



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

Recognition of the 'early' Sambagawa metamorphism and a schematic cross-section of the Late-Cretaceous Sambagawa subduction zone

Abstract

青矢睦月* 遠藤俊祐**

Mutsuki Aoya* and Shunsuke Endo**

2016年9月13日受付.

2017年2月12日受理.

* 徳島大学大学院社会産業理工学研究部
Graduate School of Science and Technology,
Tokushima University, Tokushima 770-8506,
Japan

** 島根大学大学院総合理工学研究科
Interdisciplinary Faculty of Science and En-
gineering, Shimane University, Matsue 690-
8504, Japan

Corresponding author: M. Aoya,
aoya@tokushima-u.ac.jp

Recent petrological studies on the Sambagawa metamorphic belt in Shikoku have recognized that the coarse-grained eclogite-bearing lithologies (so-called 'tectonic blocks' in earlier studies) in the Besshi area exclusively preserve evidence for the 'early' Sambagawa metamorphism, which can be related to onset of the Sambagawa subduction system during Early Cretaceous (c.116Ma). Geological mapping and associated multidisciplinary studies on the regional (spatially widespread) Sambagawa metamorphism (both the eclogite-facies and main metamorphisms) have revealed the tectonic framework of the Late-Cretaceous Sambagawa subduction zone as follows: (i) a spreading ridge was approaching close to the trench; (ii) the subducting slab was coupled with the convective mantle at depth of >65 km; (iii) thickness of the hanging-wall continental crust was 30-35 km; and (iv) the forearc mantle wedge (30-65 km depth) was largely serpentinized. These features allow us to draw a semi-quantitative cross-section of the Sambagawa subduction zone at around 89-85Ma, implying that boundary conditions for thermo-mechanical modeling aiming to simulate exhumation of high-*P/T* metamorphic rocks are now well constrained. It has also become clear that ultramafic blocks dispersed in the higher-grade part of the Sambagawa belt were derived from the mantle wedge, i.e. the corresponding part of the belt has been re-evaluated as a 'fossil subduction boundary' of a relatively warm subduction zone. Field-based petrological studies in the Sambagawa belt can, therefore, have potential to provide invaluable information on material behaviors at the slab-mantle wedge interface including domains of episodic tremor and slip (ETS) in present-day warm subduction zones.

Keywords: Sambagawa metamorphic belt, petrology, geological mapping, modeling, Late Cretaceous, ridge subduction, thickness of forearc continental crust, coupling of slab with convective mantle, serpentinized mantle wedge

はじめに

三波川帯は西の九州佐賀関半島から東の関東山地まで、東西約 800 km に渡ってほぼ連続的に延長する低温高压型(以後、高压型)変成岩の分布域、つまり高压型の広域変成帯である(中島ほか, 2004b; Wallis and Okudaira, 2016; Fig. 1a)。世界の海洋沈み込み型の高圧型変成帯の中でも、三波川帯は、その形成場からある程度の空間的連続性を保持したまま上昇・露出した貴重な例といえる。つまり、大陸衝突を伴わない活動的な沈み込み帯上にあり、かつフランシスカンなど多くの環太平洋域高圧型変成帯のような蛇紋岩メランジュではなく、また三郡周防帯のようにばらばらになっていない、沈み込み帯深部情報がよく保存された地質体として1つの世界標準と位置づけられる。

高圧型変成帯としての三波川帯は、中央構造線(MTL)を北限とし、その南方は大局的に見ればジュラ紀付加体である秩父累帯北帯に漸移する(Fig. 1b)。あとに述べるように、エクロジャイト等も含めたほとんど全ての三波川変成帯構成岩の原岩形成は前期白亜紀以降(約 120 Ma 以降)と考えられるが、主に後期白亜紀(約 89~65 Ma)に起こった三波川変成作用の影響は南側の秩父累帯北帯にも及んでいると思われる。そのため、いわゆる秩父累帯北帯(御荷鉾緑色岩類よりも南側)にまで三波川変成作用の及んだ領域としての三波川帯を拡張するかどうか、1つの議論的となっている(脇田ほか, 2007 など)。本稿では秩父累帯北帯の大部分にも低変成度の三波川変成作用が及んでいたという立場を取るが(Endo, 2015)、原岩年代も加味した地体構造区分としての三波川帯-秩父帯境界問題には立ち入らない。

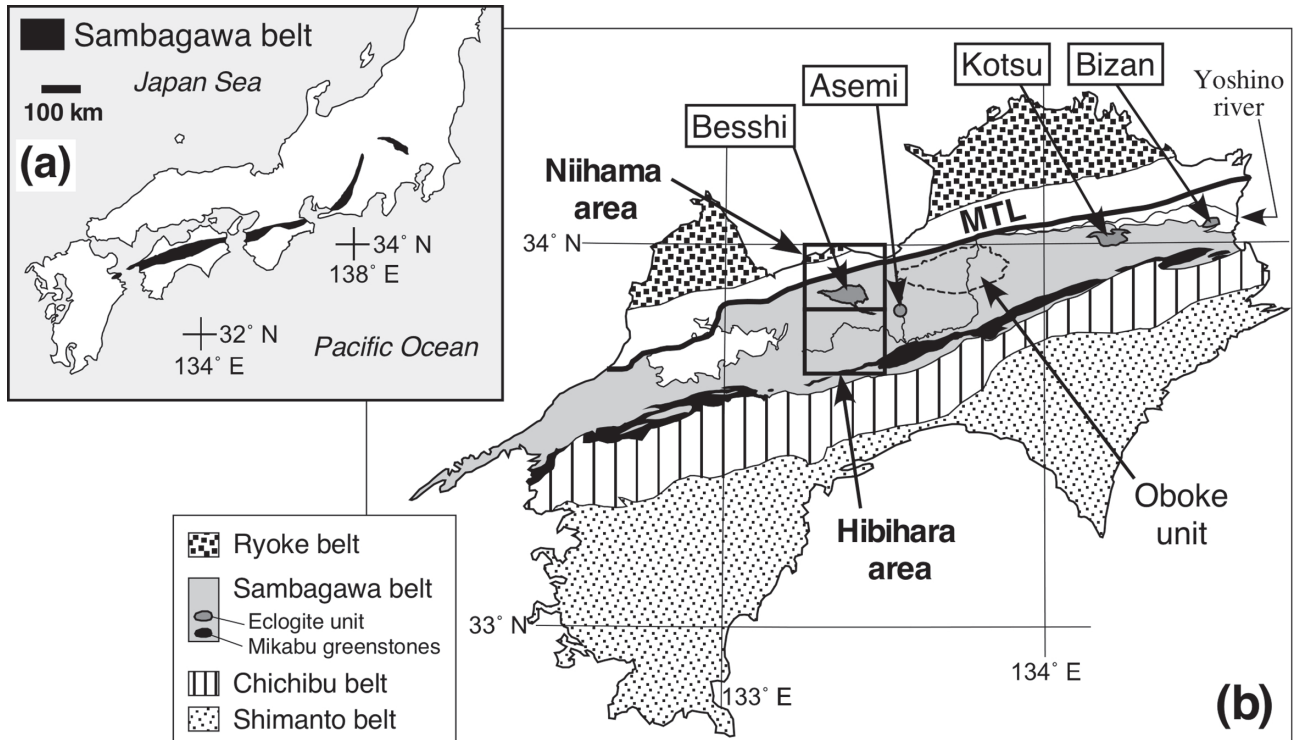


Fig. 1. Distribution of the Sambagawa belt in SW Japan (a) and tectonic division map of Shikoku island (b) based on Seamless Digital Geological Map of Japan (Geol. Surv. Japan, AIST ed., 2015) with the Hibi-hara and Niihama areas shown by bold quadrangles. In the Sambagawa belt, 4 known localities of the Eclogite unit and outline of the Oboke unit (dashed line) are indicated.

四国中央部は明治時代以来、そして近年でもなお、三波川帯研究における最重要地域の1つとして多くの研究成果を輩出している。この理由として、三波川帯の南北幅がこの地域で約30 kmと全延長の中で最大となること (Fig. 1a)、また急峻な山岳地帯であるために岩石の露出・保存状況がよいことに加えて、以下の様な学術的要素が挙げられる。すなわち、(1) 日本最大級の規模を誇った別子銅山の含銅硫化鉄鉱床(キースラーガー)を胚胎すること (遠藤ほか, 2013); (2) 一般的な低～高変成度の片岩類のみならず、三波川帯の他所にはまれな粗粒の岩相、すなわち片麻岩類やかんらん岩類のまとまった分布が見られること; および(3) これらの粗粒岩類が他の一般的な片岩類よりも深所、すなわちエクロジャイト相で変成した痕跡を残していること、などである。高圧型変成帯の上昇機構は、未だ明らかとは言えない地質学上の大問題である。特に、エクロジャイトのように地下50 km以上もの深所で形成された岩石の上昇機構を究明するにあたって、四国中央部のようにエクロジャイトを多産する地域が研究のターゲットとされて来たのはごく自然な流れとも言える。

本稿では四国中央部三波川帯、特に最近出版された1/5万地質図幅「日比原」「新居浜」の範囲 (Fig. 1b; Fig. 2; 青矢・横山, 2009; 青矢ほか, 2013b) と四国東部の高越地域 (Fig. 1b) を主な着目対象とし、近年の三波川帯研究の成果を総括する。著者らを含めた変成岩研究者が、四国中央部～東部で

最近20年ほどの間に行ってきた三波川帯研究は岩石学、構造地質学、年代学、熱モデル計算といった複数の手法に渡っている。これらを組み合わせ、馴染ませた「包括的岩石学」によって三波川帯の形成・上昇過程を解く上で重要な知見が数多く導かれた。特に、(1) 過去には三波川帯中の異物(テクトニックブロック)とみなされた粗粒の含エクロジャイト岩体群には、前期白亜紀(約116 Ma)の初期三波川変成作用が記録されていること; また(2) 後期白亜紀に起こった主たる三波川変成作用(約89～85 Ma)について、その頃の沈み込み帯モード断面図がかなり定量的に描けるようになったこと、という2点を本稿における総括の焦点とする。

初期三波川変成作用の認識：三波川沈み込み帯創成期の記録

1. 苦鉄質片麻岩体

四国中央部・新居浜図幅内の別子地域には、層状斑れい岩や超苦鉄質岩類といった深成岩起源の高変成度岩体が分布し (Figs. 2a, 3)、三波川帯ではこれら岩体中から最初にエクロジャイト(東赤石岩体のざくろ石単斜輝岩も含む)の存在が認識された(堀越, 1937; Banno, 1964)。こういったエクロジャイトを含む岩体はまず、周囲の片岩類より著しく粗粒である。そして局所的にレンズ状の弱変形部分を含むなどの特徴を持ち、野外で容易に識別できるため、五良津角閃岩体、東平角閃岩体などの固有名称が与えられ (Fig. 3)、三波川帯研究の黎明期から注目を引く存在であった。ただし、現代的

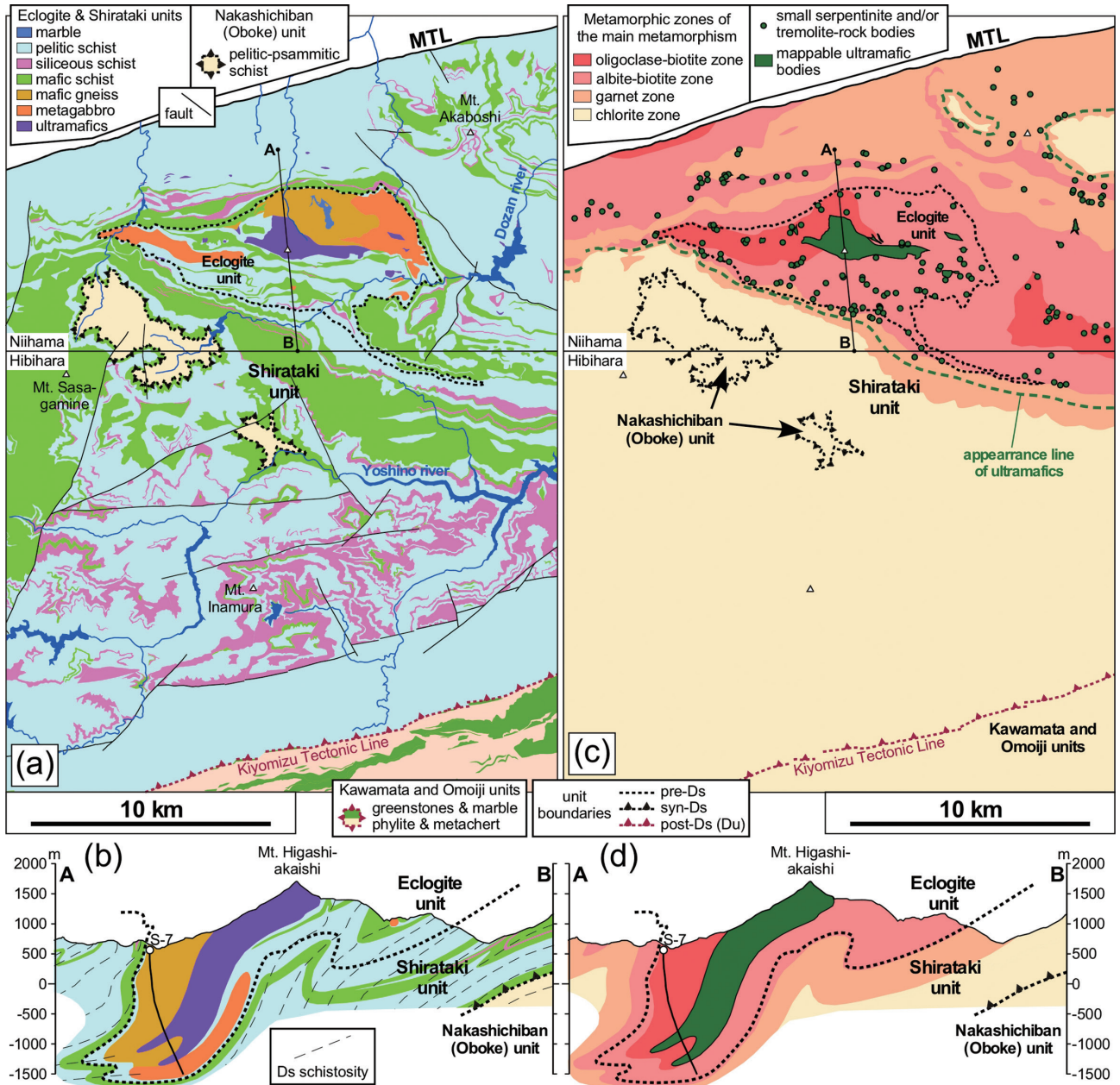


Fig. 2. Geological and metamorphic-zonation maps of the Sambagawa belt in the Hibihara-Niihama area and their cross-sections simplified from Aoya and Yokoyama (2009) and Aoya et al. (2013b). (a) Geological map. (b) Geological cross-section along the line A-B shown in (a). (c) Metamorphic zonation map with distribution of ultramafic bodies (Aoya et al., 2013a). (d) Metamorphic-zonal cross-section along the line A-B shown in (c). In (c) and (d), S-7 borehole whose data were used in drawing the cross-sections is projected perpendicular to the sectional planes.

