.1029/2003RG000127.
- Dallmeyer, R.D., Takasu, A. and Yamaguchi, K., 1995, Mesozoic tectonothermal development of the Sanbagawa, Mikabu and Chichibu belts, south-west Japan: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ whole-rock phyllite ages. *Jour. Metamor. Geol.*, **13**, 271–286.
- Davis, E.E. and Hyndman, R.D., 1989, Accretion and recent deformation of sediments along the northern Cascadia subduction zone. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **101**, 1465–1480.
- 榎並正樹, 1982, 四国中央部別子地域・三波川帯の灰長石–黒雲母帯. 地質雑, **88**, 887–900.
- Endo, S., Miyazaki, K., Danhara, T., Iwano, H. and Hirata, T., 2018, Progressive changes in lithological association of the Sanbagawa metamorphic complex,

- Southwest Japan: Relict clinopyroxene and detrital zircon perspectives. *Island Arc*, **27**, <https://doi.org/10.1111/iar.12261>.
- Ernst, W.G., Seki, Y., Onuki, H. and Gilbert, M.C., 1970, Comparative study of low-grade metamorphism in the California Coast Ranges and other metamorphic belt of Japan. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **124**, 276.
- Faure, M., Iwasaki, M., Ichikawa, K. and Yao, A., 1991, The significance of Upper Jurassic radiolarians in high pressure metamorphic rocks of SW Japan. *Jour. Southeast Asian Earth Sci.*, **6**, 131–136.
- Feng, L., Bartholomew, M.J. and Choi, E., 2015, Spatial arrangement of décollements as a control on the development of thrust faults. *Jour. Struct. Geol.*, **75**, 49–59.
- Fukunari, T. and Wallis, S.R., 2007, Structural evidence for large-scale top-to the north normal displacement along the Median Tectonic line in southwest Japan. *Island Arc*, **16**, 243–261.
- Graveleau, F., Jacques Malavieille, M. and Dominguez, S., 2012, Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics*, **538–540**, 1–66.
- Guillot, S., Hattori, K., Agard, P., Schwartz, S. and Vidal, O., 2009, Exhumation processes in oceanic and continental subduction contexts: A review. In Lallemand, S. and F. Funiciello, F., eds., *Subduction Zone Geodynamics*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 175–205.
- Gutscher, M.-A., Klaeschen, D., Flueh, E. and Malavieille, J., 2001, Non-Coulomb wedges, wrong-way thrusting, and natural hazard in Cascadia. *Geology*, **29**, 379–382.
- Haberland, C., Mokhtari, M., Babaei, H.A., Ryberg, T., Masoodi, M., Partabian, A., and Lauterjung, J., 2020, Anatomy of a crustal-scale accretionary complex: Insights from deep seismic sounding of the onshore western Makran subduction zone, Iran. *Geology*, **49**, 3–7.
- 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, DOI: 10.1111/iar.12218.
- Hara, I., Shiota, T., Hide, K., Kanai, K., Goto, M., Seki, S., Kaikiri, K., Takeda, K., Hayasaka, Y., Miyamoto, T., Sakurai, Y., Ohtomo, Y., 1992, Tectonic evolution of the Sambagawa schists and its implications in convergent margin processes. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C*, **9**, 495–595.
- 東野外志男, 1990, 四国中央部三波川変成帯の変成分帯. 地質雑, **96**, 653–670.
- 平山 健・山下 昇・須鎗和巳・中川衷三, 1956, 7万5千分の1 剣山図幅および同説明書. 51 p. 徳島県.
- 伊熊俊幸, 1980, 高知県領石・物部川地域の秩父累帯白亜紀層の変形. 地質雑, **86**, 389–407.
- 石田啓祐, 1987, 四国東部秩父累帯南帯の地質学的・微化石年代学的研究. 徳島大学教養部紀要 (自然科学), **20**, 47–121.
- 石田啓祐, 1998, 四国東部, 四万十累層群の岩相層序と放散虫年代. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no. **11**, 189–209.
- 石田啓祐・香西 武, 2003, 四国東部秩父累帯の地帯区分と層序. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **16**, 11–41.
- 石濱茂崇・君波和雄, 2000a, 砂質岩・泥質岩の化学組成からみた四国中央-東部における三波川(緑泥石帯)とジュラ-白亜紀付加体(秩父累帯南帯-四万十帯北帯)との関連. 地質学論集, no. **57**, 133–143.
