

日本列島に記録された古生代高圧変成作用

— 新知見とこれから解決すべき問題点 —

辻 森 樹*

Paleozoic Subduction-related Metamorphism in Japan: New Insights and Perspectives

Tatsuki TSUJIMORI*

Abstract

The Japanese islands were formed during a long-sustained active Pacific-type orogen resulting from subduction, oceanward-accretion, and landward-erosion, which began in the early-Paleozoic. The earlier stage of the accretion of oceanic and continental materials took place between 500–300 Ma, reflecting the convergence of two or more paleo-Pacific plates and the stable, non-subducted Middle and Late Proterozoic continental lithosphere. In Japanese Paleozoic geotectonic units, two different high-pressure metamorphic rocks with the Pacific-type protoliths are associated with serpentinite bodies of Early Paleozoic Oeyama ophiolite: blueschist-facies pelitic and mafic schists with phengite K-Ar ages of 350–280 Ma (Renge) and high-pressure epidote-amphibolite-facies amphibolite and pelitic schist with 480–400 Ma hornblende and phengite K-Ar age (Kitomyo-Fuko Pass). The Early Paleozoic Kitomyo-Fuko Pass high-pressure metamorphic rocks provide a petrotectonic constraint on the earliest subduction event in the Japanese orogen. The presence of Middle to Late Paleozoic Renge lawsonite-blueschist and glaucophane-eclogite provides evidence of a cold geotherm in the paleo-subduction zone. Metamorphic and geochronologic data provide important constraints on tectonic development during the earliest stages of orogenic growth associated with the subduction of the paleo-Pacific oceanic plates. The lack of Paleozoic batholith belt and fore-arc sediments coeval with either Renge or Kitomyo-Fuko Pass metamorphism and the presence of blueschist-facies metamorphosed fore-arc ophiolitic materials (fragments of the Oeyama ophiolite) in the Renge metamorphic rocks suggest that a significant landward subduction erosion has occurred since early-Paleozoic time; the eroded material must have been recycled back into the mantle during subduction of the paleo-Pacific plate. Thus, the early history of subduction-related orogenesis—after the dramatic tectonic conversion from a passive to active convergent margin—in the Japanese islands is comparable to the modern island arc system occurring worldwide. To further our understanding of the continuous paleo-subduction record in the Japanese Paleozoic geotectonic units, a more detailed and comprehensive approach to geology, petrology, and geochronology of high-pressure metamorphic rocks and associated rocks is required than that documented in previous studies.

Key words : Japanese Orogen, Paleozoic high-pressure metamorphic rocks, Renge metamorphic rocks, Kitomyo-Fuko Pass metamorphic rocks

キーワード : 日本列島造山帯, 古生代高圧変成作用, 蓮華変成岩, 木頭名-普甲峠変成岩

* 岡山大学地球物質科学研究センター・PML

* PML, Institute for Study of the Earth's Interior, Okayama University

I. はじめに

地球史を通して、プレート収束域は大陸・島弧地殻の成長と改変を促進させ、同時に地殻物質を地球深部（マントル）へ供給する物質循環拠点の役割を果たしてきた。とくに原生代後期以降の造山帯に出現する藍閃石やコース石を含むような高圧～超高压変成岩は、固体地球内部の十分な冷却に伴って、プレート収束域の平均地温勾配が十分に低下したことを示す地質学的な証拠である。地球の冷却はプレート収束域において、沈み込むスラブの脱水反応の最深位置をより深い方向にシフトさせながら、固体地球内部の水の循環範囲を大きく広げ、水の関与するさまざまな固体地球プロセスの空間分布を大きく支配してきた。したがって、造山帯表層に露出した過去の変成スラブ物質としての低温高压型変成岩を解析することは、プレート収束域の物理現象を理解するための1つの手段であり、固体地球内部の冷却史と水惑星「地球」の未来予想という視点において地球惑星科学の挑戦である。

海洋地殻の沈み込みにかかわる収束域の地質現象の時空間変遷を $10^4 \sim 10^8$ 年オーダーの時間スケールで連続的に解析したい。日本列島を構成する付加型造山帯は約 6～7 億年前から現在までその発達を続けており（例えば、磯崎・丸山, 1991; Isozaki, 1996; Maruyama, 1997）、日本列島造山帯の構造発達史の理解は、永続性の変化、つまり、地球内部の巨視的な物質・熱循環に支配された地球進化過程の約数億年間のシームレスな理解の糸口である。

これまでに、日本列島造山帯において断片化した個々の地質の研究が独立して行われ、さまざまな時間スケールでの地史の復元が試みられてきた。とりわけ、高压低温変成岩と前弧域オフィオライトに関する地質学・岩石学・年代学的研究は過去の沈み込み帯構成岩の形成場と時空間変遷を半定量的に推定することに貢献し、1990年代後半までには、東アジア大陸縁における日本列島形成史全体の概観の理解を促進させた。しかし、古日本列島造山帯が受動的大陸縁から活動的大陸縁

に転化した約 5～3 億年前の時期の地質学的な情報については不明な点が多く残されている（例えば、磯崎, 1998）。日本列島に残されたこの時期の地質体からの情報抽出は、東アジア大陸縁という視点で海洋プレートの沈み込みに支配された日本列島造山帯の構造発達史の初期過程を復元するだけでなく、受動的大陸縁から活動的大陸縁へ転化し、その活動的大陸縁において造山帯が発達するという原生代後期以降の造山帯発達様式パターンの理解に直結する。

本論は、日本列島を構成する付加型造山帯の中で、とくに、受動的大陸縁から活動的大陸縁に転化した約 5～3 億年前の古生代高压変成作用についての情報を総括し、今後、解決すべき問題と、地質学の研究素材としての日本の古生代高压変成岩について述べる。

II. 日本列島の地質に記録された古生代高压変成帯

1) 地質学的特徴

日本列島の造山帯において、古生代の地質要素は概して地層の連続性に乏しく、若い時代の構造運動や火成活動によって著しく配置が乱れている。とりわけ、約 5～3 億年前の古生代高压変成岩が接触熱変成作用を免れて露出する地域は最大でも数 km 程度であり、中生代以降の高压変成岩（周防変成岩、三波川変成岩、四万十変成岩）の露出面積とは大きく異なる。ところが、古生代高压変成岩の露出地点は北海道と琉球列島を除いた本州（中国山地、飛騨山地、上越山地、北上山地など）、四国、九州（北部・中部）の広範囲に広がる（図 1）。この時代の高压変成帯がかつては日本列島の広範囲に露出していたことを示唆する。

西南日本の中国山地では、古生代高压変成岩とその構造的上位・下位の地質体との地質境界が部分的に確認されている。古生代高压変成岩の地層は低角度ナップとして、秋吉帯のペルム紀付加体やそれより若い時代の地質体に衝上し、さらに大江山帯のオルドビス紀超苦鉄質岩体に衝上される（例えば、上村ほか, 1979; 梶島ほか, 1993）。

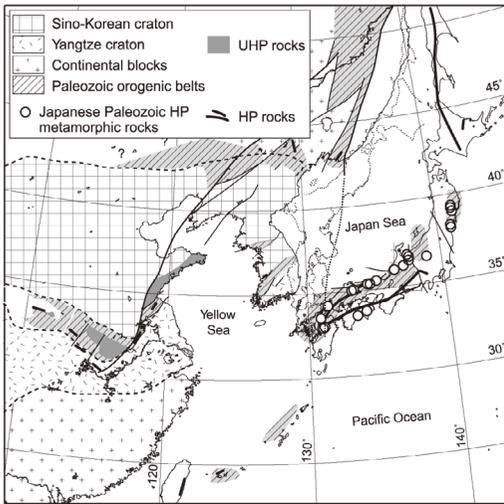


図1 東アジアの地帯構造概略図。図は Tsujimori and Liou, 2005 および, Ernst *et al.*, 2007 をもとに編集した。

Fig. 1 Generalized tectonic map of eastern Asia. The map is modified after Tsujimori and Liou (2005) and Ernst *et al.* (2007).

大江山帯の超苦鉄質岩（まれに苦鉄質岩）と古生代高压変成岩の産出はきわめて密接である。中国山地や飛騨山地では、大江山帯の一部が蛇紋岩メランジュ化し、ブロックとして古生代高压変成岩を含む（例えば、辻森, 1998; 梶座ほか, 2004）。九州中部から四国に点在する古生代高压変成岩も基本的に蛇紋岩に伴われる（例えば、丸山・植田, 1975; Maruyama, 1981; 磯崎・板谷, 1991）。蛇紋岩メランジュ中のマトリックスを構成する蛇紋岩中に高压変成作用を被った痕跡があり（例えば、辻森, 1998; Tsujimori and Liou, 2004a）、大江山帯の超苦鉄質岩の一部が高压変成作用を被った公算が高い（例えば、Yokoyama, 1985, 1987; 辻森, 1998, 2004; Nozaka, 2005; Khedr and Arai, 2010）。

2) 岩相と年代グループ

日本列島の古生代高压変成岩は、約 3.5 ~ 2.8 億年前の結晶片岩主体のグループと、4.8 ~ 4.0 億年前の角閃岩（苦鉄質片麻岩・片状角閃岩）のグループに大別される（表 1）。

結晶片岩は古生代高压変成岩に最も卓越する岩相であり、主として、砂泥互層、グレイワック、海嶺玄武岩、チャート・珪質泥岩という一般的な付加体構成岩類を原岩にもつ。結晶片岩が被った変成作用は、緑色片岩相、緑れん石角閃岩相、青色片岩相、まれにエクロジイト相とさまざまであるが、概して、約 3.5 ~ 2.8 億年前の白雲母・フェンジャイト K-Ar および $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を示す（例えば、河野・植田, 1965; Shibata and Nozawa, 1968; 柴田, 1981; 植田ほか, 1980; 梶座ほか, 1995; Nishimura, 1998; Tsujimori and Itaya, 1999; 梶座ほか, 2004; 内野ほか, 2008）。飛騨山地では、蛇紋岩メランジュ中に産する曹長岩や含フロゴパイト透閃石岩のフェンジャイトやフロゴパイトも約 3.5 ~ 3.3 億年前の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代を示す（辻森, 未公表データ）。黒瀬川帯や北上山地では、約 3.9 ~ 3.5 億年前と古い放射性同位体年代が結晶片岩から知られているが（例えば、植田ほか, 1980; Kawamura *et al.*, 2007）、それらが他の約 3.5 ~ 2.8 億年前の K-Ar 系冷却年代を示す変成岩とまったく違うグループかどうかを結論づけるには、他の希ガス元素の同位体比による過剰アルゴン有無の評価か、他の放射性同位体年代測定による束縛が必要である。実際に飛騨山地の蓮華変成岩も約 3.7 億年に達する古さの K-Ar および $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ フェンジャイト年代をもつことがある。本論ではこれらの年代グループ（約 3.5 ~ 3.3 億年前）の結晶片岩を柴田・西村（1989）に基づき「蓮華変成岩」と呼ぶ。

ジルコンの U-Pb 年代に関しては、九州北部の木山地域の蓮華変成岩中の碎屑性ジルコンの年代として、約 5.9 ~ 3.8 億年前が報告されている（Tsutsumi *et al.*, 2003）。しかし、最も若い 3.8 億年前の年代値が高压変成作用に対応するかどうかについての判断材料は得られていない。飛騨山地の糸魚川-青海地域のエクロジイト相を記録する泥質片岩は、約 18 億年前の碎屑性ジルコンの周囲にオーバーグロースした約 3.7 億年前の変成ジルコン（フェンジャイトと石英を包有する）のリムをもつ（三朝国際インタープログラム 2008 要旨 <http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/intern/>

表 1 日本の古生代高圧変成岩の年代グループ。

Table 1 Subdivisions of Japanese Paleozoic HP metamorphic rocks.

