領家帯に記録された東アジア東縁の白亜紀イベント

奥平敬元* 隅田祥光**

Cretaceous Events at the Eastern Margin of East Asia Recorded in Rocks of the Ryoke Belt, SW Japan

Takamoto OKUDAIRA* and Yoshimitu SUDA**

Abstract

In the Ryoke belt formed at the eastern margin of East Asia during mid-Cretaceous time, the most important geological record is that of felsic igneous activity, which may have been caused by the subduction of a young (hot) oceanic lithosphere. The mantle-derived arc magmas formed due to subduction of the hot lithosphere underplated the lower crust. Continuous underplating of the mantle-derived magmas resulted in partial melting of the lower crustal mafic to intermediate rocks to produce granite magmas. The granite magmas rose and were emplaced at a mid-crustal depth. They caused thermal perturbation around rocks of the Jurassic accretionary complex (Mino-Tamba belt) and formed the resultant low-pressure/high-temperature regional contact metamorphism (Ryoke metamorphism). At the time of Ryoke metamorphism, during subduction of a hot oceanic lithosphere with high obliquity, a low-angle detachment fault formed at the forearc region of the mid-Cretaceous SW Japan arc. Following this event, subduction of an inactive oceanic ridge or a very hot oceanic lithosphere with low obliquity occurred; a compressional stress regime occurred at the forearc region, forming granite mylonites and large-scale upright folds associated with crustal displacement along the detachment fault. After this event, the angle of subduction decreased gradually; the location of the felsic igneous activity moved toward the continent.

Key words : Ryoke belt, Ryoke-San-yo granitoids, detachment fault, oceanic ridge subduction

キーワード : 領家帯, 領家-山陽花崗岩類, デタッチメント断層, 海嶺沈み込み

I. はじめに

領家帯は低圧高温型広域変成帯（領家変成帯）と同時代の花崗岩類（領家花崗岩類）から構成され、白亜紀中期の東アジア東縁の活動的大陸縁辺域で形成されたとされている。領家帯における、広域テクトニクスにおいて重要な地質現象は、大規模珪長質火成作用と低角デタッチメントの形成

である。本論は、領家帯における変成作用・変形作用・火成作用に関するこれまでの研究成果を概観することにより、その形成・発達過程を明らかにし、白亜紀中期～後期の東アジア東縁のテクトニクスに貢献しようとするものである。

II. 変成作用

領家変成帯はおもに美濃-丹波帯（ジュラ紀～

* 大阪市立大学理学部地球学教室

+ 現所属：明治大学研究・知財戦略機構黒曜石研究センター

* Department of Geosciences, Osaka City University, Osaka, 558-8585, Japan

+ Present address: Center for Obsidian and Lithic Studies, Organization for the Strategic Coordination of Research and Intellectual Property, Meiji University, Nagano, 386-0601, Japan

図 1 領家変成帯の分布 (Okudaira *et al.*, 2009). 美濃-丹波帯と大野川-和泉層群の分布もあわせて示してある。

Fig. 1 Distribution of Ryoke metamorphic belt, SW Japan (Okudaira *et al.*, 2009). Distributions of the Mino-Tamba accretionary complex and the Onogawa-Izumi sedimentary basin are also shown.

白亜紀最前期付加体)の高変成度部であり、両者は漸移関係にあり、黒雲母アイソグラッドをその境界とするのが一般的である (例えば, Ichikawa, 1990; 原ほか, 1991)。変成作用の年代は約 100 Ma であり、東西変化は認められない (CHIME モナザイト年代: Suzuki *et al.*, 1994; Suzuki and Adachi, 1998)。最高温度軸 (珪線石帯・ザクロ石-堇青石帯) は中央構造線の北側に位置しており、南北両翼に向かって変成度は低下する (図 1: 諏訪, 1973; Okudaira *et al.*, 2009)。珪線石帯・ザクロ石-堇青石帯は上部角閃岩相～下部グラニュライト相に達し、地殻中部付近 (400–600 MPa : 15–20 km 深度) で形成されたものである (例えば, Okudaira *et al.*, 1993, 2001; Hokada, 1996; Nakajima, 1996; Ikeda, 1998, 2002, 2004; Kawakami, 2002)。見かけの地温勾配は約 40–50°C/km となり、典型的な低圧型変成帯である。高変成度岩の温度-圧力経路は、ほぼ一定の圧力で温度が上昇し最高変成度に達し、その後も圧力

がそれほど下降せずに温度が下がるような“ヘアピン”型である (Brown, 1998; Ikeda, 1998)。

領家花崗岩類はシート状の貫入形態をもつ古期花崗岩類とダイアピル状新期花崗岩類に大きく分けられ、CHIME モナザイト年代はそれぞれ約 95 Ma と約 90–70 Ma である (Suzuki *et al.*, 1994; Suzuki and Adachi, 1998)。古期花崗岩類と高変成度岩が密接に伴うことや変成帯内の温度-圧力構造、温度-圧力経路などから、領家変成作用は古期花崗岩の貫入・定置による広域的な接触変成作用であるとされている (Okudaira *et al.*, 1993, 2001; Okudaira, 1996; Ikeda, 1998; Miyazaki, 2007; Tirone and Ganguly, 2010)。つまり、領家変成岩類に記録されている温度-圧力条件やその経路は花崗岩質マグマの浅所への上昇による熱的影響が大きく、見かけの地温勾配はその当時の島弧-海溝系の大局的な温度構造を反映しない。よって広域テクトニクスにおいては、領家変成岩の形成過程はあまり重要ではない。しかし、これ

まで提出されている領家変成帯の熱モデル (Okudaira, 1996; Okudaira *et al.*, 2001; Miyazaki, 2007) は、初期条件 (花崗岩マグマ貫入前) の地温勾配を 30℃/km 程度に設定しており、これは比較的高いマントル熱流量 (約 80 mW/m²) を必要とするため、古期花崗岩類形成時の地殻の地温勾配が比較的高いものであったことが示唆される。

III. 変形作用

領家帯には、3つの主要な変形時相 (D₁, D₂, D₃) が認められている (原ほか, 1991; Okudaira *et al.*, 1993, 2001)。D₁ は層内褶曲を伴う層面片理形成期、D₂ は局所的な剪断変形に伴うマイロナイト帯形成期 (南縁剪断帯形成期)、そして D₃ は鉛直褶曲 (upright fold, 正立褶曲) 形成期である。変成岩類と古期花崗岩類は D₁ 以降のすべての変形を被っている。D₁ は低圧高温型変成作用期の変形であるため、変成岩の CHIME モナザイト年代から約 100 Ma と推定される。D₂ はマイロナイト形成期であり、95–85 Ma (鹿塩時階 I 期, 高温マイロナイト形成期) と 75–65 Ma (鹿塩時階 II 期, 低温マイロナイト形成期) の 2 つが識別されている (高木, 1997)。島田ほか (1998) は三重県^{かゆみ}粥見地域において、鹿塩時階 II 期の低温マイロナイトと D₃ 褶曲構造は左横ずれ圧縮場においてほぼ同時に形成されたとし、低温マイロナイトは比較的高角な姿勢であったとした。山口県柳井地方においては、D₃ までの主要な延性変形は 88 Ma には終了しているため (Okudaira *et al.*, 2001)、東西で延性変形の終了時期が異なる。領家帯の上昇は西から東へと伝搬したとされており (大友, 1996; Suzuki and Adachi, 1998; Yuhara *et al.*, 2000)、この柳井地域と粥見地域における延性変形終了時期の相違は、東西の上昇時期の違いを反映したものであろう。