- 石濱茂崇・君波和雄, 2000b, 砂岩と頁岩の化学組成に基づく四国東部秩父累帯南帯・四万十帯北帯の岩石相ユニット. 地質学論集, no. **57**, 97–106.
- 石塚英夫・三宅真紀・武田尚子, 2003, 四国西部～中東部の南部秩父帯三宝山ユニットに分布する緑色岩類の起源と変成作用. 地質雑, **109**, 267–279.
- 磯崎行雄, 1986, 秩父累帯北帯新改層とペルム紀末の黒瀬川地塊北縁部収束域. 地質雑, **92**, 497–516.
- Isozaki, Y., 1987, End-Permian convergent zone along the northern margin of Kurosegawa landmass and its products in central Shikoku, southwest Japan. *Jour. Geosci. Osaka City Univ.*, **30**, 51–131.
- 磯崎行雄, 1988, 三波川変成作用と三宝山-四万十帯の形成. 月刊地球, **10**, 367–371.
- 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.
- Isozaki, Y., Aoki, K., Nakama, T. and Yanai, S., 2010, New insight into a subduction-related orogen: A reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Res.*, **18**, 82–105.
- 磯崎行雄・橋口孝泰・板谷徹丸, 1992, 黒瀬川クリッペの検証. 地質雑, **98**, 917–941.
- Isozaki Y. and Itaya, T., 1990, Chronology of Sanbagawa metamorphism. *Jour. Metamorphic Geol.*, **8**, 401–411.

- 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.
- Itaya T. and Takasugi H., 1988, Muscovite K–Ar ages of the Sanbagawa schists, Japan and argon depletion during cooling and deformation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **100**, 281–290.
- 岩崎正夫, 1979, 三波川帯の基盤. 加納 博教授記念論文集「日本列島の基盤」, 281–298.
- 岩崎正夫・市川浩一郎・八尾 昭・Faure, M., 1984, 四国東部みかぶ緑色岩類中の緑色岩礫岩の時代. 日本地質学会関西支部報 97・西日本支部会報 **81** (合併号), 21.
- 岩崎正夫・鈴木堯士・須鎗和巳, 1991, 御荷鉾緑色岩類. 日本の地質 8 四国地方, 共立出版, 50–63.
- 関東山地団体研究グループ, 1994, 関東山地, 神流川流域の秩父累帯北帯. 地球科学, **48**, 83–101.
- 関東山地団体研究グループ, 2002, 関東山地, ミカブ緑色岩類に累重する砕屑岩層—西御荷鉾層の起源と堆積環境—. 地球化学, **56**, 333–346.
- Kawachi, Y., 1968, Large-scale overturned structure in the Sanbagawa metamorphic zone in central Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **74**, 607–616.
- 剣山研究グループ, 1984, 四国中央部大歩危地域の三波川帯の層序と地質構造. 地球科学, **38**, 53–63.
- Kiminami, K., 2010, Parentage of low-grade metasediments in the Sanbagawa belt, eastern Shikoku, SW Japan, and its geotectonic implications. *Island Arc*, **19**, 530–545.
- Kiminami, K., Hamasaki, A. and Matsuura, T., 1999, Geochemical contrast between the Sanbagawa psammitic schists (Oboke unit) and the Cretaceous Shimanto sandstones in Shikoku, Southwest Japan and its geologic significance. *Island Arc*, **8**, 373–382.
- Kiminami, K. and Ishihama, S., 2003, The parentage of low-grade metasediments in the Sanbagawa Metamorphic Belt, Shikoku, Southwest Japan, based on whole-rock geochemistry. *Sediment. Geol.*, **159**, 257–274.
- 君波和雄・松浦卓史・岩田尊夫・三浦健一郎, 1998, 四国東部に分布する白亜系四万十累層群の砂岩組成と白亜紀火山活動との関連. 地質雑, **104**, 314–326.
- 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・杉浦由希子・宮本真理子, 2007, 変成～弱変成付加体におけるビトリナイトの反射率と光学異方性: 四国東部の三波川変成帯—北部秩父帯を例として. 地質雑, **113**, 532–541.
- 君波和雄・戸田祐貴, 2007, 徳島県美馬市南部の三波川変成帯の変堆積岩の原岩層. 地質雑, **113**, 158–167.
- Kimura, H., Takeda, T., Obara, K. and Kasahara, K., 2010, Seismic evidence for active underplating below the megathrust earthquake zone in Japan. *Science*, **329**, 210–212.