な岩型名としての「角閃岩」はホルンブレンドに加えて斜長石を主要構成鉱物とするものであり (Fettes and Desmons, 2007), 「角閃岩体」という呼称は適切でないため, 本稿では「苦鉄質片麻岩体」と称する。苦鉄質片麻岩体は一般に片岩類よりも有意に高温または高圧の変成ステージを持ち, また少なくともその一部は明らかに周囲の片岩類と原岩も異なるため, 三波川帯の片岩類に固体貫入した異地性岩塊, すなわち「テクトニックブロック」として一括認識される一方, 岩体ごとには相互に異なる複雑な $P-T$ 履歴が提案された (Kunugi-

za et al., 1986; Takasu, 1989)。しかしながら, その後, 次章で述べるように周囲の片岩類にもエクロジイト相に達した部分が存在することが明らかになり, 苦鉄質片麻岩体とエクロジイト相変成作用を受けている片岩類の関係を改めて整理する必要が生じた。

苦鉄質片麻岩体の複雑な履歴の一端として, 深成岩として固結した直後の高温の変成作用や, その後のより低温の沈み込み帯付近での冷却・再平衡過程も含まれている可能性がある。五良津東部岩体 (Fig. 3) のグラニュライト相変成ステー

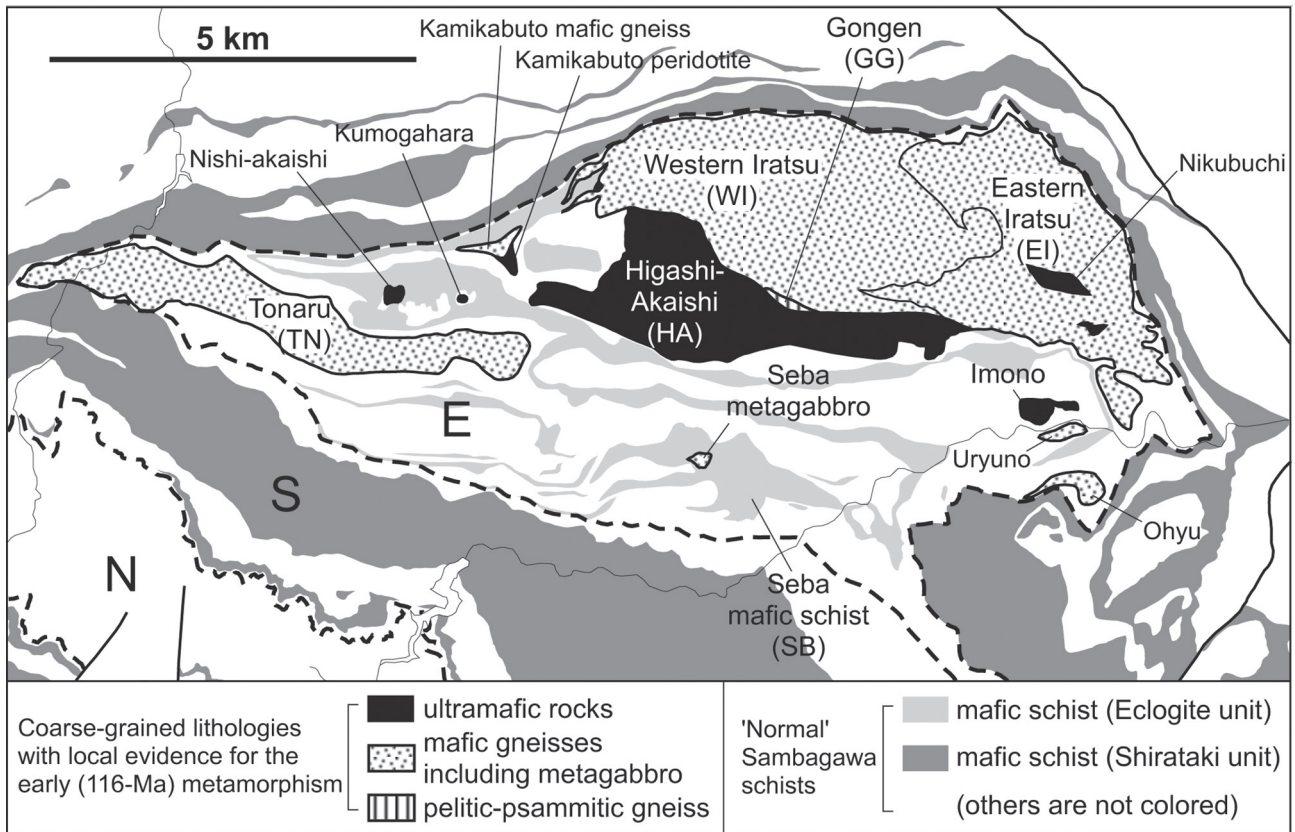


Fig. 3. Simplified geological map of the south-central part of the Niihama area showing block-like distribution of coarse-grained lithologies within the Eclogite unit (E). The boundaries between the Eclogite (E), Shirataki (S) and Nakashichiban (N) units are indicated by dashed bold lines. Given names for the particular coarse-grained bodies are also indicated, with abbreviations (such as HA) for several bodies. The boundary between the Western and Eastern Iratsu bodies follows Endo and Tsuboi (2013).

ジ(Yokoyama and Mori, 1975; Yokoyama, 1976; Ota et al., 2004 など)はそういったものであろう。しかし、苦鉄質片麻岩体がすべて深成岩起源というわけではなく、実際には地殻表層岩起源の領域も存在することが比較的早くから認識されていた(Takasu, 1989 など)。その中でも最大規模の五良津西部岩体(Fig. 3)は玄武岩や石灰岩-チャート互層を原岩とし、海山斜面堆積物起源と考えられる(釘宮・高須, 2002; Endo, 2010)。そのため、五良津西部岩体は三波川帯の一般的な片岩類と同様に地表からの沈み込みを経験しているはずであり、その履歴全体が沈み込み境界付近での変成作用に関係づけられる。つまり、五良津西部岩体は、苦鉄質片麻岩体と周囲の一般的な片岩類の関係究明に適した研究対象といえる。

2. ざくろ石の二段階成長：初期三波川変成作用の認識

五良津西部岩体のエクロジャイト中のざくろ石では、組織的・組成的不連続面をもつ二段階の成長累帯構造が普遍的であることが、比較的最近になってから明らかになった(Endo et al., 2009)。こうした二段階成長組織を示すざくろ石は、例外なく核部に斜長石(灰長石成分が最高 20 mol.% の灰曹長石)や Si に乏しい NaCa 角閃石(主にタラム閃石)などの角閃岩相高圧部を指標する包有物を、また縁部にはオンファ

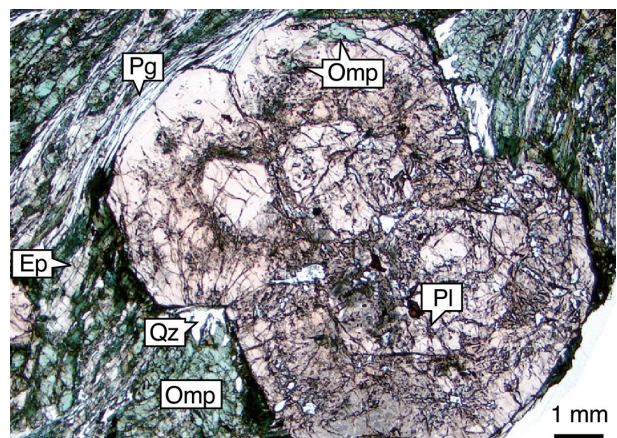


Fig. 4. Optical microscope photograph showing an aggregate of texturally zoned garnet in the Western Iratsu eclogite. The core and rim of garnet crystals host inclusions of plagioclase (Pl) and omphacite (Omp), respectively. Major matrix-forming minerals are Omp, quartz (Qz), epidote (Ep) and paragonite (Pg).

ス輝石などのエクロジャイト相を指標する包有物を含んでいる(Fig. 4)。

エクロジャイト相に先行する角閃岩相高圧部(ざくろ石核部相当)の変成作用の年代は, ざくろ石とオンファス輝石を用いた Lu-Hf 法によって決定された。Lu-Hf 系の最も重要な特徴は, 重希土類元素である Lu がざくろ石に強く分配されるため, ざくろ石の成長とともに, ざくろ石を除いた基質部分からは Lu が急速に枯渇してゆく点である。エクロジャイトの場合, 一般にざくろ石は全岩 Lu の 9 割以上を独占する一方, Hf はほとんど取り込まず (Spandler et al., 2003; Korh et al., 2009), ざくろ石は他の共存鉱物や全岩に比べて著しく高い Lu/Hf 比を示す。また, ざくろ石における Lu-Hf 系の閉鎖温度についての実験データは少ないものの, 経験的には 900°C 以上と考えられている (Anczkiewicz et al., 2007)。つまり, 900°C 以下の変成作用では, ざくろ石とその他の鉱物を用いた Lu-Hf アイソクロン年代は一般に「ざくろ石の成長年代」と解釈される。五良津西部岩体のエクロジャイトでは, ざくろ石 2 フラクシオンとオンファス輝石 2 フラクシオン, 計 4 フラクシオンから, 前期白亜紀 (115.9 ± 0.5 Ma) の見かけアイソクロン年代が得られた (Endo et al., 2009)。また, この年代値に対する妥当な解釈を探るため, LA-ICP-MS による局所分析を行った結果, Lu はざくろ石の「核部」に極めて強く濃集し, 縁部にはほとんど含まれないことが明らかにされた。この分析結果を合わせると, 得られた年代値はざくろ石核部の成長年代と捉えることができる。

ざくろ石核部の成長年代を求めるのに, その時点で存在しなかったオンファス輝石と合わせたアイソクロンを引くことは一般論としては誤りであり, 得られたアイソクロンは厳密には疑似アイソクロンである。しかし, LA-ICP-MS による分析結果は, そもそもざくろ石核部の成長以降, 基質部分には年代値の計算上, ほぼ無視できる程度の Lu しか存在しなかったことを意味する。つまり, ざくろ石核部の成長以降, Lu に枯渇した基質から成長した鉱物の Hf 同位体比は全てアイソクロン図の縦軸 (Lu/Hf = 0) 付近にプロットされ, ざくろ石核部成長時の値と (年代を求める目的の上では) 同一視できる。実際, Endo et al. (2009) によって測定されたオンファス輝石の Lu/Hf 比はゼロに近く (ざくろ石の値が 3.8~6.4 なのに対して 0.003~0.005), かつ, オンファス輝石 2 フラクシオンのデータがアイソクロン図上でざくろ石 2 フラクシオンによって規定される直線上にのることは, この解釈を支持している。つまり, 五良津西部岩体のエクロジャイトから得られた疑似アイソクロンの示す計算上の年代値は, ざくろ石核部の成長年代を近似するものと解釈できる (Endo et al., 2009)。

ざくろ石核部から認識されるこの前期白亜紀の変成作用はむしろ中圧型であり, 時期としては後述する高圧型のエクロジャイト相変成作用よりも 25~30 m.y. ほど前に起こっている。以降, この変成作用を初期三波川変成作用または単に初期変成作用と称する。初期変成作用に相当する鉱物組み合わせは, 五良津西部岩体に限らず, 例えば東平岩体においても記載されている (Miyagi and Takasu, 2005)。

3. 苦鉄質片麻岩体はテクトニックブロックか?

近年, 砕屑性ジルコンの U-Pb 年代データ (例えば, 大藤ほか, 2010; Knittel et al., 2014) から三波川帯の片岩類の原岩の大部分は後期白亜紀に海溝で堆積したことが明らかになっており, 前期白亜紀の初期変成作用は苦鉄質片麻岩体に特有なものと考えられる。つまり, 初期変成作用 (約 116 Ma) の痕跡を残した岩石の分布域は苦鉄質片麻岩体のみに限られ, 三波川帯全体で見ればほんの一部に過ぎない (Figs. 2a, 3)。また, このようなブロック状の小規模分布に加え, 一般的な片岩類よりも古い履歴を持ち, 後のエクロジャイト相変成時にそれらと一体化しているという意味において, やはりこれらを「テクトニックブロック」と呼んで問題はない。粗粒な層状斑れい岩を起源とする岩体に限らず, スラブ表層起源の五良津西部岩体が著しく粗粒であるのは, 比較的高温な初期変成作用も含め, 変成作用のタイムスケールが三波川帯の片岩類に比べて著しく長かったことによるものとして説明できる (後述)。

4. 初期三波川変成作用のテクトニックな意味

初期三波川変成作用にテクトニックな意味づけをするには定量的な *P-T* 経路の導出が重要である。そこで, 五良津西部岩体の二段階成長ざくろ石を含む試料について, 有効全岩組成や酸化還元状態の変化を考慮したシュードセクション解析および, 包有物とざくろ石の化学組成を用いた多平衡温度圧力解析が行われた (Endo et al., 2012)。その結果は, ざくろ石核部が 570°C, 0.9 GPa から 660°C, 1.2 GPa までの単調な温度・圧力上昇に伴って成長したことを示す (Fig. 5a の *P-T* 経路の黒太線部分)。このプログレード *P-T* 経路の解析は, 中粒のざくろ石を含み, 組織的に均質な試料を厳選して行ったものである。一方, 核部の直径が 0.1 mm 程度の細粒のざくろ石を含む試料では, 初期変成作用のピーク温度時にざくろ石核部の組成が結晶内元素拡散により均質化している。さらに, エクロジャイト相におけるざくろ石縁部の被覆成長前に, 核部の周縁において Mg の逆累帯構造と溶食組織が形成されている (Endo, 2010)。以上の観察・解析により, 五良津西部岩体の初期変成作用は, 高い温度勾配 (20°C/km) に沿うプログレード経路とそれに引き続く冷却経路からなる, 全体として反時計回りの *P-T* 経路であったことが明らかになった (Fig. 5a, *P-T* 経路の破線部は推定)。比較的高温での沈み込み, そしてその後の冷却とともに, 熱的定常状態にある一般的な冷たい沈み込み帯では起こり得ない。こういった反時計回りの *P-T* 経路は, 例えば, 沈み込み開始直後の未成熟な沈み込み境界に沿った沈み込みの後でスラブからはがれ, 引き続き冷却を続ける沈み込み境界部に岩石が長期間位置し続けたことによって記録されたものと解釈できる (Endo, 2010; Endo et al., 2012)。Endo et al. (2012) はこのような過程によって五良津西部岩体の反時計回り *P-T* 経路が再現できることを熱モデル計算によって示した (Fig. 5a)。同様な沈み込み開始直後の角閃岩相高圧部を通る反時計回り *P-T* 経路は, 北米西海岸・フランシスカン帯の高度変成岩ブロックをはじめ, 世界各地の高圧型変成帯からいくつか報告例がある (Wakabayashi, 1990; Ancz-

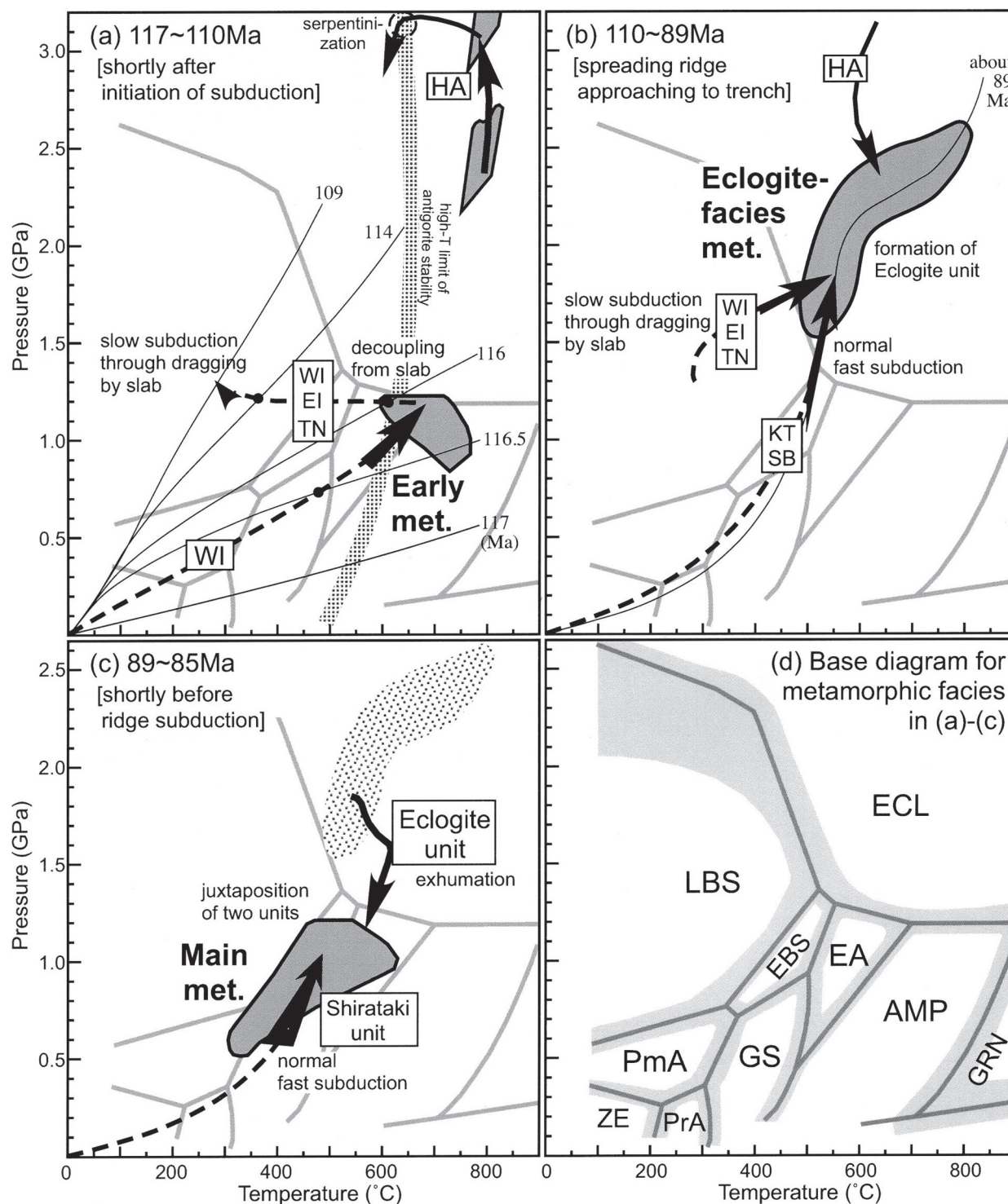


Fig. 5. Summarized metamorphic P - T history of the Eclogite and Shirataki units up to about 85 Ma (a-c), superimposed on a metamorphic-facies diagram (d). P - T conditions of the Early metamorphism (met.) are compiled from Yokoyama (1976; 1980) and Endo et al. (2012). Range of P - T conditions for the Eclogite-facies and main metamorphisms are as shown in Fig. 6a. Abbreviations of rock-body names other than KT (Kotsu) follow Fig. 3. Petrologically derived P - T paths (Mizukami & Wallis (2005) for HA, Endo (2010) and Endo et al. (2012) for WI, Aoya et al. (2003) and Weller et al. (2015) for KT, and Enami (1998) for the Shirataki unit are shown by bold arrows, and those derived using thermal model of Endo et al. (2012) by dashed bold arrows. (a) 117-109 Ma. Modeled subduction-boundary geotherms for 5 different ages (Endo et al., 2012) are shown by thin lines. High- T limit of antigorite stability (Ulmer and Trommsdorf, 1999; Bromiley and Pawley, 2003) is also shown. (b) 109-89 Ma. Speculated subduction-boundary geotherm at about 89 Ma (Aoya et al., 2009) are shown by thin line. (c) 89-85 Ma. (d) Metamorphic-facies diagram simplified from Nakajima et al. (2004b) which slightly modifies after Banno et al. (2000): ZE, PrA, PmA, LBS, EBS, GS, EA, AMP, GRN and ECL are the zeolite, prehnite-actinolite, pumpellyite-actinolite, lawsonite-blueschist, epidote-blueschist, greenschist, epidote-amphibolite, amphibolite, granulite and eclogite facies, respectively.

kiewicz et al., 2004; Agard et al., 2016). このように, 五良津西部岩体のざくろ石核部に記録された反時計回り *P-T* 経路は, 沈み込み帯の活動開始～活動初期の記録と読むことができる. 苦鉄質片麻岩体も含め, 三波川変成岩類全般の形成に関わったこの前期白亜紀～後期白亜紀のアジア東縁沈み込み帯を以後, 「三波川沈み込み帯」と呼ぶ.

