

西南日本のジュラ紀付加体砂岩におけるジュラ紀中世の組成変化とその意義 Marked change in sandstone composition during the Middle Jurassic in Jurassic accretionary complexes of SW Japan, and geologic significance

Abstract

君波和雄* 木下生一* 今岡照喜*

Kazuo Kiminami*, Seiichi Kishita* and Teruyoshi Imaoka*

2009年2月12日受付.

2009年8月27日受理.

* 山口大学理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering,
Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi 753-8512, Japan

Corresponding author; K. Kiminami,
kimi@c-able.ne.jp

To clarify the signatures and provenance evolution of Jurassic accretionary complexes, we studied the petrographic features and bulk chemistry of sandstones in the Southern Chichibu Belt and northern margin of the Shimanto Belt, eastern Kyushu, and in the Tamba Belt (Kuga Group), eastern Yamaguchi Prefecture. The sandstones are classified as high-Ti and high-Zr types based on a Zr/Nb-Ti/Nb diagram. The high-Ti sandstones are characterized by relatively low SiO₂ contents, high contents of TiO₂, MgO, Na₂O, and V, and high concentrations of volcanic rock fragments. In contrast, the high-Zr sandstones are characterized by high SiO₂ contents, low contents of TiO₂, MgO, Na₂O, and V, and low concentrations of volcanic rock fragments. The high-Ti and high-Zr sandstones were derived mainly from a magmatic arc and an area dominated by crystalline rocks without volcanic rocks, respectively. The compositional change from high-Ti to high-Zr sandstones occurred during the Middle Jurassic. The crystallization ages of granitic rocks of the Korean, Liaodong, and Jiaodong peninsulas reveal a northwestward migration of the magmatic arc during the Early-Middle Jurassic and a magmatic hiatus during the Late Jurassic and early Early Cretaceous. The extinction of the magmatic arc and rapid unroofing of granitic and continental basement rocks upon the Korean Peninsula during the Late Jurassic and early Early Cretaceous could have produced the high-Zr sandstones. The inland migration of the magmatic arc and subsequent magmatic lull could be explained by a rapid shallowing of the subduction angle and the occurrence of flat-slab subduction, respectively. Flat-slab subduction developed in response to the subduction of a large, buoyant oceanic plateau during the Jurassic.

Keywords: Jurassic accretionary complex, sandstone composition, geochemistry, Chichibu Composite Belt, Tamba Belt, flat-slab subduction, magmatic arc

はじめに

西南日本のジュラ紀付加体砕屑岩については、砂岩のモード組成や全岩化学組成、砂岩中に含まれるざくろ石の化学組成やジルコン・モナザイトなどの放射年代、火成岩礫・変成岩礫の放射年代などの研究が多数行われており（例えば、Shibata and Adachi, 1972; Suzuki et al., 1991; Hidaka et al., 2002）、それらに基づく後背地の造構場や構成岩石などが議論されている。いくつかの地域における研究は、ジュラ紀古世から新世にかけて砂岩のモード組成が顕著に変化することを示している。楠・武蔵野（1989）や木村ほか（1989）によれば、近畿地方の丹波帯砂岩は、ジュラ紀古世から新世にかけて石英が増大し、火山岩岩片が減少する傾向を示す。類似の傾向は、九州東部の南部秩父帯でも報告されている（Sakai, 1997; 酒井, 1997）。また、酒井（1992）によれば、

関東山地、四国および九州東部の南部秩父帯のジュラ紀中世後期-新世の砂岩は、組成的によく類似しており、石英や長石類の結晶粒子に富み、岩片に乏しい。一般に付加体の背後には火山弧が発達するので、付加体砂岩の多くは火山岩岩片に富むことが期待される。そのため、沈み込み帯において広域かつ長期間にわたり火山岩岩片に乏しい砂岩が形成された場合には、何らかの特別な説明が必要である。

一方、西南日本のジュラ紀付加体砂岩の全岩化学組成も検討されているが、それらはおもに中-上部ジュラ系についてであり（君波ほか, 1992, 2000, 2008; 石濱・君波, 2000, Kiminami and Ishihama, 2003; 君波・戸田, 2007.）、下部ジュラ系砂岩の検討は極めて乏しい。これらの研究によれば、ジュラ紀中世-新世の砂岩の全岩化学組成は、内帯（丹波帯）および外帯（南部秩父帯）ともに SiO₂ に富み、TiO₂ や Fe₂O₃* (Fe₂O₃ に換算した全鉄)、MgO に乏しく、広域にわたって共

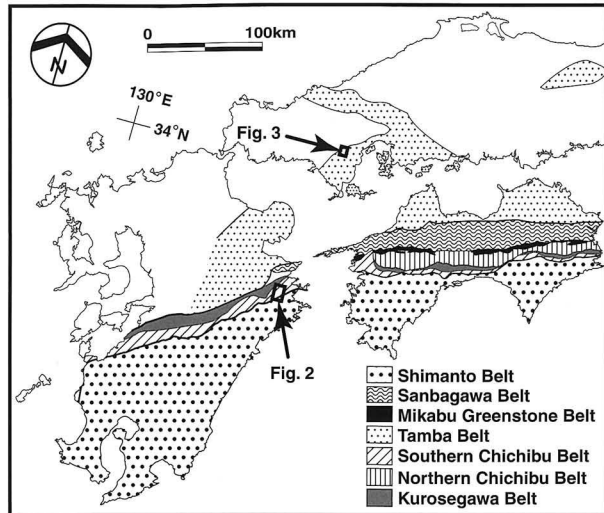


Fig. 1. Post-Triassic geologic divisions of western part of SW Japan and locations of study areas.

通した特徴を示す。このような化学組成の特徴は、砂岩の構成要素として、火山岩岩片に乏しいことと密接に関連していると推定される。ジュラ紀古世-新世の付加体砂岩の地球化学的な特徴を内帯と外帯にわたり系統的に検討した研究例はこれまで存在しない。

以上の研究背景と問題点を踏まえ、本研究では九州東部の南部秩父帯~四万十帯北縁部と山口県東部の丹波帯（玖珂層群）を例として（Fig. 1），ジュラ紀~白亜紀古世の砂岩について構成物の特徴，火山岩岩片の含有量および全岩化学組成を検討し，年代的な組成変化を明らかにするとともに，その原因となった収束域のテクトニクスを議論する。

地 質

砂岩組成を検討するにあたり，九州東部の臼杵市南部~佐伯市北部の南部秩父帯~四万十帯北縁部および山口県東部の丹波帯（玖珂層群）において，ルート沿いの地質調査と砂岩試料の採集を行った。それぞれの地域のユニット区分は，酒井ほか（1993）と Sakai（1997）および Takami and Itaya（1996）に従った（Figs. 2, 3）。両地域の地質に関する以下の記述は，今回の調査結果とこれらの報告に基づく。

1. 九州東部の南部秩父帯と四万十帯北縁部

九州東部の南部秩父帯~四万十帯北縁部の地質は，寺岡ほか（1990, 1992）や酒井ほか（1993），Sakai（1997）などにより詳細な報告が行われており，構造的な上位から南部秩父帯の鎮南山ユニット，奥川内ユニット，小園ユニット，彦ノ内ユニット，尺間山ユニット，床木ユニット，および四万十帯北帯の利根川ユニットに区分されている（Fig. 2）。以下に構造的な下位に向かって各ユニットの岩相的な特徴を述べる。

鎮南山ユニット 南部秩父帯の最上位をなす本ユニットは，泥岩，砂岩泥岩互層，チャート，石灰岩および緑色岩からおもに構成される。泥岩には一般に鱗片状劈開が発達している。

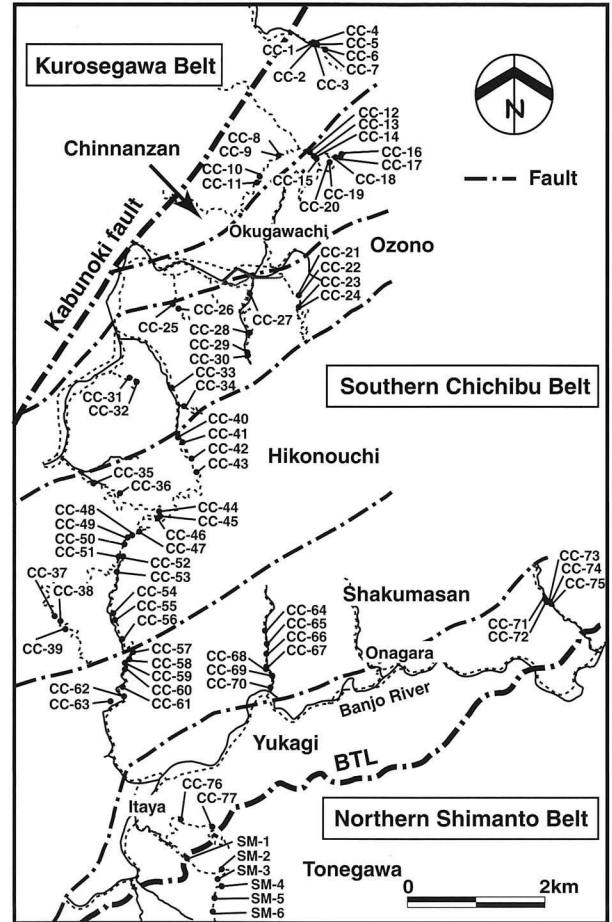


Fig. 2. Sample-locality map showing the division of tectonostratigraphic units in the Southern Chichibu Belt and northern margin of the Shimanto Belt, eastern Kyushu. Unit boundaries are from Sakai (1997). BTL: Butsuzo Tectonic Line.

泥岩中には砂岩のブロックやレンズをしばしば含む。砂岩泥岩互層は，砂岩優勢~泥岩優勢である。チャートは本ユニット分布域の北部に多く，緑色岩は南部に多い。一部の緑色岩には枕状構造が観察される。

奥川内ユニット 大きな石灰岩体の産出で特徴づけられ，砂岩優勢の砂岩泥岩互層や泥岩を伴う。砕屑岩は本ユニット分布域の北縁部におもに分布する。

小園ユニット 多くのチャートと砂岩優勢の砂岩泥岩互層からおもに構成され，泥岩，石灰岩および酸性凝灰岩を伴う。酸性凝灰岩は，本ユニット分布域の北縁部に観察され，灰緑色を呈する。

彦ノ内ユニット 塊状砂岩，砂岩泥岩互層，泥岩およびチャートから構成される。泥岩は，長径数 cm ~ 数 10 cm のレンズ状砂岩をしばしば含む。砂岩泥岩互層は，泥岩優勢~砂岩優勢であり，しばしば北上位の級化砂岩が観察される。本ユニット南縁部には厚さ 250 m の泥岩が観察される。

尺間山ユニット 塊状砂岩や砂岩優勢互層と層状チャートとの繰り返しによって特徴づけられ，まれに緑色岩を含む。砂岩優勢互層は一般に整然と成層している。砂岩は灰白色を呈

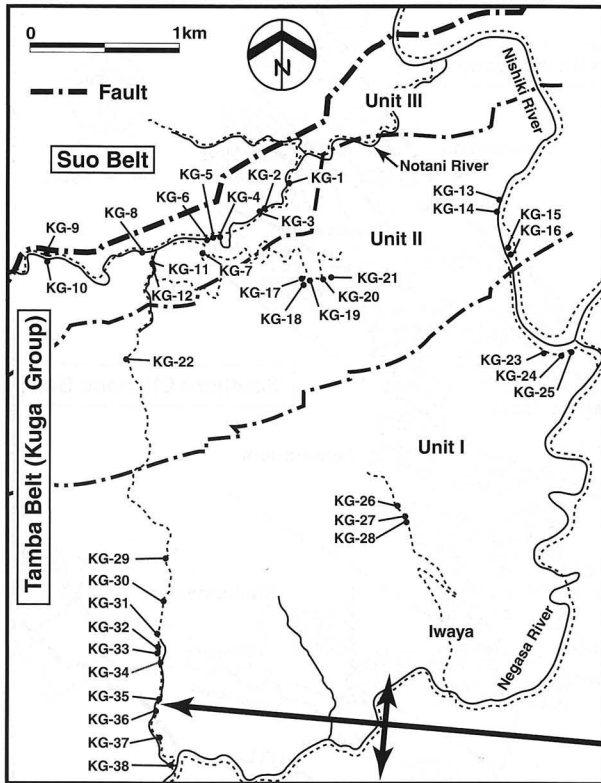


Fig. 3. Sample-locality map showing the division of tectonostratigraphic units in the Tamba Belt (Kuga Group), Yamaguchi Prefecture. Unit boundaries are from Takami and Itaya (1996).