Subdivision (Age)	Representative localities References
Renge (ca. 350–280 Ma)	Hida Mountains (Hida-Gaien belt): Itoigawa-Omi, Hakuba-Hoppou, Gamata, Naradani, and Ise areas Banno (1958), Miyashiro and Banno (1958), Seki (1959), Shibata and Nozawa (1968), Shibata and Ito (1978), Matsumoto (1980), Nakamizu <i>et al.</i> (1989), Sugimura <i>et al.</i> (1996), Tsujimori <i>et al.</i> (2000a), Tsujimori <i>et al.</i> (2001), Tsujimori (2002), Miyashita (2003), Kunugiza <i>et al.</i> (2004), Tsujimori <i>et al.</i> (2006a), Tsujimori and Matsumoto (2006) Chugoku Mountains: Oya, Wakasa (Shitani Formation), Osayama (Osayama serpentinite mélange), and Toyogatake areas Hashimoto and Igi (1970), Uemura <i>et al.</i> (1979), Nishimura <i>et al.</i> (1983), Watanabe <i>et al.</i> (1987), Shibata and Nishimura (1989), Yamaguchi (1990), Tsujimori (1998), Tsujimori and Itaya (1999), Tsujimori and Liou (2005, 2007) Kyushu: Wakamiya-Sasaguri, and Kiyama areas Shibata and Nishimura (1989), Kabashima <i>et al.</i> (1995) Shikoku (Kurosegawa belt): Ino and Engyoji areas Nakajima and Maruyama (1978), Maruyama <i>et al.</i> (1980), Ueda <i>et al.</i> (1980) Jouetsu Mountains: Tanigawa-dake area Hayama <i>et al.</i> (1969), Yokoyama (1992), Shimizu <i>et al.</i> (2000) Kitakami Mountains: Motai, Yagagami, Matsugadaira, and Nedamo areas Kouno and Ueda (1965), Shibata <i>et al.</i> (1972), Maekawa (1981, 1988), Uchino and Kawamura (2006), Kawamura <i>et al.</i> (2007), Uchino <i>et al.</i> (2008)
Kitomyo-Fuko Pass (ca. 480–400 Ma)	Hida Mountains (Hida-Gaien belt): Ise area Shibata <i>et al.</i> (1980) Chugoku Mountains: Fuko Pass, and Wakasa (Shitani Formation) areas Kurokawa (1975), Kuroda <i>et al.</i> (1976), Nishimura and Shibata (1989), Tsujimori <i>et al.</i> (2000b), Tsujimori and Ishiwatari (2002), Tsujimori and Liou (2004b) Kyushu: Wakamiya-Sasaguri area Nishimura and Shibata (1989) Shikoku (Kurosegawa belt): Kitomyo area Maruyama and Ueda (1975)

intern08/intern2008_abstracts.pdf [Cited 2010/02/08])。

一方、角閃岩（苦鉄質片麻岩・片状角閃岩）は蛇紋岩中のブロックまたは、約 3.5～2.8 億年前結晶片岩中のブロックとして産し、岩相の特徴と産状から、従来から結晶片岩とは区分して取り扱われてきた（例えば、中水ほか、1989；柵座ほか、2004）。また、角閃石 K-Ar 年代は 4.8～4.0 億年前を示し、約 3.5～2.8 億年前結晶片岩と比べ

て有意に古い（例えば、西村・柴田、1989；辻森ほか、2000b）。角閃岩の変成鉱物は、一般に、自由度の高い鉱物組合せのため変成条件の推定が困難であったが、Tsujimori and Liou (2004b) は大江山帯の大江山岩体（普甲峠）に産するトロクトライト質沈積岩起源の含藍晶石角閃岩（Kurokawa, 1975; Kuroda *et al.*, 1976）から、高圧変成作用で安定であった鉱物組合せを同定し、それが沈み込み帯で高圧変成作用を被ったと考え

た。藍晶石やパラゴナイトを含まないような岩相においてもルチルが普遍的に含まれる。四国の黒瀬川帯には4.5～4億年前のフェンジャイト K-Ar を示す片状角閃岩と泥質片岩の産地（木頭名）が知られており、これは西南日本内帯の4.8～4.0億年の角閃岩と類似する。本論ではこれらの年代グループ（約5～4億年前）の古生代高压変成岩を「木頭名-普甲峠変成岩」と呼ぶことにする。

上記の蓮華変成岩と木頭名-普甲峠変成岩の分布地域に産する高压変成岩のなかで、有意に若い年代値をもつものが知られている。Tsuji-mori *et al.* (2006a) は飛騨山地の伊勢地域の含パラゴナイトざくろ石角閃岩のパラゴナイトの K-Ar 年代として、約2.1億年前を報告した。パラゴナイトの K-Ar 系の閉止温度はフェンジャイト同等と考えられている。また、パラゴナイトは緑色片岩相程度の焼き鈍しでは簡単に曹長石を含む鉱物組合せに分解するので、得られた年代は高压変成作用後の上昇冷却年代と解釈された。

3) 岩石学的特徴

日本列島の古生代高压変成岩のうち蓮華変成岩には、さまざまな変成度の変成岩が知られている。とりわけ、この年代グループの岩石学的な特徴としては、変成玄武岩質岩において、藍閃石質のアルカリ角閃石を含む岩相が一般的なこと、低変成度部分に、藍閃石とローソン石（あるいはパンペリ石）を含む鉱物組合せが認められること、高変成度部分に、エクロジャイト相の鉱物組合せが認められること、ざくろ石角閃岩が出現すること、などがあげられる。一方、変成泥質片岩においては、低変成度部分にローソン石やパンペリ石を含む鉱物組合せがでること、カリ長石が出現する場合があること、高変成度部分に、パラゴナイトがマトリクスにおいて安定に存在すること、黒雲母を含む場合には灰曹長石が安定に存在することなどが、あげられる。

概して、青色片岩相から藍閃石が安定に存在するエクロジャイト相に至り、青色片岩相の重複を受けるといふタイプの変成岩（図2の Type I）と、緑れん石角閃岩相あるいは角閃岩相の変成作用を

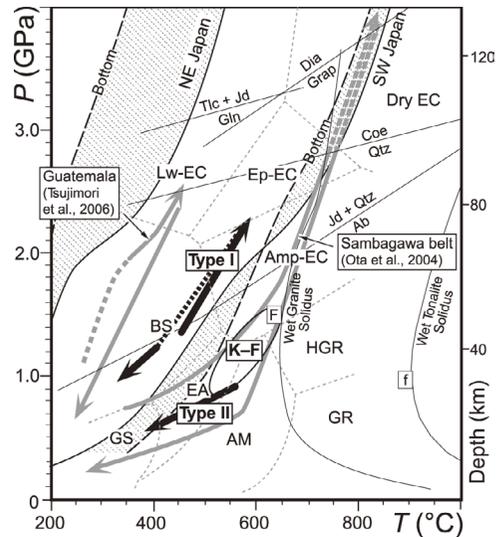


図2 日本列島の古生代高压変成岩が記録する変成条件。蓮華変成岩の変成履歴（Type I—青色片岩相～エクロジャイト相，Type II—緑れん石角閃岩～角閃岩相）。木頭名-普甲峠変成岩の変成条件（K-F）。Fとfはそれぞれ、普甲峠変成沈積岩の高压変成作用と残存グラニュライト相の変成条件。上述の詳細は本文を参照。比較のため三波川変成帯のエクロジャイト（Ota *et al.*, 2004）とグアテマラモタグア断層帯のエクロジャイト（Tsuji-mori *et al.*, 2006b）の変成履歴を示した。網掛け領域は Peacock and Wang (1999) が計算した現在の東北日本と西南日本に沈み込む海洋地殻上面・底面の温度圧力条件を示す。変成相区分とその略号は Maruyama *et al.* (1996) と Okamoto and Maruyama (1998) に基づく。

Fig. 2 Inferred *P-T* conditions (black arrows) of the Paleozoic HP metamorphic rocks. Type I—blue-schist to eclogite-facies metamorphic rocks of the Renge metamorphic rocks, Type II—epidote-amphibolite- to amphibolite-facies metamorphic rocks of the Renge metamorphic rocks, K-F—epidote-amphibolite-facies rocks of the Kitomyo-Fuko Pass metamorphic rocks, F—peak metamorphic condition of the Fuko Pass metacumulate, f—granulite-facies relic in the Fuko Pass metacumulate. For comparisons, the inferred *P-T* paths of the highest grade rocks of the Sambagawa metamorphic belt (Ota *et al.*, 2004) and Guatemalan lawsonite eclogite (Tsuji-mori *et al.*, 2006b) are also shown (gray arrows) for comparison. Hatched areas represent the calculated *P-T* conditions for the oceanic crust beneath present-day NE Japan ('cold') and SW Japan ('warm') subduction zones (Peacock and Wang, 1999); the solid and dashed lines show the top and bottom of the oceanic crust. The metamorphic facies and their abbreviations are after Maruyama *et al.* (1996) and Okamoto and Maruyama (1998).

被った後、緑色片岩相の重複を受けるというタイプ(図2の Type II)の2種類が混在するが、両タイプの関係は明らかになっていない。放射性同位体年代の有意な差も現時点で確認されていない。少なくとも、最も高圧の情報を記録したエクロジヤイト相変成岩の角閃岩相の重複や、角閃岩相変成岩の青色片岩相の重複という岩石学的証拠は見いだされていない。角閃岩相変成岩に二次的なアルカリ角閃石が形成する場合がまれに認められるが、その組成は、Mgリーベック閃石やリヒテル閃石であり、蛇紋岩中のNaに富んだ交代作用の産物と考えられる。低変成度の青色片岩(ざくろ石を欠く)においては、バンベリ石から緑れん石への相転移は認められるが、ローソン石から緑れん石への変化は確認されていない。

蓮華変成岩に産する変成角閃石、ざくろ石、変成単斜輝石の化学組成傾向の例を図3、図4、図5に示す。一般に、変成鉱物の固溶体組成傾向は、変成条件(温度、圧力、流体)だけでなく全岩組成を大きく反映するため、鉱物組合わせを無視して、それらの組成傾向から定量的に変成作用の性格を議論することは困難である。しかし、自由度が大きくても経験的には鉱物帯(変成度)ごとに変成鉱物の固溶体組成傾向の系統的な違いが多くの変成帯で知られている。蓮華変成岩では、高圧変成作用で形成した角閃石の組成は、青色片岩やエクロジヤイト相変成岩と緑れん閃石角閃岩や角閃岩質の岩相で顕著に異なる(図3)。さらに、前者の岩相グループに含まれる藍閃石質角閃岩は低変成度において鉱物組み合わせごとに組成傾向は異なるが、高変成度においては変成チャートなど特殊な岩相を除いてその組成は収束傾向にある。ひすい輝石成分を含んだ変成単斜輝石については、低変成度青色片岩においてとくに、エジン成分(0~80 mol%)やひすい輝石成分(0~30 mol%)に関して固溶体組成の幅が大きいものの、エクロジヤイト相変成岩ではひすい輝石成分40~50 mol%のオンファス輝石に収束する(図4)。高変成度岩に特徴的に含まれるざくろ石は、岩相にかかわらず一般的にMn含有量が減少しMg/(Mg + Fe)原子比が増加する正累帯を