領家変成帯における主要な変形は一軸伸長歪とされてきたが (Toriumi, 1985; Toriumi and Kuwahara, 1988)、これは D₁ と D₂/D₃ の歪みが重複した結果であり、最も主要な変形である D₁ の歪楕円は最小伸長軸が層面片理の法線方向で最大伸長

軸がほぼ東西に配置するような一軸圧縮歪～平面歪である (Okudaira and Beppu, 2008; Adachi and Wallis, 2008; Okudaira *et al.*, 2009)。この D₁ の最大主歪の方向は D₂/D₃ のそれとほぼ一致するが、花崗岩類中の岩脈の方向や変成岩の非対称構造から求められた最小主応力軸方向は D₁ と D₂/D₃ とでは異なり (図 2)、D₁ は横ずれ展張場であり、D₂/D₃ は横ずれ圧縮場であったと考えられる。

古期花崗岩類はシート状の貫入形態をもち、地殻中部付近に発生した北傾斜の剪断帯に沿って、花崗岩質マグマが貫入・上昇したものであるとされている (奥平ほか, 2000)。一方、新期花崗岩類の多くはバソリス状・岩株状であり、D₂ マイロナイト構造や D₃ 褶曲構造を切っている (ただし、一部の新期花崗岩類は D₃ 褶曲構造に参加している) ため、D₃ と同時かそれ以降に貫入・定置したものである (Sakurai *et al.*, 1983; 原ほか, 1991; Ohtomo, 1993; Sakakibara, 1995; 西脇・奥平, 2007)。

IV. 火成作用

領家花崗岩類のほとんどはチタン鉄鉱系列の I タイプ花崗岩類である (例えば, Ishihara, 1977; Kagami *et al.*, 1992; Kutsukake, 1993; Nakajima, 1996; Takagi, 2004)。系統的な CHIME モナザイト年代測定の結果は、古期花崗岩類が約 95 Ma、新期花崗岩類が約 90–80 Ma であり、その年代値に東西変化は認められない (Suzuki *et al.*, 1994; Suzuki and Adachi, 1998)。ただし、中部地方においては、新期花崗岩類の活動は約 65 Ma まで継続する (Suzuki and Adachi, 1998)。これらは山陽花崗岩類とは区別される場合が多いが、地球化学的特徴や放射年代の類似性から、領家花崗岩類 (とくに新期花崗岩類) と山陽花崗岩類をまとめて領家-山陽花崗岩類とする場合もある (例えば, 村田ほか, 2000)。この領家-山陽花崗岩類をもたらした白亜紀珪長質火成作用は大規模なものであり、日本列島だけでなく中国大陸東縁部やシホテアリン、朝鮮半島や東南アジアにも広く分布している (例えば, Ishihara,

図 2 白亜紀西南日本内帯における最小水平応力方向と伸長線構造方向の配置(奥平ほか, 2000 を一部改変). 日本海拡大に伴う西南日本弧の時計回りの回転を考慮し, 50°反時計回りに回転させた. 海洋プレートの沈み込み方向は, 北緯 35°東経 135°を基準とした Maruyama and Seno (1986) および Maruyama *et al.* (1997) によるものを示した.

Fig. 2 Orientation of minimum horizontal stress axis and stretching lineation (maximum finite strain axis) recorded in rocks of the Ryoke metamorphic belt (partially modified from Okudaira *et al.*, 2000). The SW Japan arc is rotated anticlockwise 50° to reconstruct the position of the arc before formation of the Japan Sea. Subduction directions of oceanic plates were reconstructed to the reference point at 35°N, 135°E (Maruyama and Seno, 1986; Maruyama *et al.*, 1997).

1977; Kinoshita, 1995)。

Kagami *et al.* (1992) は, 白亜紀～古第三紀花崗岩類の Nd および Sr 同位体比初生値 (NdI 値, SrI 値) に基づき, 西南日本内帯が North Zone (北帯), Transition Zone (遷移帯), South Zone (南帯) の 3 帯に区分されることを示した。領家-山陽花崗岩類はおもに南帯に相当し, 山陰帯の花崗岩類は北帯に相当する。南帯の花崗岩類は北帯のものに比べ SrI 値が高く, NdI 値は低い (図 3)。また, 酸素同位体組成 ($\delta^{18}\text{O}$ 値) が高く, 硫黄同位体比 ($\delta^{34}\text{S}$ 値) は軽い傾向にある (Ishihara and Matsuhisa, 2002; Takagi, 2004)。これら同位体の不均一性は, 上部地殻物質を構成する堆積岩類の混入量の違い (Ishihara and Matsuhisa, 2002), 上部マントルから下部地殻物質の同位体組成の違い (Kagami *et al.*,

1992; Iizumi *et al.*, 2000; Ishioka and Iizumi, 2003), 沈み込む海洋地殻・付加堆積物由来の流体相の関与の程度の違い (Takagi, 2004) が原因であるとされている。

領家-山陽花崗岩類は, 苦鉄質から中間質組成をもった閃緑岩, 斑れい岩類をしばしば伴う。Sr, Nd 同位体組成や全岩化学組成を用いた解析結果から, 領家花崗岩類は島弧下部地殻を構成していたであろうこれら閃緑岩, 斑れい岩類の部分融解メルトに由来したものであるとされている (例えば, Kagami *et al.*, 1985, 1992, 2000; 田結庄ほか, 1989; Kutsukake, 1993, 2002; Iizumi *et al.*, 2000; Ishioka and Iizumi, 2003; Nakajima *et al.*, 2004)。これら苦鉄質から中間質岩類の SrI 値 (0.7056–0.7095) は海洋地域のマントルに由来するもの (0.7020–0.7050) より明らかに高く,

図 3 白亜紀～古第三紀の斑れい岩や閃緑岩の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値と ϵNd 値 (Iizumi *et al.*, 2000 を一部改変). □: 北帯, △: 漸移帯, ○: 南帯. N_{Gr} , T_{Gr} , S_{Gr} はそれぞれ, Kagami *et al.* (1992) による北帯, 漸移帯, 南帯の領域である. また, Kagami *et al.* (2000) の領家帯に産する苦鉄質岩のデータ (●) もあわせて示した.

Fig. 3 Initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus ϵNd for gabbroic and dioritic rocks (Iizumi *et al.*, 2000). Open squares, North zone; triangles, Transitional zone; open circles, South zone. Fields of granitic rocks from the North zone (N_{Gr}), Transitional zone (T_{Gr}) and South zone (S_{Gr}) are after Kagami *et al.* (1992). Solid circles indicating plots of mafic rocks in the Ryoke belt (Kagami *et al.*, 2000) are also shown.