し、粗粒～中粒であり、石英粒が目立つ。北上位を示す級化砂岩が場所により観察される。

床木ユニット 南部秩父帯の南縁部を構成する。鱗片状劈開の発達した泥岩、石灰岩および緑色岩によって特徴づけられ、チャート、塊状砂岩、砂岩泥岩互層および酸性凝灰岩をブロック状もしくは層状に含む。石灰岩と緑色岩はブロックもしくはスリパーとして産し、厚いものは数 10 m に達する。塊状砂岩は多くが厚さ数 m 以下であり、ブロック状～レンズ状の産状を示す。石灰岩と緑色岩は、本ユニット分布域の北部に多く産出する。

利根川ユニット 四万十帯北帯の北縁部に位置する。砂岩泥岩互層からおもに構成され、塊状砂岩や泥岩を伴う。互層を構成する砂岩は、一般に整然としており、露頭中でよく連続する。級化砂岩の多くは北上位を示す。

2. 山口県東部の丹波帯（玖珂層群）

山口県東部には、丹波帯の玖珂層群が分布する。Takami and Itaya (1996) は岩相や微化石年代、緑色岩の変成鉱物組合せ、泥質岩の K-Ar 年代などに基づき本層群を構造的上位からユニット III、II および I に区分した (Fig. 3)。

ユニット III 西部は、径数 cm ～ 1 m の垂円礫もしくはレンズ状の砂岩やチャートを含む泥岩からおもに構成され、砂岩や緑色岩を伴う。泥岩には鱗片状もしくはスレート状の劈開が発達する。礫もしくはレンズ状の砂岩はしばしば多くの方解石脈を伴う。東部は層状チャートと少量の泥岩とからなる。

Tectonic Division		Outer Zone		Inner Zone
		Southern Chichibu Belt		Tamba Belt (Kuga Group)
Age				
Cretaceous	Early	Albian		
		Aptian		
		Barremian		
	Middle	Hauterivian		
		Valanginian		
		Berriasian		
Jurassic	Late	Tithonian		
		Kimmeridgian		
		Oxfordian		
	Middle	Callovian		
		Bathonian		
		Bajocian		
		Aalenian		
	Early	Toarcian		
		Pliensbachian		
		Sinemurian		
Hettangian				

Fig. 4. Depositional ages of the Southern Chichibu Belt (Sakai, 1997) and the Tamba Belt (Kuga Group) (Takami et al., 1993; Takami and Itaya, 1996).

ユニット II レンズ状の砂岩を含む泥岩、チャート、砂岩泥岩互層および緑色岩からなる。泥岩の劈開は、ユニット III に比べて弱い。地域によっては砂岩優勢の砂岩泥岩互層が比較的厚く分布する。

ユニット I 本ユニットは、スレート劈開が発達した泥岩、砂岩泥岩互層、塊状砂岩およびチャートからおもに構成され、レンズ状の石灰岩および緑色岩を少量含む。泥岩はしばしば葉理状の砂岩を挟み、縞状を呈する。豊原 (1976) および東元ほか (1986) は、本層中に西北西にプランジしたアンチフォームを報告している。調査域の地層の層理面の走向・傾斜からこのアンチフォームは岩屋の南側を通ると推定される。

3. 九州東部の南部秩父帯と山口県東部の丹波帯（玖珂層群）の堆積年代

九州東部の本調査域付近の南部秩父帯においては、石灰岩やチャート、泥岩から化石が報告されている。鎮南山ユニットおよび奥川内ユニットの石灰岩からは、神戸・寺岡 (1968) や寺岡ほか (1992) によりペルム紀のフズリナが、Murata (1981) や寺岡ほか (1992) によりペルム紀のコノドントが

報告されている。また、床木ユニットの石灰岩からはトリアス紀新世のコノドント(寺岡ほか, 1990)が得られている。

チャートからは、小園ユニット、彦ノ内ユニットおよび尺間山ユニットにおいてペルム紀やトリアス紀のコノドントが得られている(Murata, 1981; 寺岡ほか, 1990)。チャートの放散虫年代は、ユニットによって上限の年代が若干異なるが、トリアス紀～ジュラ紀古世にわたっている(寺岡ほか, 1992; Sakai, 1997)。

泥岩からの放散虫化石の産出は、Sakai (1997) によって過去の研究報告もふまえてまとめられている。これに従えば、鎮南山ユニットと奥川内ユニットがジュラ紀古世、小園ユニットと彦ノ内ユニットがジュラ紀中世、尺間山ユニットがジュラ紀中世後期～新世中期、床木ユニットが白亜紀古世であり(Fig. 4)、構造的な上位から下位に向かって大局的に年代が若くなる。

一方、本調査域周辺の玖珂層群においては、チャートと珪質粘土岩からコノドントと放散虫化石が、珪質泥岩と泥岩から放散虫化石が得られており、これらについてはTakami and Itaya (1996) によってまとめられている。ユニットIIのチャートからはペルム紀中世とトリアス紀中世のコノドントが、ユニットIの珪質粘土岩からはトリアス紀古世のコノドントが報告されている(豊原, 1976; 高見ほか, 1990)。また、チャートと珪質泥岩から得られている放散虫化石は、石炭紀新世～ジュラ紀古世前期にわたる(Takami and Itaya, 1996)。

玖珂層群の一部がかなり強く変成・変形を受けていることもあり、泥岩からの放散虫化石の報告は比較的少ない。Takami and Itaya (1996) は、ユニットIIIの泥岩からジュラ紀古世と推定される放散虫化石を、ユニットIIの泥岩からジュラ紀古世～中世初頭の放散虫化石を、ユニットIの泥岩からジュラ紀中世の放散虫化石を報告している。しかし、Takami and Itaya (1996) によるユニットIからの放散虫化石の報告は、同ユニット北部からであり、本研究で検討された砂岩の多くはより南側の同ユニットから採集された。高見ほか(1993)は本調査域の約10 km 東方のユニットIの方散虫化石を検討しており、その結果に基づけば同ユニットの泥岩の堆積年代は、ジュラ紀中世後期～新世中期である。これらの検討結果からここではユニットIの堆積年代をジュラ紀中世～新世中期としておく(Fig. 4)。

砂岩の岩石学的な特徴

砂岩の岩石学的特徴を明らかにするため、各ユニットの下部から上部にいたるいろいろな層準の中粒砂岩の薄片を作成した。九州東部の南部秩父帯奥川内ユニットでは厚い石灰岩が、玖珂層群ユニットIでは厚い泥岩が産出するため、両ユニットにおいて砂岩薄片を作成できない層準がかなりの厚さにわたった。作成した砂岩薄片のうち、変成・変質や変形が弱く、結晶粒子や岩片、基質などの多くが認定できるものについて、同源的な泥岩粒子をのぞいて300点のポイントカウンティングを行い、火山岩岩片量を測定した。測定にあたっては、火山岩岩片を大きく2つのタイプに分類し、それぞれ

を便宜的に流紋岩岩片および安山岩岩片とした。識別困難な火山岩岩片については、その他の火山岩岩片とした。測定結果をTable 1に試料の採集地点をFig. 2とFig. 3に示した。各火山岩岩片の特徴や判断基準は、次の通りである。

流紋岩岩片 珪長質火山岩に見られる隠微晶質～微晶質な石基を有するか、球果組織を示す。斑晶として石英や斜長石を含む場合もある。このタイプの火山岩岩片は、脱ハリ作用を被った流紋岩質火山岩、珪長岩、あるいは球果流紋岩に由来すると考えられる。

安山岩岩片 斜長石のマイクロライトとガラスからおもに構成され、ガラス基流晶質組織やインターサタル組織、毛織状組織、ピロタキシティック組織を示す。そのほか、斜長石が集斑状組織を呈す火山岩岩片も認められる。斜長石にはしばしば急冷によって中空となったもの(hollow plagioclase)が認められる。これらの火山岩岩片は、おもに安山岩～玄武岩組成のものと考えられるが、ここでは便宜的に安山岩岩片とする。

その他の火山岩岩片 不透明鉱物や変質鉱物などに覆われて識別が困難な火山岩岩片である。量的にはあまり多くない。

1. 九州東部の南部秩父帯～四万十帯北縁部

以下に構造的な下位に向かって各ユニットの砂岩の岩石学的な特徴を説明する。また、Fig. 5に調査ルートの岩相と構造層序に基づいて作成した模式柱状図および全火山岩岩片量(T-VF)と安山岩岩片量(A-VF)の層序的な変化を示した。

鎮南山ユニット、奥川内ユニットおよび小園ユニットの砂岩は、全体的に火山岩岩片に富み(Fig. 6.A)、それぞれの平均含有量は11.0、20.2および12.1%である。鎮南山ユニットと奥川内ユニットでは火山岩岩片に対する安山岩岩片の割合が小園ユニットに比べてより高い。奥川内ユニットではごくまれに片麻岩の岩片が認められる。石英はしばしばサブグレイン化したり、波動消光を示す。カリ長石は、しばしばパーサイトや微斜長石構造を示す。これらの3ユニットの砂岩は、黒雲母、緑泥石および白雲母を比較的多く含む。また、特筆すべきは碎屑性の緑れん石やチタン石が少量ながら普遍的に認められることである。見かけの含有量は緑れん石の方がチタン石よりも多い。電気石が認められることがある。

彦ノ内ユニットでは中・上部(試料番号CC-35～CC-53)と下部(CC-54～CC-56)とは砂岩の組成的特徴が若干異なる。下部の砂岩は尺間山ユニットの砂岩と基本的な特徴が類似する。そこで、ここでは彦ノ内ユニット中・上部の砂岩と同ユニット下部・尺間山ユニットの砂岩とに分けて説明する。中・上部の砂岩は、基本的な特徴が鎮南山ユニット～小園ユニットの砂岩に類似するが、火山岩岩片含有量(av.=5.4%)がより少ない。火山岩岩片としては、流紋岩岩片が卓越している。一方、彦ノ内ユニット下部の砂岩と尺間山ユニットの砂岩は、石英と長石類からおもに構成され(Fig. 6.B)、火山岩岩片に乏しい(av.=2.5%)。石英はしばしばサブグレイン化したり、波動消光を示す。鎮南山ユニット～小園ユニットの砂岩に比べ、長石類にはかなり多くのカリ長石を含む。カリ長石は、しばしばパーサイトや微斜長石構造を示す。斜長石は、針状の燐灰石をしばしば包有する。