顕生代の大半をアジア東縁の沈み込み帯上で発達してきた日本列島において, 上述の前期白亜紀の沈み込み開始イベントは現実的であろうか. 初期三波川変成作用の直前期(120 Ma 頃)は, 西南日本における主要な付加体成長の停滞期間にあたり, また同時期には白亜紀～古第三紀の大規模珪長質火成活動に先駆するアダカイト質火成活動(例えば Takahashi et al., 2005)の存在が知られている. また別子地域の高枯濁度を示す超苦鉄質岩類(東赤石岩体や芋野岩体; Fig. 3)からは, 沈み込み開始時に特有な前弧域火成活動の存在が推論されている(Tasaka et al., 2008; Hattori et al., 2010). 以上に加え, 三波川帯の形成に関係づけられるイザナギプレートの運動が前期白亜紀にも三波川帯の伸長方向に沿った大きな左横ずれ成分を持つこと(Wallis et al., 2009)を考慮すると, 一つのシナリオとして, プレート境界が沈み込みから横ずれ境界に一時的に転化した後, 再度沈み込みが始まった可能性が考えられる. 今後, より多くの独立な地質学的データを集積し, 当時のテクトニクスを検証する必要がある.

エクロジャイトに対する見方の変化: 広域変成岩としてのエクロジャイト

1. 三波川帯の広域変成作用: 従来の認識

三波川帯は苦鉄質片岩, 珪質片岩, 泥質片岩, 砂質片岩といった片岩類によってその大部分が占められ(Fig. 2a), これらがいわゆる「一般的な」三波川変成岩であると考えてよい. そして, これらはそれぞれ玄武岩, チャート, 泥岩, 砂岩を原岩とする変形・変成岩であり, この原岩組み合わせは海溝付近における海洋地殻の表層部分(海洋底層序)に相当する. 高圧型の変成条件も合わせると, 三波川帯とは, 主に沈み込んだ海洋地殻表層物質からなる地質体と考えられる. では, 一般的な三波川変成岩が記録している高圧型の変成相系列がどのようなものであったかと言えば, ほぼ最低変成度とされるパンペリー石アクチノ閃石相から, 緑れん石青色片岩相と緑色片岩相の境界部を経て, 緑れん石角閃岩相に至るもの, とされてきた. つまり, 最高変成度部分がひすい輝石+石英の安定領域に至るような典型的な高圧型ではない, というのが古くからの認識であった. 都城(1965)はこのような三波川変成作用の変成相系列を高圧中間群と呼んだ. ところが実際には, 少なくとも Banno(1964)や Enami et al.(1979)の段階から三波川帯のごく一部に高圧型変成岩の代表格とも言えるエクロジャイト(本稿ではざくろ石+オンファス輝石+石英の共生が認められる岩石を指し, これらの鉱物の量比は問わない)の存在は既に知られていた. ただし, 前述の通り, エクロジャイトの発見が五良津岩体, 東平岩体, 権現岩体, 瀬場変斑れい岩といった粗粒岩体(Fig. 3)に

おいて先んじていたことから, 1980年代まではやはり, エクロジャイト相変成作用(苦鉄質岩類にざくろ石+オンファス輝石の鉱物共生を生じた変成作用)は三波川帯の「広域」変成作用とは異なるもの, という暗黙の認識が消えなかった. つまり, 一般的な片岩類に明確に記録されている比較的低压(高圧中間群)の変成相系列こそが三波川帯の広域変成作用を表し, エクロジャイトを含む岩体はテクトニックブロックである, という考え方が根強かった. ところが, 1990年代後半にこの認識は転機を迎える.

2. エクロジャイト質片岩

そもそものきっかけは Takasu(1984)が瀬場変斑れい岩を取り囲む細粒の片岩(瀬場苦鉄質片岩; Fig. 3)中にもエクロジャイトを発見していたことだった. ほぼ同時期に高須・加治(1985)は四国東部の高越地域(Fig. 1b)でもエクロジャイト質片岩(バロア閃石エクロジャイト)を発見している. 当時, 基本的には片岩中にエクロジャイトは存在しないと考えられていたため, これらのエクロジャイトの発見によって, たちまち広域的なエクロジャイト相変成作用が想定されることはなかった. また Takasu(1984)の段階ではエクロジャイト質片岩の産出が瀬場変斑れい岩(Fig. 3)の直近部に限られていたため, その成因としては, 変斑れい岩の貫入による, エクロジャイト相最低圧部での固体接触変成が想定された. そして, この接触変成作用の存在は変斑れい岩が「ブロック」として上昇したことを支持し, むしろテクトニックブロック説の追い風となっていた.

ところがその後, 猶原(1995), 猶原・青矢(1997)などによって瀬場苦鉄質片岩の広範囲からエクロジャイト質片岩が発見され, エクロジャイト質片岩が変斑れい岩の直近部に集中しているわけではないことがわかった. つまり, エクロジャイト質片岩は接触変成作用のような局所的なイベントで生じたものとは考えられなくなり, 瀬場苦鉄質片岩そのものがエクロジャイト相に達した岩体とみなされるようになった(Aoya, 1998; Aoya and Wallis, 1999). このいきさつは青矢(2005)にまとめられている. さらにその後, 泥質片岩においても Enami et al.(2007), Mouri and Enami(2008)や Kouketsu and Enami(2011)が石英のラマン分光分析を用いた手法など, ざくろ石中の微細包有物からエクロジャイト相変成の証拠を得る方法論を提示し, 含エクロジャイト岩体周囲の泥質片岩もやはりエクロジャイト相に達していたことを示した. 現在までの成果をまとめると, エクロジャイト相変成の証拠を残す岩石の分布範囲はブロック状に散在するのではなく, ひとかたまりのユニットをなすに至っている(Fig. 2; 青矢ほか, 2013b; Kouketsu et al., 2014). この分布域を以後, エクロジャイトユニットと称する. 本稿のエクロジャイトユニットは青矢ほか(2013b)における広義の別子エクロジャイト相ユニットに相当する.

ここで重要なことは, もともと海洋地殻の表層部をなしていた苦鉄質片岩や泥質片岩の変成条件がエクロジャイト相に達していたことが確実となったことである. つまり, 海洋地殻表層物質がプレート運動によって地下深部にもたらされる, という本質的(広域的)な三波川変成作用が, 従来の認識

よりも深部に至っていたことが明確化し、含エクロジヤイト岩体 = テクトニックブロックとは必ずしも言えなくなった。また基本的に沈み込み境界付近で起こったとみなせる三波川広域変成作用がエクロジヤイト相にまで拡張されたことは、三波川変成岩類から、当時の沈み込み境界に関するより深部の情報が取得できるようになったことを意味していた。

3. 三段階の変成作用

長らく狭義の三波川広域変成とされてきた高圧中間群の変成作用については、泥質片岩の鉱物共生を用いた4つの鉱物帯への変成分帯が伝統的に行われてきた(東野, 1990aなど)。すなわち、変成度の低い方から順に緑泥石帯、ざくろ石帯、曹長石黒雲母帯、および灰曹長石黒雲母帯に区分されている(Fig. 2c)。この三波川帯全域をカバーする変成分帯を記録した変成作用を以後、三波川主変成作用または単に主変成作用と称する(Figs. 5c, 6a)。五良津西部岩体の二段階成長ざくろ石(Fig. 4)から、エクロジヤイト相変成作用が初期変成作用よりも後の時期とみなせることは既に述べた。一方、エクロジヤイト相変成作用が主変成作用よりも時期的に前のステージであることはエクロジヤイトの微細組織観察から明らかである。エクロジヤイトユニットの岩石において、主変成作用は主にオンファス輝石を分解して生じた曹長石+ホルンブレンドの連晶組織、シンプレクタイトとして認識され、エクロジヤイト相変成よりも確実に後である(Takasu, 1984; Aoya, 2001; Ota et al., 2004など)。度合いの差こそあれ、エクロジヤイトユニットの岩石はすべてこの主変成作用によるオーバープリントを受けている。また地図上で灰曹長石黒雲母帯の境界線(灰曹長石アイソグラッド)がエクロジヤイトユニットの分布範囲を横切っていることも、主変成がエクロジヤイト相変成の後で起こったことを支持する(榎並, 1982; Mizukami and Wallis, 2005)。以上をまとめると、三波川帯には：(1)初期変成作用、(2)エクロジヤイト相変成作用、および(3)主変成作用、という少なくとも3つの変成ステージが存在する(Fig. 5)。ただし、エクロジヤイトユニットを除いた三波川帯の大部分は主変成作用のみを記録している。

4. エクロジヤイトユニットの巨視的な構造位置とその広がり

日比原-新居浜地域ではエクロジヤイト相変成の証拠を残す岩石の分布範囲が東西10 km以上の規模を持つ単一のエクロジヤイトユニットとして再評価されたことを既に述べた(Figs. 2a, 2c)。その構造位置を示す南北断面図がFigs. 2b, 2dである。これによれば、三波川帯の主変形Ds(命名はWallis, 1990)による横臥褶曲(Hara et al., 1992; Wallis et al., 1992; Aoya, 2002; Mizukami and Wallis, 2005; Mori and Wallis, 2010)をほどくと、エクロジヤイトユニットはより下位に位置する白滝ユニットと大歩危ユニット(日比原-新居浜地域における中七番ユニットに相当)を合わせた3つのユニットからなるパイルナップ構造の最上位をなすことがわかる。Wallis and Aoya (2000), Aoya (2001; 2002)は、遅くともエクロジヤイト相変成作用の時点で一体化していた構造単位として、このユニットをエクロジヤイトナップと呼んだ。エクロジヤイトユニットを「ナップ」と呼ぶ

理由は：(1)エクロジヤイト相変成作用の*P-T*条件の連続性から(Fig. 6a)、この時点で、エクロジヤイトユニットの岩石群は沈み込み境界付近に集合して1つの「シート状」ユニットをなしていたであろうと考えられること；および(2)エクロジヤイトユニットと白滝ユニットが経験した最高変成圧力には少なくとも約0.3 GPaの圧力ギャップがあるため(Fig. 6a)、両ユニットの間に構造境界が必要と考えられること、という2つの根拠に基づく。言い換えれば、テクトニックブロック群と新たに認識された片岩エクロジヤイト等の分布域を合わせた「テクトニックシート」が、Wallis and Aoya (2000)のエクロジヤイトナップである。

またWallis and Aoya (2000)は四国東部の高越地域から高須・加治(1985)が報告したものと異なるタイプのエクロジヤイト質片岩(藍閃石エクロジヤイト)を新たに報告し、三波川帯におけるエクロジヤイトナップの分布は四国中央部にとどまらないことを論じた。現在までに、四国では新居浜地域に加えて汗見川地域(Aoki et al., 2009; Taguchi and Enami, 2014a, b)、高越地域(Matsumoto et al., 2003; Tsuchiya and Hirajima, 2013)、眉山地域(Kabir and Takasu, 2016) (Fig. 1b)、また和歌山県では船岡山地域(Endo et al., 2013)からエクロジヤイト相変成作用の痕跡が報告されており、それぞれの地域におけるエクロジヤイトユニットの詳細な分布範囲や構造位置について、さらなる研究が待たれる。

エクロジヤイト相変成作用と主変成作用の年代

以後、本稿では三波川帯の3つのユニット(Fig. 2)のうち、特にエクロジヤイトユニットと白滝ユニットに着目してゆく。本章では、これまでにいくつかの測定手法から得られている放射年代を総括し、エクロジヤイト相変成作用、および主変成作用の年代を論じる。

1. K-Ar および Ar-Ar 年代

三波川帯に広く分布する泥質片岩には普遍的にフェンジャイトが含まれる。また苦鉄質片岩もしばしばフェンジャイトを含むため、四国中央部では1990年代までにフェンジャイトもしくは全岩を用いたK-Ar および Ar-Ar 年代測定が数多く行われている(Itaya and Takasugi, 1988; Takasu and Dallmeyer, 1990; Dallmeyer and Takasu, 1991; Itaya and Fukui, 1994など)。このうち日比原-新居浜地域で得られた年代値は91-76 Maという後期白亜紀の年代を示すが、問題はこれらの年代値に対する解釈である。フェンジャイトなど、白雲母類鉱物におけるK-Ar系の閉鎖温度は従来、約400°Cとされてきた(Hodges, 1991; Hames and Bowering, 1994)。そして、三波川帯の主変成におけるざくろ石帯以上の高変成度部の最高変成温度はこの温度を上回っているため、これらの岩石について、K-Ar系年代はピーク変成の後、約400°Cまで冷却して以来の年代と捉えるのが古典的な解釈である。一方、白雲母類鉱物におけるK-Ar系の閉鎖温度は実際にはもっと高く、約600°Cに達するという見方もある(例えばItaya et al., 2009)。ただし、この解釈に立つ場合でも、塑性変形の継続中には600°C以

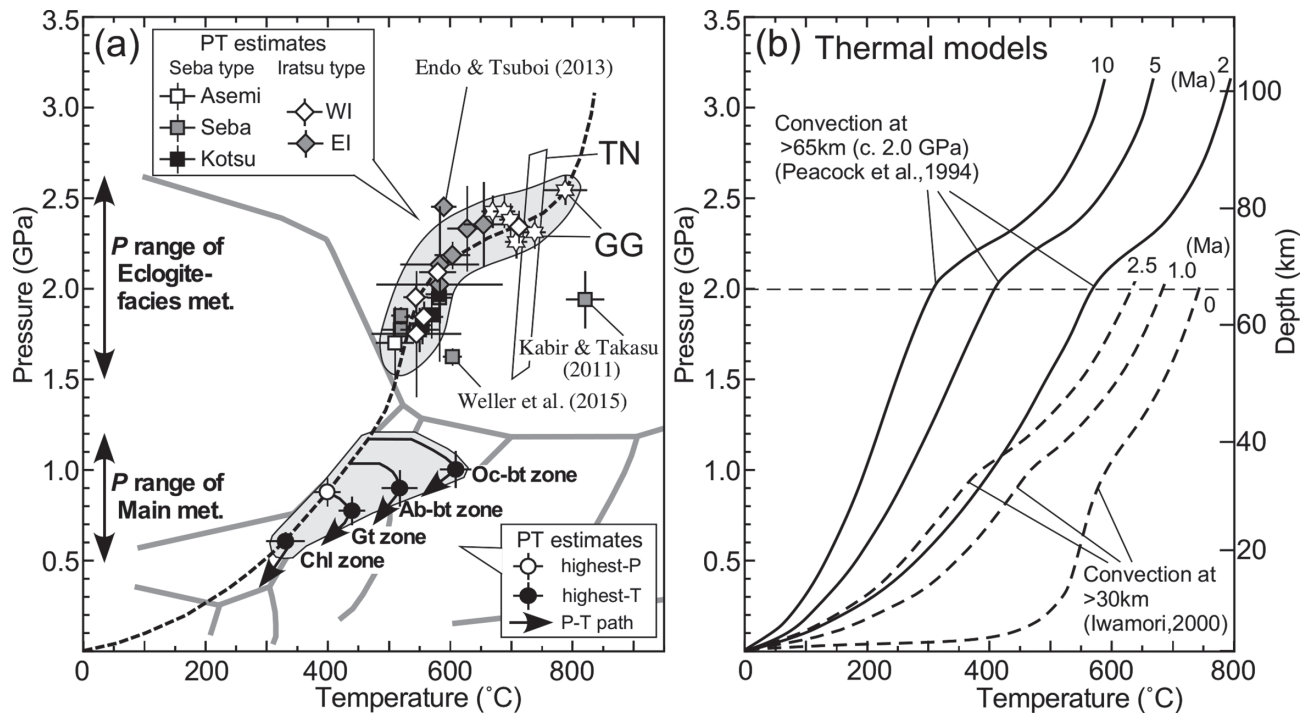


Fig. 6. (a) Compilation of petrologically derived P - T conditions for the Late-Cretaceous (89-85 Ma) Sambagawa metamorphism superimposed on the metamorphic-facies diagram of Fig. 5d. Abbreviations of rock-body names follow Fig. 3. Overall P - T distributions for the eclogite-facies and main metamorphisms are outlined. Data for the main metamorphism are from Enami (1983) and Enami et al. (1994): Chl, Gt, Ab-bt, Oc-bt zones represent chlorite, garnet, albite-biotite and oligoclase-biotite zones, respectively. Data sources for the eclogite-facies metamorphism are Matsumoto et al. (2003) (for Kotsu), Ota et al. (2004) (for WI, EI and GG), Miyagi and Takasu (2005) (for TN), Zaw et al. (2005) (for Seba pelite in SB), Miyamoto et al. (2007) (for GG), Aoki et al. (2009) (for Asemi), Endo (2010) (for WI), Kouketsu et al. (2010) (for Seba pelite in SB), Kabir and Takasu (2011) (for Seba pelite in SB), Endo and Tsuboi (2013) (for EI) and Weller et al. (2015) (for SB and Kotsu). For Ota et al. (2004), only P - T estimates obtained from mineral assemblages involving garnet, clinopyroxene and phengite are plotted. The dashed bold line represents subduction-boundary geotherm at about 89 Ma speculated from these P - T estimates. (b) Examples of warped subduction boundary geotherms in previous 2-D thermal models. 3 results of steady-state model by Peacock et al. (1994) with induced mantle convection at depths >65 km (corresponding to c. 2.0 GPa in pressure: the boundary shown by thin dashed line) and a subduction velocity (v) of 10 cm/year are shown by thick bold lines labeled by the associated constant ages of subducting slabs, 10, 5 and 2 Ma. Other 3 results of ridge-approach model by Iwamori (2000), which incorporates mantle convection at depths >30 km and uses $v = 6.3$ cm/year, are shown by dashed bold lines labeled by the corresponding ages of the slab at trench, 2.5, 1.0 and 0 Ma.