低い Rb や K の含有量や均質な全岩組成などから, この高い SrI 値は花崗岩類との同位体平衡によるのではなく, 初生的なものであると考えられている (Kagami *et al.*, 1985; 加々美ほか, 1995; Kagami *et al.*, 2000)。Iizumi *et al.* (2000) や Ishioka and Iizumi (2003) は領家-山陽花崗岩類・山陰帯花崗岩類に伴って産する苦鉄質～中間質岩石の Sr および Nd 同位体比初生値にも地域的な変化を認め, その原因を島弧下マンツルの不均質性に求めた。この島弧下マンツルの不均質は, スラブ上面に由来する流体による汚染の程度を反映したものであり, 前弧下マンツルは背弧下より流体による汚染の程度が高かったことを示唆する。さらに, 花崗岩類の Sr-Nd 同位体比初生値との類似性から (図 3), 花崗岩類の同位体比初生値の地域的な変化の原因をその起源物質である苦鉄質～中間質岩石の地域変化に求めた。

図 4 後期白亜紀における珪長質火山フロントの変遷 (山田, 2005 を一部改変)。

Fig. 4 Distribution of the felsic volcanic front at different stages (KV-1 to KV-4) during the Late Cretaceous (slightly modified from Yamada, 2005).

また, これら苦鉄質から中間質岩類の起源は, Kagami *et al.* (2000) は大陸リソスフェアの影響を受けた大陸洪水玄武岩質マグマであるとしたが, Nakajima *et al.* (2004) は, Kagami *et al.* (2000) の検討に用いられた試料は斑れい岩などの集積岩や苦鉄質グラニュライトであり, これらはマグマの組成を反映していないとし, Cr や Ni 含有量が低く FeO^*/MgO 比の比較的高い試料 (よりマグマの組成を反映していると考えられるもの) を検討に用いた結果, 島弧・大陸弧玄武岩質マグマであるとした。なお, Kagami *et al.* (2000) が解析に用いた試料の Nb/Y 比, Nb/Zr 比はそれぞれ 0.5, 0.15 以下であり, Tatsumi *et al.* (1998) の判別図に基づく, 大陸洪水玄武岩の形成と密接に関係したであろうマンツルブルームの影響は認められない。

山田 (2005) は, 西南日本内帯における火山岩類の空間分布と放射年代値に基づき, 白亜紀～古第三紀の火山フロントの変遷を 4 つのステージ (KV-1 期, 110–95 Ma; KV-2 期, 95–80 Ma; KV-3 期, 80–65 Ma; KV-4 期, 65 Ma 以降) にまとめている (図 4)。この復元によると, 火山フロントは KV-1 期から KV-2 期へと南下し KV-2

期以降は北上する。このような珪長質火成作用の活動域の北上は花崗岩類の形成年代からも指摘されているが (Kinoshita, 1995), 活動場の変遷はより複雑である (加々美ほか, 1999; Yuhara *et al.*, 2000)。しかし, 領家古期花崗岩はその後の花崗岩類 (領家新期花崗岩類や山陽花崗岩類) とは貫入深度が異なるため, 両者を単純に比較することはできない。

V. 議 論

1) 白亜紀海嶺沈み込み

Uyeda and Miyashiro (1974) 以降, 領家-山陽火成作用や領家変成作用の熱源として, 活動的の海嶺もしくは熱い (若い) 海洋プレートの沈み込みが考えられている (例えば, 木下・伊藤, 1986; Nakajima *et al.*, 1990; 君波ほか, 1993; Kinoshita, 1995; Nakajima, 1996; Maruyama *et al.*, 1997; Brown, 1998; Iwamori, 2000; Okudaira and Yoshitake, 2004; Aoya *et al.*, 2009)。領家-山陽火成作用は下部地殻苦鉄質岩類の部分熔融によるものであり, 下部地殻物質を大規模に融解させるには, 島弧-海溝系の地温勾配の上昇や高温物質の島弧地殻への供給 (付加) が必要となる。

活動的の海嶺の接近・通過によって火山フロント付近の地温勾配はさほど変化しないが, 前弧域の地温勾配は大きく変化する (例えば, Iwamori, 2000; Okudaira and Yoshitake, 2004)。Iwamori (2000) による数値シミュレーションでは, 海嶺の接近・通過によって沈み込んだ海洋玄武岩質地殻が大規模に熔融し領家-山陽花崗岩類が発生するシナリオが描かれている。領家-山陽帯においては, 沈み込む海洋地殻および堆積物の部分熔融によって形成されたアダカイト質花崗岩や, このアダカイト質メルトがマントルウェッジかんらん岩と反応することによって形成されたとされる高 Mg 安山岩 (巽, 2003) の産出がしばしば報告されている (Imaoka *et al.*, 1993; 木村・貴治, 1993; 貴治ほか, 1995, 2000; 村田ほか, 2000)。アダカイト質花崗岩や高 Mg 安山岩の産出は海嶺もしくは若い海洋地殻の沈み込みを強く示唆するものであるが, その発生条件は空間的・時間的に限定さ

れるため (Thorkelson and Breitsprecher, 2005), アダカイト質マグマや高 Mg 安山岩マグマそれ自体は領家-山陽帯規模の火成作用には対応しないであろう (Okudaira and Yoshitake, 2004)。

先述したように, 領家-山陽花崗岩類はソレイト質玄武岩 (火山弧玄武岩もしくは大陸性洪水玄武岩) の部分熔融したものが主体であり, スラブ熔融モデルから期待される海洋玄武岩由来の珪長質マグマの関与は小さいと考えられている。筆者らは, 下部地殻苦鉄質岩類の部分熔融が比較的長期間 (十数 Myr 程度) 維持されるテクトニクスとして, 活動的の海嶺を伴わない若い (熱い) 海洋プレートの沈み込みによる, 島弧-海溝系の地温勾配の上昇と島弧火成活動の活発化による高温物質 (ソレイト質玄武岩) の島弧地殻への供給 (付加) を想定している。

ソレイト質玄武岩マグマの活動は, 沈み込む海洋プレート上部を構成する含水鉱物の脱水による島弧下マントルのかんらん岩の吸水融解によるものであるが, マントルに供給される水の量は海洋プレートの年齢が古いほど多いはずであり, 海嶺もしくは若い海洋プレートの沈み込みは通常の島弧火成活動を弱めることが期待される。事実, 現在活動的の海嶺が沈み込んでいる南米チリでは, 南北に分布する第四紀火山帯において, 沈み込んだ海嶺の直上には第四紀火山が存在しない (例えば, Cande and Leslie, 1986)。領家-山陽花崗岩類のようなチタン鉄鉱系花崗岩類の生成には多量の堆積物やそれに由来する流体の関与が考えられているが (Takagi, 2004), この多量の堆積物の沈み込みと若い海洋プレートの沈み込みは一見矛盾する。しかし, 堆積物沈み込み量は堆積物の供給量 $\times$ 沈み込み速度で決まるはずであり, 白亜紀中期は非常に速い沈み込み速度が想定されており (Engebretson *et al.*, 1985; Maruyama and Seno, 1986; Maruyama *et al.*, 1997), 供給量の不足分を上回る速い沈み込みによって島弧マグマが生成されたのであろう。実際, チタン鉄鉱系花崗岩類の生成量と海洋プレートの沈み込み速度には正の相関が指摘されている (図 5: Takagi, 2004)。一方, Aoya *et al.* (2009) は, 海嶺沈み

図5 海洋プレートの北緯40°東経140°における収束速度と磁鉄鉱系およびチタン鉄鉱系花崗岩類の地表露出面積の経年変化 (Takagi, 2004 を一部改変). 年代は5 Myr 間隔で、折れ線グラフ (右目盛) として示してある.