呈するが、高変成度の青色片岩とエクロジヤイト相変成岩のざくろ石は、緑れん閃石角閃岩や角閃岩質の岩相のそれに比べてグロシュラー成分に富む傾向がある(図5)。

蓮華変成岩のように地層の連続に乏しい場合、個々の変成岩が記録する変成履歴の解析とともに、変成度ごとに主要鉱物の固溶体組成の組成傾向を把握することは、断片化する前の変成帯の岩石学的特徴を概観する1つの手段である。

木頭名-普甲峠変成岩については、角閃岩や角閃石片岩を主体とし、一般に緑れん石角閃岩相の鉱物組合わせで特徴づけられる。木頭名ではざくろ石と黒雲母を含んだ泥質片岩を伴う(丸山・植田, 1975)。普甲峠の角閃石岩・緑れん石角閃岩はルチルを含みざくろ石を欠く。とくに、トロクトライト質~斜長岩質沈積岩を原岩とした変成岩には、変成ピーク時期の鉱物組合わせとして“藍晶石+クリノゾイサイト+パラゴナイト+曹長石”を含み(まれに十字石とコランダムを含む)、藍晶石は部分的にマーガライトと斜長石に置換される(Tsujimori and Liou, 2004b)。さらに、普甲峠の変成沈積岩には高圧の緑れん石角閃岩相に先立つグラニュライト相(図2)の残晶(Alに富む単斜輝石とコランダム-磁鉄鉱シンプレクタイトからなるFeに富んだスピネルの仮像)が保持されており、Tsujimori and Ishiwatari (2002)は夜久野オフィオライトのような分厚い海洋地殻の断片の沈み込みを考えた。今後、日本列島の古生代オフィオライトに付随する角閃岩質岩の岩石学的特徴を丁寧に調べることにより、パラゴナイトや藍晶石など高圧変成作用を示唆する鉱物がみつかるとの可能性がある。

4) 地表での削剝

日本列島の古生代高圧変成岩の地表での削剝に関する地質学的な証拠が、堆積岩中の碎屑物としていくつか認められる。

上越山地では、中新世以降に貫入した花こう閃緑岩類が標高2000 mを超す谷川連峰に露出し、現在も隆起を続ける日本列島の中では最も新生代以降の隆起が顕著な地域である(例えば、フォッサマグナ研究会, 1991; 川野ほか, 1992)。同地域

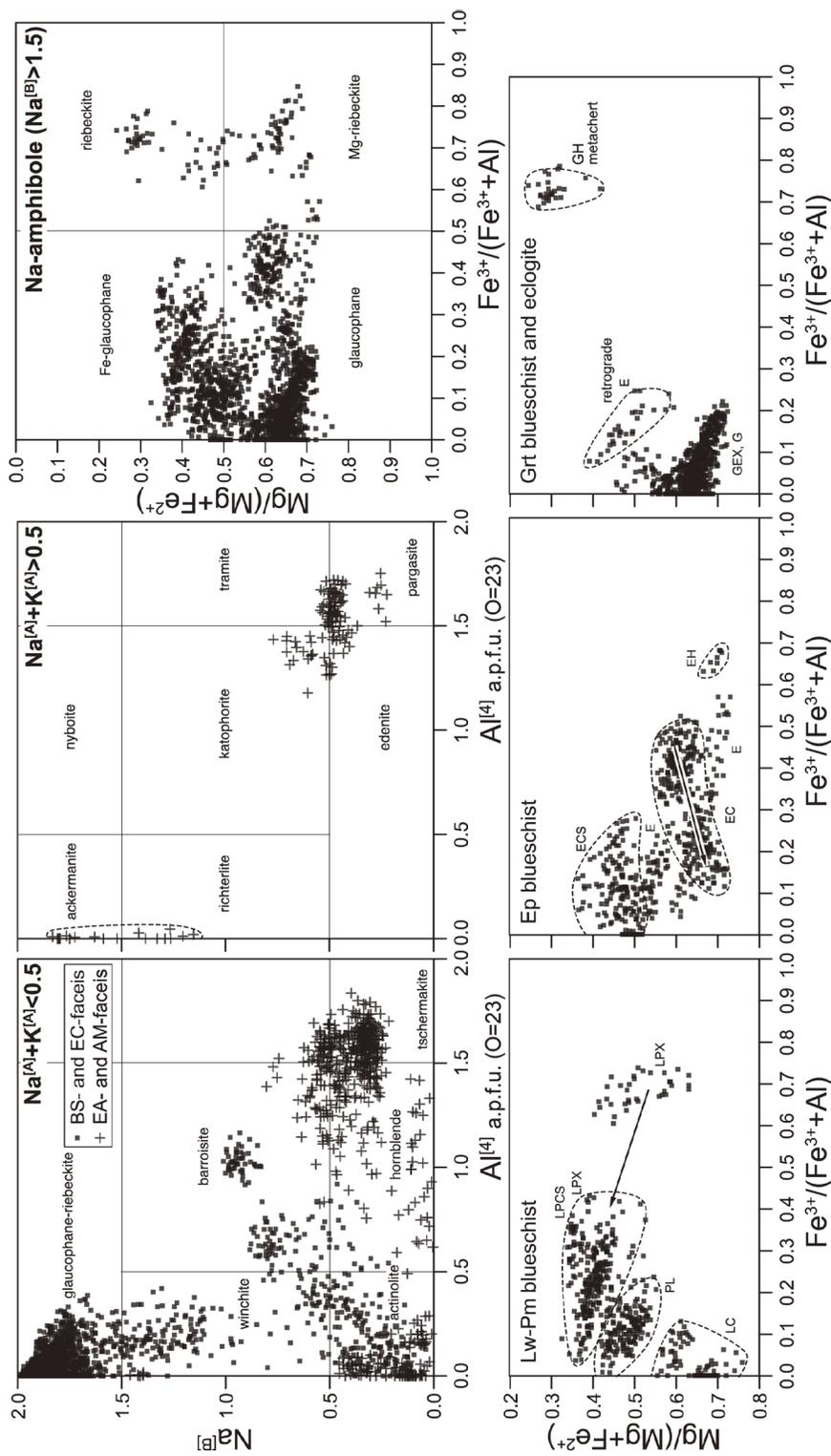


図3 飛騨山地 (糸魚川-青海, 伊勢地域) と中国山地 (大屋, 若桜, 大佐山地域) の蓮華変成岩の角閃石の化学組成傾向。変成相の略号: BS—青色片岩, EC—エクロジヤイト相, EA—緑れん石角閃岩相, AM—角閃岩相。鉱物の略号: C—緑泥石, S—スティルプノメレン, L—ローソン石, P—パンペリ石, E—緑れん石, G—ざくろ石, X—単斜輝石, H—赤鉄鉱。

Fig. 3 Compositional trend of amphiboles from Renge metamorphic rocks. Arrows show chemical zoning from core to rim. Abbreviations of metamorphic facies: BS—blueschist, EC—eclogite, EA—epidote-amphibolite, AM—amphibolite. Abbreviations of minerals: C—chlorite, S—stilpnomelane, L—lawsonite, P—pumpellyite, E—epidote, G—garnet, X—clinopyroxene, H—hematite.

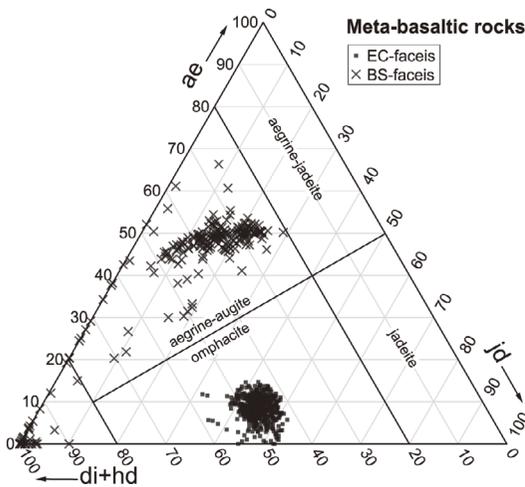


図4 飛騨山地(糸魚川-海地域)と中国山地(大屋, 大佐山地域)の蓮華変成岩の単斜輝石の化学組成傾向。固溶体組成の略号: jd—ひすい輝石, ae—エジリン, di—透輝石, hd—ヘデン輝石

Fig. 4 Compositional trend of clinopyroxene from Renge metamorphic rocks. Abbreviations of end-members: jd—jadeite, ae—aegirine, di—diopside, hd—hedenbergite.

では花こう閃緑岩類が中生代・第三系に接触変成作用を与えただけでなく、地層を上方に押し上げ、中生代のほとんどがすでに剝離され、その一部がループベンド状にわずかに分布するだけである(例えば, Hayama *et al.*, 1969; Yokoyama, 1992)。しかし、中新統の礫岩層は高圧型結晶片岩礫を多産し、それらの岩石学的特徴は蓮華帯の青色片岩と類似する(清水ほか, 2000)。

飛騨山地では白亜紀後期の手取層群石徹白亜層群に結晶片岩礫が知られている(例えば, 相馬・櫛座, 1993)。中国山地東部(丹波山地)では、舞鶴帯の三疊紀前期～中期志高層群の砂岩層から、碎屑性の含アルカリ角閃石・ローソン石岩片, 含ローソン石・パンペリ石岩片, 碎屑性のアルカリ角閃石とローソン石が見いだされている(足立, 1990)。最近, 小林・後藤(2008)は丹波帯を覆う白亜紀後期の篠山層群下部層から含ローソン石片岩礫を見だし、そのフェンジャイトに濃集した試料(K=4.2 wt.%)のK-Ar年代として、

約2.7億年前を報告し、蓮華変成岩起源と推定した。フェンジャイトの不純成分によるK-Ar年代の若返り(例えば, Tsujimori and Itaya, 1999)を考慮すると、実際の年代はやや古いものであると予想される。上述の事例はいずれも大陸縁辺型の堆積盆に堆積した浅海-非海成の非付加体碎屑岩である。

付加体碎屑岩としては、九州東部四万十帯南帯の日向垂層群(始新統～漸新統)に約3.2億年のK-Ar年代を示す碎屑性白雲母が含まれる(寺岡ほか, 1994)。彼らは後背地において蓮華変成岩相当の結晶片岩の浸食を考えた。

一般に、変成帯の地殻の浅所までの上昇時期と最終的な地表への露出は必ずしも重なるものではない(例えば, Maruyama *et al.*, 1996)。例えば、四国三波川帯では最終的な地表への露出の下限は始新統久万層群の堆積年代で与えられる(例えば, Narita *et al.*, 1999)。辻森(1998)は中国山地における蓮華変成岩の地表への露出時期の下限について、志高層群中の碎屑性アルカリ閃石およびローソン石(足立, 1990)の存在から三疊紀後期と考えた。三疊紀より若い非付加体性と付加体堆積物にしばしば認められる蓮華変成岩由来の碎屑物は、蓮華変成岩が比較的長い時間にわたって造山帯表層に露出し、その大部分が剝離された可能性を示唆する。