- Kimura, G., Maruyama, S., Isozaki, Y. and Terabayashi, M., 1996, Well-preserved underplating structure of the jadeitized Franciscan complex, Pacheco Pass, California. *Geology*, **4**, 75–78.
- Knittel, U., Suzuki, S., Nishizaka, N., Kimura, K., Tsai, W.-L., Lu, H.-Y., Ishikawa, Y., Ohno, Y., Yanagida, M. and Lee, Y.-H., 2014, U–Pb ages of detrital zircons from the Sanbagawa Belt in western Shikoku: Additional evidence for the prevalence of Late Cretaceous protoliths of the Sanbagawa Metamorphics. *Jour. Asian Earth Sci.*, **96**, 148–161.
- Knittel, U., Walia, M., Suzuki, S. and Lee, Y.-H., 2018, U–Pb single grain zircon ages for Sanbagawa Metamorphic Rocks in central Shikoku (Japan): the Sanbagawa Belt re-united. *Okayama Univ. Earth Sci. Rept.*, **25**, 39–48.
- Knittel, U., Walia, M., Suzuki, S. and Lee, Y.-H., 2019, Late Cretaceous age of eclogite facies metamorphism of the Sanbagawa Belt in the Asemi River area, Shikoku (SW Japan): evidence from detrital zircon. *Jour. Asian Earth Sci.*, **177**, 48–51.
- 小島丈児, 1951, 四国中央部結晶片岩地域の層序と構造. 地質雑, **57**, 177–190.
- 小島丈児・秀 敬・吉野言生, 1956a, 四国三波川におけるキースラガーの層序学的位置. 地質雑, **62**, 30–45.
- 小島丈児・吉田博直・甲藤次郎・市川浩一郎・石井健一, 1956b, 四国西条—上八川路線に沿う三波川帯の地質. 地質雑, **62**, 317–326.
- Konstantinovskaya, E and Malavieille, J., 2005, Erosion and exhumation in accretionary orogens: Experimental and geological approaches. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **6**, doi:10.1029/2004GC 000794.
- Konstantinovskaya, E and Malavieille, J., 2011, Thrust wedges with décollement levels and syntectonic erosion: A view from analog models. *Tectonophysics*, **502**, 336–350.
- Kubota, Y. and Takeshita, T., 2008, Paleocene large-scale normal faulting along the Median Tectonic Line, western Shikoku, Japan. *Island Arc*, **17**, 129–151.
- 公文富士夫, 1981, 徳島県南部の四万十累帯白亜系. 地質雑, **87**, 277–295.
- Malavieille, J., 2020, Impact of erosion, sedimentation,

- and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies. *GSA Today*, **20**, doi: 10.1130/GSATG48A.1.
- Malavieille, J. and Konstantinovskaya, E., 2010, Impact of surface processes on the growth of orogenic wedges: Insights from analog models and case studies. *Geotectonics*, **44**, 541–588.
- Maruyama, S., Liou, J.G. and Terabayashi, M., 1996, Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *Internat. Geol. Rev.*, **38**, 485–594.
- 丸山茂徳・真砂英樹・片山郁夫・岩瀬康幸・鳥海光弘, 2004, 広域変成作用論の革新的変貌. 地学雑誌, **113**, 727–768.
- 松岡喜久次, 1999, 関東山地北縁, 御荷鉾緑色岩の赤色頁岩からのジュラ紀新世放散虫化石の発見. 地球科学, **53**, 71–74.
- 松岡喜久次, 2013, 関東山地北東部, 秩父帯北帯の柏木ユニット—岩相, 地質年代および海洋プレート層序—. 地球科学, **67**, 101–112.
- 松岡 篤, 1998, 四国西端部秩父累帯の地体構造区分. 地質雑, **104**, 565–576.
- 松岡 篤・山北 聡・榊原正幸・久田健一郎, 1998, 付加体地質の観点に立った秩父累帯のユニット区分と四国西部の地質. 地質雑, **104**, 634–653.
- Menant, A., Angiboust, S., Gerya, T., Lacassin, R., Simoes, M. and Grandin, R., 2020, Transient stripping of subducting slabs controls periodic forearc uplift. *Nature Com.*, **11**, doi.org/10.1038/s41467-020-15580-7.