下でも気体の Ar が白雲母類の結晶内にトラップされることはない(つまり, 閉鎖しない)とする考えがある. そしてこの場合, K-Ar 時計のスタートは変形終了時にあたると考えられる (Itaya and Takasugi, 1988; Itaya and Tsujimori, 2015 など). この解釈を採れば, 三波川帯高変成度部の岩石の K-Ar 系年代はおおむね, 主変形 Ds の終了年代と捉えられる(ただし, エクロジャイトユニットの一部の岩石は Ds より古い時期の変形構造を残している点には注意が必要). さらに, Ds より後の塑性変形をも強く被っている岩石の場合には, Ds 終了年代の若返りが起こっている可能性もある. ここで重要な点は, Ds 変形が三波川変成岩の上昇期, すなわちピーク変成以後の時期まで継続したと考えられる点である (Wallis, 1998 など). つまり, 冷却年代もしくは変形終了年代といういずれの解釈を採るにしても, 三波川帯高変成度部の K-Ar 系年代はピーク変成年代よりも若い可能性が高い. 三波川変成作用の変成年代を得るには, 岩石が経験したピーク温度よりも閉鎖温度が高く, かつ塑性変形の影響を受

けにくい鉱物中の壊変系を用いた年代測定法が必要であった.

なお, 南新ほか(1979)による汗見川地域の砂質片岩・泥質片岩を用いた Rb-Sr 全岩アイソクロン年代(116 ± 10 Ma)はこれまで多くの研究者によって主変成のピーク変成年代として引用されてきたが, 実際にはこの年代が何を意味しているのかは解釈不能である (Wallis and Endo, 2010).

2. ジルコン U-Pb 年代: 権現岩体のエクロジャイト

SHRIMP や SIMS, LA-ICP-MS を用いた微小領域分析(点分析)ではジルコン粒子が持つ累帯構造の中から特定の領域を選択して U-Pb 年代測定を行うことができる. またジルコンにおける U-Pb 系の閉鎖温度は 750°C 以上と非常に高く (Hodges, 1991; Cherniak and Watson, 2000 など), 三波川変成作用の温度条件では開放されない. つまり, この手法から得られる年代は測定点に対応する部分の「ジルコン成長年代」と解釈できる. ただし, ジルコンは火成作用でも

変成作用でも成長し得る上に風化に強く、単一粒子中に年代の異なる複数回の成長部分が観察されることが多い。つまり、得られた年代を変成年代と解釈するためには、測定点近辺で変成鉱物の微細包有物を見つける必要がある。このようなアプローチの成功例として Katayama et al. (2001) によるカザフスタン共和国・コクチェタフの超高压変成作用の年代決定がある。この論文ではまず、ラマン分光分析によって超高压変成作用を指標するコース石の微細包有物を含むジルコン中の領域を絞り込んだ上で該当部分を点分析し、約 540 Ma という超高压変成作用の年代を導いている。

一方、三波川帯では Okamoto et al. (2004) が、玄武岩質火山砕屑岩-泥質岩互層を原岩とする権現岩体 (Miyamoto et al., 2007 など; Fig. 3) の石英エクロジヤイト (GO4)、および権現岩体から 150 m 北東に産する砂質変成岩 (QM) という 2 試料から多数のジルコンを抽出し、SHRIMP を用いた U-Pb 年代測定を行った。点分析の結果、砂質変成岩について、ジルコンの核部から 1900–134 Ma、マントル部から 135.5–112 Ma、またこれらを被覆する外縁部から 132–112 Ma という年代分布が得られ、外縁部年代の加重平均 (120.6 ± 5.9 Ma (2σ)) が砂質岩 (QM) の変成年代を表すものと解釈された。一方、石英エクロジヤイト (GO4) からは、明らかに古い核部の 1 点 (148 ± 5.9 Ma (2σ)) を除くと、残り 8 点からは 118–100 Ma という比較的狭い範囲に集中した年代が得られた。そして、この年代範囲が砂質変成岩の外縁部年代とほぼ一致することを踏まえ、この 8 点の加重平均 (112.9 ± 5.6 Ma (2σ)) がエクロジヤイト相変成作用の年代を表すものと解釈された。ただし、ジルコンのいずれの部分からもエクロジヤイト相変成を指標する微細包有物 (オンファス輝石、ざくろ石など) が見つかっていないため、この解釈は決定的とは言えない。また砂質変成岩ではマントル部と外縁部の年代分布は区別がつかないのに加え、累帯構造が一部欠損し、明らかに砕屑性と思われるジルコンマントル部分からも 112 Ma という外縁部と同等の年代が得られている。現時点で 112.9 ± 5.6 Ma が権現岩体のエクロジヤイト相変成年代であることを否定はできないが、Endo et al. (2009) が示した初期変成作用の年代 (約 116 Ma) と一致することも併せると、砕屑性ジルコンの年代、初期変成作用の年代、もしくは両者の混合年代といういずれかである可能性が高い。

3. ジルコン U-Pb 年代：汗見川地域の泥質片岩

一方、その後、Aoki et al. (2009) は四国中央部・汗見川地域の灰曹長石黒雲母帯のざくろ石岩 (garnetite) から、エクロジヤイト相相当の変成作用 ($P = 1.5\text{--}1.9$ GPa, $T = 500\text{--}520^\circ\text{C}$; Fig. 6a)、およびその後の緑れん石角閃岩相での変成作用 ($P = 0.7\text{--}1.1$ GPa, $T = 460\text{--}510^\circ\text{C}$) という二段階の変成作用を認識した。同時に、近接する泥質片岩から複数のジルコンを抽出し、Nano-SIMS を用いた U-Pb 年代測定を行った。カソードルミネッセンス像の観察から、ジルコンには核部、マントル部、および外縁部という 3 つの領域が識別されたが、このうち外縁部からのみ、変成鉱物であるフェンジヤイトの微細包有物が確認された。つまり、外

縁部は何らかの変成作用時に成長した変成ジルコンと考えられる。そして、外縁部の 3 点に対する測定結果がコンコーディア年代を示し、このデータ集合に対する加重平均の年代値として 85.6 ± 3.0 Ma が得られた (誤差は 2σ)。Aoki et al. (2009) はこの年代を緑れん石角閃岩相における変成作用、すなわち三波川主変成作用の年代と解釈した。では、エクロジヤイト相変成作用の年代はどうであろうか？

4. ざくろ石とオンファス輝石による Lu-Hf 年代

Endo et al. (2009) が Lu-Hf アイソクロン法によって初期変成作用の年代 (約 116 Ma) を得たことは既に述べたが、この手法のもう少し詳しい部分に触れておく。鉱物アイソクロンを用いた年代測定法では親元素と娘元素の化学的挙動が測定対象とする複数の鉱物の間で異なっている必要がある。そうでないとアイソクロン図上でのデータプロットが横軸方向に開かず、正確な年代を導けない。Lu-Hf 法の場合、親元素である Lu は重希土類元素であるためざくろ石に強く濃集するのに対し、娘元素である Hf はチタン族元素であり、両者の挙動が大きく異なる。つまり、測定鉱物にざくろ石を含めればアイソクロンが横軸 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) 方向に大きく開き、高精度の年代が得られると期待できる。北米西海岸・フランスカン帯の複数のエクロジヤイトについて、共にアイソクロン法である Sm-Nd 法と Lu-Hf 法を同一試料に用いた例 (Anczkiewicz et al., 2004) では、前者における横軸 ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$) の開きがおおむね 0.2 程度であるのに対し、後者では横軸 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) の開きが 2.8~30 と、確実に一桁以上大きいことは印象的である。なお、局所分析ではない鉱物アイソクロン法では、分離した鉱物フラクションの純度が年代の精度・確度を左右する。エクロジヤイトの Lu-Hf 年代測定においては、希土類元素に富むアパタイトや、Hf の主要ホストであるジルコンには注意が必要である。そのため、ざくろ石と同位体平衡にない可能性のあるアパタイトやジルコンの微小包有物を除去し、ざくろ石自体の高い Lu/Hf 比を高精度年代測定に生かすため、硫酸処理によるアパタイトの除去やジルコンなどの難溶性鉱物を残す「部分溶解」の手法が確立されている (Anczkiewicz et al., 2004; Lagos et al., 2007)。以下に述べる三波川エクロジヤイトの Lu-Hf 年代測定でも、実体顕微鏡下で視認できる包有物を含まない鉱物粒子の入念なハンドピッキングの後、こうした手法が取り入れられている。

さて、ここで 1 つの問題は、ある変成岩中でざくろ石の「最初の」成長が必ずしもエクロジヤイト相で起こるとは限らないことである。五良津西部岩体の例では、ざくろ石核部が角閃岩相で最初に成長した際、全岩に含まれる Lu はほとんどすべてざくろ石に濃集してしまっている (Endo et al., 2009)。だからこそ、初期変成作用の年代を得ることができたわけだが、逆に言えば、このような試料から Lu-Hf 法によってざくろ石 [縁部] の成長年代を得ることは不可能である。つまり、エクロジヤイト相変成作用の年代を導くには、エクロジヤイト相で初めてざくろ石が成長したと考えられる試料を用いる必要がある。そこで Wallis et al. (2009) は、ざくろ石が単一の成長履歴を持ち、かつその成長がオンファ

ス輝石と同時期と考えられる試料, すなわち瀬場苦鉄質片岩中のエクロジャイト, および徳島県高越地域の藍閃石エクロジャイトという2試料を選択し, Lu-Hf法による年代測定を行った. 瀬場のエクロジャイトについては Aoya (2001) で, また高越のエクロジャイトについては Matsumoto et al. (2003) で, 同様の試料におけるざくろ石とオンファス輝石の同時成長が確認されている. また Lu-Hf系がざくろ石の成長以後, 閉鎖状態にあったことを確認するため, 2試料中のざくろ石について Mn, Fe, Mg, Ca といった主要元素, および Lu の累帯構造を検討した結果, ざくろ石は主要元素について明確な成長累帯構造を保持し, かつ Lu 濃度はざくろ石中心部に鋭いピークを持っていた. すなわち, 主要元素や Lu はざくろ石成長以後の元素拡散によってほとんど移動していない. 以上の観察により, 選択した2試料から得られる年代はほぼ確実なエクロジャイト相変成作用の年代とみなせる. 結果は, 瀬場について 88.8 ± 0.6 Ma, 高越について 88.2 ± 0.5 Ma と, ほぼ同一の後期白亜紀の年代が得られた (誤差の信頼度は 95%). 瀬場の試料ではざくろ石の2つのフラクションのうち1つが実験の過程で失われてしまったため, 結果として2点アイソクロンとなってしまうが, 3点アイソクロンによる高越のデータと年代値, および Hf 同位体初生値がほぼ一致することは, これら2つの年代値の妥当性を支持している. すなわち, 四国中央部から東部にかけてのエクロジャイト相変成作用の時期はおおむね 89–88 Ma と結論された.

5. 総括: 三波川変成作用の年代

近年, LA-ICP-MS を用いた碎屑性ジルコンに対する U-Pb 年代の大量測定が普通に行われるようになった. 砂質片岩や泥質片岩中の碎屑性ジルコンはこれらの原岩が堆積する際に取り込まれたものなので, 原岩の堆積年代はジルコンの U-Pb 年代よりも若いはずである. こういった碎屑性ジルコンの U-Pb 年代と K-Ar 年代を組み合わせることで, 変堆積岩類の原岩年代を制約することができる. このアプローチにより, 大歩危ユニットの変堆積岩類の堆積年代が後期白亜紀 (82 ± 11 Ma 以降) であることはほぼ確実にってきた (Aoki et al., 2007 など). 加えて, 白滝ユニットについても同様の手法により, 変堆積岩類の堆積年代が後期白亜紀 (100 Ma 以降) であることが明らかになりつつある (Knittel et al., 2014 など). つまり, 三波川変成岩類の原岩は基本的に後期白亜紀に生じたものであり, 初期変成作用の痕跡を残す苦鉄質片麻岩類や超苦鉄質岩類 (Fig. 3) を除けば, 変成作用の時期は後期白亜紀以降である.

まとめると, 四国中央部~東部のエクロジャイトユニット, および白滝ユニットにおける三波川変成作用に関して, 直接的に求まっている変成年代は, 初期変成作用が 115.9 ± 0.5 Ma (2σ) (Endo et al., 2009), エクロジャイト相変成作用が 89.4–87.7 Ma (Wallis et al., 2009), そして主変成作用が 85.6 ± 3.0 Ma (Aoki et al., 2009) であり, これらの変成年代は K-Ar 系年代の範囲 (91–76 Ma) とほぼ整合的である. エクロジャイト相変成作用から主変成作用までの時間間隔は数 m.y. 程度と比較的短く, これら2つの変成

作用は大きく見れば 89–85 Ma 頃の後期白亜紀に起こった単一のイベントと捉えられる.

Wallis et al. (2009) は瀬場苦鉄質片岩について, 前述した Lu-Hf 年代と Ar-Ar 年代 (Dallmeyer and Takasu, 1991) の年代差, およびピーク変成圧力 (Zaw Win Ko et al., 2005) と上昇時 *P-T* 経路 (Okamoto and Toriumi, 2005) に基づく K-Ar 系の閉鎖時圧力の圧力差を組み合わせた議論から, この岩体の初期の上昇速度が 2.5 cm/year 以上という, プレート運動に匹敵する高速であったことを推論している.

後期白亜紀の変成作用: 海嶺の接近と エクロジャイトナップの形成・上昇

以下, エクロジャイトユニットの苦鉄質岩を瀬場タイプと五良津タイプに分けて議論する. 瀬場タイプのエクロジャイトは瀬場苦鉄質片岩 (Fig. 3) に産するものに代表され, 多くの基質鉱物は径 1 mm 以下と比較的細粒である. また, ざくろ石は基本的に単一のエクロジャイト相における成長履歴を持ち, 初期変成作用の痕跡を持たない. 一方, 五良津岩体に代表される苦鉄質片麻岩類を五良津タイプとするが, これらの構成鉱物の多くは肉眼で認識可能な程度に粗粒である. また初期変成作用の痕跡を一部に残す.

五良津西部岩体のざくろ石核部 (Fig. 4) から導かれた *P-T* 経路から, 前期白亜紀の初期変成作用時のテクトニックセッティングが沈み込み開始直後と読めることは既に述べた. では, 後期白亜紀 (89–85 Ma) のエクロジャイト相変成作用, 主変成作用はどのような状況で起こったのか?

1. 海嶺沈み込みの関与: 瀬場タイプエクロジャイトの *P-T* 経路から

Aoya et al. (2003) は瀬場タイプの特徴を持つ徳島県の高越藍閃石エクロジャイトについて詳細なざくろ石の包有物解析を行い, *P-T* 図上で「立った」, すなわち 0.71 GPa/100°C 以上という非常に大きな *dP/dT* を持つ沈み込み *P-T* 経路を認識した (Fig. 5b). このような *P-T* 経路は近年, Weller et al. (2015) のシュードセクション解析によって, 高越地域の藍閃石エクロジャイトと含クロリトイドざくろ石藍閃石片岩, および瀬場苦鉄質片岩のエクロジャイトという3つの瀬場タイプの岩相について再現されている (ただし, 共著者の青矢はこの論文で瀬場について導かれた沈み込み *P-T* 経路に完全に納得しているわけではない). そして, Aoya et al. (2003) は, このような, 原点からの直線よりも明らかに立った *P-T* 経路が記録されるテクトニックな状況が海嶺沈み込みの直前期, すなわち数 m.y. 前に当たることを熱モデル計算 (Uehara and Aoya, 2005) によって示した (青矢, 2004 参照). つまり, 高越や瀬場のエクロジャイトが形成した約 89 Ma の時期には中央海嶺が海溝の近傍にまで接近している状況であったと考えられる (Fig. 7a).