III. これらから解決すべき問題

1) これまでの年代学の検証と新しい年代学の展開

1-1) フェンジャイト K-Ar 年代学からジルコン U-Pb 年代学へ

前述のように、日本列島の古生代高圧変成岩の放射性同位体年代決定は、日本の他の高圧変成岩と同様にK-Ar系年代測定に大きく依存してきた。迅速なK-Ar系年代測定による年代マッピングによって、日本列島の地帯構造論が進歩した。例えば、いわゆる「三郡帯」の分割(柴田・西村, 1989; Nishimura, 1998)や、「三波川帯」の再定義・分割(Aoki *et al.*, 2007, 2008; 青木ほか, 2010)などがそうである。また、高圧変成帯の下限・上

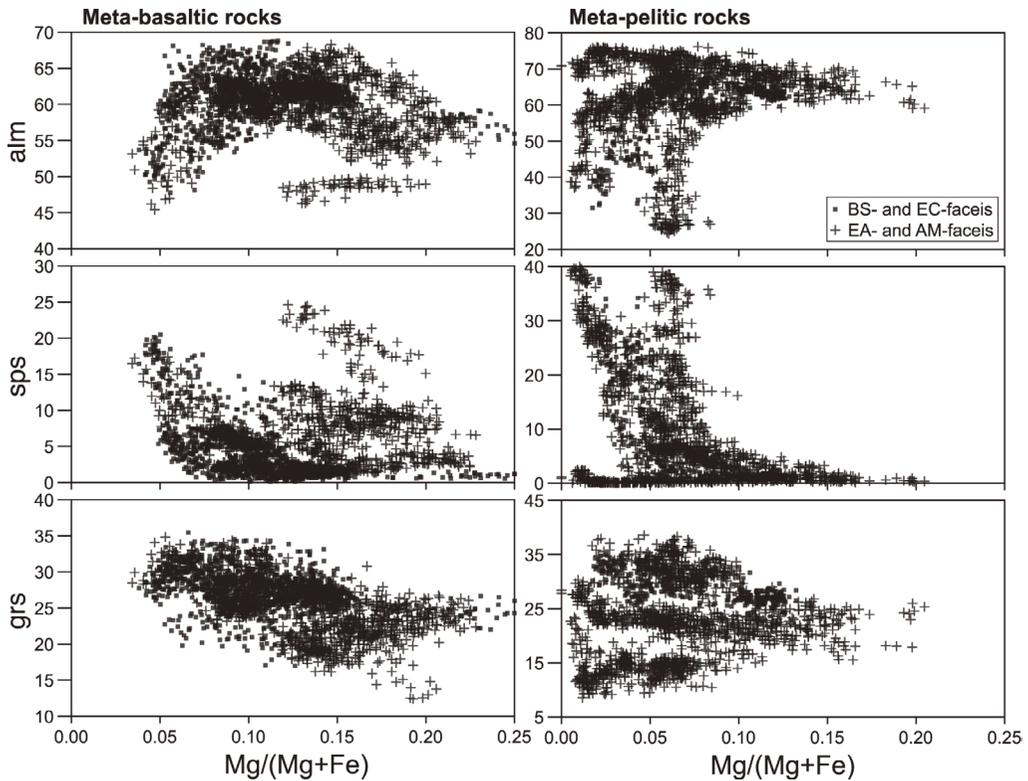


図 5 飛騨山地（糸魚川-青海地域）と中国山地（大佐山地域）の蓮華変成岩の高変成度部分のざくろ石の化学組成傾向。ざくろ石はコアにおいてスペサルティン成分に富み、リムに向かって連続的に $Mg/(Mg+Fe)$ 原子比が現象する組成累帯を呈する。固溶体組成の略号：alm—アルマンディン，grs—グロッシュラー，sps—スペサルティン。

Fig. 5 Compositional trend of garnet from Renge metamorphic rocks. Garnets are zoned with spessartine-rich cores; $Mg/(Mg+Fe)$ atomic ratio increases continuously toward the rim. Abbreviations of end-members: alm—almandine, grs—grossular, sps—spessartine.

限の認定手段としても有用である（例えば，Nishimura *et al.*, 2000）。その一方，K-Ar 系年代測定は，閉止温度の問題と過剰 Ar という 2 つの大きな問題があった。変成ピークが 550 ~ 600°C に達するような標本の場合，それから分離したフェンジャイトの K-Ar 年代は，冷却過程で約 350°C 程度の温度となるタイミングに相当する。つまり，変成温度ピークの年代を示さない。また，K-Ar 年代測定は，Ar 同位体初生値を大気と同じという大前提に基づいており，その妥当性は $^{40}Ar/^{39}Ar$ 法によっても検証が困難である。 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 法の段階加熱による年代測定において，各温度フラクションの同位体組成を使ってアイソクロン法により，

Ar 同位体初期値を確認する試みもあるが，分離した試料が純粋であるならばアイソクロンを定義するだけのバリエーションを得ることはできない。K-Ar 系年代測定の大前提を検証するためには，Ar だけではなく，He や Ne といった他の希ガス同位体組成を測定し，どれだけ大気に近いのか評価する必要がある。また，年代値の妥当性の検証には，共存するフェンジャイトとパラゴナイトを分離し，Rb-Sr 系のアイソクロン年代測定を試みる手段もある。糸魚川-青海地域のエクログジャイト相の泥質変成岩では，フェンジャイトとパラゴナイトの Rb-Sr アイソクロン年代が，それらの K-Ar 年代と矛盾しない（三朝国際イン

ターンプログラム 2008 要旨 http://www.misasa.okayama-u.ac.jp/intern/intern08/intern2008_abstracts.pdf [Cited 2010/02/08]。

近年、地質年代学の進歩は質量分析法に関係した高精度分析機器の発達によるところがきわめて大きい。造山運動に関する固体地球プロセスの高解像度の解読のための変成岩試料においても、高分解能型二次イオン質量分析装置やレーザーアブレーション誘導結合プラズママルチコレクター質量分析装置 (LA-MC-ICPMS) を利用した変成ジルコン局所 U-Pb 年代測定への依存度を増している。しかし、変成温度が 550 ~ 600°C 程度の玄武岩質変成岩では、一般に変成ジルコンは数 μm と非常に小さく、ジルコンの形成時期の認定も簡単ではない。ジルコンを含む変成組織と微細包有物の記載、さらに、微量元素組成の定量分析や安定同位体組成の局所分析など、ジルコンの U-Pb 年代のもつ地質学的な意味づけはきわめて、慎重に行う必要がある。

高压変成帯の変成ピーク年代の決定として、Sm-Nd 系や Lu-Hf 系の鉱物アイソクロン年代測定の試みは可能である。しかし、変成温度が 550 ~ 600°C 程度ではアイソクロン法を適用するための平衡が成り立たない場合が多い。高压低温変成作用は多かれ少なかれさまざまなスケールで元素移動を伴い系は閉じていない。同位体測定を行う前に測定対象の鉱物の平衡関係と系についての慎重な検証および、鉱物包有物をとり除くための綿密な鉱物分離技術が求められる。正確な情報を追求する場合、包括的な地球化学的な特徴づけは避けられない。

LA-ICPMS の普及に伴い堆積岩から、碎屑性ジルコンを分離し、大量の U-Pb 年代値の統計処理に基づいた後背地解析を目的とした碎屑性年代学・熱年代学の手法が過去数年間に普及した (例えば, Kosler *et al.*, 2002; Fedo *et al.*, 2003)。そして、その手法は、付加体碎屑岩や堆積岩起源の高压変成岩にも適用されている (例えば, Aoki *et al.*, 2007; Ernst *et al.*, 2008; Snow *et al.*, 2009)。しかし、この手法は試料採集・選定・年代測定過程で、さまざまなバイアスがある。さらに、統計

学的に意味をもたせるためには、地質学的な議論に必要な年代値の個数の評価 (Vermeesch, 2004) など、慎重にならなければならない。今後、日本列島の造山帯においても、碎屑性ジルコンの U-Pb 年代測定による後背地解析に基づいた地帯構造区分の再定義が進むと予想されるが、バイアス除去のための新しい基準設定など、後発であるがゆえに工夫が必要であろう。

1-2) 沈み込み開始はいつか?

日本列島の付加型造山帯の歴史は、受動的大陸縁から活動的大陸縁への転化に最初のクライマックスがある。活動的大陸縁への転化、つまり、最初の沈み込みについての情報をどれだけ正確に抽出できるであろうか? 日本列島の付加型造山帯の中で、最も古い地質体は、その構造的な最上位を占める大江山帯のオフィオライトである。このオフィオライトは前期古生代以前に形成された海洋底マントルの断片と考えられており、北米西岸のクラマス山地や東オーストラリアのニューイングランド褶曲帯に分布する前期古生代のオフィオライトと同様に、環太平洋造山帯において最古のオフィオライトの 1 つである (石渡, 1989; Ishiwatari, 1991)。辻森ほか (2000b) は大江山帯の蛇紋岩体に付随する普甲峠の含藍晶石角閃岩が、四国黒瀬川帯の木頭名の約 4.5 ~ 4 億年前の K-Ar 年代を示す高压変成岩とともに、日本列島最古の沈み込み変成作用を示すものだと考えた。しかし、それらの年代は上昇冷却年代と考えられ、変成ピークはさらに古いと予想される。木頭名-普甲峠変成岩には蓮華変成岩に産する藍閃石質角閃石は認められない。すなわち、日本列島最古の沈み込み変成岩は藍閃石質角閃石を形成するような地温勾配を記録していない (Tsuji-mori and Liou, 2004b)。

木頭名-普甲峠変成岩の年代と類似性をもつ岩石として、西南日本の古生代高压変成岩を含む蛇紋岩メランジュに特徴的に産出するひすい輝石岩 (例えば, 茅原, 1989) がある。そのひすい輝石岩中のジルコンの U-Pb 年代は、いずれも約 5 ~ 4.7 億年前を示し、低温高压条件下での流体活動によるジルコン形成の時期と解釈された (棚座ほか,

2002; Tsujimori *et al.*, 2005; Tsutsumi *et al.*, 2006; 柗座・後藤, 2010)。しかしながら, 最近, Fu *et al.* (2010) は, Tsujimori *et al.* (2005) が年代測定したジルコン (中国山地, 大佐山蛇紋岩メランジュ産) の局所微量元素と酸素同位体組成を行い, そのジルコンのコアの一部が低流体起源ではなく火成作用で形成したジルコン残晶であることを明らかにした。ジルコンの残存火成コアと低温流体ジルコンの年代差は誤差範囲で区別されないが, その組織は明らかに低温流体ジルコンが後に形成したことを示す。