- 宮本隆実, 1980, 西南日本外帯の秩父帯白亜系の層序学的・堆積学的研究. 広島大学地学研究報告, **23**, 1–138.
- Moore, J.C., Diebold, J., Fisher, M.A., Sample, J., Brocher, T., Talwani, M., Ewing, J., von Huene, R., Rowe, C., Stone, D., Stevens, C., and Sawyer, D., 1991, EDGE deep seismic-reflection transect of the eastern Aleutian arc-trench layered lower crust reveals underplating and continental growth. *Geology*, **19**, 420–424.
- Müller, R.D., Seton, M., Zahirovic, S., Williams, S.E., Matthews, S.E.K., Nicky, M., Wright, N.M., Shephard, G.E., Maloney, K.T., Barnett-Moore, N., Hosseinpour, M., Bower, D.J., and John Cannon, J., 2016, Ocean basin evolution and global-scale plate reorganization events since Pangea breakup. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **44**, 107–38.
- 村田明広, 2014, 四国中東部, 三嶺—剣山地域の御荷鉾緑色岩類～秩父北帯の地質構造. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **28**, 55–63.
- 村田明広, 2016, 秩父帯. 日本地方地質誌 7 四国地方, 朝倉書店, 103–150.
- 村田明広・犬房陽一・前川寛和, 2010, 四国中央部～西部, 上土居地域と小田地域における御荷鉾緑色岩類の地質構造. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **24**, 55–64.
- 村田明広・前川寛和, 2009, 四国中央部, 西石原地域における御荷鉾緑色岩類の地質構造. 徳島大学総合科学部自然科学研究, **23**, 73–81.
- Nagata, M., Miyazaki, K., Iwano, H., Danhara, T., Obayashi, H., Hirata, T., Yagi, K., Kouchi, Y., Yamamoto, K. Otoh, S., 2019, Timescale of material circulation in subduction zone: U–Pb zircon and K–Ar phengite double-dating of the Sanbagawa metamorphic complex in the Ikeda district, central Shikoku, southwest Japan. *Island Arc*, <https://doi.org/10.1111/iar.112306>.
- 成田耕一郎・山路 敦・田上高広・栗田裕司・小布施明子・松岡敷充, 1999, 四国の第三系久万層群の堆積年代とその意義. 地質雑, **105**, 305–308.
- 西村年晴, 2016, 和泉層群. 日本地方地質誌, 四国地方, 44–50.
- Noda, A. and Sato, D., 2018, Submarine slope-fan sedimentation in an ancient forearc-related to contemporaneous magmatism: The Upper Cretaceous Izumi Group, southwestern Japan. *Island Arc*, **27**, doi: 10.1111/iar.12240.
- 小川勇二郎, 1974, 四国東部秩父帯の地質構造. 地質雑, **80**, 439–455.
- Okamoto, K., Maruyama, S. and Isozaki, Y., 2000, Accretionary complex origin of the Sanbagawa, highP/T metamorphic rocks, Central Shikoku, Japan — Layer-parallel shortening structure and greestone geochemistry —. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **106**, 70–86.
- Okudaira, T., Hayasaka, ., Himeno, O., Watanabe, K., Sakurai, Y. and Ohtomo, K., 2001, Cooling and inferred exhumation history of the Ryoke metamorphic belt in the Yanai district, south-west Japan: Constraints from Rb–Sr and fission-track ages of gneissose granitoid and numerical modeling. *Island Arc*, **10**, 98–115.
- 大藤 茂・下條将徳・青木一勝・中間隆晃・丸山茂徳・柳井修一, 2010, 砂岩変岩中のジルコンの年代分布に基づく三波川帯再区分の試み. 地学雑誌, **119**, 333–346.
- 小柳津 篤・君波和雄, 2000, 四国西部の四万十帯における白亜紀末～古第三紀初期の砂岩組成とその意義. 地質学論集, no. 57, 29–41.
- 小柳津 篤・君波和雄, 2004, 四国西部四万十帯における白亜紀後期から古第三紀初期にかけての後背地の変遷とその意義. 地質雑, **110**, 403–416.

- 小柳津 篤・三浦健一郎・田中利治・林 久晃・君波和雄, 2002, 四国西部の四万十累層群の地質と放散虫年代. 地質雑, **108**, 701–720.
- 小澤大成・元山茂樹・井上宗弥・加藤康浩・村田 守, 1999, 四国東部みかぶ緑色岩類の岩石学的特徴. 地質学論集, no. **52**, 217–228.