Wallis et al. (2009) は Engebretson et al. (1985) の古地磁気学的データを検討し, 約 89 Ma に日本周辺に存在したプレートのうち, ユーラシアプレートに対して左横ずれを伴う斜め沈み込みを起こし得るのはイザナギプレートのみであ

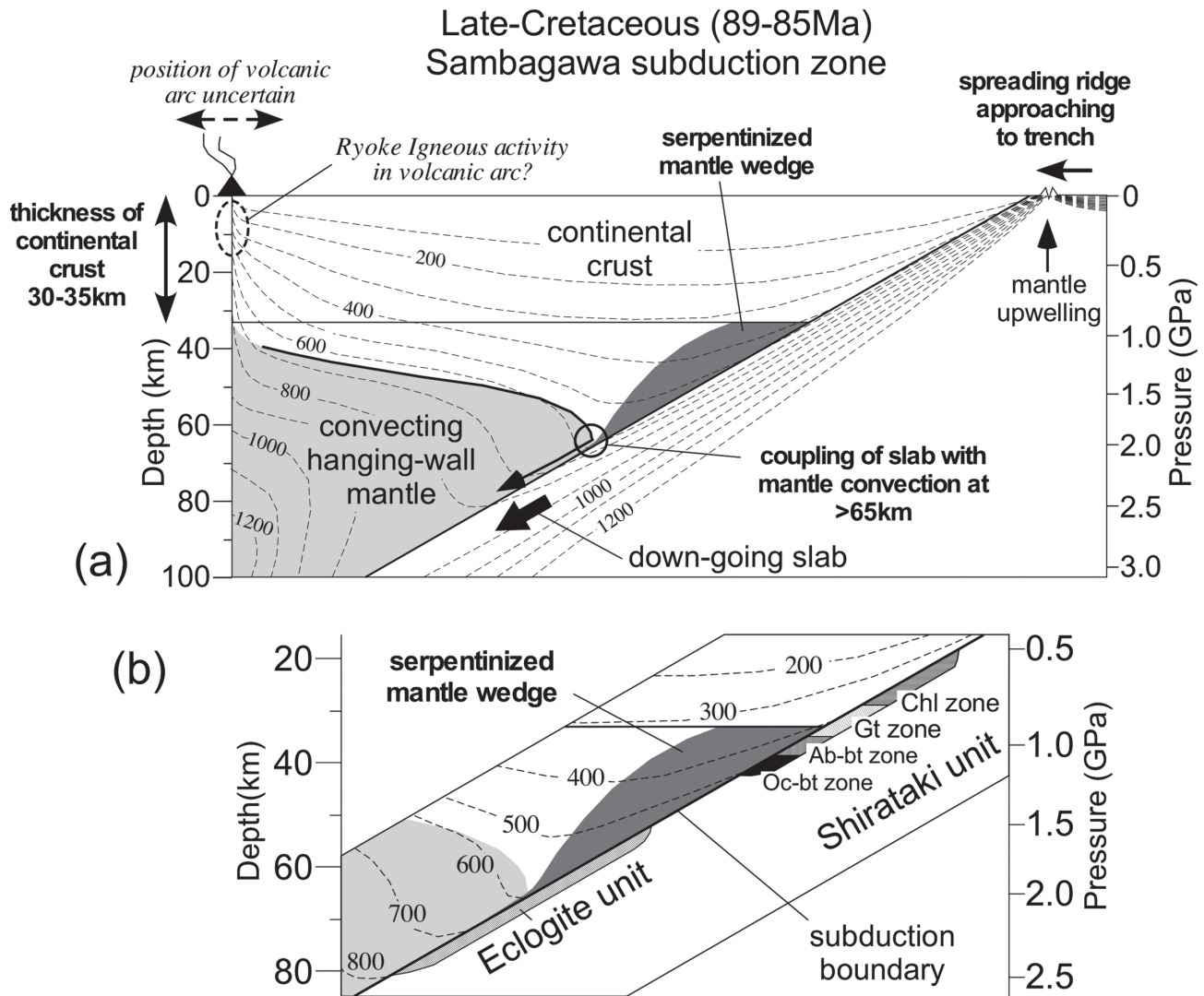


Fig. 7. (a) Schematic cross-section and thermal structure of the Late-Cretaceous (89-85 Ma) Sambagawa subduction zone. Thermal contours are shown by thin dashed lines at 100°C interval. The overall thermal structure follows and is modified from that at the time of initiation of ridge subduction by Aoya et al. (2009). (b) Close-up of the central part of (a) showing the peak-P positions of the Eclogite and Shirataki units in the footwall side. The overall configuration of the figure follows Aoya et al. (2013b).

ることから、三波川変成岩類はイザナギプレートに由来するものとした。また、その後の後期白亜紀には、ユーラシアプレートに対して海嶺が接近し(例えば Okudaira and Yoshitake, 2004), ついには海嶺沈み込みが起こったとする研究が複数ある(木下・伊藤, 1986; Nakajima et al., 1990; 磯崎・丸山, 1991; Otsuki, 1992; 君波ほか, 1993; Sakaguchi, 1996; Maruyama et al., 1997; Iwamori, 2000; Aoya et al., 2003, 2009; Wallis et al., 2009)。また領家・山陽帯の深成岩類の年代に西から東への若返り傾向が見られること(Nakajima et al., 2004a)などから、この海嶺沈み込みは西から東へと順次起こっていったとも考えられている(木下・伊藤, 1986; Nakajima et al., 1990; 君波ほか, 1993 など)。いずれにせよ、後期白亜紀の 85–80 Ma の時期にはイザナギプレートの消滅、クラプレートの出現など、日本周辺域に

において海嶺沈み込みを含めたプレート運動の大変化が起こっていたらしい(Wallis et al., 2009; Taira et al., 2016)。エクロジャイト相変成作用(約 89 Ma)、および主変成作用(約 86 Ma)はいずれも、この大変化直前の比較的短い間に起こっている。

2. エクロジャイトユニットの形成

Endo et al. (2012)は五良津西部岩体のエクロジャイトについてシュードセクション解析を行い、エクロジャイト相への沈み込み P - T 経路が瀬場タイプに比べて明らかに小さな dP/dT を持つことを示した(Fig. 5b)。そして、このような「寝た」沈み込み P - T 経路はゆっくりとした沈み込みによって形成されるものと考え、熱モデル計算によってその P - T 経路を再現した。すなわち、五良津西部岩体は約 116 Ma にスラブと一体の正常な沈み込みによって初期変成作用を経

験したのちにスラブからはがれ(Fig. 5a), その後はスラブに引きずられる形でゆっくりと沈み込んでエクロジャイト相に達したという解釈である(Figs. 5a, 5b). スラブからはがれた時期は沈み込み開始直後であったため, その後沈み込み境界はどんどん冷却してゆく. これに伴い, 五良津岩体は初期変成作用のあと, 110 Ma ころまでに急速な温度降下を経験する. 一方, 110–89 Ma の時期には接近してくる海嶺によって沈み込み境界は次第に温められてゆくと, この状況でゆっくりと沈み込む五良津岩体には「寝た」 P - T 履歴が記録される(Fig. 5b). つまり, Endo et al. (2012) のモデル計算によれば, 五良津西部岩体が約 20 m.y. もの時間をかけた昇温によってエクロジャイト相へと達したのに対し, 立った沈み込み P - T 経路を伴う瀬場タイプエクロジャイトは約 89 Ma に一気にエクロジャイト相まで沈み込んでおり, 変成作用の継続時間は数 m.y. 以内とごく短い. 五良津西部岩体と瀬場苦鉄質片岩の原岩は共に海洋プレート表層部の玄武岩ないし玄武岩質凝灰岩と考えられるため, 両者の粒度の違いは, こういった変成作用の持続時間の違いによるものと解釈できる. 近年, 含エクロジャイト岩体群を取り囲む泥質片岩や珪質片岩もエクロジャイト相変成を経験したと考えられるようになったが(Kouketsu et al., 2014 など), こういった比較的細粒の片岩類は瀬場タイプエクロジャイトと履歴を共にしていただろう. 一方, 東平岩体(Fig. 3)が五良津タイプに属することは既に述べたが, 瀬場変斑れい岩(Aoya et al., 2006 など), 権現岩体(Fig. 3)などが瀬場タイプと五良津タイプのどちらに分類されるべきなのかは今のところ明確ではない. 初期変成作用の痕跡を残しているか否か, またはエクロジャイト相への沈み込み P - T 経路の傾きが大きい小さいかが分類の鍵であろう.

いずれにせよ, これまでに得られているエクロジャイト相変成作用の P - T 条件をまとめると Fig. 6a のようにほぼ一連のトレンドをなす(Ota et al., 2004; Aoya et al., 2009 など). つまり, エクロジャイト相変成以前には東赤石岩体, 瀬場タイプ, 五良津タイプといったいくつかの異なる P - T 経路が存在するものの(Fig. 5a, 5b), エクロジャイト相変成の時期(約 89 Ma)にはこれらすべての岩体は一体化し, 一連のユニットであるエクロジャイトナップ(Wallis and Aoya, 2000; Aoya, 2002)が形成していたと考えられる.

3. エクロジャイトユニットの上昇と主変成作用のオーバープリント

別子地域ではエクロジャイトユニットの大部分は主変成の変成分帯における曹長石黒雲母帯または灰曹長石黒雲母帯に属する(Figs. 2c, 2d). そして, エクロジャイトにおけるオンファス輝石の分解組織, すなわち曹長石+ホルンブレンドからなるシンプレクタイトの形成 P - T 条件は緑れん石角閃岩相に相当し, 曹長石黒雲母帯, および灰曹長石黒雲母帯における最高温度時の変成条件(Fig. 6a)と合致する. このようにエクロジャイトユニットが周囲の白滝ユニットと同様の主変成作用を共有していることは, この時期の間にエクロジャイトユニットと白滝ユニットが定置したことを示す. つまり, 主変成作用の時期にエクロジャイトユニットの上昇と

白滝ユニットの沈み込みが同時進行し, 両ユニットが一体化したものと考えられる(Fig. 5c).

Aoya(2001)は瀬場苦鉄質片岩のエクロジャイトについて, エクロジャイト相から緑れん石角閃岩相への定性的な上昇履歴を示した. また五良津西部岩体のエクロジャイトについては Endo(2010) および Endo et al.(2012) が, エクロジャイト相から緑れん石角閃岩相に向かう定量的な上昇履歴を報告している(Fig. 5c). 一方, Enami et al.(1994)は白滝ユニット緑泥石帯の珪質片岩が約 0.6 GPa, 330°C という最高温度条件に至るまでの P - T 経路が比較的立った沈み込み(昇温・昇圧)履歴となっていることを示した. 一方で, ざくろ石帯, および曹長石黒雲母帯の珪質片岩試料においても最高温度条件以前の P - T 経路を検討し, 最高温度達成の前に 50–100°C の昇温に伴う 0.03–0.1 GPa の減圧があったことを示した(Fig. 6a). その後 Enami(1998)は, 両鉱物帯の泥質片岩に産するざくろ石の累帯構造を詳細に検討して最外縁部の昇温・減圧履歴を取り除き, それ以前, すなわち最高圧力時に至るまでの沈み込み P - T 経路が比較的立った (dP/dT の大きな)ものであることを示した(Fig. 5c). これらの研究から得られた沈み込み P - T 履歴は, 主変成作用の時期もエクロジャイト相変成作用時に引き続いて, 海嶺の接近期に当たっていたことを支持している(Aoya et al., 2003).

蛇紋岩化ウェッジの存在, およびその地表への露出

三波川変成岩類のほとんどは海洋地殻の表層物質であり, それらが沈み込んだ際には変成作用に伴う脱水反応が起こっていたはずである. すなわち, 当時の沈み込み境界面付近では水流体が発生していたであろう. しかも, 初期変成やエクロジャイト相変成の最高温部を除けば, 三波川変成作用の大部分は蛇紋石の安定な P - T 条件下で進行している(Figs. 5a–5c). だとすれば, 三波川沈み込み帯におけるスラブ直上のマントルウェッジ部分は, かんらん岩に水が加わった結果として大規模に蛇紋岩化していたのではないかと(例えば Manning, 1995; Hyndman and Peacock, 2003).

1. エクロジャイトの P - T 条件による予測

そもそも, 三波川沈み込み帯に蛇紋岩化したマントルウェッジ(以下, 蛇紋岩化ウェッジと称する)が存在するのではないかと推測を著者の 1 人(Aoya et al., 2009)が立てたのは, 領家帯(Fig. 1b)に大量に分布する花崗岩類の成因を説明するためだった. 三波川帯と領家帯のように, ほぼ同時代の高圧型と低圧型(高温低圧型)の変成帯が, 地図上で数 100 km に渡って併走するような分布は対の変成帯と呼ばれる(都城, 1965). そして, 領家火成活動・変成作用を単純に島弧火成活動の産物と見て良いかについては, 三波川帯–領家帯ペアの異常に接近した位置関係と関連して未解決の問題も多い(Fig. 7a; Wallis and Okudaira, 2016). 前述の通り, 領家・山陽帯における火成活動の熱源を海嶺沈み込みに求める考えは既に存在した(例えば Nakajima et al., 1990). しかし, 現在の地球上で実際に海嶺沈み込みが起こっている南米・チリ南部の例を見ると, 話はもう少し複雑

なようである。

南米大陸西岸には北方でナスカプレート、南方で南極プレートが東へ向かって沈み込んでおり、それぞれの沈み込み帯に対応する火山弧が大陸内部に存在する。ところが、2つのプレート間に存在する海嶺軸が南米プレートの地下まで延長していると考え、その上方の地上にのみ、現世の火山が存在しない(Cande and Leslie, 1986)。つまり、沈み込んだ海嶺(スラブウィンドウ)が直下にある場所ではむしろ、火成活動が停止しているように見える。海洋地殻は一般に、海嶺での誕生時以降、海水と反応して含水化しているが、沈み込んだ海嶺ではマントル上昇流が地表に達することがないために、その部分には水がほとんど存在しない。チリ南部における観察事実は、海嶺沈み込みの際、海嶺による加熱だけではマグマが発生しないこと、そして、マグマを発生させるには岩石の熔融温度を下げるために水の存在が不可欠であることを示唆している。

では、白亜紀の三波川沈み込み帯に蛇紋岩化ウェッジが存在し、そこに海嶺が沈み込んだと考えてはどうか。蛇紋岩は、沈み込んだ海嶺によって加熱されれば脱水し、水流体を発生するだろう(Hyndman and Peacock, 2003)。その結果、マントルウェッジ直上の下部地殻の玄武岩質岩は水の供給を受け、そのソリダスが700°C以下まで低下するために(Green, 1982など)、海嶺による加熱によって部分熔融を起こし、花崗岩質マグマが生じるだろう。このモデルによって領家花崗岩の少なくとも一部の成因が説明できると思われる。では、蛇紋岩化ウェッジが存在したことはどのように確かめられるだろうか？

Aoya et al. (2009)は三波川変成作用、特にエクロジイト相変成作用の*P-T*条件に着目した。それまでの研究の経緯から、過去にはやや正体不明であった苦鉄質片麻岩類についても、そこから得られるピーク圧力時の*P-T*条件は沈み込み境界のもののみならず、良いことが既に示唆されていた。現在までに得られているエクロジイト相変成作用の最高圧力時*P-T*条件はFig. 6aに総括した。この図から明らかのように、エクロジイト相変成作用時のピーク*P-T*条件が描き出すトレンドは、低圧部(約1.5 GPa)から高圧部(約2.5 GPa)への圧力上昇に伴って高温側へと湾曲する。一方、既存の熱モデル計算による沈み込み境界の地温曲線(以後、境界地温曲線と称する)を見ると、このような湾曲は沈み込むスラブがマントル対流と結合する深度で生じることがわかる(Fig. 6b)。例えば、30 kmよりも深い部分にマントル対流を組み込んでいるIwamori(2000)のモデルでは約30 kmの深さから、また65 kmよりも深い部分にマントル対流を組み込んでいるPeacock et al. (1994)のモデルでは約65 kmの深さから、境界地温曲線の湾曲が始まっている。つまり、沈み込むスラブが初めて高温のマントル流と出会う深度で急速な温度上昇が起こるが、三波川エクロジイトの*P-T*トレンドが示す湾曲深度はPeacock et al. (1994)のモデルが示す湾曲深度とほぼぴったりと一致する(Figs. 6a, 6b)。つまり、後期白亜紀の三波川沈み込み帯においては、約65 km(圧力にして約2.0 GPa)の位置からスラブとマン

トル対流の結合が始まっていたと読むことができる。

ちなみに、この議論はプロットされた*P-T*データが全て最高圧力時のものであること、またほぼ同時期(後期白亜紀)のものであることを暗に仮定しており、やや荒削りなものではある。また以後の研究において、Aoya et al. (2009)で得られた*P-T*トレンドから外れた*P-T*条件もいくつか導かれており(Fig. 6a; Kabir and Takasu, 2011; Endo and Tsuboi, 2013; Weller et al., 2015)、議論の質を高めるためには変成年代や*P-T*経路についてより詳細な検討が必要である。ただし、Aoya et al. (2003)が高越の藍閃石エクロジイトについて導いた立った*P-T*経路(Fig. 5b)がWeller et al. (2015)によって再現され、その確実性を増したことは重要である。つまり、約2.0 GPaに至るこのような立った*P-T*経路は、少なくとも約2.0 GPa相当の深さまで境界地温曲線の湾曲、すなわちスラブとマントル流の結合が起こっていないことを示唆している。

さて、Fig. 6によって示される約65 kmにおけるスラブとマントル対流の結合は、後期白亜紀三波川沈み込み帯において、65 kmよりも「浅い」部分のマントルウェッジが巨視的なマントル対流から孤立していたことを示唆する(Fig. 7a)。つまり、65 km以浅のマントルウェッジ部分は、その直下を次々と通過するスラブから供給される水流体によって大規模に蛇紋岩化していたものと推測できる(Fig. 7a; Aoya et al., 2009)。