約5～4.7億年前の火成ジルコンのメルトからの晶出と, その直後の低温流体によるジルコン形成は何を意味するのであろうか? 近年, 現在の海洋底を構成する海洋地殻構成岩から火成作用によってメルトから晶出したジルコンが報告されている (例えば, Schwartz *et al.*, 2005; Grimes *et al.*, 2007, 2009a, b; Lissenberg *et al.*, 2009; Baines *et al.*, 2009)。とりわけ, 低速拡大軸直下において, 分化の進んだ下部地殻の構成岩にジルコンが認められている (Schwartz *et al.*, 2005)。大佐山蛇紋岩メランジュ産ひすい輝石岩中の低温流体ジルコンに残存する火成ジルコンの酸素同位体組成は, Grimes *et al.* (2009a) が報告した海洋地殻起源の火成ジルコンに類似する (Fu *et al.*, 2010)。ひすい輝石岩中のジルコン中の火成ジルコン残晶は日本列島に最初に沈み込んだ海洋地殻の環境とその形成年代を示すものであろう。低温流体によるひすい輝石やルチルを保有するジルコン形成時期が, 火成ジルコンコアの年代に比べて有意な差を示さないことは, 日本列島の最初の沈み込みにおいて, 比較的若い年齢の海洋地殻が沈み込んだことを示唆する。

1-3) 沈み込んだスラブの年齢

前述のように, 蓮華変成岩には変成ピークで藍閃石を安定に含む低温のエクロジャイトが存在する。一般に沈み込み帯域のベニオフ面上の温度分布を決める独立変数の中でスラブの年齢の効果が最も大きな影響をもつと考えられている。既存の地球物理学的手法によるベニオフ面上の温度分布の数値計算モデリングのいくつかは, 東北日本や

トンガのような年齢の古い (1億年前) 海洋プレートが定常的に沈み込む場合, 火山フロント直下 (約80～120 km) においてもベニオフ面上で400℃に満たない超低地温勾配域が存在することを予測した (例えば, Kirby *et al.*, 1996; Peacock and Wang, 1999)。一方, 年齢の古い海洋プレートが沈み込む場合においても, 年齢の若い (0.25億年前より若い) スラブが沈み込む場合と同様に, 火山フロント直下においてベニオフ面上の温度分布はスラブ融解を起こす高温状態 (約800℃) である可能性も示されている (例えば, van Keken *et al.*, 2002; Abers *et al.*, 2006)。いずれにしても, 沈み込みがはじまると100万年前程度で平衡温度になり, 沈み込み帯の地温勾配は最初が最も低く, 次第に若いプレートになるにつれて高温側にシフトする。

日本列島の古生代高压変成岩がどれくらいの年齢の海洋プレートの沈み込みで変成したのか? 斑れい岩を原岩とするような変成岩中の数 μm サイズのジルコンについて, 岩石薄片上の組織観察に基づいた高分解能型二次イオン質量分析装置による極局所年代測定の方法で, 火成作用と沈み込み変成作用の識別ができれば, 古生代に沈み込んだスラブの年齢が推定可能となる。

2) 沈み込み浸食 (構造性浸食)

近年, 世界のほとんどすべての海溝で海洋プレートの沈み込みに伴い構造性浸食が普遍的に起きていることが明らかとなった (例えば, Scholl and von Huene, 2009; De Franco *et al.*, 2008; Vannucchi *et al.*, 2004)。構造性浸食は既存の付加型の造山帯だけでなく, ときには古い大陸基盤まで破壊し, 地殻物質をマントル深部へ運びうる。この新知見は日本列島を構成する付加型造山帯も海洋側に向かって単純に成長したのではなく, 構造性浸食による短縮を被ったことを示唆する。

日本列島に点在する古生代高压変成岩の広範囲な分布を考慮すると, 古生代高压変成帯と同様に, それと対をなす花こう岩質深成岩体の分布も非常に広域的であったと予想される。しかし, 古生代高压変成作用の時期に対応した古期花こう

岩質岩の活動の詳細は不明な点が多い。北上山地には古生代の島弧地殻を構成していたと考えられる古期花こう岩質岩が分布する（小林ほか、2000）。しかし、西南日本ではそれに対応した岩体がほとんど存在しない。その主要原因として構造浸食による造山帯の短縮が考えられる。

蓮華変成岩の一部には、大江山オフィオライト起源と考えられる岩相が蓮華変成岩と一緒に、高圧変成作用を被った証拠がある。高圧変成岩中（とくに堆積岩起源の結晶片岩中）に散在する蛇紋岩やオフィオライト起源の輝緑岩・斑れい岩は、(1) 蛇紋岩ダイヤピルに捕獲されて地表にもたらされたオフィオライト構成岩が再び海溝に堆積し、沈み込むスラブと一緒に変成作用を受けること、(2) 構造的浸食によって、ウエッジマンツルの前弧オフィオライトが削剥され、沈み込むスラブと一緒に変成作用を受けること、などのプロセスが考えられる（辻森、1998）。

海洋プレートに海洋プレートが沈み込むような海洋内沈み込み帯では、沈み込み帯上盤側に海洋地殻・マンツル層序が想定される。このような構造場ではオフィオライト層序をもった沈み込み帯上盤構成岩が沈み込みによって浸食され、オフィオライト構成岩は容易に高圧変成作用を被る。大江山帯のオフィオライトには青色片岩相の変成作用を被った岩石がまったくないにもかかわらず、蓮華変成岩を含む蛇紋岩メランジュにとり込まれたオフィオライトの断片が高圧変成作用を被るためには、海洋内沈み込み帯で大江山オフィオライトに相当する海洋地殻・マンツル層序を、構造的浸食によって、沈み込ませるようなテクニクスが必要となる。このモデルは、西南日本において、大江山帯と蓮華変成岩を含む地層との間に、非変成付加体が存在しないことと調和する。

北上山地では蓮華変成岩相当の古生代高圧変成岩が、石炭紀前期の放散虫化石を含む付加体碎屑岩と混在する（例えば、内野ほか、2005、2008）。この非変成付加体は蓮華変成岩を含む地層の構造的上位のユニットであって、その大部分は構造的削剥によって失われた可能性がある。

3) 延長問題

日本列島の古生代高圧変成帯を含めた先ジュラ系と造山帯構成要素と、東アジアの他の先ジュラ系地質体との連続性に関する議論は数多い（例えば、Hiroi, 1981; Kojima, 1989; 磯崎・丸山, 1991; Ernst and Liou, 1995; Ree *et al.*, 1996; Ishiwatari and Tsujimori, 2003; Liou *et al.*, 2006; Ernst *et al.*, 2007）。エクロジヤイト相変成岩の産出というキーワードで、蓮華変成岩は韓半島やさらに黄海を挟んだ蘇魯-大別山超高压変成帯に連続性を求めることも可能である。しかし、蓮華変成岩と韓半島や中国のエクロジヤイト相変成岩を比較すると、原岩や変成年代が異なるだけでなく、太平洋型と衝突型という造山様式が根本的に異なる（Maruyama *et al.*, 1996）。Ernst *et al.* (2007) は造山様式が異なるものの、日本列島とロシア沿海州の先ジュラ系地質体のすべてが同じプレート境界として、韓半島や蘇魯-大別山超高压変成帯に連続するとした。

これまでの延長問題は基本的にどれも層序学的・記載岩石学的・年代学的な対比に基づく。しかしながら、太平洋型と衝突型という造山様式と原岩が大きく異なる場合、高圧変成岩の年代の類似性による対比は非常に難しい。日本列島造山帯において、竹貫-日立-飛騨(宇奈月変成岩を含む)-肥後変成岩は唯一、不純な石灰岩と Al に富んだ泥質岩の存在とチャートを欠くといった受動的大陸縁の原岩をもつことを特徴とし、北中国と南中国の衝突型境界の延長である公算が高く（磯崎・丸山, 1991）、今後その検証が必要である。

この衝突型境界の延長を検証する方法として安定同位体組成に基づく対比がある。中国の蘇魯-大別山変成帯の変成岩に関して、きわめて軽い酸素同位体比をもった変成鉱物が広域的に知られている（例えば、Yui *et al.*, 1995; Rumble *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2003, 2004; Chen *et al.*, 2007; Tang *et al.*, 2008）、その原因は、変成岩の原岩が原生代後期の全地球凍結時期に地殻浅所で地殻が軽い酸素同位体比をもつ流体と相互作用を起こしたことが原因と考えられている。今後、竹貫-日立-飛騨(宇奈月変成岩を含む)-肥後変成岩から、異常

に軽い酸素同位体組成がみつかる可能性がある。

日本列島の造山帯は、南中国（揚子地塊）の大陸縁において発達したというモデルが支配的である（例えば、磯崎・丸山, 1991; Isozaki, 1997）。そのモデルでは、日本海の隠岐島と飛騨山地の飛騨-宇奈月片麻岩はそれぞれ南中国と北中国（中朝地塊）に相当する。最近、宇奈月地域の変成花崗岩類から約 37 億年前の古いジルコンが報告された（瀧口ほか, 2007）。このような古いジルコンの存在は、飛騨帯が中朝地塊（北中国地塊）の一部であるというモデルと調和的である。ところが、蓮華変成岩には約 18 億年前の碎屑性ジルコンが含まれる。この年代のジルコンは中朝地塊の基盤岩に特徴的である。揚子地塊には約 8 億年前の年代をもったジルコンが多産する。もし、日本列島の造山帯が揚子地塊の大陸縁に発達したのなら、碎屑性ジルコンの年代として、約 8 億年前の年代がもっと検出されるかもしれない。

IV. 地質学の研究素材としての 日本の古生代高压変成岩

1) 蛇紋岩メランジュの地質

前述のように、日本列島の古生代高压変成岩は概して大量の蛇紋岩を伴うことを特徴とする。とりわけ、蛇紋岩メランジュの地質は、高压変成岩だけでなく、ひすい輝石岩などの特異な性格の岩石を伴うことで特徴づけられる。このような地質学的性格は、中米グアテマラのモタグア断層帯 (Martens *et al.*, 2007; Brueckner *et al.*, 2009)、ドミニカのカム断層帯 (Saumur *et al.*, 2010)、北米西岸ダイアプロ山地のニューイドリア蛇紋岩体 (Tsuji-mori *et al.*, 2007)、ミャンマー北部のビルマ山脈の蛇紋岩地帯 (Shi *et al.*, 2009) など、見かけ上はトランスフォーム断層に伴って形成したと考えられる蛇紋岩メランジュの地質と共通点が非常に多い。

もちろん、蛇紋岩メランジュができた頃に横ずれプレート境界であったかどうかは今後の検証の余地があるものの、高压変成岩を含む蛇紋岩メランジュの地質と構成岩石の研究は、活動的大陸縁における沈み込みスラブ-流体-マントル物質の

相互作用を間接的に解析することを意味する。また、蛇紋岩の浮力による高压変成岩の地殻浅所への上昇、つまり、マントル深度物質の移動プロセスの解読など、優れた研究素材でもある。さらに、日本列島の付加型造山運動の発達過程において、トランスフォーム断層による山脈形成や地質帯の再配置など、造山帯の伸びの方向に対して平行な造山過程を検証するために重要である。