Fig. 5 Variations of convergence rate of oceanic plates at latitude 40°N-longitude 140°E and variations of exposure area of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in the Japan arc in units of 5 Myr (Takagi, 2004).

込み前のプレートの沈み込みによる前弧域マントルの蛇紋岩化によりマントルに流体を多量に保持させ、海嶺沈み込みと水の量の矛盾を回避するモデルを提出している。

山田 (2005) の指摘した珪長質火山活動の火山フロントの移動は、沈み込む海洋プレートの沈み込み角度の変化を反映している可能性がある。岩石の変形作用は熱活性化過程であるためそのレオロジーは温度条件によって大きく変化し、沈み込む海洋プレートの年齢が若ければ地温勾配が高いため軟らかく、古ければ地温勾配が低いいため相対的に硬くなる。この沈み込む海洋プレートの硬さは沈み込み角度に大きく関係し、前者の場合はより高角となり島弧が圧縮場となることが期待され、後者の場合はより低角となり海溝が後退し島弧は展張場となることが期待される (Tagawa *et al.*, 2007; Goes *et al.*, 2008)。つまり、KV-1 期 (110–95 Ma: 領家古期花崗岩類の活動期) から KV-2 期 (95–80 Ma: 領家新期花崗岩類の活動期) の火山フロントの海溝側への南下は沈み込み

角度の増加によるものであり、その後の KV-3 期 (80–65 Ma: 山陽花崗岩類の活動期) から KV-4 期 (65 Ma 以降: 山陰花崗岩類の活動期) への北上は沈み込み角度の低下に対応したものであった可能性がある (図 6)。これは D_1 と D_2/D_3 がそれぞれ展張場と圧縮場の変形であることと調和的であり、若いプレートの沈み込みが D_2/D_3 変形時相・領家新期花崗岩類の活動期に起きたことを示唆する。

領家帯と白亜紀の対の変成帯をなす三波川変成帯は、その温度-圧力構造が温度-圧力空間において下に凸になる比較的高い地温勾配から、定常的な海洋プレートの沈み込みでは形成されず、若い (熱い) 海洋プレートの沈み込みが必要であるとされた (Iwamori, 2000; Aoya *et al.*, 2003, 2009)。なお、この熱い海洋プレートは活動的な海嶺を伴わなかったことが数値実験の結果から指摘されている (Aoya *et al.*, 2003; Okudaira and Yoshitake, 2004)。よって、領家帯-三波川変成帯を一つの島弧-海溝系として形成するためには、非活動的な海嶺もしくは若い (熱い) 海洋プレートの沈み込みと高温物質の継続的な下部地殻への付加・底付け作用を同時に満たすようなモデルを考える必要がある。Wallis *et al.* (2009) はエクログャイト相変成作用の形成年代 (Lu-Hf 年代) として 89–88 Ma を報告し、海嶺の沈み込みもこの時期であるとした。この指摘に基づくと、領家変成作用や古期花崗岩類の活動は 100–95 Ma であるので、海嶺の沈み込みに直接関係した火成活動は、三波川変成作用と同時代の新期花崗岩類 (約 90–80 Ma, KV-2 期) となる。実際、現在の露出面積から考えると、火成作用の規模としては新期花崗岩類の方が古期花崗岩類より大きいため、海嶺の沈み込みに対応した地質現象は新期花崗岩類であり (Nakajima *et al.*, 1990)、古期花崗岩類や低圧高温型広域変成作用ではないのかもしれない。しかし、Okamoto *et al.* (2004) はエクログャイト相変成作用として 120–110 Ma のジルコン SHRIMP 年代を報告しており、これが三波川変成作用の主要な形成年代であるとすれば、そもそも領家帯-三波川変成帯を対の変成帯として同一

図 6

後期白亜紀の西南日本における地質過程の概念図。(a) 100-95 Ma: 沈み込む海洋プレートの年齢が若くなるにつれて、ソレアイト質玄武岩の活発化と島弧-海溝系の地温勾配の上昇によって下部地殻が部分熔融し、Iタイプ花崗岩マagma (領家古期花崗岩マagma) が生成される。角閃岩が脱水熔融過程によって20%程度熔融し得る温度を950°C (例えば, Petford *et al.*, 2000) とした。地殻中部に発生したD₁水平剪断作用は低角デタッチメントを形成する。(b) 95-80 Ma: 海嶺もしくはきわめて若い海洋プレートの沈み込みによって沈み込み角度が増加し、ソレアイト質玄武岩の活動場が海溝側へと移動し、苦鉄質下部地殻の形成とその熔融により領家新期花崗岩類が形成される。この時、前弧域は圧縮場となり、低角デタッチメントに沿った花崗岩マイロナイト (D₂剪断帯) とD₃正立褶曲が形成される。(c) 80-65 Ma: 海洋プレートの年齢が増加するとともに沈み込み角度が減少し島弧火成活動 (山陽花崗岩類) がより背弧側に移動する。地表では左横ずれプルーアパート堆積盆としての大野川-和泉層群がデタッチメントの左横ずれ運動に伴い発達する。

Fig. 6

Geological processes in the mid-Cretaceous SW Japan. (a) 100-95 Ma. I-type Older Ryoke granitoids formed by partial melting of the lower crustal mafic rocks, since the subducting lithosphere was young, then volcanic arc basalt activity was promoted and the mantle heat flux increased. Production of 20 vol. % melt from amphibolites by a dehydration-melting process was assumed to occur at 950°C (e.g., Petford *et al.*, 2000). The deep-seated horizontal shear zone and the shallower fault system might form a crustal-scale detachment in the forearc region. (b) 95-80 Ma. I-type Younger Ryoke granitoids formed by subduction of an inactive oceanic ridge or very young (hot) oceanic lithosphere. At that time, the subduction angle increased and then a transpressional stress regime occurred across the arc. Localized southern marginal mylonite zone (D₂ shear zone) and the contemporaneous D₃ upright folds were formed by sinistral movement along the detachment fault. (c) 80-65 Ma. As the age of the oceanic lithosphere increased after subduction of an oceanic ridge, the subduction angle decreased and igneous activity moved toward the continent to form San-yo granitoids. At the same time, left-lateral pull-apart forearc basins, Onogawa-Izumi Group also developed at the north side of the shallower fault system along with sinistral movement along the detachment fault.