2. 三波川超苦鉄質岩類の起源：マントルウェッジか海洋底か

四国中央部三波川帯にかんらん岩、蛇紋岩といった超苦鉄質岩類、およびこれらと周囲の泥質片岩の反応により生じたタルク-アクチノ閃石岩が散在することは古くから認識されていた(Kunugiza et al., 1986など)。こういった超苦鉄質岩類は、小さい方では径数cmのものから最大の東赤石かんらん岩体(Fig. 3)では数km規模という、大小様々な規模を持つブロック状岩体として主に泥質片岩中に産する(Fig. 2c)。三波川帯全体の規模で見れば量的には圧倒的に少ないが、その分布は広範囲で認められている。ただし、これらの超苦鉄質岩類が沈み込み帯の下盤側、上盤側のいずれからもたらされた物なのかは容易には解決しない問題であった。1つの可能性として、前節でその存在が推測された蛇紋岩化ウェッジ、すなわち上盤側起源ということが考えられる。例えば、東赤石かんらん岩体については、超高压の変成条件への沈み込み経路(Enami et al., 2004; Fig. 5a)や地球化学的な特徴から、上盤側のマントルウェッジ起源が推測された(Mizukami and Wallis, 2005; Hattori et al., 2010)。一方、Terabayashi et al. (2005)は東赤石岩体と隣接する五良津岩体等の間の関係(Fig. 3)を初生的なデュープレックス構造と解釈し、それらの起源を下盤側の海洋底に求めた。世界的に見ても、例えば低速拡大する海嶺軸付近に露出するもの(例えばCannat et al., 1995)、蛇紋岩海山(例えばFryer et al., 1985)に由来する海溝充填堆積物(Wakabayashi, 2012)など、下盤側の地表付近に超苦鉄質岩類が分布する例は複数存在する。

ただし、四国中央部三波川帯に関して言えば、この超苦鉄

質岩類の起源問題はほぼ解決したものと著者らは考える。きっかけは、2005年に開始した1/5万地質図幅「日比原」(青矢・横山, 2009)の作成に係る詳細な野外調査であった。2006年には北隣りの1/5万地質図幅「新居浜」(青矢ほか, 2013b)の作成も始まり、両者を併せるとおおむね20×30 km²に及ぶ広範囲(Fig. 1b)の地質図作成計画が、産総研地質調査総合センターのプロジェクトとして進化した。それらの成果を総括した地質図、および変成分帯図がFig. 2である。Fig. 2cの変成分帯図上には、上記の調査で認識された超苦鉄質岩体、および過去の研究で認識されていた小規模超苦鉄質岩体(Kunugiza et al., 1986; Higashino, 1990b)の分布を合わせて示してある。この図から明らかなように、超苦鉄質岩類は緑泥石帯、すなわち三波川帯で最も変成圧力の低い領域(Fig. 6a)には一切存在しない。これは、緑泥石帯に限っても地点番号にして2000箇所以上を記載した上での結果である(Aoya et al., 2013a)。

なお、清水構造線以南に分布するいわゆる御荷鉾緑色岩類(Fig. 2a)中に、日比原-新居浜地域では1箇所も超苦鉄質岩が記載されなかったことは一種の偶然だろう。実際、日比原図幅の東隣り、1/5万「本山」図幅内の御荷鉾緑色岩類は一部に蛇紋岩を伴う(高知県, 1988)。御荷鉾緑色岩類についてはMORB類似の玄武岩類に伴って著量のピクライトが認識され、スーパーブルームを伴う海洋底起源が想定されているため(小澤ほか, 1999; Ichiyama et al., 2014)、御荷鉾緑色岩類に伴う超苦鉄質岩類は日比原-新居浜地域に分布するものとは別物と考えていることを付け加えておく。

さて、日比原-新居浜地域において、超苦鉄質岩類がざくろ石帯以上の高変成度部に広く分布するのに対し、緑泥石帯には一切存在しないということ(Fig. 2c)は、超苦鉄質岩類の分布に明瞭な深さ依存があることを意味する。仮に超苦鉄質岩が下盤側に由来するのであれば、その後の沈み込み深度に関わらず、緑泥石帯にも同様に超苦鉄質岩が分布するはずであるため、Fig. 2cのような分布は、超苦鉄質岩類が上盤側マントルウェッジに由来するものであることを強く支持している。つまり、緑泥石帯の変成岩類がマントルウェッジの深さまで沈み込まなかったために超苦鉄質岩を伴わないのに対し、ざくろ石帯以上の高変成度部の岩石はマントルの深さまで沈み込み、直上の超苦鉄質岩類を取り込んだ上で、現在の地表にまで上昇してきたものと考えられる(Fig. 7b)。すなわち、清水構造線以北の四国中央部三波川帯に分布する超苦鉄質岩類は、ほぼ全てがマントルウェッジ由来のテクトニックブロックと解釈できる。

3. 当時の大陸地殻の厚さ

ここまでの議論から、四国中央部三波川帯における超苦鉄質岩の出現線は、前弧域における地殻とマントルの境界を表しているものと考えられる。そして、Fig. 2cから明らかなように、この出現線はざくろ石帯の内部に引くことができる。一方、別子地域におけるざくろ石帯の変成条件はEnami et al. (1994)によって既に求まっている。これによれば、最高温度時の P - T 条件は0.70–0.85 GPa、425–470°Cであり、この P - T 条件に至るまでには約0.1 GPaの昇温減圧

があった(Fig. 6a)。従って、ざくろ石帯の岩石が到達した最高変成圧力は0.80–0.95 GPaであり(Fig. 6a)、これが当時の地殻-マントルの境界圧力とみなせる。圧力を用いた深さ見積もりは上部地殻と下部地殻の厚さの比率にも依存するが、仮に1–20 kmの範囲を花崗岩質の上部地殻(密度2.7 g/cm³)、その下を斑れい岩質の下部地殻(密度3.0 g/cm³)とすれば、この圧力見積もりは概ね30–35 kmの深さに相当する(Spear, 1993など参照)。すなわち、後期白亜紀三波川沈み込み帯における上盤側大陸地殻の厚さは30–35 kmであったことがわかる(Fig. 7a)。

4. 蛇紋岩化ウェッジの成長と消滅：前～後期白亜紀の履歴

四国中央部三波川帯の超苦鉄質岩類が上盤側に由来することが明らかになったため、改めてこれら超苦鉄質岩類自体に記録された情報を集約し、蛇紋岩化ウェッジの進化の実像に迫りたい。梶座(1984)はこれら超苦鉄質岩類には、初生的なかんらん岩(Pタイプ)と、蛇紋岩の昇温変成により二次的にかんらん岩化した岩体(Sタイプ)の二タイプが存在することを認識した。四国中央部にはkmスケールの超苦鉄質岩体として東赤石岩体(Fig. 3)と汗見川地域(Fig. 1b)の白髪岩体があり、これらはそれぞれPタイプ、Sタイプの代表である。また、Pタイプの分布は現在の地質区分で見れば、エクロジヤイトユニット内に限定される。Pタイプに属する東赤石岩体(Mizukami and Wallis, 2005)や五良津西部岩体に折り込まれた超苦鉄質岩体(Endo et al., 2015)の解析から、前期白亜紀の初期変成時には沈み込み境界付近でもマントルは蛇紋石安定領域外にあり、蛇紋岩化ウェッジはまだ発達していなかったことが指摘できる。この時期に生じたスラブ流体は、マントルウェッジ下底部に、斜方輝石や緑泥石、トレモラ閃石に富む岩相を形成する交代作用を引き起こしていた(Endo et al., 2015)。またMizukami and Wallis (2005)は東赤石岩体が超高压条件で蛇紋岩化し始めたことを示し(Fig. 5a)、この岩体が三波川帯に保存されたマントル物質としては最深部を代表する。

一方、前述の超苦鉄質岩出現線の近傍に位置する白髪岩体は、浅部マントルを代表する。Kawahara et al. (2016)は白髪岩体内から万遍なく採集した100試料以上の薄片観察により、三波川沈み込み帯上盤側の浅部マントルに関して、以下の事実を明らかにした。まず、初生かんらん石が白髪岩体には皆無であり、この岩体は一旦100%蛇紋岩化したと見られる。また、このときの鉱物組合せにはアンチゴライト(蛇紋石)に加えて、ブレース石[Mg(OH)₂]も最大で20 vol.%程度含まれていた。さらには、その後の昇温変成作用により、ブレース石+アンチゴライト→かんらん石+H₂Oという上記蛇紋岩化の逆反応による脱蛇紋岩化が進行していた。ただし、ピーク温度時でも P - T 条件はアンチゴライト安定領域内(代表的な鉱物組合せは、アンチゴライト+かんらん石)にあり、周囲のスラブ由来変成岩の三波川主変成作用のピーク条件(ざくろ石帯高温部～曹長石黒雲母帯)と調和的である。また、変成蛇紋岩体(Sタイプ)の鉱物組合せの岩体ごとの変化と、泥質片岩の鉱物組合せに基づく変成分帯との整合性(梶座, 1984)も併せると、白髪岩体などS

タイプ岩体の脱蛇紋岩化は三波川主変成作用によるものと考えられる。

以上を整理すると、三波川沈み込み帯の創生以降、マントルウェッジの冷却とスラブ流体の供給により、白亜紀中頃までには蛇紋岩化ウェッジが形成されていた。そして、蛇紋岩化ウェッジは岩石学的には約 450°C の等温線を境に深部(高温)のアンチゴライト+かんらん石領域と浅部(低温)のアンチゴライト+ブルース石領域に二分でき、浅部では蛇紋岩化が 100% 進行していた。その後、海嶺接近に同期した後期白亜紀の主変成作用時には、アンチゴライト+ブルース石領域の縮退に伴って、すでに蛇紋岩化ウェッジは一部脱水を開始していた。そして、超苦鉄質岩類のブロックを取り込んだ三波川帯の上昇後、海嶺沈み込みにより蛇紋岩化ウェッジは完全な脱水、つまり約 600°C 以上でのアンチゴライトの単独分解(Fig. 5a)にまで至ったと推論される。

後期白亜紀三波川沈み込み帯の描像と新たな展開

1. 高圧型変成帯の上昇機構へのヒント：浮力モデルの妥当性

初期変成作用の存在とその年代、*P-T*履歴が導かれたことで、三波川沈み込み帯が約 117 Ma に稼動し始めて一度は成熟(冷却)し、その後、89–85 Ma のエクロジイト相変成作用・主変成作用に至る頃には、海嶺が海溝付近まで接近して再び温まっていたことが明らかになってきた。つまり、現在地表に露出しているエクロジイトユニットや白滝ユニットの岩石は、海嶺による沈み込み帯全体の加熱・流動化を機に上昇に転じたものと推測される(Aoya et al., 2003)。五良津西部岩体が高温での沈み込みによって約 116 Ma に角閃岩相高圧部に達し、一度はスラブからはがれたにも関わらず、その時点では上昇に向かわなかったことは、その後、沈み込み帯全体が急速に冷却したためなのかもしれない(Fig. 5a)。Mizukami and Wallis (2005) は東赤石かんらん岩体の初期の上昇駆動力を、蛇紋岩化(Fig. 5a)による密度低下に伴って生じた浮力に求めている。同様に、Endo et al. (2012) はシュードセクション解析に基づき、五良津西部岩体全体の岩石密度が上昇開始時に無水マントル物質よりも有意に小さかったことを示し、また上昇開始時にエクロジイトユニットが多量の低密度物質(主に泥質片岩)を伴っていたこと(Mouri and Enami, 2008; Kouketsu et al., 2010 など)も併せ、エクロジイトユニットの上昇駆動力をやはり浮力に求めた。

これまでの研究成果を総合して描いた後期白亜紀三波川沈み込み帯の模式断面図、および模式温度構造図(Fig. 7)は、定性的には、こういった浮力による高圧型変成帯上昇モデルを支持するように見える。特に重要な点は、海嶺接近の熱的影響により、この時期の沈み込み帯温度構造が、より一般的な冷たい沈み込み帯のものとは大きく異なっている点である。冷たい沈み込み帯では沈み込み境界下方のスラブが最も冷たく、この部分に傾斜方向への等温線の大きな落ち込みが存在する(例えば、Peacock, 1996 の Fig. 2 参照)。それに対し、後期白亜紀の三波川沈み込み帯ではスラブは比較的高温で、等温線の落ち込みはスラブ内には存在しない(Fig.

7a)。そして、沈み込み境界の下側には、この境界の傾斜に沿うように多数の等温線が密集しており(Fig. 7a)、スラブの表面から内部への急激な温度上昇が認められる。これは、同じ深さで見たととき、スラブ表面から内部に向かって岩石が急激に流動化している状態と考えられる。従って、スラブ表面が低密度であれば、この部分のみが沈み込むスラブから剥がれ、プレート境界に沿って上昇することが可能な状態であろう。それに対し、沈み込み境界から上盤側へ向かっては、ほとんど温度変化がないか、むしろ温度が下がる(Fig. 7b)。すなわち、巨視的にはスラブ表面から上盤側に向かって岩石の有効粘性が下がらないので、変成岩類がこの高粘性部分をくぐり抜けて真上方向に浮力上昇することは考えにくい。一方で、地下約 65 km までの上盤側マントルは蛇紋岩化しているので(Fig. 7)、これによって上盤側物質の摩擦係数が下がり、沈み込み境界傾斜方向への滑りが起こりやすくなっていった可能性が高い。つまり、マントルの深さまで沈み込んだエクロジイトユニットや白滝ユニット高圧部は、スラブ内部からは熱的に剥離し、上盤側では滑動を起こすことで元の沈み込み境界に沿って浮力上昇し、結果として現在のようなナップ構造(Figs. 2b, 2d)を形成したのかもしれない。一般論としては、沈み込み帯周辺が Fig. 7a のような温度構造を獲得したタイミングで高圧型変成岩の上昇が始まっている可能性が示唆される。

前述の議論はあくまで定性的なものだが、これまでの研究に基づき、後期白亜紀の三波川沈み込み帯については、かなり定量的にその模式断面図(Fig. 7)を描くことができるようになってきたことを強調しておきたい。つまり、高圧型変成岩の上昇機構など、沈み込み帯の深部過程をより定量的に吟味するための熱的・力学的モデル計算に必要な境界条件は確実に増えてきている。

2. 現世の暖かい沈み込み帯深部のアナログとして

超苦鉄質岩類の起源が明確になったことで、三波川帯の高変成度部は「深部沈み込み境界の化石」として再認識された。そのため、特に三波川帯が上昇を始める前の記録は、現在の「暖かい沈み込み帯」の深部過程を理解するうえで重要な情報を含むであろう。一般に、プレート境界地震発生帯の深部端はほぼ 350°C の温度で規定されると考えられるが(Hyndman et al., 1997)、その先(深部)では ETS(episodic tremor and slip)と総称される低周波微動や各種スロースリップ現象が、現世のいくつかの沈み込み帯で観測されている。そして、ETSは西南日本やカスケーディアといった、若いプレートの沈み込みを伴う暖かい沈み込み帯において最も詳細なデータが揃っている(例えば Schwartz and Rokosky, 2007; Obara, 2009)。これら現世沈み込み帯の ETS 発生域は、温度が 350–450°C、深さは地殻–マントル境界付近と推定されており、まさに三波川変成岩類の形成条件(ざくろ石帯程度)に重なることから、一部の変成岩研究者はこの現象と変成岩研究の関係性に注目するようになった。ところで、玄武岩質岩は 350°C 以下の低温条件では多くの高含水量鉱物が安定化して飽和含水量が高くなるため、プレート境界地震発生帯では変質玄武岩質海洋地殻の初期含水量が著し

く高い部分を除けば脱水は起こらないと考えられる。一方、より深部(高温)の ETS 発生領域は高 V_p/V_s 比を示し(Matsubara et al., 2009), この深度において海洋地殻の脱水が始まり, プレート境界や直上の最浅部マントルは高間隙流体圧状態となっていると考えられる。つまり ETS は, 海洋地殻の脱水や直上マントルの蛇紋岩化に伴う変形プロセスに関係した現象であろうと予想される(例えば, Katayama et al., 2012)。

Mizukami et al. (2014)は西南日本の短期的スロースリップと長期的スロースリップが, 蛇紋岩の鉱物組み合わせ(アンチゴライト+かんらん石, もしくはアンチゴライト+ブルース石)が支配する水理学的挙動の違いに対応している可能性を示唆した。その一方, ETS 発生域では SiO_2 に富むスラブ流体の活動が重要という見方もあり(Hyndman et al., 2015), この場合, 浅部のマントルウェッジ尖端は Si 交代作用の進行によってほぼアンチゴライトのみからなり, かんらん石やブルース石の存在は期待できない。しかし前章で述べたように, Kawahara et al. (2016)は三波川沈み込み帯の蛇紋岩化ウェッジ浅部に著量のブルース石が存在し, Si 交代作用はスラブ-マントルウェッジ境界に限定的であったことを示した。つまり, Si 交代作用は摩擦係数の低いタルク層の形成など, 沈み込み境界面の力学特性を考えるうえで重要である一方, 直上マントルの広範に浸透的に及んではいなかったものと考えられる。このように, 現在の沈み込み帯の豊富な地球物理学的観測情報を解釈してゆくに当たり, いかに具体的な物質科学的描像を提供できるかという観点は, 今後の三波川帯研究の方針のひとつに挙げられるだろう。

謝 辞

著者らの三波川帯研究の扉を開いて下さった指導教官の Simon Wallis 氏, また同氏に加え, 共同研究者として多大なるご助言・ご協力を頂いた榎並正樹氏, 水上知行氏, 上原真一氏, 松本昌俊氏, 壺井基裕氏, また 1/5 万地質図幅「日比原」[新居浜]の作成をご提案頂いた宮崎一博氏, 本稿に関する貴重なご指摘を頂いた査読者の鳥海光弘氏, 奥平敬元氏と編集委員の岡本敦氏, その他, 著者らの研究に関係し, 様々な局面で様々なご議論・ご協力を頂いた大勢の皆様, 以上の方々に厚くお礼申し上げます。