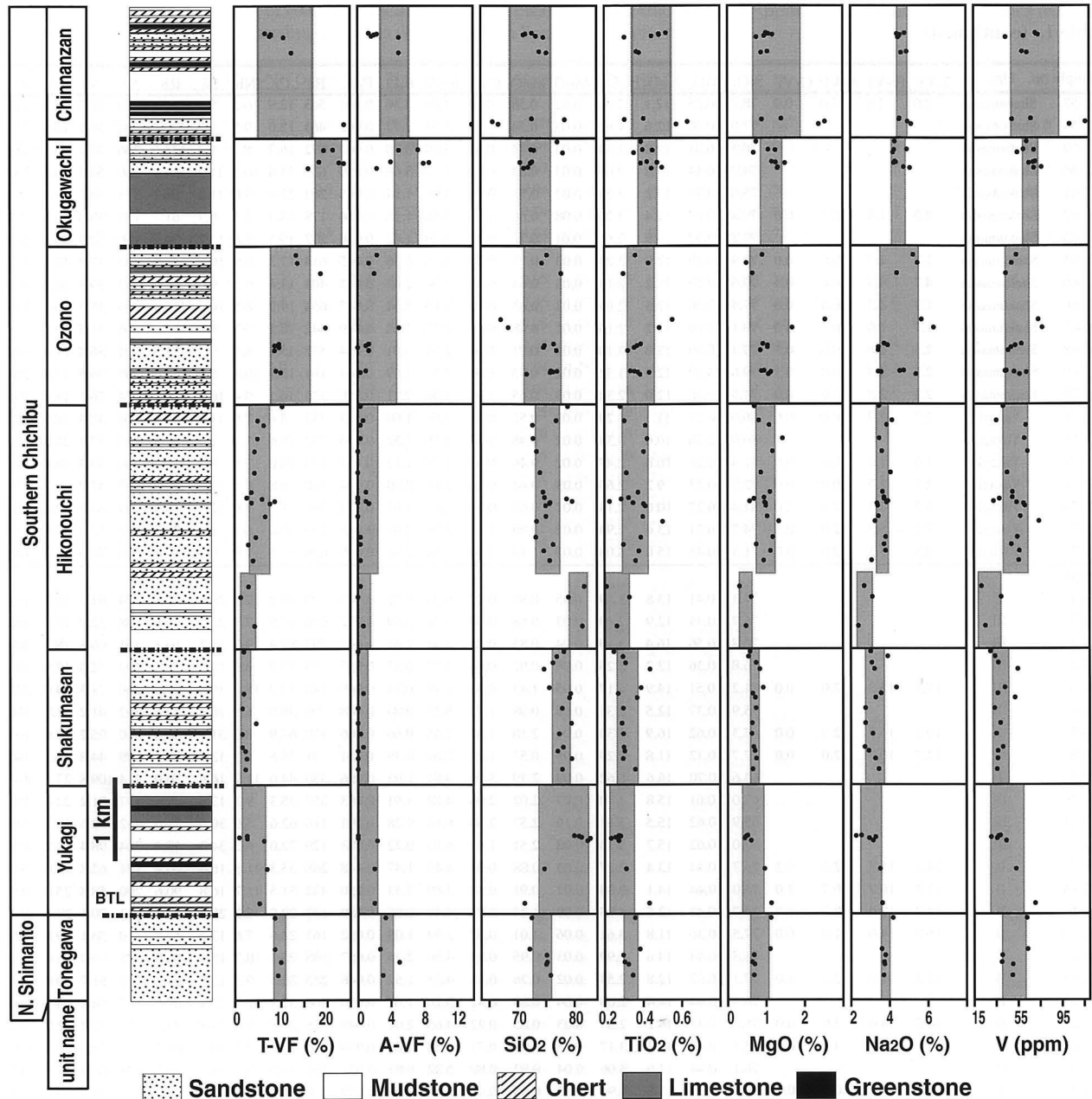


Fig. 5. Schematic stratigraphic column and variations in T-VF (total volcanic rock fragments), A-VF (andesitic volcanic rock fragments), SiO_2 , TiO_2 , MgO , Na_2O and V for sandstones from the Southern Chichibu Belt and northern margin of the Shimanto Belt (Tonegawa unit), eastern Kyushu. The column is produced in consideration of depositional ages and juxtapositional relationships of the tectonostratigraphic units. Gray rectangles in the variation diagrams are $\pm 1\sigma$.

ミルメカイト組織が認められることがある。石英と長石類の組み合わせからなる深成岩岩片もかなり多く観察される。スレートや片岩が少量ながら普遍的に認められる。また、碎屑性の白雲母や黒雲母（一部緑泥石化）がかなり多く観察される。特筆すべきは、他形のざくろ石や緑れん石、円磨したジルコン、半自形～他形の電気石、不透明鉱物および自形の燐灰石が少量ながら普遍的に認められることである。

床木ユニットの砂岩は、上部（北東部）の4試料（CC-71, CC-73～CC-75）においては多くのチャート岩片を特徴的に含み、1試料（CC-75）をのぞいては火山岩岩片に乏

しい。多くのチャート岩片を含む点をのぞけば基本的に尺間山ユニットの砂岩に類似する。一方、下部（南西部）の2試料（CC-76とCC-77）は、石英や長石類を主体とするが、火山岩岩片を比較的多く含み（7.7%と5.3%）、チャート岩片をほとんど伴わない。その岩石学的な特徴は南側に隣接した四万十帯利根川ユニットの砂岩に類似する。

利根川ユニットの砂岩は、石英、長石類および火山岩岩片からおもに構成される。火山岩岩片の平均含有量は9.2%であり、そのうち安山岩岩片が約4割を占める。球果流紋岩に富む試料も見られる。石英はしばしばサブグレイン化したり、

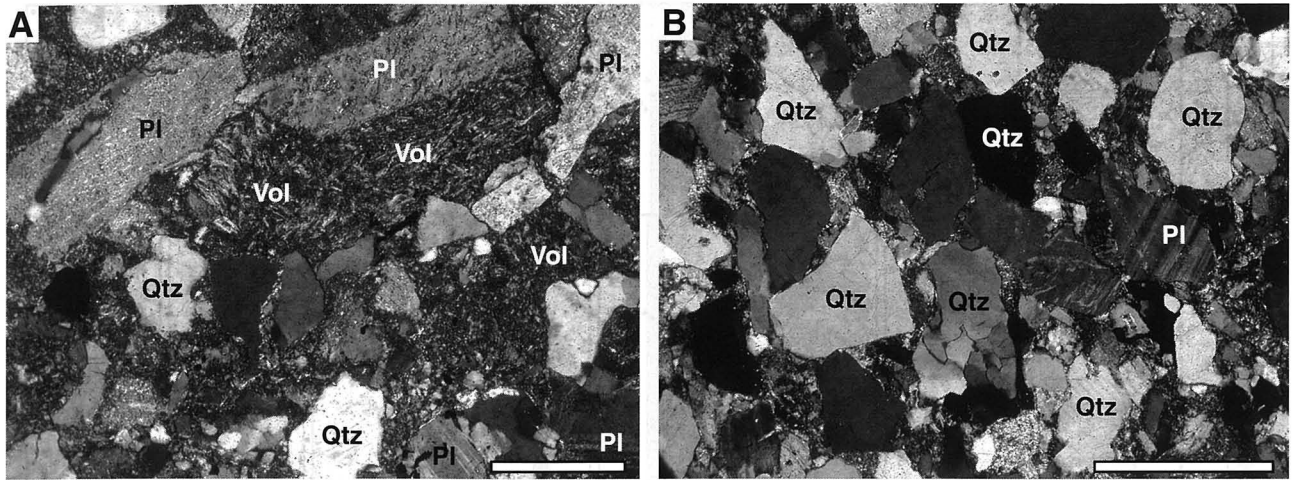


Fig. 6. Photomicrographs (crossed nicol) of sandstones from the Okugawachi (A) and Shakumasan (B) units from the Southern Chichibu Belt, eastern Kyushu. Qtz: quartz, Pl: plagioclase and Vol: volcanic rock fragment. Scale bar=0.5 mm

波動消光を示す。カリ長石は、しばしばパーサイトや微斜長石構造を示す。斜長石はセリサイト化・緑れん石化していることが多い。ミルメカイト組織が認められることがある。黒雲母および少量の緑泥石や白雲母とともに、碎屑粒子として緑れん石とチタン石を普遍的に含む。ごく微量ながら褐れん石やざくろ石が見られる。

2. 山口県東部の丹波帯 (玖珂層群)

ユニットⅢの砂岩は、玖珂層群中で最も強く変形・変成を受けており、多くの砂岩において結晶粒子や岩片が塑性変形して引き伸ばされている。このため、鏡下での岩片の認定が困難な砂岩が多い。長石類の多くはセリサイト化している。ユニットⅡの砂岩においては、結晶粒子の周りにしばしばプレッシャーシャドーやプレッシャーフリッジが認められるが、含まれる岩片の組織は基本的に保存されている。ユニットⅢとⅡの砂岩は、石英、長石類および火山岩岩片からおもに構成される。火山岩岩片の含有量は、ユニットⅢの砂岩が12.7-19.3% (av.=16.4%)、ユニットⅡの砂岩が12.3-17.7% (av.=14.9%)である (Fig. 7)。ユニットⅢの砂岩は、まれに片麻岩の岩片を含む。火山岩岩片中では流紋岩岩片が安山岩岩片よりも卓越する。また、碎屑性の緑れん石やチタン石を普遍的に含む。

ユニットⅠの砂岩は、石英と長石類からおもに構成され、岩片に乏しい。花崗岩岩片が普遍的に認められ、少量の火山岩岩片 (0.7-3.0%; av.=1.8%)、および準片岩～片岩や片麻岩の岩片が少量ながら観察される。石英はしばしばサブグレイン化したり、波動消光を示す。カリ長石は、しばしばパーサイトや微斜長石構造を示す。斜長石はアルバイト双晶をなすものが多く、しばしば針状の燐灰石を包有している。また、比較的多くの白雲母や黒雲母とともに、ざくろ石やジルコン、電気石、チタン石、褐れん石、不透明鉱物を少量含む。

砂岩の全岩化学組成

今回、全岩化学分析を行った砂岩試料は、九州東部の南部

秩父帯～四万十帯北縁部から83個、山口県東部の丹波帯 (玖珂層群) から38個である。それぞれの試料採集地点を Fig. 2 と Fig. 3 に示した。分析にあたっては、山崎ほか (1999) に従い、粉末試料を四ホウ酸リチウムで5倍希釈してガラスビードを作成し、山口大学総合科学実験センターの蛍光 X 線分析装置 (理学電気工業株式会社製, RIX3000) を使用して、全岩化学組成 (主成分元素10種、微量元素10種) を測定した。Table 1 に分析値 (無水状態で100%に規格化した値) を示す。

1. 九州東部の南部秩父帯～四万十帯北縁部

鎮南山ユニット、奥川内ユニットおよび小園ユニットの SiO_2 含有量平均値は、それぞれ72.4%、73.3%および74.5%であり、南部秩父帯では低い値を示す (Fig. 5)。また、 TiO_2 、 MgO 、 Na_2O 、 V 含有量が高い。鎮南山ユニットと小園ユニットの SiO_2 、 TiO_2 および MgO 、小園ユニットの Na_2O 、鎮南山ユニットの V の含有量は、ばらつきが大きい。彦ノ内ユニット中・上部の砂岩 (資料番号 CC-35～CC-53) は、鎮南山ユニット～小園ユニットの砂岩に比べて SiO_2 含有量がより高く (av.=75.3%)、 TiO_2 や MgO 、 Na_2O 、 V の含有量がより低い。尺間山ユニットと彦ノ内ユニット下部 (CC-54～CC-56) の砂岩は、 SiO_2 含有量が高く (av.=78.3%)、 TiO_2 や MgO 、 Na_2O 、 V の含有量が低い。