の造構場で考える必要はなくなる。Iwamori (2000) の数値シミュレーションによれば、領家帯-三波川変成帯を同一の海嶺沈み込みにより形成させる場合、両者の形成は完全に同時期ではなく、若干のずれがあることが指摘されているが、このずれは大きくても数 Myr 程度である。

2) 白亜紀横ずれ運動と低角デタッチメントの形成

Toriumi (1985) や Iwamori (2003) は島弧-海溝系を想定したコーナー流の数値シミュレーションを行い、Toriumi (1985) や Toriumi and Kuwahara (1988) などによって指摘された歪楕円の最大伸長軸が変成帯に平行に配置する一軸伸長歪の発達、2つの変形ステージ・モード(平面歪〜一軸圧縮歪でその最大伸長軸の方向が島弧に対して比較的高角の沈み込み期の変形ステージと一軸伸長歪みでその最大伸長軸の方向が島弧に対してほぼ平行の上昇期の変形ステージ)が重なったものであることを示した(ただし、沈み込み期の最大主歪の方位は、海洋プレートの沈み込み方向と海溝と直交する方位の差である斜交度に依存する)。領家帯における詳細な歪解析の結果は、 D_1 は最大伸長軸が変成帯に平行に配置する平面歪〜一軸圧縮歪であり、その後、部分的に D_2/D_3 の変形が重複した結果、最大伸長軸が変成帯に平行に配置する一軸伸長歪となったことを示した (Okudaira and Beppu, 2008; Okudaira *et al.*, 2009)。 D_1 は低圧高温型変成作用期であり、古期花崗岩類の活動期でもあるため、Toriumi (1985) や Iwamori (2003) の2つの変形ステージモデルでは、上昇期の変形ステージの早期に対応するはずである。つまり、Toriumi (1985) や Iwamori (2003) のモデルと天然の解析結果は、重複変形により最大伸長軸が変成帯に平行に配置する一軸伸長歪がもたらされたということに関しては調和的であるが、平面歪〜一軸圧縮歪が発達するときの最大伸長軸の配置やその形成ステージに関しては調和的ではない。よって、コーナー流モデルではない他のモデルによって、領家帯におけるダイナミクスを説明する必要がある。

D_1 の最大主歪は変成帯に平行に配置し、最小主歪は層面片理にほぼ垂直である。領家帯変成作用期における層面片理の姿勢は不明であるが、美濃-丹波帯の大構造が北に緩く傾斜していることやアイソグラッドが層面片理にほぼ平行であることから、 D_1 における層面片理の姿勢も北に緩く傾斜したものであったであろう。Adachi and Wallis (2008) は、三河高原における構造解析から、領家帯変成作用期における変成帯に平行な剪断運動は、上盤が西に移動する剪断センスをもつことを示した。これらのことから、白亜紀中期の領家帯はほぼ水平な姿勢の剪断帯と捉えることができ (Okudaira *et al.*, 2009)、この水平剪断帯における歪み集中帯がデタッチメント断層へと発達していった可能性が高い (図 6a)。これは、Fitch 型内陸横ずれデタッチメント断層が地殻強度の低い火山弧位置 (地温勾配の高い領域) で形成されやすいということと調和的である。ただし、このデタッチメント断層は、Fitch (1972) や高木 (1999) が想定したような高角なものではなく、低角なものであったと考えられる (Ito *et al.*, 2009)。おもに領家帯における最小水平応力方向および伸長線構造方向の配置から、90 Ma 前後に広域応力場の転換 (横ずれ展張場から横ずれ圧縮場への転換) があったことが指摘されている (Sakakibara, 1995; 島田ほか, 1998; 高木, 1999; 奥平ほか, 2000; Okudaira *et al.*, 2009)。デタッチメント断層の形成は圧縮場よりも展張場の方が容易であるため、 D_1 の横ずれ展張場において発生した可能性が高く、 D_2/D_3 の運動はこの D_1 デタッチメント断層が再活動したものであろう (図 6b)。

領家帯南縁を不整合に覆っている上部白亜系大野川-和泉層群は、左横ずれ断層運動によって形成された弧間もしくは前弧海盆 (プルアパート堆積盆) を埋積したものであり、この横ずれ運動の主断層系は現在の中央構造線とはほぼ一致するとされている (Taira *et al.*, 1983; Miyata, 1990; 宮田, 1996; 山北・大藤, 2000; Kubota and Takeshita, 2008)。大野川-和泉層群の堆積中心は西 (九州中央部) から東 (近畿西部) へ約 2 cm/yr で漸次

移動し、堆積年代も西 (Turonian) から東 (Maastichtian) へと若くなる (小玉, 1990; 山北・大藤, 2000)。和泉層群は領家変成岩類や新期花崗岩類そして泉南流紋岩類を不整合に覆っているため (Nishimura, 1984; 市原ほか, 1986), その堆積時において少なくとも領家帯南縁部は、新期花崗岩類の定置深度程度までは上昇・剝離され、地表に露出していたと考えられる (Suzuki and Adachi, 1998)。先述した領家帯内に想定される低角デタッチメントと大野川-和泉層群を形成した主断層系との関係を直接示すような地質学的観察はないが、西での大野川-和泉層群の堆積と東での D₂/D₃ の運動は同時期であり、さらに両者は類似した広域応力場 (左横ずれが卓越する応力場) において活動したと考えられるため (Hara *et al.*, 1980; Taira *et al.*, 1983; 島田ほか, 1998; 高木, 1999; 山北・大藤, 2000; Kubota and Takeshita, 2008; Okudaira *et al.*, 2009), 低角デタッチメントと大野川-和泉層群を形成した主断層系には密接な関係が示唆される (図 6c)。

Maruyama and Seno (1986) や Maruyama *et al.* (1997) によれば、90 Ma 前後に海洋プレートの沈み込み方向の転換があったとされており (図 2), 100 Ma 頃はユーラシアプレートに対してイザナギプレートが北北西方向に 10-20 cm/yr の速度で沈み込んでいるが、約 90 Ma 以降は (クラ-) 太平洋プレートが西北西方向におよそ 10 cm/yr で沈み込んでいる。海洋プレートの沈み込み方向と海溝と直交する方位の差である斜交度は、イザナギプレートの沈み込みでは大きく、(クラ-) 太平洋プレートでは小さい。このため、島弧 (海溝) に直交する方位の水平圧縮応力は、前者の場合では小さく、後者では大きくなることが期待される。領家帯における 90 Ma 前後の広域応力場の転換は、この海洋プレートの沈み込み方向および速度の大きな変化が原因の一つであったと考えられる。また先述したように、90 Ma 頃の高嶺もしくは若い海洋プレートの沈み込みにより沈み込み角度が短期間に急変した可能性があり、これも前弧域の広域応力場に大きな影響を与えたであろう。