かつて、青色片岩が蛇紋岩に密接に伴われることが多いことから、その成因論として、沈み込みテクトニクスとは関係なく、蛇紋岩中を通過するアルカリ元素に富んだ流体による交代作用によって青色片岩が形成するという考えがあった。現在、その成因論は否定されたが、高压低温変成岩を伴う蛇紋岩メランジュ中では、沈み込み変成作用と関連した流体による交代作用の証拠が普遍的に認められる (Coleman, 1961; Tsujimori *et al.*, 2006c)。蛇紋岩メランジュに捕獲された変成岩塊中の高压鉍物脈やひすい輝石岩、オンファス輝石岩、ローソン石岩などの高压低温単鉍物岩の直接解析は、スラブ直上のいわゆる「沈み込みチャンネル」中における流体挙動を解く鍵として注目される。とくに、蛇紋岩メランジュに捕獲された高压低温変成岩や蛇紋岩化を免れたマントルかんらん岩の変成圧力・温度・時間・変形履歴に加えて、高压鉍物岩や鉍物脈の地球化学的な特徴づけと形成時期の特定を慎重に行うことで、過去の沈み込み帯域におけるウエッジマントルの蛇紋岩化の環境と沈み込みチャンネルに沿った蛇紋岩の上昇流に伴う物質の移動機構の詳細が物質科学的にみえてくるであろう。

2) 造山帯の熟成—高压変成帯の上限・下限境界の不明瞭化—

島弧-海溝系において、現在進行形の付加体深部の高压変成部と浅部の非変成付加体部は連続する。しかしながら、造山帯に定置した高压変成帯には、一般に上限と下限境界が存在する（例えば、Maruyama *et al.*, 1996）。それは高压変成帯として、付加体深部の高压変成部が地殻浅場所に上昇する過程（二次的ドーミングなど）で必然的に上限・下限境界ができるからである。その高压変成

帯の上限・下限境界を明確にすることは、造山帯形成のパターンを地質学的に認識する上で重要である。ところが、日本の古生代高压変成岩のような断片的な分布ではそれが簡単ではない。

一般に、太平洋型の造山帯では高压変成帯と対をなすバソリス帯があり、その間に前弧盆堆積体が発達する。失われた変成帯の復元のためには、変成帯の本来の境界断層を特定し、次に、変成帯内部の圧力・温度構造の解析、そして複変成・複変形作用の時代と実態の解析、周辺の地質（普通は前弧堆積帯）との関係の特定が順番にあって、これらの研究に寄与する研究手法として碎屑性ジルコンや変成ジルコンのU-Pb年代学がある（丸山茂徳、私信）。高压変成帯とその関連する地質体を含めて造山運動という視点でまとめることが肝要であり、そのためには日本列島だけでなく日本海内部、韓半島、アジア東部の地質の理解が重要となる。

造山運動に関係した地質学的な一般則を解説しようという場合、著しく断片化した分布にはさまざまな弊害がある。しかし、高压変成帯の上限・下限境界の不明瞭化・複雑化は、まさに造山帯の熟成であり、熟成した造山帯形成の固体地球プロセスの本質を解くための1つの研究対象であり、解析は困難だが、地域地質学が大きく活躍できるポイントであろう。

3) 失われた（浸食された）地質体の復元

活動的なプレート収束域では、海溝での構造性削剥だけでなく、地質学的に速い時間スケールでの地殻の急速な隆起が構造的に起こりうる。そして、その結果として陸上では激しい表層の地層と岩石の浸食を伴う。陸上の浸食作用により失われた表層地質は、しばしば、隆起と同時期に造山帯周縁の堆積盆に碎屑鉱物や碎屑岩片（礫）として堆積する。

失われた（浸食された）古期造山帯がどのような特徴をもっていたのか？ それを、いつ地表に露出し、どれくらいの量がどれくらいの時間スケールで浸食されたのか？ 浸食を含む造山過程を地質学的に解析する手法として碎屑鉱物の熱年代学（前述）や礫の岩石学・年代学的な研

究（例えば、Tsuji-mori, 1995; Schott and Johnson, 2001; MacKenzie *et al.*, 2005; Nuong *et al.*, 2009）の手法がある。日本列島の古生代高压変成岩とそれに関係した地質体の復元に関して、断片化した個々の地質素材の研究に加えて、中生代以降の碎屑岩からの失われた（浸食された）地質体の成分を碎屑粒子や岩片として抽出する必要がある。

今後、日本の古生代高压変成岩の研究は、より多角的な研究手法の総合によって、受動的大陸縁から活動的大陸縁に転化した第一世代（約5～3億年前）の造山帯進化の詳細を理解させてくれるはずである。

謝 辞

埼玉大学の岡本和明博士と東京工業大学の丸山茂徳博士には粗稿を査読していただいた。本特集号編集幹事の先生方には執筆の機会を与えていただいた。ここに記して感謝します。また、本論の執筆にあたり、科学研究費補助金基盤研究（B）21340148の一部を使用した。

文 献

- Abers, G.A., van Keken, P.E., Kneller, E.A., Ferris, A. and Stachnik, J.C. (2006): The thermal structure of subduction zones constrained by seismic imaging: Implications for slab dehydration and wedge flow. *Earth and Planetary Science Letters*, **241**, 387-397.
- 足立 守 (1990): 舞鶴帯の三疊系志高層群砂岩の重鉱物組成. 地質学会講演要旨, 278.
- Aoki, K., Iizuka, T., Hirata, T., Maruyama, S. and Terabayashi, M. (2007): Tectonic boundary between the Sanbagawa belt and the Shimanto belt in central Shikoku, Japan. *Journal of the Geological Society of Japan*, **113**, 171-183.
- Aoki, K., Itaya, T., Shibuya, T., Masago, H., Kon, Y., Terabayashi, M., Kaneko, Y., Kawai, T. and Maruyama, S. (2008): The youngest blueschist belt in SW Japan: Implication for the exhumation of the Cretaceous Sanbagawa high-P/T metamorphic belt. *Journal of Metamorphic Geology*, **26**, 583-602.
- 青木一勝・大藤 茂・柳井修一・丸山茂徳 (2010): 三波川変成帯中の新たな独立した広域変成帯の存在—白亜紀から第三紀の日本における造山運動—. 地学雑誌, **119**, 313-332.
- Baines, A.G., Cheadle, M.J., John, B.E., Grimes, C.B., Schwartz, J.J. and Wooden, J.L. (2009): SHRIMP Pb/U zircon ages constrain gabbroic crustal accretion at Atlantis Bank on the ultraslow-spreading

- Southwest Indian Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, **287**, 540-550.
- Banno, S. (1958): Glaucofane schists and associated rocks in the Omi district, Niigata Prefecture, Japan. *Japanese Journal of Geology and Geography*, **29**, 29-44.
- Brueckner, H.K., Avé Lallemant, H.G., Sisson, V. B., Harlow, G.E., Hemming, S.R., Martens, U., Tsujimori, T. and Sorensen, S.S. (2009): Metamorphic reworking of a high pressure-low temperature mélange along the Motagua fault, Guatemala: A record of Neocomian and Maastrichtian transpressional tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, **284**, 228-235.
- Chen, R.-X., Zheng, Y.-F., Gong, B., Zhao, Z.-F., Gao, T.-S., Chen, B. and Wu, Y.-B. (2007): Oxygen isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from 200-4000 m core samples of the Chinese continental scientific drilling. *Chemical Geology*, **242**, 51-75.
- 茅原一也 (1989): 飛騨外縁帯ならびに三郡変成帯のヒスイ輝石岩の構造的意義. 地質学論集, **33**, 37-51.
- Coleman, R.G. (1961): Jadeite deposits of the Clear Creek area, New Idria district, San Benito County, California. *Journal of Petrology*, **2**, 209-247.
- De Franco, R., Govers, R. and Wortel, R. (2008): Nature of the plate contact and subduction zones diversity. *Earth and Planetary Science Letters*, **271**, 245-253.
- Ernst, W. G. and Liou, J.G. (1995): Contrasting plate-tectonic styles of the Qinling-Dabie-Sulu and Franciscan metamorphic belts. *Geology*, **23**, 353-356.
- Ernst, W.G., Tsujimori, T., Zhang, R.Y., Liou, J.G. (2007): Permo-Triassic collision, ultrahigh-pressure metamorphism, and tectonic exhumation along the East Asian continental margin. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **35**, 73-110.
- Ernst, W.G., Snow, C.A., and Scherer, H.H. (2008): Contrasting early and late Mesozoic petrotectonic evolution of northern California. *GSA Bulletin*, **120**, 179-194.
- Fedo, C.M., Sircombe, K.N. and Rainbird, R.H. (2003): Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **53**, 277-303.
- フォッサマグナ地質研究会 (1991): フォッサマグナの隆起過程. 地団研専報, **38**, 159-181.
- Fu, B., Valley, J.W., Kita, N.T., Spicuzza, M.J., Paton, C., Tsujimori, T., Bröcker, M. and Harlow, G.E. (2010): Multiple origins of zircons in jadeitite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, doi:10.1007/s00410-009-0453-y.
- Grimes, C.B., John, B.E., Kelemen, P.B., Mazdab, F.K., Wooden, J.L., Cheadle, M.J., Hanghøj, K and Schwartz, J.J. (2007): Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, **35**, 643-646.
- Grimes, C.B., John, B.E., Cheadle, M.J., Mazdab, F.K., Wooden, J.L., Swapp, S. and Schwartz, J.J. (2009a): On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **158**, 757-783.
- Grimes, C., Ushikubo, T., John, B.E. and Valley, J.W. (2009b): Oxygen isotopic ratio of ocean zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **73**, A466.
- 橋本光男・猪木幸男 (1970): 中国地方東部の三郡帯よりローソン石藍閃片岩の発見. 地質学雑誌, **76**, 159-160.
- Hayama, Y., Kizaki, Y., Aoki, K., Kobayashi, S., Toya, K. and Yamashita, N. (1969): The Joetsu metamorphic belt and its bearing on the geologic structure of the Japanese islands. *Memoirs of Geological Society of Japan*, **4**, 61-82.
- Hiroi, Y. (1981): Subdivision of the Hida metamorphic complex, central Japan, and its bearing on the geology of the Far East in pre-Sea of Japan time. *Tectonophysics*, **76**, 317-333.
- 石渡 明 (1989): 日本のオフィオライト. 地学雑誌, **98**, 290-303.
- Ishiwatari, A. (1991): Ophiolites in the Japanese Islands: Typical segment of the circum-Pacific multiple ophiolite belts. *Episodes*, **14**, 274-279.
- Ishiwatari, A. and Tsujimori, T. (2003): Paleozoic ophiolites and blueschists in Japan and Russian Primorye in the tectonic framework of East Asia: A synthesis. *Island Arc*, **12**, 190-206.
- Isozaki, Y. (1996): Anatomy and genesis of a subduction-related orogen: A new view of geotectonic subdivision and evolution of the Japanese Island. *Island Arc*, **5**, 289-320.
- Isozaki, Y. (1997): Contrasting two types of orogen in Permo-Triassic Japan: Accretionary versus collisional. *Island Arc*, **6**, 2-24.
- 磯崎行雄 (1998): 日本列島の起源と付加型造山帯の成長—リフト帯での誕生から都城型造山運動へ—. 地質学論集, **50**, 89-106.
- 磯崎行雄・板谷徹丸 (1991): 四国中西部秩父累帯北帯の先ジュラ系クリッペー黒瀬川内帯起源説の提唱—. 地質学雑誌, **97**, 431-450.
- 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.
- 梶島太郎・磯崎行雄・西村祐二郎 (1993): 長門構造帯, 300 Ma 低温高圧型片岩類と弱変成ペルム紀付加体間の境界スラストの発見. 地質学雑誌, **99**, 877-880.
- 梶島太郎・磯崎行雄・西村祐二郎・板谷徹丸 (1995): 九州中部, 低温高圧型木山結晶片岩の K-Ar 年代の再検討. 地質学雑誌, **101**, 397-400.
- Kawamura, M., Uchino, T., Gouzu, C. and Hyodo, H. (2007): 380 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the high-P/T schists obtained from the Nedamo Terrane, Northeast Japan. *Journal of Geological Society of Japan*,