床木ユニットの北部の砂岩 (CC-71～CC-75) は、 SiO_2 に最も富み (av.=81.5%)、 TiO_2 や MgO 、 Na_2O などに乏しい。床木ユニットの南部の砂岩2試料 (CC-76 と CC-77) は、 SiO_2 、 TiO_2 、 MgO 、 Na_2O 、 V などの含有量が下位の利根川ユニットの砂岩と類似する。四万十帯北縁部の利根川ユニットは、 SiO_2 含有量が比較的 low (av.=74.3%)、 MgO や Na_2O 、 V などに比較的富む (Fig. 5)。

2. 山口県東部の丹波帯 (玖珂層群)

ユニットⅢとユニットⅡの砂岩は、 SiO_2 含有量が低く (それぞれ av.=71.1, 75.4%)、 TiO_2 や MgO 、 Na_2O 、 V の含有量が高い (Fig. 7)。ユニットⅢの砂岩は、Fig. 7 に示したす

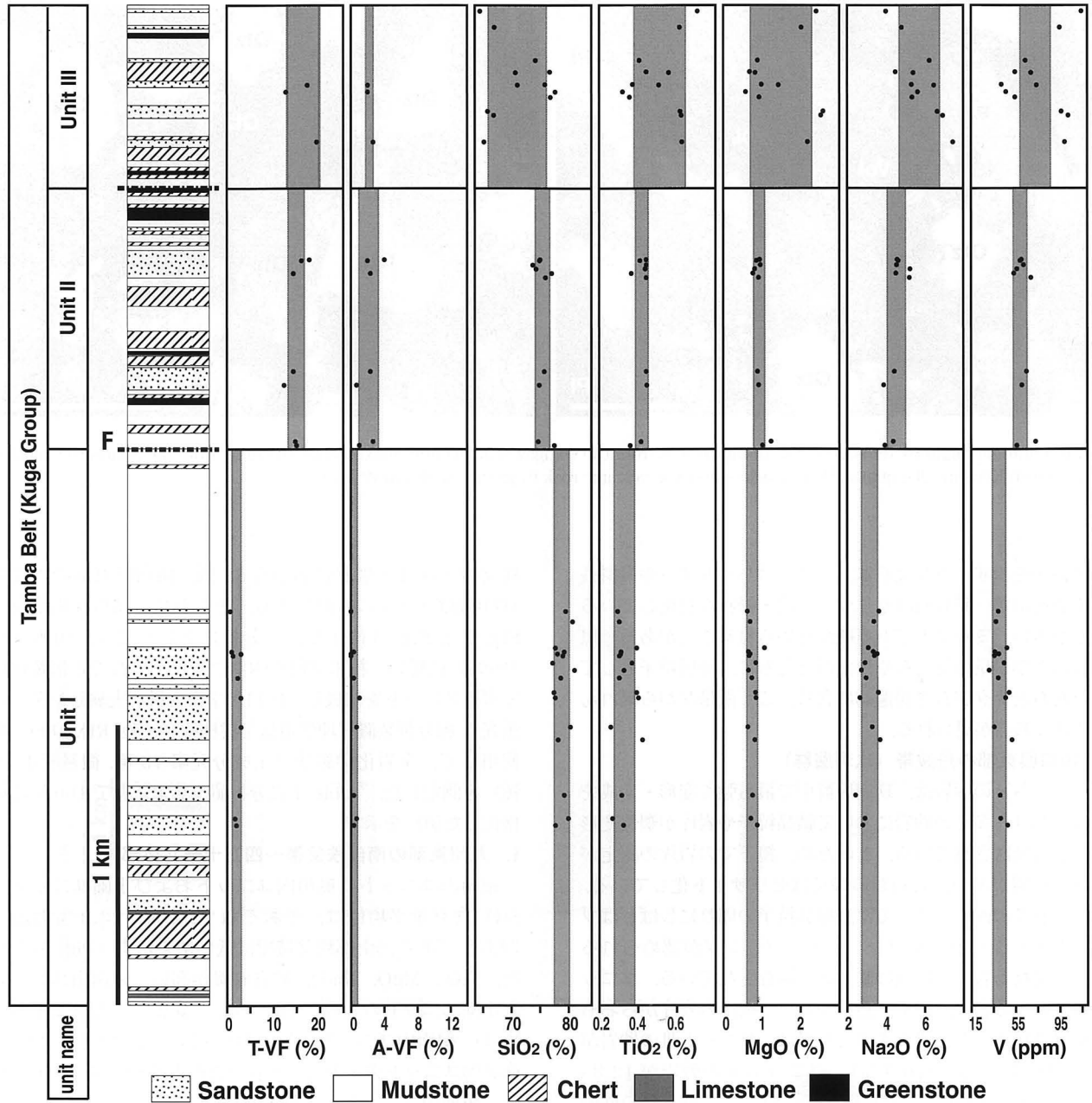


Fig. 7. Schematic stratigraphic column and variations in T-VF (total volcanic rock fragments), A-VF (andesitic volcanic rock fragments), SiO_2 , TiO_2 , MgO , Na_2O and V for sandstones from the Tamba Belt (Kuga Group), Yamaguchi Prefecture. The column is produced in consideration of depositional ages and juxtapositional relationships of the tectonostratigraphic units. Gray rectangles in the variation diagrams are $\pm 1\sigma$. F: fault.

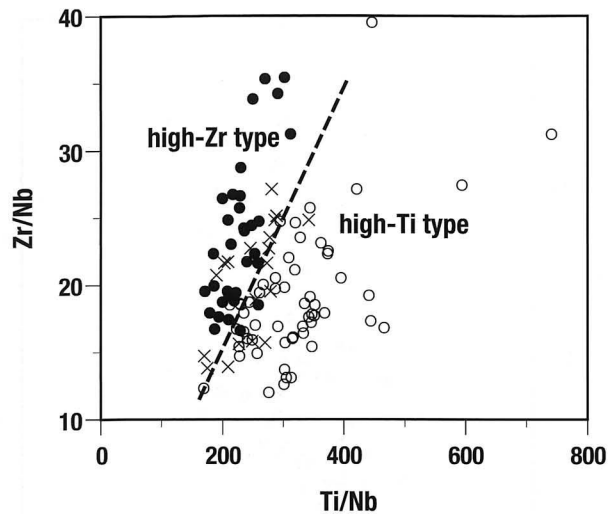
すべての元素において含有量のバラツキが大きい。ユニット I の砂岩は、 SiO_2 含有量が大きく (av.=78.9%), TiO_2 や MgO , Na_2O , V の含有量が低い。ユニット II とユニット I との間には、各元素において含有量に相違が認められる。しかし、ユニット I の構造的上部を構成する厚い泥岩から分析試料が得られていないため、組成的な漸移部の有無は不明である。

3. HFS 元素比を用いた砂岩の分類

分析に用いた砂岩にも顕微鏡スケールの石英脈がしばしば含まれる。また、二次的に形成された方解石は、ごく普通に認められる。南部秩父帯と玖珂層群の砂岩を堆積年代によ

て分別するのにあたり、これらの二次的に形成された鉱物の影響や変質に伴う元素移動の影響をより小さく抑えるために HFS 元素 (high field-strength elements) 比を用いた。

南部秩父帯床木ユニットの砂岩は、下部と上部で組成的な特徴が異なる。下部の砂岩は四万十帯利根川ユニットの砂岩と組成的な共通性が高く、上部の砂岩は多くのチャート岩片を含む点でほかのユニットの砂岩と特徴を異にする。そこで、床木ユニットをのぞいて、HFS 元素比のいくつかの組み合わせについて検討した結果、 Zr/Nb-Ti/Nb 相関図上で砂岩を年代的にうまく分別できることが明らかになった (Fig. 8)。



- Chinnanzan, Okugawachi and Ozono Units and Units III/II
- × middle and upper parts of Hikonouchi Unit
- lower part of Hikonouchi and Shakumasan Units and Unit I

Fig. 8. Zr/Nb versus Ti/Nb diagram for sandstones from the Southern Chichibu Belt and the Tamba Belt (Kuga Group).

南部秩父帯の鎮南山・奥川内・小園ユニットおよび玖珂層群のユニットⅢ・Ⅱの砂岩は、共通した岩石学的・地球化学的特徴を示し、その主要部分は下中部ジュラ系と推定される (Fig. 4)。また、南部秩父帯の彦ノ内ユニット下部と尺間山ユニットおよび玖珂層群のユニットⅠの砂岩は、共通した岩石学的・地球化学的特徴を示し、その主要部分は中上部ジュラ系であると推定される (Fig. 4)。これらの2つのグループの砂岩は、Zr/Nb-Ti/Nb 図上でわずかな例外をのぞいて分別される。そこで、図中の破線を境にしてより大きな Ti/Nb 値を示す砂岩を高 Ti 型 (high-Ti type)、より小さな Ti/Nb 値を示す砂岩を高 Zr 型 (high-Zr type) とする。一方、火山岩岩片の含有量や全岩化学組成が中間的な特徴を示す彦ノ内ユニット中・上部の砂岩は、Zr/Nb-Ti/Nb 図上で高 Ti 型と高 Zr 型の両方にプロットされる。

考 察

1. 砂岩の年代的な組成変化

九州東部の床木ユニットをのぞく南部秩父帯と山口県東部の丹波帯 (玖珂層群) の砂岩は、Zr/Nb-Ti/Nb 図上において、高 Ti 型と高 Zr 型に区分される。Zr は苦鉄質マグマに対しては典型的な不適合元素であるので、マンタルの鉱物には容易に入らず、花崗岩中のジルコンなど分化の末期生成物に含まれる。一方で Ti はチタン石、イルメナイト、ルチルなどの副成分鉱物や輝石、角閃石、黒雲母などに入る。既述のように高 Ti 型の砂岩ではしばしばチタン石が、高 Zr 型の砂岩ではジルコンが含まれる。高 Ti 型の砂岩は高 Zr 型の砂岩に比べて Ti/Zr 値が高い傾向にあるが、Nb 含有量は両タイプの砂岩であまり変わらない。このため、Zr/Nb-Ti/Nb 図上で両タイプの砂岩は、異なる領域に分かれてプロットされる

ものと思われる。源岩の副成分鉱物の違いが砂岩の重鉱物組成の違いとなり、両タイプにおける Zr/Nb-Ti/Nb 図上での相違を生じたものと考えられる。

高 Ti 型の砂岩は南部秩父帯の鎮南山・奥川内・小園ユニットおよび玖珂層群のユニットⅢ・Ⅱを、高 Zr 型の砂岩は南部秩父帯の彦ノ内ユニット下部と尺間山ユニットおよび玖珂層群のユニットⅠを構成する。彦ノ内ユニット中・上部の砂岩は高 Ti 型と高 Zr 型の両方を含む。高 Ti 型の砂岩は、SiO₂ に乏しく、火山岩岩片や苦鉄質の火成岩により多く含まれる TiO₂、MgO、Na₂O、V などの元素に富む。それに対して、高 Zr 型の砂岩は、SiO₂ に富み、火山岩岩片や TiO₂、MgO、Na₂O、V に乏しい。火山岩岩片含有量と SiO₂、TiO₂ 含有量との相関は、火山岩岩片が増えると SiO₂ が減少し、TiO₂ が増加することを示している (Fig. 9)。このように全岩化学組成は、火山岩岩片の量に強く規制されている。また、高 Ti 型の砂岩から構成されるいくつかのユニットに関しては、組成的なバラツキが大きい。その原因の一つに含まれる火山岩のタイプの違いが考えられる。高 Ti 型の砂岩における安山岩岩片/流紋岩岩片と SiO₂ との相関を示した Fig. 10 は、安山岩岩片量が相対的に増えると SiO₂ が減少する傾向 (相関係数 = -0.44) にあることを示している。少なくとも一部の元素の含有量は、含まれる火山岩のタイプに影響を受けていると考えられる。