- Platt, J.P., 1986, Dynamics of orogenic wedges and the uplift of high-pressure metamorphic rocks. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **97**, 1037–1053.
- Platt, J.P., 1993, Exhumation of high-pressure rocks: a review of concept and process. *Terra Nova*, **5**, 119–133.
- Platt, J.P.・Wallis, S.R., 1991, 高圧変成帯はどうやって上昇したのか. 科学, **61**, 535–543.
- Ring, U. and Brandon, M., 2008, Exhumation settings, Part I: Relatively simple cases. *Internat. Geol. Rev.*, **50**, 97–120.
- Ring, U., Brandon, M., Willett, S.D. and Lister, G.S., 1999, Exhumation processes. In Ring, U. and Brandon, M., ed., Exhumation Processes: Normal Faulting, Ductile Flow and Erosion. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **154**, 1–27.
- Ruh, J.B., 2020, Numerical modeling of tectonic underplating in accretionary wedge systems. *Geosphere*, **16**, <https://orcid.org/0000-0001-7035-1453>
- 榊原正幸, 2016, 御荷鉾緑色岩類. 日本地方地質誌 7 四国地方, 89–102.
- Sawada, H., Isozaki, Y., Aoki, S., Sakata, S., Sawaki, Y., Hasegawa, R. and Nakamura, Y., 2019, The Late Jurassic magmatic protoliths of the Mikabu greenstones in SW Japan: A fragment of an oceanic plateau in the Paleo-Pacific Ocean. *Jour. Asian Earth Sci.*, **169**, 228–236.
- Scholl, D.W., 2019, Seismic imaging evidence that forearc underplating built the accretionary rock record of coastal North and South America. *Geol. Mag.*, **158**, 1–14
- Scholl, D.W., Kirby, S.H., von Huene, R., Ryan, H., Wells, R.E. and Geist, E.L., 2015, Great (≥ MW8.0) megathrust earthquakes and the subduction of excess sediment and bathymetrically smooth seafloor. *Geosphere*, **11**, 236–265.
- Selverstone, J., 2005, Are the Alps collapsing? *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **33**, doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122535.
- Shinjoe, H. and Tagami, T., 1994, Cooling history of the Sanbagawa metamorphic belt inferred from fission track zircon ages. *Tectonophysics*, **239**, 73–79.
- 須鎗和巳・桑野幸夫・石田啓祐, 1980, 御荷鉾緑色岩に関する 2, 3 の問題. 中生代造構作用の研究, **2**, 21–29.
- 須鎗和巳・桑野幸夫・石田啓祐, 1982, 御荷鉾緑色岩類およびその周辺の層序と構造—その 2. 四国東部秩父累帯北帯の中生界層序に関する 2・3 の知見—, 徳島大学教養部紀要 (自然科学), **15**, 51–71.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1998, Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Jour. Metamor. Geol.*, **16**, 23–37.
- Suzuki, S. and Ishizuka, H., 1998, Low-grade metamorphism of the Mikabu and northern Chichibu belts in central Shikoku, SW Japan: Implications for the areal extent of the Sanbagawa low-grade metamorphism. *Jour. Metamor. Geol.*, **16**, 107–16.
- Syracuse, E.M., van Keken, P.E. and Abers, G.A., 2010, The global range of subduction zone thermal models. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **183**, 73–90.
- Takasu, A. and Dallmeyer, R.D., 1990, ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral age constraints for the tectonothermal evolution of the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan: a Cretaceous accretionary prism. *Tectonophysics*, **185**, 111–139.
- Takatsuka, K., Kawakami, T., Skrzypek, E., Sakata, S., Obayashi, H. and Hirata, T., 2018, Spatiotemporal evolution of magmatic pulses and regional metamorphism during a Cretaceous flare-up event: Constraints from the Ryoke belt (Mikawa area, central Japan). *Lithos*, **308–309**, 428–448.
- 武田賢治・佃 栄吉・徳田 満・原 郁夫, 1977, 三波川帯と秩父帯の構造的関係. 秀 敬編「三波川帯」, 広島大学出版研究会, 107–151.
- 田中明子・矢野雄策・笹田政克・大久保泰邦・梅田浩司・中司 昇・秋田藤夫, 1999, 坑井の温度データによる日本の地温勾配値のコンパイル. 地質調査所月報, **50**, 457–487.