VI. ま と め

領家帯における重要な地質現象は活発な珪長質火成作用であり、この火成作用の直接的・間接的熱源としての非活動的の高嶺もしくは若い (熱い) 海洋プレートの沈み込みが白亜紀中期の東アジア東縁において想定される。

若い海洋プレートの沈み込みにより、活発なソレイト質玄武岩マグマの発生とその地殻への底付け作用、その結果としての下部地殻苦鉄質岩の融解による珪長質マグマの生成、そしてその珪長質マグマの浅所への上昇・貫入とその熱的影響による広域接触変成作用 (領家変成作用) が起きた。

この若い海洋プレートの沈み込みは大きな斜交度をもっていたため、地殻強度の低い前弧域において低角横ずれデタッチメントが発生した。その後、非活動的の高嶺もしくはきわめて若い海洋プレートの斜交度の小さな沈み込みにより島弧は圧縮場となり、デタッチメントの再活動とそれに伴う花崗岩マイロナイトの形成や正立褶曲群が形成された。これ以降、海洋プレートの沈み込み角度は徐々に小さくなり、珪長質火成作用の活動場が北上した。

謝 辞

大阪府立大学の石井和彦氏には有益な助言をいただいた。査読者の岩森 光氏 (東京工業大学) と高木秀雄氏 (早稲田大学) には論文改訂において有益な助言をいただいた。また、特集号「日本列島形成史と次世代パラダイム」編集委員会ならびに編集委員の下司信夫氏 (産業技術総合研究所) には、有意義なご指摘をいただいた。ここに記して深く感謝したい。

文 献

- Adachi, Y. and Wallis, S. (2008): Ductile deformation and development of andalusite microstructures in the Hongusan area: Constraints on the metamorphism and tectonics of the Ryoke belt. *The Island Arc*, **17**, 41-56.
- 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 ocean-ridge subduction.

- Geology*, **31**, 1045–1048.
- Aoya, M., Mizukami, T., Uehata, S.I. 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.
- Brown, M. (1998): Unpairing metamorphic belts: P–T paths and a tectonic model for the Ryoke Belt, southwest Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 3–22.
- Cande, S.C. and Leslie, R.B. (1986): Late Cenozoic tectonics of the southern Chile trench. *Journal of Geophysical Research*, **91**, 471–496.
- Engebretson, D., Cox, A. and Gordon, R.G. (1985): Relative plate motions between oceanic and continental plates in the northern Pacific basin. *Geological Society of America, Special Paper*, **206**, 1–59.
- Fitch, T.J. (1972): Plate convergence, transcurrent faults, and internal deformation adjacent to southeast Asia and the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **77**, 4432–4460.
- Goes, S., Capitanio, F.A. and Morra, G. (2008): Evidence of lower-mantle slab penetration phases in plate motion. *Nature*, **451**, 981–984.
- Hara, I., Shyoji, K., Sakurai, Y., Yokoyama, S. and Hide, K. (1980): Origin of the Median Tectonic Line and its initial shape. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **18**, 27–50.
- 原 郁夫・櫻井康博・奥平敬元・早坂康隆・大友幸子・榑原信夫 (1991): 領家帯のテクトニクス. 日本地質学会第 99 年学術大会見学旅行案内書, 1–20.
- Hokada, T. (1996): Orthopyroxene from a metabasite of the Ryoke belt in the Ina district, Nagano Prefecture, central Japan: Textural evidence of partial melting. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **91**, 253–265.
- Ichikawa, K. (1990): Pre-Cretaceous terranes of Japan. in *Pre-Cretaceous Terranes of Japan* edited by Ichikawa, K., Mizutani, S., Hara, I., Hada, S. and Yao, A., Publication of IGCP Project No. 224, 1–12.
- Iizumi, S., Imaoka, T. and Kagami, H. (2000): Sr–Nd ratios of gabbroic and dioritic rocks in a Cretaceous–Paleogene granite terrain, Southwest Japan. *The Island Arc*, **9**, 113–127.
- Ikeda, T. (1998): Progressive sequence of reactions of the Ryoke metamorphism in the Yanai district, southwest Japan: The formation of cordierite. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 39–52.
- Ikeda, T. (2002): Regional occurrence of orthopyroxene-bearing basic rocks in the Yanai district, SW Japan: Evidence for granulite-facies Ryoke metamorphism. *The Island Arc*, **11**, 185–192.
- Ikeda, T. (2004): Pressure-temperature conditions of the Ryoke metamorphic rocks in the Yanai district, SW Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **146**, 577–589.
- Imaoka, T., Nakajima, T. and Itaya, T. (1993): K–Ar ages of hornblendes in andesite and dacite from the Cretaceous Kanmon Group, Southwest Japan. *Journal of Mineralogy, Petrology and Economic Geology*, **88**, 265–271.
- Ishihara, S. (1977): The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, **27**, 293–305.
- Ishihara, S. and Matsuhisa, Y. (2002): Oxygen isotopic constraints on the genesis of the Cretaceous–Paleogene granitoids in the Inner Zone of southwest Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **53**, 421–438.
- Ishioka, J. and Iizumi, S. (2003): Petrochemical and Sr–Nd isotope investigations of Cretaceous intrusive rocks and their enclaves in the Togouchi-Yoshiwa district, northwest Hiroshima Prefecture, SW Japan. *Geochemical Journal*, **37**, 449–470.
- 市原 実・市川浩一郎・山田直利 (1986): 岸和田地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 148p.
- Ito, T., Kojima, Y., Kodaira, S., Sato, H., Kaneda, Y., Iwasaki, T., Kurashimo, E., Tsumura, N., Fujiwara, A., Miyauchi, T., Hirata, N., Harder, S., Miller, K., Murata, A., Yamakita, S., Onishi, M., Abe, S., Sato, T. and Ikawa, T. (2009): Crustal structure of southwest Japan, revealed by the integrated seismic experiment Southwest Japan 2002. *Tectonophysics*, **472**, 124–134.
- Iwamori, H. (2000): Thermal effects of ridge subduction and its implications for the origin of granitic batholith and paired metamorphic belts. *Earth and Planetary Science Letters*, **181**, 131–144.
- Iwamori, H. (2003): Viscous flow and deformation of regional metamorphic belts at convergent plate boundaries. *Journal of Geophysical Research*, **108**, doi:10.1029/2002JB001808.
- Kagami, H., Tainosho, Y., Iizumi, S. and Hayama, Y. (1985): High initial ratios of gabbro and metadiabase in the Ryoke Belt, Southwest Japan. *Geochemical Journal*, **19**, 237–243.
- Kagami, H., Iizumi, S., Tainosho, Y. and Owada, M. (1992): Spatial variations of Sr and Nd isotope ratios of Cretaceous–Paleogene granitoid rocks, Southwest Japan Arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **112**, 165–177.
- 加々美寛雄・柚原雅樹・飯泉 滋・田結庄良昭・大和田正明・端山好和・濡木輝一 (1995): 瀬戸内・近畿領家帯地域に分布するジュラ紀～中新世火成岩類の Sr, Nd 同位体比の変遷. 地質学論集, **44**, 309–320. [Kagami, H., Yuhara, M., Iizumi, S., Tainosho, Y., Owada, M., Hayama, Y. and Nureki, T. (1995): *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, **44**, 309–320.]
- 加々美寛雄・井川寿之・加賀島慎一・周藤賢治・今岡照喜・小山内康人・川野良信・石岡 純・柚原雅樹・大和田正樹・飯泉 滋・田結庄良昭 (1999): 本州弧白亜紀～第三紀火成活動の時空変遷と下部地殻—