九州東部の南部秩父帯における高 Ti 型の砂岩から高 Zr 型の砂岩への移行は、両者が混在する彦ノ内ユニット中・上部の砂岩の堆積時に起きている。Sakai (1997) によれば、彦ノ内ユニットの堆積年代はジュラ紀中世である。すなわち、高 Ti 型から高 Zr 型への組成的な移行は、南部秩父帯ではジュラ紀中世のある時期に行われ、その変化は漸移的であったと推定される。一方、玖珂層群では高 Ti 型から高 Zr 型への漸移を示す層準は確認されない。高 Ti 型と高 Zr 型との境界は、ユニットⅡとユニットⅠとの境界、もしくはユニットⅠ上部の厚い泥岩中にあると推定される。九州東部に認められる高 Ti 型と高 Zr 型との漸移的な層準が玖珂層群で認められない原因は不明であるが、次のようないくつかの可能性が考えられる: 1) 漸移部がもともと存在したが、現在は断層に伴う地層の欠損などで失われている、2) 砂岩試料が得られていないユニットⅠ上部の厚い泥岩の堆積時に漸移的な変化があった、3) 高 Ti 型から高 Zr 型への変化が非常に急激であった。ユニットⅢ、ⅡおよびⅠの堆積年代は、それぞれジュラ紀古世、ジュラ紀古世-中世初頭およびジュラ紀中世-新世中期である (Fig. 4)。これらのデータを考慮すると玖珂層群における高 Ti 型砂岩から高 Zr 型砂岩への移行は、ジュラ紀中世に行われたと考えられる。

床木ユニットの堆積年代は、Sakai (1997) により放散虫化石から白亜紀古世とされた。本ユニットは、四国の三宝山ユニットに対比されており (松岡ほか, 1998; 尾上ほか, 2004)、松岡ほか (1998) はその堆積年代をジュラ紀新世末~白亜紀古世初期と推定している。床木ユニット上部の砂岩は、かなりの量のチャート岩片を含む点をのぞけば、尺間山ユニットの砂岩に類似している。一方、下部の砂岩は、火山

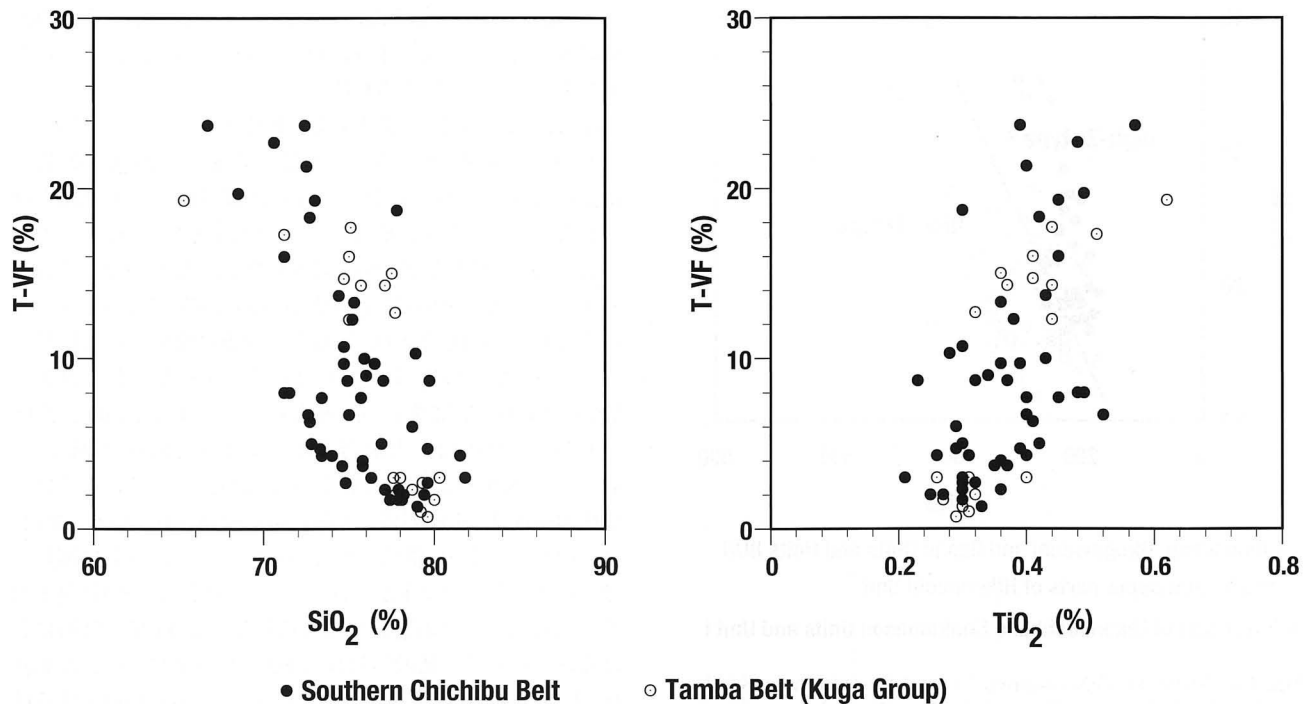


Fig. 9. T-VF (total volcanic rock fragments) versus SiO_2 and TiO_2 diagrams for the sandstones from the Southern Chichibu Belt and the Tamba Belt (Kuga Group).

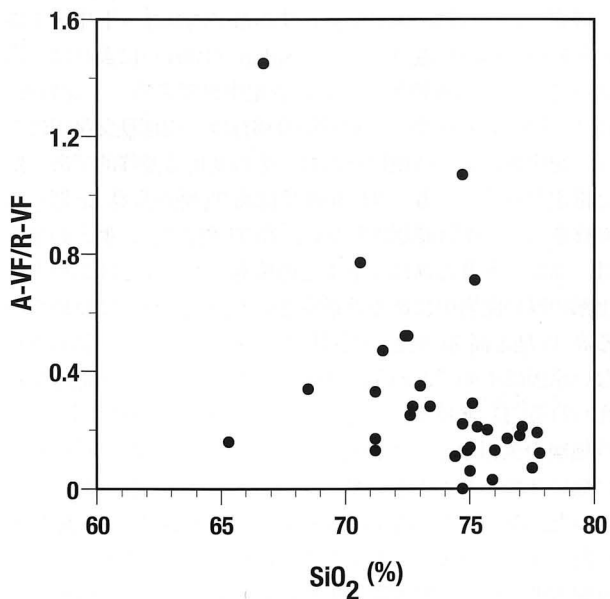


Fig. 10. A-VF (andesitic volcanic rock fragments)/R-VF (rhyolitic volcanic rock fragments) versus SiO_2 diagram for high-Ti type sandstones from the Southern Chichibu Belt and the Tamba Belt (Kuga Group).

岩岩片の含有量や全岩化学組成の特徴が四万十帯利根川ユニットの砂岩と類似している。この事実は、床木ユニットの堆積時に火山活動をほとんど欠いた後背地から活発な火山活動があった後背地へと変化したことを示している。酒井(1999)は、九州や関東山地の南部秩父帯において、白亜紀古世の砂

岩がジュラ紀新世の砂岩に比べて火山岩岩片に富むことを指摘している。Sakai (1997)により白亜紀古世の放射虫化石群集が抽出された試料の採集地点は、火山岩岩片に富む砂岩が得られた地点とほぼ同じである。このことは、白亜紀古世のある時期に後背地で活発な火山活動が開始したことを示唆している。

付加体を構成する碎屑岩の後背地は、一般的には火成弧である。そのため、付加体中の砂岩の多くは高Ti型砂岩のように多くの火山岩岩片を含む。しかし、ジュラ紀付加体を構成する高Zr型砂岩は火山岩岩片に極めて乏しく、結晶粒子に富むことから、花崗岩類や片麻岩、片岩などの結晶質岩からおもに供給されたと推定される。付加が進行する環境でこのような後背地からの供給が少なくともジュラ紀新世から白亜紀初期にわたり継続したことに關しては、何らかの特殊な地質的環境を考慮する必要があるだろう。

2. 西南日本内帯—外帯のジュラ紀付加体碎屑岩の供給源に関する諸見解

(1) 碎屑物供給の原因や砂岩組成の変化要因に関する研究
ジュラ紀付加体を構成する多量の碎屑岩の起源を南中国地塊と北中国地塊との衝突に求める見解がある (Taira and Tashiro, 1987; 磯崎・丸山, 1991; Sakai, 1997; 酒井, 1997; 竹内, 2000)。南中国地塊と北中国地塊の衝突帯が大別 (Dabie) 山地から山東半島の蘇魯 (Sulu) 地域に続くことに關しては、ほぼ意見の一致をみている。しかし、その東方延長に關しては諸説があり (Chwae, 1998; Ishiwatari and Tsujimori, 2003; Kim et al., 2003; Oh and Kusky, 2007; Zhai et al., 2007; Cho et al., 2008; Kwon et al., 2009)、見解が一致

していない。一方、衝突の年代に関しては、衝突に伴う超高压変成作用やそれに関連した火成岩類の貫入の年代からおおよそ 250–220 Ma (トリアス紀古世–新世初期) (Hacker et al., 1998, 2006; Wang et al., 1998; Xu et al., 2000), もしくは 2 回あった衝突のうち、後の衝突が 240–200 Ma (トリアス紀中世–新世) (Wu et al., 2009) とされている。竹内 (2000) は衝突に関連した造構運動がジュラ紀にまで及び、それがジュラ紀付加体碎屑物の供給に関与したと推定した。しかし、大別山地や蘇魯地域ではジュラ紀古世–中世の火成活動はほとんど知られておらず (例えば, Wang et al., 1998; Yang et al., 2005; Huang et al., 2006; Hou et al., 2007; Huang et al., 2008), 衝突帯からの供給ではジュラ紀古世の火山岩岩片に富む砂岩の存在やジュラ紀中世における砂岩組成の顕著な変化を十分に説明できない。また、衝突帯から海溝に碎屑物が供給された場合には、ポイントソースからの軸流による運搬が主要な碎屑物分散パターンになると考えられるが、これまで得られている古流向 (足立・水谷, 1971; 近藤・足立, 1975; Adachi, 1976; 脇田, 1984; 立花ほか, 1992) は、北、北西、西、南西などの方向からの側方流や軸流による運搬を示しており、必ずしもこれを支持していない。

砂岩のモード組成がジュラ紀を通じて変化することや、ジュラ紀新世の砂岩が火山岩岩片に乏しいことがいくつかの地域で知られている。木村ほか (1989) や楠・武蔵野 (1989) によれば、近畿地方の丹波帯の年代的に若い I 型地層群の砂岩は石英に富み、岩片が少なく、II 型地層群の砂岩は古期のものほど岩片量の多いワッケとなる傾向にあり、岩片では珪長質～中間質火山岩および珪長質深成岩が多い。美濃帯–丹波帯におけるジュラ紀砂岩のモード組成の研究結果を整理した竹内 (2000) も同様の指摘をしている。酒井 (1997) は、ジュラ紀付加体砂岩におけるこの様な変化傾向が西南日本の内外帯を通じて広く認められることを指摘している。楠 (1992) はこの原因として、ジュラ紀古世–中世には南側 (中国南東部) にあった陸弧から北北東向きの軸流により、ジュラ紀新世には北側 (極東シホテアリン周辺) のトランスフォーム境界から西南西～南南西向きの軸流によって運ばれたと推定した。しかし、先に示した古流向に関するこれまでの研究結果からは、このような軸流の転換があったことを確認することはできない。Zhou et al. (2006) や Xie et al. (2006), Shu et al. (2009) によれば、中国南東部 (浙江省や福建省、江西省、広東省など) の南中国地塊では 205–180 Ma に火成活動の静穏期がある。この事実は、多くの火山岩岩片を含むジュラ紀古世付加体砂岩が中国南東部を供給源とはしていないことを示唆する。また、ジュラ紀新世～白亜紀初期の付加体がシホテアリンからも見いだされていることから (Kojima, 1989; Natal'in, 1993; Kemkin et al., 1997; Kojima et al., 2000; 小嶋・亀高, 2000; Khanchuk, 2001; Wakita and Metcalfe, 2005), この時期のシホテアリン周辺はトランスフォーム境界ではなく、沈み込み帯を形成していたと考えられる。