- 寺岡易司・奥村公男, 1992, 四万十帯北帯の構造区分と白亜系砂岩組成. 地質学論集, no. **38**, 261–270.
- 富永良三, 1990, 四国東部秩父帯北帯のジュラ紀付加体. 地質雑, **96**, 505–522.
- Tominaga, R., 1990, Tectonic development of the Chichibu Belt, Southwest Japan. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C*, **19**, 377–413.
- Tominaga, K. and Hara, H., 2021, Paleogeography of Late Jurassic large-igneous-province activity in the Paleo-Pacific Ocean: Constraints from the Mikabu greenstones and Chichibu accretionary complex, Kanto Mountains, Central Japan. *Gondwana Res.*, **89**,

- 177–192.
- 辻 智大・榊原正幸, 2008, 四国西部における北部秩父帯の大規模逆転構造. 地質雑, **115**, 1–16.
- Wallis, S., 1998, Exhuming the Sanbagawa metamorphic belt: the importance of tectonic discontinuities. *Jour. Metamorphic Geol.*, **16**, 83–95.
- Willett, S.D., 1999, Orogeny and orography: The effects of erosion on the structure of mountain belts. *Jour. Geophys. Res.*, **104**, 28957–28981.
- Wu, J.T.J. and Wu, J., 2019, Izanagi-Pacific ridge subduction revealed by a 56 to 46 Ma magmatic gap along the northeast Asian margin. *Geology*, **47**, 953–957.
- 山北 聡, 1998, 北部秩父帯とはどの範囲か—北部秩父帯と黒瀬川帯をめぐる地体区分状上の問題—. 地質雑, **104**, 623–633.
- 山崎哲司・横田佳憲・奥村 清, 1993, 高知県安芸市東部から産する白亜紀放散虫化石—四万十帯北帯と南帯に関して—. 大阪微化石研究会誌, 特別号, no. **9**, 215–223.
- 吉倉伸一・板谷徹丸・岡村 真, 1991, 四国四万十帯大山岬層産結晶片岩礫の K-Ar 年代. 日本地質学会第 98 年学術大会講演要旨, 434.
- Zilio, L.D., Ruh, J. and Avouac, J.-P., 2020. Structural evolution of orogenic wedges: Interplay between erosion and weak décollements. *Tectonics*, **39**, e2020TC006210. [https:// doi.org/ 10.1029/2020TC006210](https://doi.org/10.1029/2020TC006210).

Abstract

Exhumation of high P/T metamorphic rocks is a subject of ongoing debate. The Sanbagawa metamorphic belt is a typical high P/T metamorphic belt in Southwest Japan. Geodynamic cause(s) and process for the exhumation of the Sanbagawa metamorphic rocks are still debated, and yet to be resolved. Here, I examine depositional ages of the protoliths for the low-grade (chlorite zone) metamorphic rocks in the Sanbagawa belt, eastern Shikoku, SW Japan, in addition to geologic structures of the Sanbagawa and Northern Chichibu belts, and propose a plausible scenario for the exhumation of the Sanbagawa metamorphic rocks described below.

1) The Sanbagawa belt represents underplated deeper facies of the Cretaceous Shimanto accretionary complex, but not the Jurassic Chichibu accretionary complex. 2) The depositional ages of the parent sediments of low-grade metamorphic rocks found in the Sanbagawa belt and the Jurassic Northern Chichibu belt, indicate a north younging polarity. In contrast, sedimentological evidence indicates younging to the south. 3) During a depositional stage of the main part (Campanian–Early Maastrichtian) of KS-II unit in the Northern Shimanto belt, a large volume of coarse-grained clastic sediments was deposited in the Shimanto trench, leading to active underplating, and consequently a wide forearc domain was uplifted as a domal structure, and dip and facing directions of beds in the Sanbagawa and Northern Chichibu belts have changed to the south. 4) Previously reported data on vitrinite reflectance and geologic structure indicate that the Northern Chichibu belt was part of the overburden formerly lying on the Sanbagawa metamorphic rocks. 5) The Sanbagawa belt, which was the domain of maximum exhumation, experienced extensional tectonics and subsequent normal faulting in the belt and at the both sides of the belt (Median Tectonic Line and the boundary fault between the Sanbagawa belt and Mikabu greenstones). The overburden above the Sanbagawa metamorphic rocks was removed by normal faulting and surface erosion during the latest Cretaceous and early Paleogene.