文 献

- Agard, P., Yamato, P., Soret, M., Prigent, C., Guillot, S., Plunder, A., Dubacq, B., Chauvet, A. and Monié, P., 2016, Plate interface rheological switches during subduction infancy: Control on slab penetration and metamorphic sole formation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **451**, 208–220.
- Anczkiewicz, R., Platt, J. P., Thirlwall, M. F. and Wakabayashi, J., 2004, Franciscan subduction off to a slow start: evidence from high-precision Lu–Hf garnet ages on high grade-blocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **225**, 147–161.
- Anczkiewicz, R., Szczepański, J., Mazur, S., Storey, C., Crowley, Q., Villa, I. M., Thirlwall, M. F. and Jeffries, T. E., 2007, Lu–Hf geochronology and trace element distribution in garnet: Implications for uplift and exhumation of ultra-high pressure granulites in the Sudetes, SW Poland. *Lithos*, **95**, 363–380.
- Aoki, K., Iizuka, T., Maruyama, S. and Terabayashi, M., 2007, Tectonic boundary between the Sambagawa belt and the Shimanto belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **113**, 171–183.
- Aoki, K., Kitajima, K., Masago, H., Nishizawa, M., Terabayashi, M., Omori, S., Yokoyama, T., Takahata, N., Sano, Y. and Maruyama, S., 2009, Metamorphic P–T–time history of the Sambagawa belt in central Shikoku, Japan and implications for retrograde metamorphism during exhumation. *Lithos*, **113**, 393–407.
- Aoya, M., 1998, Thermal calculation for high-pressure contact metamorphism: application to eclogite formation in the Sebadani area, the Sambagawa belt, SW Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **160**, 681–693.
- Aoya, M., 2001, P–T–D path of eclogite from the Sambagawa belt deduced from combination of petrological and microstructural analyses. *Jour. Petrol.*, **42**, 1225–1248.
- Aoya, M., 2002, Structural position of the Seba eclogite unit in the Sambagawa belt: supporting evidence for an eclogite nappe. *Island. Arc*, **11**, 91–110.
- 青矢睦月(Aoya, M.), 2004, 三波川エクロジヤイトの沈み込み P–T 経路の導出とそのテクトニックな意味づけ—包括的岩石学への布石として—(Derivation of subduction-stage pressure-temperature path of Sambagawa eclogite and its tectonic significance: Towards the goal of a comprehensive petrology). 地学雑(Jour. Tokyo Geogr. Soc.), **113**, 664–677.
- 青矢睦月(Aoya, M.), 2005, 四国三波川帯・瀬田地域の研究史: 高度変成地域の野外調査にまつわる諸事情(Research history of the Seba region in the Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, with special focus on its field-geological aspect). 地調研報(Bull. Geol. Surv. Japan), **56**, 137–146.
- Aoya, M., Endo, S., Mizukami, T. and Wallis, S. R., 2013a, Paleo-mantle wedge preserved in the Sambagawa high-pressure metamorphic belt and the thickness of forearc continental crust. *Geology*, **41**, 451–454.
- Aoya, M., Mizukami, T., Uehara, S. and Wallis, S. R., 2009, High-P metamorphism, pattern of induced flow in the mantle wedge, and the link with plutonism in paired metamorphic belts. *Terra Nova*, **21**, 67–73.
- 青矢睦月・野田 篤・水野清秀・水上知行・宮地良典・松浦浩久・遠藤俊祐・利光誠一・青木正博(Aoya, M., Noda, A., Mizuno, K., Mizukami, T., Miyachi, Y., Matsuura, H., Endo, S., Toshimitsu, S. and Aoki, M.), 2013b, 新居浜地域の地質・地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Niihama District. With Geological Sheet Map at 1: 50000*), 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST), 181 p.
- Aoya, M., Tsuboi, M. and Wallis, S. R., 2006, Origin of eclogitic metagabbro mass in the Sambagawa belt: geological and geochemical constraints. *Lithos*, **89**, 107–134.
- Aoya, M., Uehara, S., Matsumoto, M., Wallis, S. R. and Enami, M., 2003, Subduction-stage pressure-temperature path of eclogite from the Sambagawa belt: Prophetic record for oceanic-ridge subduction. *Geology*, **31**, 1045–1048.
- Aoya, M. and Wallis, S. R., 1999, Structural and microstructural constraints on the mechanism of eclogite formation in the Sambagawa belt, SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **21**, 1561–1573.
- 青矢睦月・横山俊治(Aoya, M. and Yokoyama, S.), 2009, 日比原地域の地質・地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Hibihara District. With Geological Sheet Map at 1: 50000*), 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST), 75 p.
- Banno, S., 1964, Petrologic studies on Sambagawa crystalline schists in the Besshi-Ino district, central Shikoku, Japan. *Jour. Fac. Sci. University of Tokyo, SecII*, **15**, Part 3, 203–319.
- 坂野昇平・鳥海光弘・小畑正明・西山忠男(Banno, S., Toriumi, M.,

- Obata, M. and Nishiyama, T., 2000, 岩石形成のダイナミクス (*Dynamics of Petrogenesis*), 東京大学出版会 (University of Tokyo Press), 304p.
- Bromiley, G. D. and Pawley, A. R., 2003, The stability of antigorite in the system MgO-SiO₂-H₂O (MSH) and MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (MASH): The effects of Al³⁺ substitution on high-pressure stability. *Amer. Mineral.*, **88**, 99–108.
- Cande, S. C. and Leslie, R. B., 1986, Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Jour. Geophys. Res.*, **91**, 471–496.
- Cannat, M., Mével, C., Maia, M., Deplus, C., Durand, C., Gente, P., Agrinier, P., Belarouchi, A., Dubuisson, G., Humler, E. and Reynolds, J., 1995, Thin crust, ultramafic exposures, and rugged faulting patterns at the Mid-Atlantic Ridge (22°–24°N). *Geology*, **23**, 49–52.
- Cherniak, D. J. and Watson, E. B., 2000, Pb diffusion in zircon. *Chem. Geol.*, **172**, 5–24.
- Dallmeyer, R. D. and Takasu, A., 1991, Tectonometamorphic evolution of the Sebani eclogitic metagabbro and the Sambagawa schists, central Shikoku, Japan: ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral age constraints. *Jour. Metamorph. Geol.*, **9**, 605–618.
- 榎並正樹 (Enami, M.), 1982, 四国中央部別子地域・三波川帯の灰曹長石-黒雲母帯 (Oligoclase-biotite zone of the Sanbagawa metamorphic terrain in the Besshi district, central Shikoku, Japan). *地質雑* (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **88**, 887–900.
- Enami, M., 1983, Petrology of pelitic schists in the oligoclase-biotite zone of the Sanbagawa metamorphic terrain, Japan: phase equilibria in the highest grade zone of a high-pressure intermediate type of metamorphic belt. *Jour. Metamorph. Geol.*, **1**, 141–161.
- Enami, M., 1998, Pressure-temperature path of Sanbagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet. *Jour. Metamorph. Geol.*, **16**, 97–106.
- Enami, M., Iwata, O. and Banno, S., 1979, Notes on petrography and rock-forming mineralogy (6) Glaucophane in the Iratsu amphibolite in the Sanbagawa belt in central Shikoku. *Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **74**, 332–338.
- Enami, M., Mizukami, T. and Yokoyama, K., 2004, Metamorphic evolution of garnet-bearing ultramafic rocks from the Gongen area, Sanbagawa belt, Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **22**, 1–15.
- Enami, M., Nishiyama, T. and Mouri, T., 2007, Laser Raman microspectrometry of metamorphic quartz: A simple method for comparison of metamorphic pressures. *Amer. Mineral.*, **92**, 1303–1315.
- Enami, M., Wallis, S. R. and Banno, Y., 1994, Paragenesis of sodic pyroxene-bearing quartz schist: implications for the P-T history of the Sanbagawa belt. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **116**, 182–198.
- Endo, S., 2010, Pressure-temperature history of titanite-bearing eclogite from the Western Iratsu body, Sanbagawa Metamorphic Belt, Japan. *Island. Arc*, **19**, 313–335.
- Endo, S., 2015, Jadeite-bearing metaigneous rocks from the Northern Chichibu belt, SW Japan: implications for the lowest-grade Sanbagawa metamorphism. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **110**, 8–19.
- 遠藤俊祐・青矢睦月・青木正博 (Endo, S., Aoya, M. and Aoki, M.), 2013, 新居浜地域の地質 10.2 銅鉾床. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Niihama District, 10.2 Copper mines. With Geological Sheet Map at 1: 50000*). 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 149–158.
- Endo, S., Mizukami, T., Wallis, S. R., Tamura, A. and Arai, S., 2015, Orthopyroxene-rich Rocks from the Sanbagawa Belt (SW Japan): Fluid-Rock Interaction in the Forearc Slab-Mantle Wedge Interface. *Jour. Petrol.*, **56**, 1113–1137.
- Endo, S., Nowak, I. and Wallis, S. R., 2013, High-pressure garnet amphibolite from the Funaokayama unit, western Kii Peninsula and the extent of eclogite facies metamorphism in the Sanbagawa belt. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **108**, 189–200.
- Endo, S. and Tsuboi, M., 2013, Petrogenesis and implications of jadeite-bearing kyanite eclogite from the Sanbagawa belt (SW Japan). *Jour. Metamorph. Geol.*, **31**, 647–661.
- Endo, S., Wallis, S., Hirata, T., Anczkiewicz, R., Platt, J., Thirlwall, M. and Asahara, Y., 2009, Age and early metamorphic history of the Sanbagawa belt: Lu-Hf and P-T constraints from the Western Iratsu eclogite. *Jour. Metamorph. Geol.*, **27**, 371–384.
- Endo, S., Wallis, S. R., Tsuboi, M., Aoya, M. and Uehara, S., 2012, Slow subduction and buoyant exhumation of the Sanbagawa eclogite. *Lithos*, **146–147**, 183–201.
- Engelbreton, D., Cox, A. and Gordon, R. G., 1985, *Relative plate motions between ocean and continental plates in the Pacific basin*. Geol. Soc. Amer. Spe. Pap., 206, 60p.
- Fettes, D. and Desmons, J., 2007, Metamorphic rocks—a classification and glossary of terms. *Recommendations of International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks*. Cambridge University Press, 244p.
- Fryer, P., Ambos, E. L. and Hussong, D. M., 1985, Origin and emplacement of Mariana forearc seamounts. *Geology*, **13**, 774–777.
- Green, T. H., 1982, Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite. In Thorpe, R. S., ed. *Andesites*. Wiley, London, 465–487.
- Hames, W. E. and Bowring, S. A., 1994, An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **124**, 161–167.
- Hara, I., Shiota, T., Hide, K., Kanai, K., Goto, M., Seki, S., Kikiri, K., Takeda, K., Hayasaka, Y., Miyamoto, T., Sakurai, Y. and 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.
- Hattori, K., Wallis, S., Enami, M., and Mizukami, T., 2010, Subduction of mantle wedge peridotites: Evidence from the Higashi-akaishi ultramafic body in the Sanbagawa metamorphic belt. *Island. Arc*, **19**, 192–207.
- 東野外志男 (Higashino, T.), 1990a, 四国中央部三波川変成帯の変成分帯 (Metamorphic zones of the Sambagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan). *地質雑* (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **96**, 703–718.
- Higashino, T., 1990b, The higher grade metamorphic zonation of the Sambagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **8**, 413–423.
- Hodges, K. V., 1991, Pressure-temperature-time paths. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **19**, 207–236.
- 堀越義一 (Horikoshi, Y.), 1937, 伊予東赤石山付近産の榴輝岩 (Eclogite) に就いて (On the eclogite in the vicinity of Higashi-Akaiishi-yama in the Province Iyo). *地質雑* (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **44**, 141–144.
- Hyndman, R. D., McCrory P. A., Wech, A., Kao, H. and Ague, J., 2015, Cascadia subducting plate fluids channeled to forearc mantle corner: ETS and silica deposition. *Jour. Geophys. Res. Solid Earth*, **120**, 4344–4358.
- Hyndman, R. D. and Peacock, S. M., 2003, Serpentinization of the forearc mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **212**, 417–432.
- Hyndman, R. D., Yamano, M. and Oleskevich, D. A., 1997, The seismogenic zone of subduction thrust faults. *Island. Arc*, **6**, 244–260.
- Ichiyama, Y., Ishiwatari, A. and Kimura, J.-I., 2014, Jurassic plume-origin ophiolites in Japan: accreted fragments of oceanic plateaus. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **168**, 1019.
- 磯崎行雄・丸山茂徳 (Isozaki, Y. and Maruyama, S.), 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区分 (Studies on orogeny based on plate tectonics in Japan and new geo-

- tectonic subdivision of the Japanese islands). 地質雑(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **100**, 697–761.
- Itaya, T. and Fukui, S., 1994, Phengite K–Ar ages of schists from the Sanbagawa southern marginal belt, central Shikoku, southwest Japan: influence of detrital mica and deformation on age. *Island. Arc*, **3**, 48–58.
- Itaya, T., Hyodo, H., Tsujimori, T., Wallis, S., Aoya, M., Kawakami, T. and Gouzu, C., 2009, Regional-Scale Excess Ar wave in a Barrovian type metamorphic belt, eastern Tibetan Plateau. *Island. Arc*, **18**, 293–305.
- 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.
- Itaya, T. and Tsujimori, T., 2015, White mica K–Ar geochronology of Sanbagawa eclogites from Southwest Japan: implications for deformation-controlled K–Ar closure temperature. *Int. Geol. Rev.*, **57**, 1014–1022.
- Iwamori, H., 2000, Thermal effects of ridge subduction and its implications for the origin of granitic batholith and paired metamorphic belts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **181**, 131–144.
- Kabir, M. F. and Takasu, A., 2011, High–Mg garnets from pelitic schists adjacent to the Sebadani eclogitic metagabbro mass, Sambagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **106**, 332–337.
- Kabir, M. F. and Takasu, A., 2016, Jadeite–garnet glaucophane schists in the Bizan area, Sambagawa metamorphic belt, eastern Shikoku, Japan: significance and extent of eclogite facies metamorphism. *Jour. Metamorph. Geol.*, **34**, 893–916.
- Katayama, I., Terada, K., Sano, Y., Maruyama, S. and Parkinson, C. D., 2001, Ion micro-probe U–Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **188**, 185–198.
- Katayama, I., Terada, T., Okazaki, K. and Tanikawa, W., 2012, Episodic tremor and slow slip potentially linked to permeability contrasts at the Moho. *Natl. Geosci.*, **5**, 731–734.
- Kawahara, H., Endo, S., Wallis, S. R., Nagaya, T., Mori, H. and Asahara, Y., 2016, Brucite as an important phase of the shallow mantle wedge: Evidence from the Shiraga unit of the Sanbagawa subduction zone, SW Japan. *Lithos*, **254–255**, 53–66.
- 君波和雄・宮下純夫・川端清司(Kiminami, K., Miyashita, S. and Kawabata, K.), 1993, 海嶺衝突とその地質的影響: 西南日本の後期白亜紀を例として(Active ridge-forearc collision and its geological consequences: an example from Late Cretaceous Southwest Japan). 地質学論集(*Mem. Geol. Soc. Japan*), **42**, 167–182.
- 木下 修・伊藤英文(Kinoshita, O. and Ito, H.), 1986, 西南日本の白亜紀火成活動の移動と海嶺のもぐり込み(Migration of Cretaceous igneous activity in Southwest Japan related to ridge subduction). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **92**, 723–735.
- 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.
- 高知県(Kochi prefecture), 1988, 土地分類基本調査「本山・伊予三島」[土佐長浜] (5万分の1表層地質図および同説明書)(*Surface Geological Map of the Motoyama, Iyomishima and Tosanagahama Districts, Scale 1: 50,000 and its Explanatory Text*)*, 高知県農林水産部耕地課, 44p.
- Korh, A. E., Schimidt, S. T., Ulianov, A. and Potel, S., 2009, Trace element partitioning in HP–LT metamorphic assemblages during subduction-related metamorphism, Ile de Groix, France: a detailed LA–ICPMS study. *Jour. Petrol.*, **50**, 1107–1148.
- Kouketsu, Y. and Enami, M., 2011, Calculated stabilities of sodic phases in the Sambagawa metapelites and their implications. *Jour. Metamorph. Geol.*, **29**, 301–316.
- Kouketsu, Y., Enami, M. and Mizukami, T., 2010, Omphacite-bearing metapelite from the Besshi region, Sambagawa metamorphic belt, Japan: Prograde eclogite facies metamorphism recorded in metasediment. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **105**, 9–19.
- Kouketsu, Y., Enami, M., Mouri, T., Okamura, M. and Sakurai, T., 2014, Composite metamorphic history recorded in garnet porphyroblasts of Sambagawa metasediments in the Besshi region, central Shikoku, Southwest Japan. *Island. Arc*, **23**, 263–280.
- 釘宮康郎・高須 晃(Kugimiya, Y. and Takasu, A.), 2002, 四国中央部別子地域の三波川変成帯テクトニック・メランジェ中の五良津西部岩体とその周辺の地質(Geology of the Western Iratsu mass within the tectonic mélange zone in the Sambagawa metamorphic belt, Besshi district, central Shikoku, Japan). 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **108**, 644–662.
- 梶座圭太郎(Kunugiza, K.), 1984, 四国中央部三波川変成帯の超苦鉄質岩体の変成作用と起源(Metamorphism and origin of ultramafic bodies of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku). 岩鉱(*Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **79**, 20–32.
- Kunugiza, K., Takasu, A. and Banno, S., 1986, The origin and metamorphic history of the ultramafic and metagabbro bodies in the Sanbagawa belt. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **164**, 375–385.
- Lagos, M., Scherer, E. E., Tomaschek, F., Münker, C., Keiter, M., Berndt, J. and Ballhaus, C., 2007, High precision Lu–Hf geochronology of Eocene eclogite-facies rocks from Syros, Cyclades, Greece. *Chem. Geol.*, **243**, 16–35.
- Manning, C. E., 1995, Phase-equilibrium controls on SiO₂ metasomatism by aqueous fluid in subduction zones: reaction at constant pressure and temperature. *Int. Geol. Rev.*, **37**, 1074–1093.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G. and Terabayashi, M., 1997, Paleogeographic maps of the Japanese islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present. *Island. Arc*, **6**, 121–142.
- Matsubara, M., Obara, K. and Kasahara, K., 2009, High-V_p/V_s zone accompanying non-volcanic tremors and slow-slip events beneath southwestern Japan. *Tectonophysics*, **472**, 6–17.
- Matsumoto, M., Wallis, S., Aoya, M., Enami, M., Kawano, J., Seto, Y. and Shimobayashi, N., 2003, Petrological constraints on the formation conditions and retrograde P–T path of the Kotsu eclogite unit, central Shikoku. *Jour. Metamorph. Geol.*, **21**, 363–376.
- 南新真裕・柳 喙・山口 勝(Minamishin, M., Yanagi, T. and Yamaguchi, M.), 1979, 四国中央部三波川変成帯の Rb–Sr 全岩年代(Rb–Sr whole rock ages of the Sanbagawa metamorphic rocks in central Shikoku). 山口 勝編, 日本列島構成の同位体地球科学(*Isotope Geoscience of the Japanese Islands*), 科学研究費補助金総合研究(A) (課題番号 334054), 68–71.
- Miyagi, Y. and Takasu, A., 2005, Prograde eclogites from the Tonaru epidote amphibolite mass in the Sambagawa Metamorphic Belt, central Shikoku, southwest Japan. *Island. Arc*, **14**, 215–235.
- Miyamoto, A., Enami, M., Tsuboi, M. and Yokoyama, K., 2007, Peak conditions of kyanite-bearing quartz eclogites in the Sanbagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **102**, 352–367.
- 都城秋穂(Miyashiro, A.), 1965, 変成岩と変成帯(*Metamorphic Rocks and Metamorphic Belts*). 岩波書店(Iwanami Shoten), 458p.
- Mizukami, T. and Wallis, S. R., 2005, Structural and petrologi-