立花ほか (1992) は、美濃帯のジュラ紀新世の砂岩が火成岩岩片をほとんど伴わないことを指摘するとともに、その原

因として砂岩の堆積期間がイザナギ・プレートの沈み込み開始時期にあたり、沈み込みに伴う火成活動がまだほとんど起きていなかったと推定した。九州東部の南部秩父帯や山口県東部の丹波帯における火山岩岩片に極めて乏しい砂岩の堆積は、ジュラ紀中世のある時期からジュラ紀新世中期以降もしくは白亜紀初期にわたっている。沈み込みがこのような期間にわたり継続していたにもかかわらず、新たなプレートの沈み込み起因して火成弧がその期間を通じて未発達であったとは考えづらい。

(2) 碎屑粒子の年代や組成に基づく供給源の推定 美濃帯の砂岩に含まれる碎屑粒子の放射年代や組成、および礫岩中の礫の放射年代から後背地の性格やその具体的な場所を推定した研究が多数行われている。放射年代に関する研究では、変成岩礫や火成岩礫の Rb-Sr 雲母・全岩年代や K-Ar 雲母年代, CHIME モナザイト・ジルコン年代, SHRIMP ジルコン U-Pb 年代 (Shibata and Adachi, 1972, 1974; Suzuki et al., 1991; Sano et al., 2000; 田中ほか, 2000; Tanaka et al., 2002; Hidaka et al., 2002; Nutman et al., 2006), 砂岩に含まれるモナザイトやジルコンの CHIME 年代 (Suzuki et al., 1991; Tanaka et al., 2002) などが報告されている。これらの研究で対象となった地層はいずれも上部ジュラ系と推定され、約 2500 Ma, 2000–1500 Ma, 1300–1200 Ma, 900–700 Ma, 270–220 Ma, 180–160 Ma といった年代が報告されている。これらの年代値は、美濃帯の後背地に原生界が存在していたことを示している。美濃帯の碎屑岩類が示すこのような放射年代から、その後背地として韓半島の可能性が指摘されている (Shibata and Adachi, 1974; Chang et al., 2003a; Nutman et al., 2006)。Nutman et al. (2006) が指摘するように、900–700 Ma の放射年代は北中国地塊からはほとんど報告されておらず、西南日本の近隣では韓半島の臨津江帯 (Imjingang Belt), 京畿地塊 (Gyeonggi Massif) および沃川帯 (Okcheon Belt) において散点的ながら報告されている (Zhai et al., 2007)。また、竹内 (2000) は、日本列島各地の中・古生界から報告されている砂岩中のざくろ石組成を総括し、ジュラ紀新世には高度変成岩から多量の碎屑物が供給されたとしている。

3. 韓半島およびその周辺のジュラ紀火成活動と内帯–外帯におけるジュラ紀砂岩の組成変化

前述したように、美濃帯のジュラ紀付加体碎屑岩に含まれる変成岩礫・火成岩礫の放射年代や碎屑性モナザイト・ジルコンの放射年代は、韓半島もしくはその地質的な延長部からの碎屑物供給を示唆している。韓国とその周辺には花崗岩類を主とするジュラ紀～白亜紀古世の火成岩が多数分布している (Fig. 11)。そこで、韓国、北朝鮮、遼東半島および山東半島のジュラ紀～白亜紀古世火成岩類の放射年代をコンパイルし、地域別にヒストグラムを作成した (Fig. 12)。コンパイルにあたっては、SHRIMP U-Pb (ジルコン, チタン石), LA-ICPMS U-Pb (ジルコン), CHIME (ジルコン, モナザイト, 褐れん石) および Rb-Sr アイソクロン (全岩) などの閉止温度が数 100 度に達する手法の測定結果のみを採用した。採用されたデータのほとんどは花崗岩類である。コンパイル

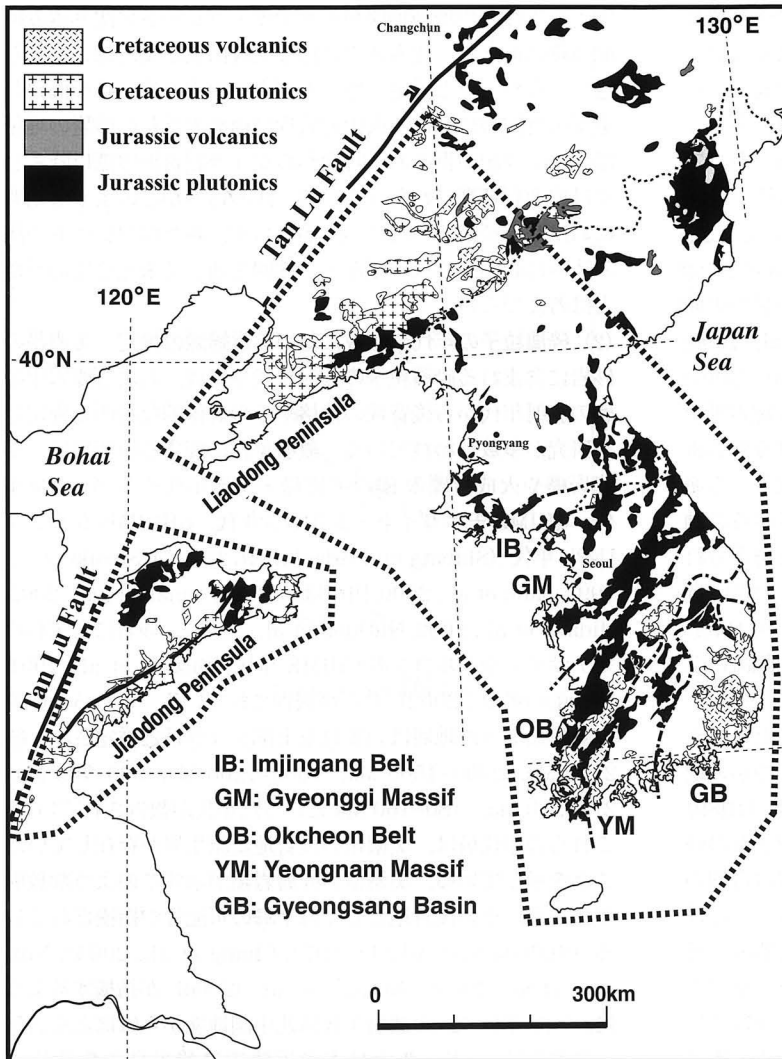


Fig. 11. Distributions of Jurassic and Cretaceous igneous rocks in and around the Korean Peninsula. Compiled from Teraoka and Okumura (2003) and Wu et al. (2005a). Polygons of broken line show the area in which radiometric ages of igneous rocks are compiled.

に用いた文献は次のとおりであり、その中には Sagong et al. (2005) による韓国のコンパイルデータを含む: Kato et al. (1997), Wang et al. (1998), Kim et al. (2002, 2009), Chang et al. (2003b), Kim et al. (2003), Zhang et al. (2003), Li et al. (2004), Oh et al. (2004), Kim et al. (2005), Sagong et al. (2005), Yang et al. (2005), Wu et al. (2005a, b), Han et al. (2006), Huang et al. (2006), Kwon et al. (2006), Pei et al. (2006), Wee et al. (2006), Ling et al. (2007), Wu et al. (2007a, b), Lin et al. (2008), Tan et al. (2008), Liu et al. (2009). 韓国の京畿地塊、沃川帯および嶺南地塊 (Yeongnam Massif) に分布するジュラ紀花崗岩類は、多くがカルクアルカリ岩系に属し、火成弧起源とされている (Kim et al., 2002; Kim et al., 2003; Kim et al., 2005; Sagong et al., 2005; Kwon et al., 2006). また、遼東半島や山東半島のジュラ紀～白亜紀古世火成岩類は、多くが A タイプ花崗岩やアダカイト質花崗岩であり (Wu et al., 2005a, b; Hou et al., 2007), 何人かの研究者はこれらの起源をアセノスフェア・マントルの上昇流と関連づけている (Wu et al., 2005a, b; Hou et al., 2007; Tan et al., 2008). 北

朝鮮の花崗岩類に関しては、岩石学的・地球化学的特徴および起源は不明である。Fig. 12 と年代の空間的分布からこの地域の火成活動に関して次の特徴を指摘することができる。1) 韓国におけるジュラ紀火成岩の年代は、嶺南地塊がおもにジュラ紀古世、沃川帯がジュラ紀古世後期～中世中期、京畿地塊がおもにジュラ紀中世である。なお、嶺南地塊、沃川帯および京畿地塊における放射年代の幅は、それぞれ 197–169 Ma, 187–165 Ma, 180–158 Ma である。2) 韓国では 158–115 Ma に放射年代値の空白期間 (43 my) がある。3) 遼東半島および山東半島でもそれぞれ 156–134 Ma (22 my の空白) および 152–130 Ma (22 my の空白) に放射年代の空白期間がある。この空白期間の開始年代は韓国のそれとほぼ同じであるが、終了年代は韓国のそれよりも古い。4) ジュラ紀古世後期～中世前期にかけて幅 200 km を超える広い火成活動帯が存在した。以上の特徴は、韓国においてジュラ紀古世から中世にかけて火成弧が内陸側に移動し、その後弧の火成活動が停止したことを示している。そして、白亜紀古世後期に弧の火成活動が再開している。

以上のような韓国とその周辺の火成活動史は、九州東部の

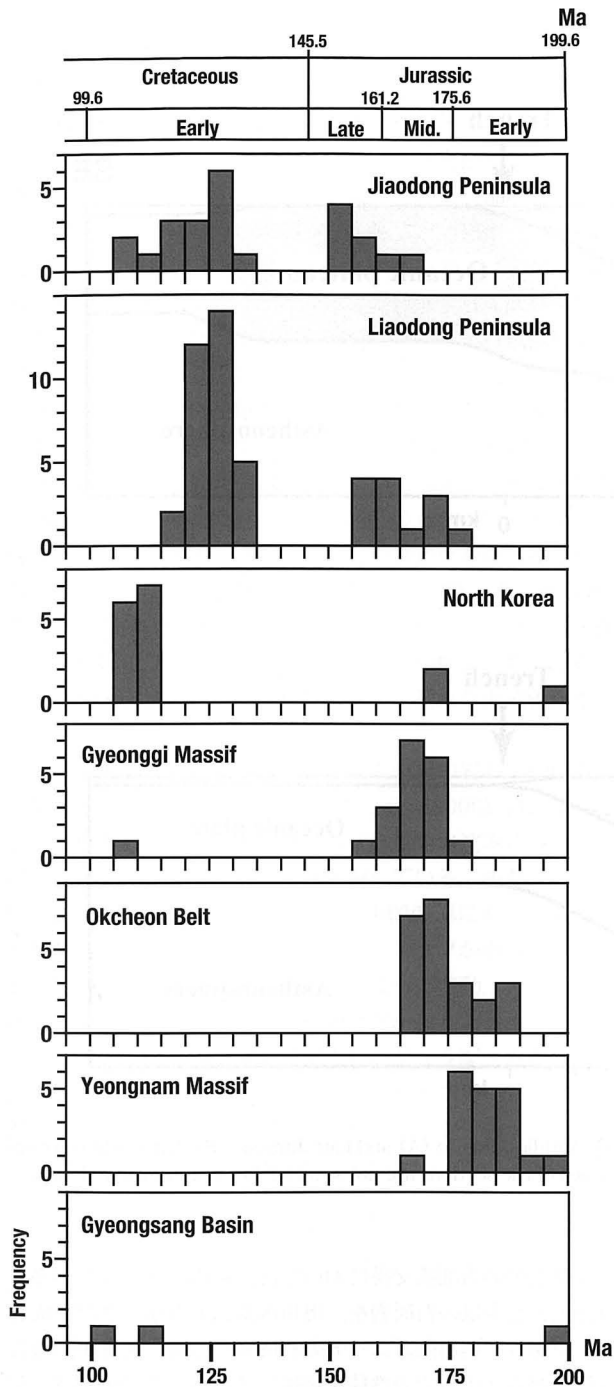


Fig. 12. Frequency diagrams of compiled radiometric ages for igneous rocks in South Korea, North Korea, Liaodong Peninsula and Jiaodong Peninsula. See text for more details.