- 113, 492-499.
- 川野良信・柴田 賢・内海 茂・大平寛人 (1992): 谷川岳鮮新世深成岩体の K-Ar 年代. 岩石鉱物鉱床学会誌, **87**, 221-225.
- Khedr, M.Z. and Arai, S. (2010): Hydrous peridotites with Ti-rich chromian spinel as a low-temperature forearc mantle facies: Evidence from the Happo-O'ne metaperidotites (Japan). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **159**, 137-157.
- Kirby, S.H., Stein, S., Okal, E.O. and Rubie, D.C. (1996): Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere. *Review of Geophysics*, **34**, 261-306.
- 小林文夫・後藤 篤 (2008): 兵庫県丹波市上滝-下滝地域の下部白亜系篠山層群下部層の層序と含礫層の結晶片岩礫の K-Ar 年代. 地質学雑誌, **114**, 577-586.
- 小林靖広・高木秀雄・加藤 潔・山後公示・柴田 賢 (2000): 日本の古生代花崗岩類の岩石化学的性質とその対比 (古領家帯と黒瀬川帯の構成要素と変遷過程). 地質学論集, **56**, 65-88.
- Kojima, S. (1989): Mesozoic terrane accretion in northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeontology*, **69**, 213-232.
- 河野義礼・植田良夫 (1965): 本邦産火成岩の K-Ar dating (III). 岩石鉱物鉱床学会誌, **54**, 162-172.
- Kosler, J., Fonneland, H., Sylvester, P., Tubrett, M. and Pedersen, R.B. (2002): U-Pb dating of detrital zircons for sediment provenance studies: A comparison of laser ablation ICPMS and SIMS techniques. *Chemical Geology*, **182**, 605-618.
- 梶座圭太郎・後藤 篤 (2010): 日本列島の誕生場—古太平洋の沈み込み開始を示す飛騨外縁帯の 520 Ma の熱水活動—. 地学雑誌, **119**, 279-293.
- 梶座圭太郎・中村栄三・宮島 宏・後藤 篤・小林桂 (2002): 飛騨外縁帯糸魚川 青海地域の熱水作用によるヒスイ輝石岩の形成年代. 日本岩石鉱物鉱床学会講演要旨, 296.
- 梶座圭太郎・後藤 篤・板谷徹丸・横山一己 (2004): 年代学からみた飛騨外縁帯の構造発達史: 高压変成岩類の K-Ar 年代と蛇紋岩に接触変成作用を与えた花崗岩類の U-Th-Pb EMP 化学年代からの制約. 地質学雑誌, **110**, 580-590.
- Kuroda, Y., Kurokawa, K., Uruno, K., Kinugawa, T., Kano, H. and Yamada, T. (1976): Staurolite and kyanite from epidote-hornblende rocks in the Oeyama (Komori) ultramafic mass, Kyoto Prefecture, Japan. *Earth Science (Chikyū Kagaku)*, **30**, 331-333.
- Kurokawa, K. (1975): Discovery of kyanite from epidote-amphibolite in the Oeyama ultramafic mass, Inner zone of southwestern Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, **81**, 273-274.
- Liou, J.G., Tsujimori, T., Chu, W., Zhang, R.Y. and Wooden, J.L. (2006): Protolith and metamorphic ages of the Haiyangsuo Complex, eastern China: A Non-UHP exotic tectonic slab in the Sulu ultrahigh-pressure terrane. *Mineralogy and Petrology*, **88**, 207-226.
- Lissenberg, C.J., Rioux, M., Shimizu, N., Bowring, S.A. and Mével, C. (2009): Zircon dating of oceanic crustal accretion. *Science*, **323**, 1048-1050.
- MacKenzie, J.M., Canil, D., Johnston, S.T., English, J., Mihalynuk, M.G. and Grant, B. (2005): First evidence for ultrahigh-pressure garnet peridotite in the North American Cordillera. *Geology*, **33**, 105-108.
- 前川寛和 (1981): 北上山地南西部母体層群の地質. 地質学雑誌, **87**, 543-554.
- 前川寛和 (1988): 東北日本の低温高压型変成岩類—母体-松ヶ平帯—. 地球科学, **42**, 212-219.
- Martens, U., Solari, L., Sisson, V.B., Harlow, G.E., Torres de León, R., Ligorra, J.P., Tsujimori, T., Ortega, F., Brueckner, H., Giunta G. and Avé Lallemand, H. (2007): *Field Trip Guide, the First Field Workshop of IGCP 546 "High-pressure Belts of Central Guatemala: The Motagua Suture and the Chuacús Complex"*. 36p.
- Maruyama, S. (1981): Kurosegawa melange zone in the Ino district to the north of Kochi City, central Shikoku. *Journal of Geological Society of Japan*, **87**, 569-583.
- Maruyama, S. (1997): Pacific-type orogeny revisited: Miyashiro-type orogeny proposed. *Island Arc*, **6**, 91-120.
- 丸山茂徳・植田良夫 (1975): 四国東部の黒瀬川構造帯に伴う超塩基性岩岩体中の結晶片岩とその K-Ar 年代. 岩石鉱物鉱床学会誌, **70**, 47-52.
- 丸山茂徳・相馬恒雄・松本謙一 (1980): 飛騨帯—飛騨外縁帯のテクトニクス. 飛騨外縁帯研究報告, **1**, 122-125.
- Maruyama, S., Liou, J.G. and Terabayashi, M. (1996): Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, **38**, 485-594.
- 松本謙一 (1980): 飛騨外縁帯青海地域の蛇紋岩メランジ. 飛騨外縁帯研究報告, **1**, 1-14.
- Miyashiro, A. and Banno, S. (1958): Nature of glaucophanitic metamorphism. *American Journal of Science*, **256**, 97-110.
- 宮下 敦 (2003): 八方尾根のエクログナイト相変成岩類. 地質学会講演要旨, 292.
- Nakajima, T. and Maruyama, S. (1978): Barroisite-bearing schist blocks in serpentinite of the Kurosegawa tectonic zone, West of Kochi City, central Shikoku. *Journal of Geological Society of Japan*, **84**, 231-242.
- 中水 勝・岡田昌治・山崎哲夫・小松正幸 (1989): 飛騨外縁帯, 青海-蓮華メランジの変成岩類. 地質学論集, **33**, 21-35.
- Narita, K., Yamaji, T., Tagami, T., Kurita, H., Obuse, A. and Matsuoka, K. (1999): The sedimentary age of the Tertiary Kuma Group in Shikoku and its significance. *Journal of Geological Society of Japan*, **105**, 305-308.

- Nishimura, Y. (1998): Geotectonic subdivision and areal extent of the Sangun belt, inner zone of Southwest Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 129-140.
- 西村祐二郎・柴田 賢 (1989): “三郡変成帯”の変斑れい岩質岩石の産状と K-Ar 年代. 地質学論集, **33**, 343-357.
- Nishimura, Y., Nakamura, E. and Hara, I. (1983): K-Ar ages of Sangun metamorphic rocks in Yamaguchi Prefecture and their geologic significance. *Journal of Japanese Association of Mineralogist, Petrologist and Economic Geologist*, **78**, 11-20.
- Nishimura, Y., Coombs, D.S., Landis, C.A. and Itaya, T. (2000): Continuous metamorphic gradient documented by graphitization and K-Ar age, southeast Otago, New Zealand. *American Mineralogist*, **85**, 1625-1636.
- Nozaka, T. (2005): Metamorphic history of serpentinite mylonites from the Happo ultramafic complex, central Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **23**, 711-723.
- Nuong, N.D., Itaya, T., Hyodo, H. and Yokoyama, K. (2009): K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phengite ages of Sanbagawa schist clasts from the Kuma Group, central Shikoku, southwest Japan. *Island Arc*, **18**, 282-292.
- Okamoto, K. and Maruyama, S. (1998): The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB + H_2O system. *American Mineralogist*, **84**, 362-373.
- 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.
- Peacock, S.M. and Wang, K. (1999): Seismic consequences of warm, versus cool subduction metamorphism: Examples from Southwest and Northeast Japan. *Nature*, **286**, 937-939.
- Ree, J.-H., Cho, M., Kwon, S.-T., Won, S.-T. and Nakamura, E. (1996): Possible eastward extension of Chinese collision belt in South Korea: The Imjingang belt. *Geology*, **24**, 1071-1074.
- Rumble, D., Giorgis, D., Orelund, T., Zhang, Z.M., Xu, H.F., Yui, T.F., Yang, J.S., Xu, Z.Q. and Liou, J.G. (2002): Low $\delta^{18}\text{O}$ zircons, U-Pb dating, and the age of the Qinglongshan oxygen and hydrogen isotope anomaly near Donghai in Jiangsu province, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **66**, 2299-2306.
- Saumur, B.M., Hattori, K.H. and Guillot, S. (2010): Contrasting origins of serpentinites in a subduction complex, northern Dominican Republic. *GSA Bulletin*, **122**, 292-304.
- Scholl, D.W. and von Huene, R. (2009): Implications of estimated magmatic additions and recycling losses at the subduction zones of accretionary (non-collisional) and collisional (suturing) orogens. *Geological Society, London, Special Publications*, **318**, 105-125.
- Schott, R.C. and Johnson, C.M. (2001): Garnet-bearing trondhjemite and other conglomerate clasts from the Gualala basin, California: Sedimentary record of the missing western portion of the Salinian magmatic arc? *GSA Bulletin*, **113**, 870-880.
- Schwartz, J.J., John, B.E., Cheadle, M.J., Miranda, E.A., Grimes, C.B., Wooden, J.L. and Dick, H.J.B. (2005): Dating the growth of oceanic crust at a slow-spreading ridge. *Science*, **310**, 654-657.
- Seki, Y. (1959): Petrological studies on the circum-Hida crystalline schists: I. Crystalline schists in the Gamata and Naradani district, Gifu Prefecture. *Science Reports of Saitama University, Series B*, **3**, 209-220.
- Shi, G.H., Jiang, N., Liu, Y., Wang, X., Zhang, Z.Y. and Xu, Y.J. (2009): Zircon Hf isotope signature of the depleted mantle in the Myanmar jadeitite: Implications for Mesozoic intra-oceanic subduction between the Eastern Indian Plate and the Burmese Platelet. *Lithos*, **112**, 342-350.
- 柴田 賢 (1981): 青海-蓮華帯の変成岩の K-Ar 年代(予報). 飛騨外縁帯, **2**, 62-63.
- Shibata, K. and Ito, M. (1978): Isotopic ages of schist from the Asahidake-Shiroumadake area, Hida Mountains. *Journal of Japanese Association of Mineralogist, Petrologist and Economic Geologist*, **73**, 1-4.
- 柴田 賢・西村祐二郎 (1989): 三郡結晶片岩の同位体年代. 地質学論集, **33**, 317-341.
- Shibata, K. and Nozawa, T. (1968): K-Ar age of Omi schist, Hida Mountains, Japan. *Bulletin of Geological Survey of Japan*, **19**, 243-246.
- 柴田 賢・Wanless, R.K.・加納 博・野沢 保・猪木 幸男・小西健二 (1972): 日本列島の 2, 3 のいわゆる基盤岩類の Rb-r 年齢. 地質調査所月報, **23**, 505-510.
- 柴田 賢・野沢 保・内海 茂 (1980): 飛騨外縁帯の K-Ar 年代. 飛騨外縁帯, **1**, 110-112.
- 清水 豊・辻森 樹・石渡 明 (2000): 群馬県中新統粟沢層に含まれる上越帯の泥質片岩礫 “藍閃石片岩礫および谷川岳の泥質片岩との関係”. 地質学会講演要旨, 160.
- Snow, C.A., Wakabayashi, J., Ernst, W.G. and Wooden, J.L. (2009): Detrital zircon evidence for progressive underthrusting in Franciscan metagraywackes, west-central California. *GSA Bulletin*, **122**, 282-291.
- 相馬恒雄・柗座圭太郎 (1993): 飛騨ナップの形成と中生層のテクトニクス: 飛騨地域の構造発達史. 地質学論集, **42**, 1-20.
- 杉村和子・中村保夫・相馬恒雄・柗座圭太郎・松本謙一 (1996): 黒雲母と灰曹長石の生成反応をもとにした変成帯の比較. 地球惑星科学関連学会合同学会演旨, 506.
- 瀧口 愛・日高 洋・堀江憲路 (2007): ジルコンの U-Pb 分析に基づく宇奈月帯深成複合岩体の中圧変成作用の年代学的考察. 地球化学会講演要旨, 1D20.
- Tang, J., Zheng, Y.-F., Gong, B., Wu, Y.-B., Gao, T.-S.,