- Rb-Sr 全岩アイソクロン年代と Sr, Nd 同位対比初生値からの検討—地質学論集, **53**, 1-19. [Kagami, H., Ikawa, S., Kagashima, S., Shuto, K., Imaoka, T., Osanai, Y., Kawano, Y., Ishioka, J., Yuhara, M., Owada, M., Iizumi, S. and Tainosho, Y. (1999): *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, **53**, 1-19.]
- Kagami, H., Yuhara, M., Iizumi, S., Tainosho, Y., Owada, M., Ikeda, Y., Okano, O., Ochi, S., Hayama, Y. and Nureki, T. (2000): Continental basalts in the accretionary complexes of the Southwest Japan Arc: Constraints from geochemical and Sr and Nd isotopic data of metadiabase. *The Island Arc*, **9**, 3-20.
- Kawakami, T. (2002): Magmatic andalusite from the migmatite zone of the Aoyama area, Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **97**, 241-253.
- 貴治康夫・大平 武・板谷徹丸 (1995): 丹波帯中央部に露出する花崗岩類の黒雲母および角閃石 K-Ar 年代. 地質学雑誌, **101**, 462-465. [Kiji, M., Ohira, T. and Itaya, T. (1995): *Journal of the Geological Society of Japan*, **101**, 462-465.]
- 貴治康夫・小澤大成・村田 守 (2000): 京都市北部, 山陽帯に分布するアダカイト質丹波花崗岩質岩. 岩石鉱物科学, **29**, 136-149. [Kiji, M., Ozawa, H. and Murata, M. (2000): *Japanese Magazine of Mineralogical and Petrological Sciences*, **29**, 136-149.]
- 君波和雄・宮下純夫・川端清司 (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. 地質学論集, **42**, 167-182. [Kiminami, K., Miyashita, S. and Kawabata, K. (1993): *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, **42**, 167-182.]
- 木村克巳・貴治康夫 (1993): 美濃-丹波帯に貫入する高マグネシア安山岩および玄武岩シートの K-Ar 年代. 地質学雑誌, **99**, 205-208. [Kimura, K. and Kiji, M. (1993): *Journal of the Geological Society of Japan*, **99**, 205-208.]
- Kinoshita, O. (1995): Migration of igneous activities related to ridge subduction in Southwest Japan and the East Asian continental margin from the Mesozoic to the Paleogene. *Tectonophysics*, **245**, 25-35.
- 木下 修・伊藤英文 (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. 地質学雑誌, **92**, 723-735. [Kinoshita, O. and Ito, H. (1986): *Journal of the Geological Society of Japan*, **92**, 723-735.]
- 小玉一人 (1990): 四国および淡路島の中央構造線沿いに分布する和泉層群の古地磁気層位. 地質学雑誌, **96**, 265-278. [Kodama, K. (1990): *Journal of the Geological Society of Japan*, **96**, 265-278.]
- Kubota, Y. and Takeshita, T. (2008): Paleocene large-scale normal faulting along the Median Tectonic Line. *The Island Arc*, **17**, 129-151.
- Kutsukake, T. (1993): An initial continental margin plutonism—Cretaceous Older Ryoke granitoids, southwest Japan. *Geological Magazine*, **130**, 15-28.
- Kutsukake, T. (2002): Geochemical characteristics and variations of the Ryoke granitoids, southwest Japan: Petrogenetic implications for the plutonic rocks of a magmatic arc. *Gondwana Research*, **5**, 355-372.
- Maruyama, S. and Seno, T. (1986): Orogeny and relative plate motions—An example of the Japanese Islands. *Tectonophysics*, **127**, 1-25.
- 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. *The Island Arc*, **6**, 121-142.
- Miyata, T. (1990): Slump strain indicative of paleoslope in Cretaceous Izumi sedimentary basin along Median Tectonic Line, Southwest Japan. *Geology*, **18**, 392-394.
- 宮田隆夫 (1996): 中央構造線の断層運動と和泉層群堆積盆地形成のモデル化. テクトニクスと変成作用 (原郁夫先生退官記念論文集), 220-226.
- Miyazaki, K. (2007): Formation of a high-temperature metamorphic complex due to pervasive melt migration in the hot crust. *The Island Arc*, **16**, 69-82.
- 村田 守・貴治康夫・小澤大成 (2000): 西南日本のアダカイト質花崗岩質岩. 地球号外, **30**, 204-208. [Murata, M., Kiji, M. and Ozawa, H. (2000): *Chikyū Monthly Special Issue*, **30**, 204-208.]
- Nakajima, T. (1996): Cretaceous granitoids in SW Japan and their bearing on the crust-forming processes in the eastern Eurasian margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*, **87**, 183-191.
- 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. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **104**, 381-389.
- Nakajima, T., Kamiyama, H., Williams, I.S. and Tani, K. (2004): Mafic rocks from the Ryoke Belt, southwest Japan: Implication for Cretaceous Ryoke/Sanyo granitic magma genesis. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Science*, **95**, 249-263.
- Nishimura, T. (1984): Geology and basin analysis of the Upper Cretaceous Izumi Group in western Shikoku, Japan. *Hyogo University of Teacher Education Journal, Ser. 3 (Natural Sciences, Practical Life Studies)*, **3**, 271-294.
- 西脇 仁・奥平敬元 (2007): 近畿中央部, 初瀬深成複合岩体の定置過程. 地質学雑誌, **113**, 249-265. [Nishiwaki, H. and Okudaira, T. (2007): *Journal of the Geological Society of Japan*, **113**, 249-265.]
- Ohtomo, Y. (1993): Origin of the Median Tectonic Line. *Journal of Science of the Hiroshima University, Ser. C*, **9**, 611-669.
- 大友幸子 (1996): 初生中央構造線の研究史. テクトニクスと変成作用 (原 郁夫先生退官記念論文集), 創