南部秩父帯や山口県東部の丹波帯（玖珂層群）で確認された砂岩組成の特徴・変化傾向と調和的である。ジュラ紀古世には嶺南地塊～沃川帯で活発な火成活動があり、それに由来する火山岩岩片に富んだ高 Ti 型の砂が美濃－丹波－南部秩父帯を形成した海溝に供給されたと推定される。ジュラ紀古世後期－中世に火成活動場が次第に内陸側に移動するのに伴い、火成活動場と海溝との距離は次第に大きくなったと考え

られる。このために、砂岩中に含まれる火山岩岩片は減少した。ジュラ紀中世中期には沃川帯の火成活動が終了し、それに続いて中世末には京畿地塊の火成活動がほぼ終了した。そして、韓半島における火成活動の休止期をむかえる。このようにして、ジュラ紀中世のある時期から新世にかけて、火山岩岩片をほとんど伴わない高 Zr 型の砂が海溝に供給されるようになったと考えられる。

4. フラット・スラブ沈み込みと内帯－外帯におけるジュラ紀砂岩の組成変化

ジュラ紀の韓国に認められる弧火成活動の内陸側への移動や幅広い弧火成活動、その後の活動停止などの一連の現象は、スラブの低角沈み込みもしくはフラット・スラブ沈み込み (flat-slab subduction; 以下、フラット・スラブ) で起きている現象と類似している。弧火成活動の停止もしくは衰微は、海溝に直交する方向の収束速度の低下でも起こりうる (例えば、George et al., 2003; Syracuse and Abers, 2006)。しかし、ジュラ紀新世には海溝で付加が活発に進行しており、火成弧の活動を停止させるほどの収束速度の低下が 40 my 以上にわたって継続したとは考えづらい。また、韓国の中生代花崗岩類の放射年代をコンパイルした Sagong et al. (2005) は、ジュラ紀新世から白亜紀古世にかけて (約 50 my) 火成活動の休止期があること、その原因としてスラブの低角沈み込みの可能性を指摘した。

フラット・スラブは、地球史を通じて起こっている可能性が高く (Murphy et al., 1999)、北米のララミー変動 (白亜紀末～古第三紀) や南米の非活動的の海嶺・海台の沈み込み場で多くの議論が行われている。南米では Nazca 海嶺による Peruvian フラット・スラブと Juan Fernandez 海嶺による Chilean フラット・スラブがよく知られており、とくに後者に関する研究報告は多い。中央アンデスにおけるフラット・スラブは、漸新世頃から始まっていると推定されており、スラブの低角化に伴う火山弧の内陸への移動と幅広い火成活動、その後の弧火成活動の停止、地殻の短縮・厚化などが議論、もしくは指摘されている (Gutscher et al., 2000; Kay and Mpodozis, 2002; Ramos et al., 2002; Trumbull et al., 2006)。一方、ララミー変動においては、Coney and Reynolds (1977) により、白亜紀末から始新世にかけてカリフォルニアの海岸付近から内陸側に 1000 km に達する火成活動の移動が示された。同論文は、火成活動の移動がスラブの低角化に由来すると推定しており、低角化の原因として、スラブの高速沈み込み、浮揚性スラブ (若いスラブや非震性海嶺) の沈み込み、上盤プレートの前進などの可能性を指摘している。カリフォルニアとほぼ同じ時期の内陸側への火成活動の移動は、すぐ南側のメキシコ北西部でも知られている (Valencia-Moreno et al., 2006)。カリフォルニア周辺のララミー変動におけるフラット・スラブについては、海台や非活動的の海嶺などの浮揚性地塊の沈み込み、もしくは浮揚性地塊の沈み込みと大きな収束速度が原因であるとする見解が多い (Livaccari et al., 1981; English et al., 2003; Saleeby, 2003)。

韓国におけるジュラ紀古世から中世にかけての内陸側への火成弧の移動や幅広い火成弧の出現は、沈み込むスラブの低

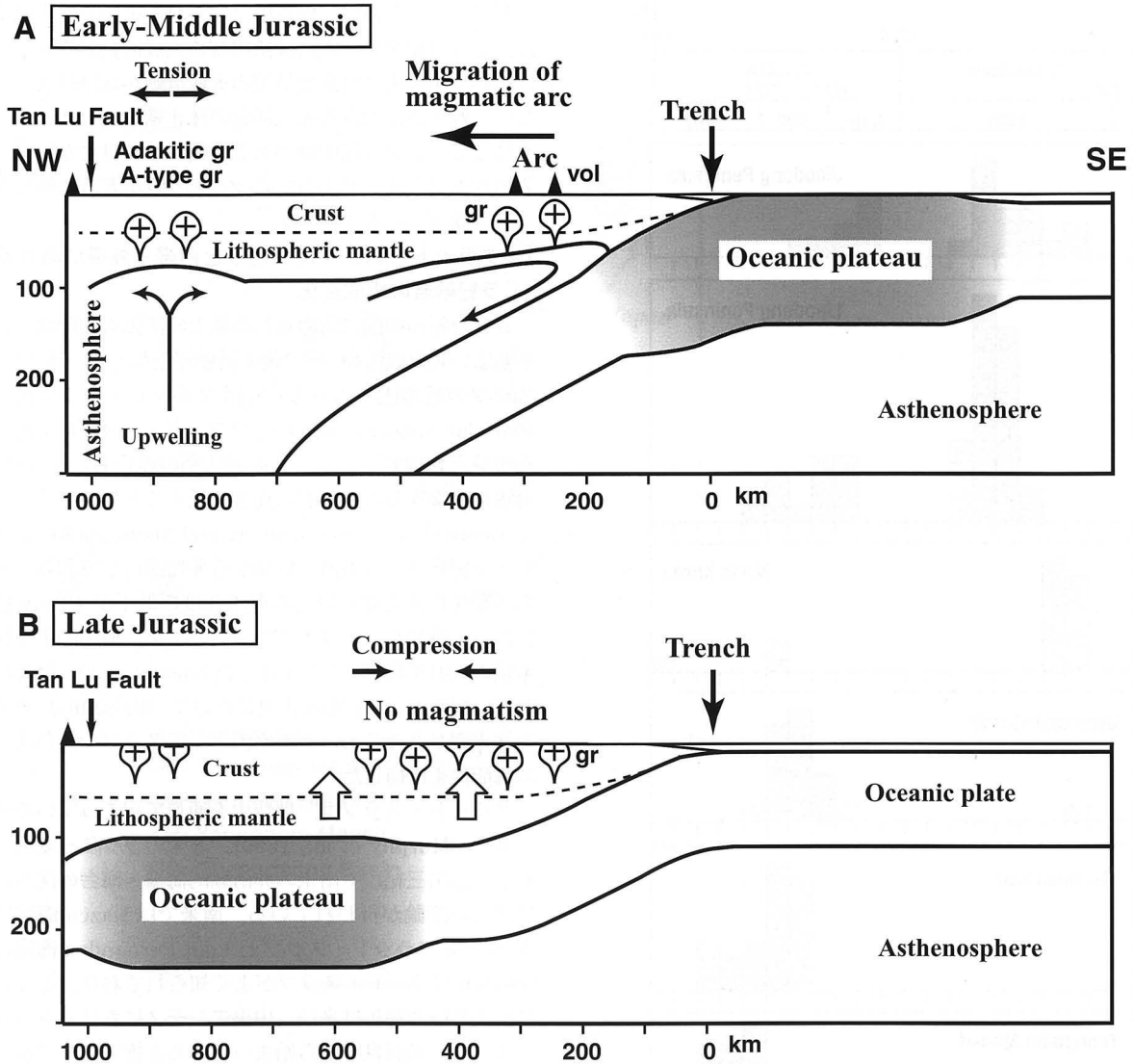


Fig. 13. Schematic cross sections along the Korean Peninsula during the Early-Middle Jurassic (A) and Late Jurassic (B). Large white arrows show uplift. vol: volcano and gr: granitic rocks. The horizontal and vertical scales of the sections are not so strict. See text for more details.

角化で説明される。また、ジュラ紀新世にフラット・スラブがほぼ完成したことにより弧の火成活動が停止したと考えられる。Sagong et al. (2005) は、比較的深部 (12–28 km) で定置したジュラ紀花崗岩類が浅部 (10 km 以下) で定置した白亜紀花崗岩類の形成以前に浅部まで上昇したとしている。Choi et al. (2005) や Kim et al. (2005) は、ジュラ紀中世の花崗岩類が定置してから白亜紀花崗岩類が定置するまでの間に韓国で広域的な上昇運動があり、ジュラ紀花崗岩や大陸基盤の顕著な unroofing が進行したとしている。Han et al. (2006) はジュラ紀中世–新世の沃川帯が、また Kim et al. (2008) はジュラ紀の沃川帯が北西–南東方向の圧縮場にあったとしている。韓国のジュラ紀火山岩は、現在では衝上断層・褶曲帯に構造的に挟み込まれてわずかに分布するのみであり (Han et al., 2006)、白亜紀花崗岩の定置以前に圧縮環境の中でジュラ紀火成弧を含む地域が大きく上昇したことにより、火山岩の多くが削剥されたと推定される。

九州東部の南部秩父帯においては、鎮南山ユニットが多くの緑色岩と少量の石灰岩を、奥川内ユニットが大きな石灰岩岩体を伴う。奥川内ユニットの石灰岩からはフズリナが報告されており、浅海での堆積を示唆している。この事実は、ジュラ紀古世に何らかの地形的な高まりが沈み込み、それらの一部が付加したことを示している。山口県東部の丹波帯 (玖珂層群) においては、ジュラ紀古世のユニットⅢが最も多くの緑色岩を含む。西南日本内帯のジュラ紀付加体の岩相や年代を広くコンパイルした中江 (2000) は、ジュラ紀古世–中世の付加体がペルム紀の石灰岩とそれに付随した緑色岩を多く含むことを指摘するとともに、この時期における複数の海山群の沈み込みの可能性を指摘した。一方、Ichiyama et al. (2006) や Koizumi and Ishiwatari (2006)、Ichiyama et al. (2008) は、丹波帯のⅡ型地層群や美濃帯の舟伏山ユニットに含まれる緑色岩が厚い地殻を有した大きな海台に由来する可能性を示した。Ⅱ型地層群の堆積年代はジュラ紀古

世—中世 (例えば, 木村, 2000), 舟伏山ユニットの堆積年代はジュラ紀中世 (脇田, 1991), もしくはジュラ紀古世末—中世中頃 (山本, 1985; 中江, 2000) と推定されている。