- Yuan, H.-L. and Wu, F.-Y. (2008): Extreme oxygen isotope signature of meteoric water in magmatic zircon from metagranite in the Sulu orogen, China: Implications for Neoproterozoic rift magmatism. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 3139-3169.
- 寺岡易司・柴田 賢・奥村公男・内海 茂 (1994): 九州東部-四国西部の四万十累層群の碎屑性カリ長石および白雲母の K-Ar 年代. *地質学雑誌*, **100**, 477-485.
- Tsujimori, T. (1995): Staurolite-bearing sillimanite schist cobble from the Upper Jurassic Tetori Group in the Kuzuryu area, Hida Mountains, central Japan. *Journal of Geological Society of Japan*, **101**, 971-977.
- 辻森 樹 (1998): 中国山地中央部, 大佐山蛇紋岩メランジュの地質: 大江山オフィオライトの下に発達した 320Ma 青色片岩を含む蛇紋岩メランジュ. *地質学雑誌*, **104**, 213-231.
- Tsujimori, T. (2002): Prograde and retrograde P-T paths of the late Paleozoic glaucophane eclogite from the Renge metamorphic belt, Hida Mountains, southwest Japan. *International Geology Review*, **44**, 797-818.
- 辻森 樹 (2004): 組成累帯クロムスピネルからみた青海蛇紋岩メランジュを構成する蛇紋岩の起源. *地質学雑誌*, **110**, 591-597.
- Tsujimori, T. and Ishiwatari, A. (2002): Granulite facies relics in the early Paleozoic kyanite-bearing ultrabasic metacumulate in the Oeyama belt, the Inner Zone of southwestern Japan. *Gondwana Research*, **5**, 823-835.
- Tsujimori, T. and Itaya, T. (1999): Blueschist-facies metamorphism during Paleozoic orogeny in southwestern Japan: Phengite K-Ar ages of blueschist-facies tectonic blocks in a serpentinite mélange beneath Early Paleozoic Oeyama ophiolite. *Island Arc*, **8**, 190-205.
- Tsujimori, T. and Liou, J.G. (2004a): Coexisting chromian omphacite and diopside in tremolite schist from the Chugoku Mountains, SW Japan: The effect of Cr on the omphacite-diopside immiscibility gap. *American Mineralogist*, **89**, 7-14.
- Tsujimori, T. and Liou, J.G. (2004b): Metamorphic evolution of kyanite-staurolite-bearing epidote-amphibolite from the Early Paleozoic Oeyama belt, SW Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **22**, 301-313.
- Tsujimori, T. and Liou, J.G. (2005): Eclogite-facies mineral inclusions in clinozoisite from Paleozoic blueschist, central Chugoku Mountains, Southwest Japan: Evidence of regional eclogite-facies metamorphism. *International Geology Review*, **47**, 215-232.
- Tsujimori, T. and Liou, J.G. (2007): Significance of the Ca-Na pyroxene-lawsonite-chlorite assemblage in blueschist-facies metabasalts: An example from the Renge metamorphic rocks, SW Japan. *International Geology Review*, **49**, 415-430.
- 辻森 樹・松本啓作 (2006): 青海蛇紋岩メランジュ産の藍閃石-緑れん石エクロジャイトの圧力温度シュートセクション: 予報. *地質学雑誌*, **112**, 407-414.
- 辻森 樹・石渡 明・坂野昇平 (2000a): 西南日本内帯蓮華変成帯, 青海町湯ノ谷のエクロジャイト質藍閃石片岩について. *地質学雑誌*, **106**, 353-362.
- 辻森 樹・仁科克一・石渡 明・板谷徹丸 (2000b): 西南日本内帯大江山地域の普甲峠変成沈積岩に産する 4~4.4 億年含藍晶石緑れん石角閃岩. *地質学雑誌*, **106**, 646-649.
- 辻森 樹・宮島 宏・竹之内 耕 (2001): 糸魚川-青海地域の古生代高压変成岩類. *日本地質学会第 108 年年会見学旅行案内書*, 157-177.
- Tsujimori, T., Liou, J.G., Wooden J.L. and Miyamoto, T. (2005): U-Pb dating of large zircons in low-temperature jadeitite from the Osayama serpentinite melange, Southwest Japan: Insights into the timing of serpentinization. *International Geology Review*, **47**, 1048-1057.
- Tsujimori, T., Liou, J.G., Ernst, W.G. and Itaya, T. (2006a): Triassic paragonite- and garnet-bearing epidote-amphibolite from the Hida Mountains, Japan. *Gondwana Research*, **9**, 167-175.
- Tsujimori, T., Sisson, V.B., Liou, J.G., Harlow, G.E. and Sorensen, S.S. (2006b): Petrologic characterization of Guatemalan lawsonite eclogite: Eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone. in *Ultrahigh-pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction* edited by Hacker B.R., McClelland, W.C. and Liou, J.G., *Geological Society of America Special Paper*, **403**, 147-168.
- Tsujimori, T., Liou, J.G. and Harlow, G.E. (2006c): Multiple stages of fluid infiltrations in HP-LT lawsonite (lawsonite-rich rock) from the Motagua fault zone, Guatemala. *GSA Abstracts with Programs*, **38**, 569.
- Tsujimori, T., Liou, J.G. and Coleman, R.G. (2007): Finding of high-grade tectonic blocks from the New Idria serpentinite body, Diablo Range, California: Petrologic constraints on the tectonic evolution of an active serpentinite diapir. in *Convergent Margin Terranes and Associated Regions—A Tribute to W.G. Ernst* edited by Cloos, M., Carlson, W.D., Gilbert, M.C., Liou, J.G. and Sorensen, S.S., *Geological Society of America Special Paper*, **419**, 67-80.
- Tsutsumi, Y., Yokoyama, K., Terada, K. and Sano, Y. (2003): SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons in metamorphic rocks from northern Kyushu, western Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **98**, 181-193.
- Tsutsumi, Y., Yokoyama, K., Miyawaki, R., Matsubara, S. and Hidaka, H. (2006): Ion microprobe U-Pb dating of zircons in jadeitites and jadeite-bearing rocks from Japan. *Abstract of 19th General Meeting of the International Mineralogical Association*, P35-3.
- 内野隆之・川村信人 (2006): 根田茂帯 (旧“早池峰帯”)

- から発見された藍閃石を含む苦鉄質片岩とその意義. 地質学雑誌, **112**, 478-481.
- 内野隆之・栗原敏之・川村信人 (2005): 早池峰帯から発見された前期石炭紀放射状化石一付加体碎屑岩からの日本最古の化石年代一. 地質学雑誌, **111**, 249-252.
- 内野隆之・川村信人・郷津知太郎・兵藤博信 (2008): 根田茂帯礫岩から得られた含ザクロ石泥質片岩礫の白雲母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代. 地質学雑誌, **114**, 314-317.
- 植田良夫・中島 隆・松岡喜久次・丸山茂徳 (1980): 高知市北方の黒瀬川構造帯に伴う準片岩一伊野相と結晶片岩ブロックの白雲母の K-Ar 年代. 岩石鉱物鉱床学会誌, **76**, 230-233.
- 上村不二雄・坂本 享・山田直利 (1979): 若桜地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅). 地質調査所, 91p.
- Vannucchi, P., Galeotti, S., Clift, P.D., Ranero, R.C. and von Huene, R. (2004): Long-term subduction-erosion along the Guatemalan margin of the Middle America Trench. *Geology*, **32**, 617-620.
- van Keken, P.E., Kiefer, B. and Peacock, S. (2002): High-resolution models of subduction zones: Implications for mineral dehydration reactions and the transport of water into the deep mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystem*, **3**, doi:10.1029/2001GC000256.
- Vermeech, P. (2004): How many grains are needed for a provenance study? *Earth and Planetary Science Letters*, **224**, 441-451.
- Watanabe, T., Tokuoka, T. and Naka, T. (1987): Complex fragmentation of Permo-Triassic and Jurassic accreted terranes in the Chugoku region, southwest Japan and the formation of the Sangun metamorphic rocks. in *Terrane Accretion and Orogenic Belts* edited by Leitch, E.C. and Scheibner, E., *Geodynamics Series*, American Geophysical Union, **18**, 275-289.
- 山口健二 (1990): 若桜地域三郡変成帯志谷層の変成作用. 島根大学地質学研究報告, **9**, 29-36.
- Yokoyama, K. (1985): Ultramafic rocks in the Hida marginal zone. *Memoirs of National Science Museum, Tokyo*, **18**, 5-18.
- Yokoyama, K. (1987): Ultramafic rocks in the Kurosegawa tectonic zone, Southwest Japan. *Journal of Japanese Association of Mineralogist, Petrologist and Economic Geologist*, **82**, 319-335.
- Yokoyama, K. (1992): K-Ar ages of metamorphic rocks at the top of Mt. Tanigawa-dake, Central Japan. *Bulletin of National Science Museum, Tokyo, Series C*, **18**, 43-47.
- Yui, T.F., Rumble, D. and Lo, C.H. (1995): Unusually low $\delta^{18}\text{O}$ ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 2859-2864.
- Zheng, Y.-F., Fu, B., Gong, B. and Li, L. (2003): Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Review*, **62**, 105-161.
- Zheng, Y.-F., Wu, Y.-B., Chen, F.-K., Gong, B., Li, L. and Zhao, Z.-F. (2004): Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale $\delta^{18}\text{O}$ depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **48**, 4145-4165.

(2009 年 10 月 29 日受付, 2010 年 2 月 19 日受理)