- cal constraints on the tectonic evolution of the garnet-lherzolite facies Higashi-akaishi peridotite body, Sanbagawa belt, SW Japan. *Tectonics*, **24**, TC6012, doi: 10.1029/2004TC001733.
- Mizukami, T., Yokoyama, H., Hiramatsu, Y., Arai, S., Kawahara, H., Nagaya, T. and Wallis, S.R., 2014, Two types of antigorite serpentinite controlling heterogeneous slow-slip behaviors of slab-mantle interface. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **401**, 148–158.
- Mori, H. and Wallis, S. R., 2010, Large-scale folding in the Asemi-gawa region of the Sanbagawa Belt, southwest Japan. *Island. Arc*, **19**, 357–370.
- Mouri, T. and Enami, M., 2008, Areal extent of eclogite facies metamorphism in the Sanbagawa belt, Japan: New evidence from a Raman microprobe study of quartz residual pressure. *Geology*, **36**, 503–506.
- Nakajima, T., Kamiyama, H., Williams, I. S. and Tani, K., 2004a, Mafic rocks from the Ryoke Belt, southwest Japan: implications for Cretaceous Ryoke/San-yo granitic magma genesis. *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.: Earth Sci.*, **95**, 249–263.
- Nakajima, T., Shirahase, T. and Shibata, K., 1990, Along-arc lateral variation of Rb–Sr and K–Ar ages of Cretaceous granitic rocks in Southwest Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **104**, 381–389.
- 中島 隆・高木秀雄・石井和彦・竹下 徹(Nakajima, T., Takagi, H., Ishii, K. and Takeshita, T.), 2004b, 変成・変形作用 (*Metamorphism and Deformation*). 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 194p.
- 猶原亮介(Naohara, R.), 1995, 四国中央部三波川帯瀬場谷地域に新しく見いだされたエクロジヤイト(Newly found eclogite from the Sambagawa metamorphic belt in the Sebadani area, central Shikoku, Japan). 島根大学地質学研究報告(*Geol. Rep. Shimane Univ.*), **14**, 117–125.
- 猶原亮介・青矢睦月(Naohara, R. and Aoya, M.), 1997, 四国中央部三波川帯瀬場谷地域の塩基性片岩に産する累進的エクロジヤイト(Prograde eclogites from Sambagawa basic schists in the Sebadani area, central Shikoku, Japan). 島根大学総合理工学部紀要, シリーズA(*Mem. Fac. Sci. Shimane Univ., Series A*), **30**, 63–73.
- Obara, K., 2009, Inhomogeneous distribution of deep slow earthquake activity along the strike of the subducting Philippine Sea Plate. *Gondwana Res.*, **16**, 512–526.
- Okamoto, A. and Toriumi, M., 2005, Progress of actinolite-forming reactions in mafic schists during retrograde metamorphism: an example from the Sambagawa metamorphic belt in central Shikoku. *Jour. Metamorph. Geol.*, **23**, 335–356.
- Okamoto, K., Shinjoe, H., Katayama, I., Terada, K., Sano, Y. and Johnson, S., 2004, SHRIMP U–Pb zircon dating of quartz-bearing eclogite from the Sanbagawa Belt, southwest Japan: implications for metamorphic evolution of subducted protolith. *Terra Nova*, **16**, 81–89.
- Okudaira, T. and Yoshitake, Y., 2004, Thermal consequence of the formation of a slab window beneath the Mid-Cretaceous southwest Japan arc: A 2-D numerical analysis. *Island. Arc*, **13**, 520–532.
- Ota, T., Terabayashi, M. and Katayama, I., 2004, Thermobaric structure and metamorphic evolution of the Iratsu eclogite body in the Sanbagawa belt, central Shikoku, Japan. *Lithos*, **73**, 95–126.
- 大藤 茂・下條将徳・青木一勝・中間隆晃・丸山茂徳・柳井修一(Otoh S., Shimojo, M., Aoki, K., Nakama, T., Maruyama, S. and Yanai, S.), 2010, 砂質片岩中のジルコンの年代分布に基づく三波川帯最区分の試み(Age distribution of detrital zircons in the psammitic schist of the Sanbagawa Belt, Southwest Japan). *地学雑*(*Jour. Tokyo Geogr. Soc.*), **119**, 333–346.
- Otsuki, K., 1992, Oblique subduction, collision of microcontinents and subduction of oceanic ridge: Their implications on the Cretaceous tectonics of Japan. *Island. Arc*, **1**, 51–63.
- 小澤大成・元山茂樹・井上宗弥・加藤泰浩・村田 守(Ozawa, H., Motoyama, S., Inoue, S., Kato, Y. and Murata, M.), 1999, 四国東部みかぶ緑色岩類の岩石学的特徴(Petrology of basic volcanics of the Mikabu greenstone complex in the eastern Shikoku). *地質学論集(Mem. Geol. Soc. Japan)*, **52**, 217–228.
- Peacock, S. M., 1996, Thermal and petrologic structure of subduction zones. In Bebout, G. E., Scholl, D. W., Kirby, H., Platt, J. P., eds., *Subduction Top to Bottom*. American Geophysical Union, 119–133.
- Peacock, S. M., Rushmer, T. and Thompson, A. B., 1994, Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **121**, 227–244.
- Sakaguchi, A., 1996, High paleogeothermal gradient with ridge subduction beneath the Cretaceous Shimanto accretionary prism, southwest Japan. *Geology*, **24**, 795–798.
- 産総研地質調査総合センター編(Geol. Surv. Japan, AIST ed.), 2015, 20万分の1日本シームレス地質図(*Seamless Digital Geological Map of Japan (1: 200,000)*)2015年5月29日版. 産総研地質調査総合センター.
- Schwartz, S. Y. and Rokosky, J. M., 2007, Slow slip events and seismic tremor at circum-Pacific subduction zones. *Rev. Geophys.*, **45**, RG3004.
- Spandler, C., Hermann, J., Arculus, R. and Mavrogenes, J., 2003, Redistribution of trace elements during prograde metamorphism from lawsonite blueschist to eclogite facies; implications for deep subduction-zone processes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **146**, 205–222.
- Spear, F. S., 1993, *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Path*. Mineral. Soc. Amer., Washington, D. C., 799p.
- Taira, A., Ohara, Y., Wallis, S. R., Ishiwatari, A. and Iryu, Y., 2016, Geological evolution of Japan: an overview. In Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T., Gibbons, W., eds., *The Geology of Japan*. Geol. Soc., London, 1–24.
- Taguchi, T. and Enami, M., 2014a, Compositional zoning and inclusions of garnet in Sanbagawa metapelites from the Asemi-gawa route, central Shikoku, Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **109**, 1–12.
- Taguchi, T. and Enami, M., 2014b, Coexistence of jadeite and quartz in garnet of the Sanbagawa metapelite from the Asemi-gawa region, central Shikoku, Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **109**, 169–176.
- Takahashi, Y., Kagashima, S. and Mikoshiba, M. U., 2005, Geochemistry of adakitic quartz diorite in the Yamizo Mountains, central Japan: Implications for Early Cretaceous adakitic magmatism in the inner zone of southwest Japan. *Island. Arc*, **14**, 150–164.
- Takasu, A., 1984, Prograde and retrograde eclogites in the Sambagawa metamorphic belt, Besshi district, Japan. *Jour. Petrol.*, **25**, 619–643.
- Takasu, A., 1989, P-T histories of peridotite and amphibolite tectonic blocks in the Sambagawa metamorphic belt, Japan. In Daly, J. S., Cliff, R. A. and Yardley, B. W. D., eds., *Evolution of Metamorphic Belts*, Geol. Soc. Spec. Publ., **43**, 533–538.
- 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.
- 高須 晃・加治敦次(Takasu, A. and Kaji, A.), 1985, 三波川変成帯中のエクロジヤイト相の存在(四国, 高越・別子地域より新たに見いだされたエクロジヤイト) (Existence of eclogite facies in the Sambagawa regional metamorphism: newly found eclogites in the Kotsu and Besshi districts). 日本地質学会第92年学術大会講演要旨(92nd Ann. Meet. Geol. Soc. Japan

- Abstr.), 374–374.
- Tasaka, M., Michibayashi, K. and Mainprice, D., 2008, B-type olivine fabrics developed in the fore-arc side of the mantle wedge along a subducting slab. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **272**, 747–757.
- Terabayashi, M., Okamoto, K., Yamamoto, H., Kaneko, Y., Ota, T., Maruyama, S., Katayama, I., Komiya, T., Ishikawa, A., Anma, R., Ozawa, H., Windley, B. F. and Liou, J. G., 2005, Accretionary complex origin of the mafic-ultramafic bodies of the Sanbagawa belt, central Shikoku, Japan. *Int. Geol. Rev.*, **47**, 1058–1073.
- Tsuchiya, S. and Hirajima, T., 2013, Evidence of the lawsonite eclogite facies metamorphism from an epidote-glaucophane eclogite in the Kotsu area of the Sambagawa belt Japan. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **108**, 166–171.
- Uehara, S. and Aoya, M., 2005, Thermal model for approach of a spreading ridge to subduction zones and its implications for high P/ high T metamorphism: Importance of subduction vs ridge-approach ratio. *Tectonics*, **24**, TC4007. doi: 10.1029/2004TC001715.
- Ulmer, P. and Trommsdorf, V., 1999, Phase relations of hydrous mantle subducting to 300 km. In Fei Y., Bertka C.M. and Mysen B.O., eds., *Mantle Petrology: Field Observations and High Pressure Experimentation*, Geochem. Soc. Spec. Publ., **6**, 259–281.
- Wakabayashi, J., 1990, Counterclockwise P-T-t paths from amphibolites, Franciscan complex, California: relics from the early stages of subduction zone metamorphism. *Jour. Geol.*, **98**, 657–680.
- Wakabayashi, J., 2012, Subducted sedimentary serpentinite mélanges: Record of multiple burial–exhumation cycles and subduction erosion. *Tectonophysics*, **568-569**, 230–247.
- 脇田浩二・宮崎一博・利光誠一・横山俊治・中川昌治(Wakita, K., Miyazaki, K., Toshimitsu, S., Yokoyama, S. and Nakagawa, M.), 2007, 伊野地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅) (*Geology of the Ino District. With Geological Sheet Map at 1: 50000*), 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST), 140p.
- Wallis, S. R., 1990, The timing of folding and stretching in the Sambagawa belt: the Asemigawa region, central Shikoku. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **96**, 345–352.
- Wallis, S., 1998, Exhuming the Sanbagawa metamorphic belt: the importance of tectonic discontinuities. *Jour. Metamorph. Geol.*, **16**, 83–95.
- Wallis, S. R., Anczkiewicz, R., Endo, S., Aoya, M., Platt, J. P. and Thirwall, M., 2009, Lu–Hf dating of eclogite, ridge subduction and preservation of the Sanbagawa Belt, SW Japan. *Jour. Metamorph. Geol.*, **27**, 93–105.
- Wallis, S. and Aoya, M., 2000, A re-evaluation of eclogite facies metamorphism in SW Japan: proposal for an eclogite nappe. *Jour. Metamorph. Geol.*, **18**, 653–664.
- Wallis, S. R., Banno, S. and Radvanec, M., 1992, Kinematics, structure and relationship to metamorphism of the east-west flow in the Sanbagawa belt, southwest Japan. *Island. Arc*, **1**, 176–185.
- Wallis, S. R. and Endo, S., 2010, Comment on “Metamorphic P-T-time history of the Sanbagawa belt in central Shikoku, Japan and implications for retrograde metamorphism during exhumation” by K. Aoki, K. Kitajima, H. Masago, M. Nishizawa, M. Terabayashi, S. Omori, T. Yokoyama, N. Takahata, Y. Sano, S. Maruyama. *Lithos*, **116**, 195–196.
- Wallis, S. R. and Okudaira, T., 2016, Paired metamorphic belts of SW Japan: the geology of the Sanbagawa and Ryoke metamorphic belts and the Median Tectonic Line. In Moreno, T., Wallis, S., Kojima, T., Gibbons, W. eds., *The Geology of Japan*, Geol. Soc., London, 101–124.
- Weller, O. M., Wallis, S. R., Aoya, M. and Nagaya, T., 2015, Phase equilibria modelling of blueschist and eclogite from the Sanbagawa metamorphic belt of southwest Japan reveals along-strike consistency in tectonothermal architecture. *Jour. Metamorph. Geol.*, **33**, 579–596.
- Yokoyama, K., 1976, Finding of plagioclase-bearing granulite from the Iratsu epidote amphibolite mass in central Shikoku. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **82**, 549–551.
- Yokoyama, K., 1980, Nikubuchi peridotite body in the Sanbagawa metamorphic belt: thermal history of the Al pyroxene-rich suite peridotite body in high pressure metamorphic terrain. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**, 1–13.
- Yokoyama, K. and Mori, T., 1975, Spinel-garnet-two pyroxenes rock from the Iratsu epidote amphibolite mass in central Shikoku. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **81**, 29–37.
- Zaw Win Ko, Enami, M. and Aoya, M., 2005, Chloritoid and barroisite-bearing pelitic schists from the eclogite unit in the Besshi district, Sanbagawa metamorphic belt. *Lithos*, **81**, 79–100.

*English translation from the original written in Japanese

(著者プロフィール)

青矢睦月 徳島大学大学院社会産業理工学研究部准教授。95年 京都大学理学部卒, 00年 学術振興会特別研究員, 01年 京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了(理学博士), 04年 産業技術総合研究所研究員, 12年から現職。研究内容: 変成岩の形成と上昇に関わるテクトニクス。E-mail: aoya@tokushima-u.ac.jp.



遠藤俊祐 島根大学大学院総合理工学研究科特任講師。06年 名古屋大学理学部卒, 10年 名古屋大学大学院環境学研究科博士後期課程短縮修了(理学博士), 14年 産業技術総合研究所研究員, 16年から現職。研究内容: 沈み込み帯中～深部の変成作用とテクトニクス。E-mail: s-endo@riko.shimane-u.ac.jp.s

(要 旨)

青矢睦月・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. (Aoya, M. and Endo, S., 2017, Recognition of the 'early' Sambagawa metamorphism and a schematic cross-section of the Late-Cretaceous Sambagawa subduction zone. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **123**, 677-698.)

近年の四国三波川帯に関する研究から, テクトニックブロックと認識されて来た粗粒の含エクロジイト岩体群に前期白亜紀(約 116 Ma)の初期三波川変成作用が記録されていることが判明した. 一方, 後期白亜紀(約 89~85 Ma)の主たる三波川変成作用については, 海嶺の海溝への接近というテクトニックな状況, 蛇紋岩化したマントルウェッジの存在, またスラブとマントル対流の結合深度(約 65 km)や上盤側大陸地殻の厚さ(30~35 km)が認識され, 当時の沈み込み帯模式断面図がかなり具体的に描けるようになった. 同時に, 散在するブロック状超苦鉄質岩類が上盤側マントルウェッジ起源であることも判明し, 三波川帯は「深部沈み込み境界の化石」として再認識された. 深部低周波微動やスロースリップなど, 現世沈み込み帯で観測される注目すべき地質現象の解釈に当たり, 物質科学的な情報を提供し得るフィールドとして新たな期待がかかる.