- 文, 191-201.
- 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, south-west Japan: Implications for metamorphic evolution of subducted protolith. *Terra Nova*, **16**, 81-89.
- Okudaira, T. (1996): Thermal evolution of the Ryoke metamorphic belt, southwestern Japan: Tectonic and numerical modelling. *The Island Arc*, **5**, 373-385.
- Okudaira, T. and Beppu, Y. (2008): Inhomogeneous deformation of metamorphic tectonites of contrasting lithologies: Strain analysis of metapelite and metachert from the Ryoke metamorphic belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology*, **30**, 39-49.
- 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. *The Island Arc*, **13**, 520-530.
- Okudaira, T., Hara, I., Sakurai, Y. and Hayasaka, Y. (1993): Tectono-metamorphic processes of the Ryoke belt in the Iwakuni-Yanai district, southwest Japan. *Memoirs of the Geological Society of Japan*, **42**, 91-120.
- 奥平敬元・早坂康隆・大友幸子 (2000): 領家変成帯からみた西南日本白亜紀テクトニクス. 地団研専報, **49**, 67-80. [Okudaira, T., Hayasaka, Y. and Ohtomo, Y. (2000): *Monograph Association of Geological Collaboration Japan*, **49**, 67-80.]
- Okudaira, T., Hayasaka, Y., Himeno, O., Watanabe, K., Sakurai, Y. and Ohtomo, Y. (2001): Cooling and inferred exhumation history of the Ryoke metamorphic belt in the Yanai district, south-west Japan: Constraints from Rb-Sr and fission-track ages of gneissose granitoid and numerical modeling. *The Island Arc*, **10**, 98-115.
- Okudaira, T., Beppu, Y., Yano, R., Tsuyama, M. and Ishii, K. (2009): Mid-crustal horizontal shear zone in the forearc region of the mid-Cretaceous SW Japan arc, inferred from strain analysis of rocks within the Ryoke metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, **35**, 34-44.
- Petford, N., Cruden, A.R., McCaffrey, K.J.W. and Vigneresse J.-L. (2000): Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, **408**, 669-673.
- Sakakibara, N. (1995): Structural evolution of multiple ductile shear zone system in the Ryoke belt, Kinki Province. *Journal of Science of the Hiroshima University, Ser. C*, **10**, 267-332.
- Sakurai, Y., Yoshida, H. and Hara, I. (1983): Intrusion mechanism of a granite batholith. *Journal of Science of the Hiroshima University, Ser. C*, **8**, 103-122.
- 島田耕史・高木秀雄・大澤英昭 (1998): 横ずれ圧縮場における地質構造発達様式: 紀伊半島東部, 領家帯南縁部のマイロナイト化と褶曲形成の時空関係. 地質学雑誌, **104**, 825-844. [Shimada, K., Takagi, H. and Osawa, H. (1998): *Journal of the Geological Society of Japan*, **104**, 825-844.]
- 諏訪兼位 (1973): 中央構造線に沿う変成岩類—領家及び三波川変成帯—. 杉山隆二編: 中央構造線. 東海大学出版会, 221-238. [Suwa, K. (1973): *Chuo Kozosen* edited by Sugiyama, R., Tokai University Press, 221-238.]
- Suzuki, K. and Adachi, M. (1998): Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, south-west Japan: Constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 23-38.
- Suzuki, K., Adachi, M. and Kajizuka, I. (1994): Electron microprobe observations of Pb diffusion in metamorphosed detrital monazites. *Earth and Planetary Science Letters*, **128**, 391-405.
- Tagawa, M., Nakakuki, T. and Tajima, F. (2007): Dynamic modeling of trench retreat driven by the slab interaction with the mantle transition zone. *Earth, Planets and Space*, **59**, 65-74.
- 田結庄良昭・飯泉 滋・加々美寛雄・端山好和 (1989): 近畿-瀬戸内領家帯の塩基性岩類の成因. 地球科学, **43**, 16-27. [Tainosho, Y., Iizumi, S., Kagami, H. and Hayama, Y. (1989): *Earth Science (Chikyu Kagaku)*, **43**, 16-27.]
- Taira, A., Saito, Y. and Hashimoto, M. (1983): The role of oblique subduction and strike-slip tectonics in the evolution of Japan. in *Geodynamics of the Western Pacific-Indonesian Region* edited by Hilde, T.W.C. and Uyeda, S., American Geophysical Union, Geodynamics Series, **11**, 303-316.
- 高木秀雄 (1997): 中部地方領家帯のマイロナイト化の時期. 月刊地球, **19**, 111-116. [Takagi, H. (1997): *Chikyu Monthly*, **19**, 111-116.]
- 高木秀雄 (1999): 分配テクトニクス: トランスプレッション場における走向移動とスラスト (褶曲) の運動論的分配. 構造地質, **43**, 21-32. [Takagi, H. (1999): *Structural Geology (Journal of the Tectonic Research Group of Japan)*, **43**, 21-32.]
- Takagi, T. (2004): Origin of magnetite- and ilmenite-series granitic rocks in the Japan arc. *American Journal of Science*, **304**, 169-202.
- 巽 好幸 (2003): 安山岩と大陸の起源—ローカルからグローバルへ—. 東京大学出版会. [Tatsumi, Y. (2003): *High-Mg Andesite Genesis, Continental Crust Formation and Mantle Evolution*. University of Tokyo Press.]
- Tatsumi, Y., Shinjoe, H., Ishizuka, H. and Sager, W.W. (1998): Geochemical evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, **26**, 151-154.
- Thorkelson, D.J. and Breitsprecher, K. (2005): Partial melting of slab window margins: Genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, **79**, 25-41.
- Tirone, M. and Ganguly, J. (2010): Garnet composi-

- tion as recorders of P-T-t history of metamorphic rocks. *Gondwana Research*, **18**, 138-146.
- Toriumi, M. (1985): Two types of ductile deformation/regional metamorphic belt. *Tectonophysics*, **113**, 307-326.
- Toriumi, M. and Kuwahara, H. (1988): Inhomogeneous progressive deformation during low P/T type Ryoke regional metamorphism in central Japan. *Lithos*, **21**, 109-116.
- Uyeda, S. and Miyashiro, A. (1974): Plate tectonics and the Japanese Islands: A synthesis. *Geological Society of America Bulletin*, **85**, 1159-1170.
- Wallis, S.R., Anczkiewicz, R., Endo, S., Aoya, M., Platt, J.P., Thirlwall, M. and Hirata, T. (2009): Plate movements, ductile deformation and geochronology of the Sanbagawa belt, SW Japan: Tectonic significance of 89-88 Ma Lu-Hf eclogite ages. *Journal of Metamorphic Geology*, **27**, 93-105.
- 山田直利 (2005): 濃飛流紋岩の形成史. 地団研専報, **53**, 173-183. [Yamada, N. (2005): *Monograph Association of Geological Collaboration Japan*, **53**, 173-183.]
- 山北 聡・大藤 茂 (2000): 中央構造線の後期白亜紀左横すべり変位量の推定とその西南日本の地帯配列における意味. 地団研専報, **49**, 93-104. [Yamakita, S. and Otoh, S. (2000): *Monograph Association of Geological Collaboration Japan*, **49**, 93-104.]
- Yuhara, M., Kagami, H. and Nagao, K. (2000): Geochronological characterization and petrogenesis of granitoids in the Ryoke belt, Southwest Japan Arc: Constraints from K-Ar, Rb-Sr and Sm-Nd systematics. *The Island Arc*, **9**, 64-80.

(2009年9月9日受付, 2011年2月21日受理)