これらからジュラ紀—白亜紀古世の付加体砕屑岩の供給と後背地の変遷に関して次のようなシナリオを描くことができる。ジュラ紀古世—中世には韓半島やその延長部の火成弧から火山岩岩片に富む砂が海溝域に供給され (Fig. 13.A), 高 Ti 型の砂岩が付加した。この時期に大きなサイズの海台が沈み込みを開始したため, ジュラ紀古世後期から火成弧が次第に内陸側に移動した。これに伴い海溝域にはそれ以前に比べて火山岩岩片により乏しい砂が供給されるようになった。ジュラ紀中世末から白亜紀古世前期にはフラット・スラブがほぼ完成し, 後背地における弧の火成活動はほぼ停止した (Fig. 13.B)。この時期には後背地における地殻の短縮・厚化に伴い, ジュラ紀花崗岩類や大陸基盤の unroofing が急速に進行した。そのため, 海溝域には火山岩岩片をほとんど伴わない砂が多量に供給され, 高 Zr 型砂岩が付加した。その後, 海台の深部への沈み込みもしくは海台を伴ったスラブの破断と落下が起こり, スラブのロールバックが始まった。それに伴い白亜紀古世後期から後背地において新たな火成弧が生じた。

中国南東部の火成活動史の解析や火成岩の岩石学的研究から Zhou and Li (2000) や Jiang et al. (2006) は, ジュラ紀—白亜紀もしくはジュラ紀における低角の沈み込みとそれに続くスラブのロールバックを指摘している。また, Li and Li (2007) や Li et al. (2007) は中国南部においておよそ 250 Ma から 190 Ma 頃にフラット・スラブが形成され, これに伴って火成活動や地殻変動の内陸への移動, 火成活動の休止, 火成活動の海溝側への移動などが起きた可能性を指摘している。今回, 本研究で提案されたジュラ紀—白亜紀古世前期にかけての低角沈み込み/フラット・スラブと中国南東部で指摘されている低角沈み込みやフラット・スラブとの関連も今後の重要な検討課題となるだろう。

ま と め

- 九州東部の床木ユニットをのぞく南部秩父帯と山口県東部の丹波帯 (玖珂層群) のジュラ紀砂岩は, Zr/Nb—Ti/Nb 図上において, 高 Ti 型と高 Zr 型に区分される。高 Ti 型の砂岩は, SiO₂ に乏しく, 火山岩岩片や TiO₂, MgO, V, Na₂O などの元素に富む。高 Zr 型の砂岩は, SiO₂ に富み, 火山岩岩片や TiO₂, MgO, V, Na₂O に乏しい。ジュラ紀中世のある時期に高 Ti 型の砂岩から高 Zr 型の砂岩に変化した。高 Zr 型砂岩と類似した砂岩の堆積は, 白亜紀古世初期まで連続する。高 Ti 型砂岩はおもに火成弧から, 高 Zr 型砂岩はおもに花崗岩類や大陸基盤から供給されたと推定される。
- 西南日本の付加体砂岩の主要な供給源であった可能性が高い韓半島ではジュラ紀古世から中世にかけて火成弧が内陸側に移動するとともに, 幅広い火成弧が形成され, その後 158—115 Ma (ジュラ紀新世初頭—白亜紀古世前期) には火成活動の静穏期が出現する。この一連の現象は,

低角沈み込みやフラット・スラブ沈み込みで説明される。西南日本のジュラ紀付加体砕屑岩の年代的な組成変化は, 韓半島やその地質的延長部におけるこのような一連の現象と密接に関連していると推定される。

- ジュラ紀—白亜紀古世の付加体砕屑岩の供給と後背地の変遷に関して次のようなシナリオを描くことができる。ジュラ紀古世には韓半島やその延長部の火成弧から火山岩岩片に富む高 Ti 型の砂が海溝域に供給された。この時期に大きなサイズの海台が沈み込みを開始したため, ジュラ紀古世後期から火成弧が次第に内陸側に移動した。これに伴い海溝域には火山岩岩片により乏しい砂が供給された。ジュラ紀新世から白亜紀古世前期には, フラット・スラブ沈み込みにより弧の火成活動が停止した。そして, 圧縮場のもとで花崗岩類や大陸基盤の unroofing が進行した。そのため, 海溝域には火山岩岩片をほとんど伴わない高 Zr 型の砂が多量に供給された。その後, 海台の深部への沈み込みもしくは海台を伴ったスラブの破断と落下が起こり, スラブのロールバックが始まった。それに伴い白亜紀古世後期から後背地において新たな火成弧が生じた。

謝 辞 鎌田祥仁博士 (山口大学地球科学教室) にはジュラ紀の放射虫化石に関して種々ご教示いただいた。竹内 誠博士 (名古屋大学) と匿名の査読者および編集委員の中江 訓博士 (産総研) のご意見は, 本稿改善のために非常に有益であった。本研究を進めるにあたり, 文部省科学研究費 (課題番号: 14540428) を使用した。ここに記して厚くお礼を申し上げる。

文 献

- Adachi, M., 1976, Paleogeographic aspects of the Japanese Paleozoic-Mesozoic geosyncline. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **23**, 24, 12-55.
- 足立 守・水谷伸治郎 (Adachi, M. and Mizutani, S.), 1971, 美濃帯古生層の sole markings と古流系について。地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 6, 39-48.
- Chang, H.W., Turek, A. and Kim, C.-B., 2003a, U-Pb zircon geochronology and Sm-Nd-Pb isotopic constraint for Precambrian plutonic rocks in the northern part of Ryeongnam massif, Korea. *Geochem. Jour.*, **37**, 471-491.
- Chang, K.-H., Suzuki, K., Park, S.-O., Ishida, K. and Uno, K., 2003b, Recent advances in the Cretaceous stratigraphy of Korea. *Jour. Asian Earth Sci.*, **21**, 937-948.
- Cho, M., Kim, H., Lee, Y., Horie, K. and Hisada, H., 2008, The oldest (ca. 2051 Ga) rocks in South Korea: U-Pb zircon age of a tonalitic migmatite, Daeijak Island, western Gyeonggi massif. *Geosci. Jour.*, **12**, 1-6.
- Choi, S.-G., Kwon, S.-T., Ree, J.-H., So, C.-S. and Pak, S.J., 2005, Origin of Mesozoic gold mineralization in South Korea. *Island Arc*, **14**, 102-114.
- Chwae, U., 1998, Does the Injingang Fold Belt cross the mid-Korean Peninsula along the demilitarized zone (DMZ) as an extension of the Sulu Belt, China. *Jour. Earth Planet. Sci. Nagoya Univ.*, **45**, 41-73.
- Coney, O.J. and Reynolds, S.J., 1977, Cordilleran Benioff zones. *Nature*, **270**, 403-406.
- English, J.M., Johnston, S.T. and Wang, K., 2003, Thermal modelling of the Laramide orogeny: testing the flat-slab subduction hypothesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **214**, 619-632.
- George, R., Turner, S., Hawkesworth, C., Morris, J., Nye, C., Ryan, J. and Zheng, S.-H., 2003, Melting processes and fluid and sediment trans-

- port rates along the Alaska-Aleutian arc from an integrated U-Th-Ra-Be isotope study. *Jour. Geophys. Res.*, **108**, No. B5, 2252, doi: 10.1029/2002JB001916.
- Gutscher, M.-A., Maury, R., Eissen, J.-P. and Bourdon, E., 2000, Can slab melting be caused by flat subduction. *Geology*, **28**, 535-538.
- Hacker, B.R., Ratschbacher, L., Webb, L., Ireland, T., Walker, D. and Shuwen, D., 1998, U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **161**, 215-230.
- Hacker, B.R., Wallis, S.R., Ratschbacher, L., Grove, M. and Gehrels, G., 2006, High-temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Dabie-Sulu Orogen. *Tectonics*, **25**, TC5006, doi: 10.1029/2005TC001937.
- Han, R.H., Ree, J.-H., Cho, D.-L., Kwon, S.-T. and Armstrong, R., 2006, SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Res.*, **9**, 106-117.
- Hidaka, H., Shimizu, H. and Adachi, M., 2002, U-Pb geochronology and REE geochemistry of zircons from Palaeoproterozoic paragneiss clasts in the Mesozoic Kamiaso conglomerate, central Japan: evidence for an Archean provenance. *Chem. Geol.*, **187**, 279-293.
- 東元定雄・高橋裕平・牧本 博・脇田浩二・佃 栄吉 (Higashimoto, S., Takahashi, Y., Makimoto, H., Wakita, K. and Tsukuda, E.), 1986, 大竹地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅) [Geology of the Otake District. Quadrangle Series, scale 1: 50000], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 70p.
- Hou, M.-L., Jiang, Y.-H., Jiang, S.-Y., Ling, H.-F. and Zhao, K.-D., 2007, Contrasting origins of late Mesozoic adakitic granitoids from the northwestern Jiaodong Peninsula, east China: implications for crustal thickening to delamination. *Geol. Mag.*, **144**, 619-631.
- Huang, F., Li, S., Dong, F., He, Y. and Chen, F., 2008, High-Mg adakitic rocks in the Dabie orogen, central China: Implications for foundering mechanism of lower continental crust. *Chem. Geol.*, **255**, 1-13.
- Huang, J., Zheng, Y.-F., Zhao, Z.-F., Wu, Y.-B., Zhou, J.-B. and Liu, X., 2006, Melting of subducted continent: Element and isotopic evidence for a genetic relationship between Neoproterozoic and Mesozoic granitoids in the Sulu orogen. *Chem. Geol.*, **229**, 227-256.
- Ichiyama, Y., Ishiwatari, A., Hirahara, Y. and Shuto, K., 2006, Geochemical and isotopic constraints in the genesis of the Permian ferropicritic rocks from the Mino-Tamba belt, SW Japan. *Lithos*, **89**, 47-65.
- Ichiyama, Y., Ishiwatari, A. and Koizumi, K., 2008, Petrogenesis of greenstones from the Mino-Tamba belt, SW Japan: Evidence for an accreted Permian oceanic plateau. *Lithos*, **100**, 127-146.
- 石濱茂崇・君波和雄 (Ishihama, S. and Kiminami, K.), 2000, 砂岩と頁岩の化学組成に基づく四国東部秩父累帯南帯・四万十帯北帯の岩石相ユニット. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 57, 97-106.
- 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.
- 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地体構造区分. 地学雑誌 (*Jour. Geogr., Tokyo*), **100**, 697-761.
- Jiang, Y.-H., Jiang, S.-Y., Zhao, K.-D. and Ling, H.-F., 2006, Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dykes, Southeast China: implications for a back-arc extension setting. *Geol. Mag.*, **143**, 457-474.
- 神戸信和・寺岡易司 (Kambe, N. and Teraoka, Y.), 1968, 白杵地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅) [Geology of the Usuki District. Quadrangle Series, scale 1: 50000], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 63p.
- Kato, T., Suzuki, K., Morishita, T. and Yonezawa, C., 1997, CHIME ages of zircons in granitic gneiss and granite from Samilpo, southeastern Democratic People's Republic of Korea. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.*, **44**, 61-69.
- Kay, S. M. and Mpodozis, C., 2002, Magmatism as a probe to the Neogene shallowing of the Nazca plate beneath the modern Chilean flat-slab. *Jour. S. Amer. Earth Sci.*, **15**, 39-57.
- Kemkin, I.V., Rudenko, V.S. and Taketani, Y., 1997, Some Jurassic and Early Cretaceous radiolarians from chert-terrigenous sequence of the Taukha Terrane, southern Sikhote-Alin. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 48, 163-175.
- Khanchuk, A.I., 2001, Pre-Neogene tectonics of the Sea-of-Japan region: A view from the Russian side. *Earth Sci. (Chikyū Kagaku)*, **55**, 275-291.
- Kim, C.-B., Chang, H.-W. and Turek, A., 2003, U-Pb zircon ages and Sr-Nd-Pb isotopic compositions for Permian-Jurassic plutons in the Ogcheon belt and Ryeongnam massif, Korea: tectonic implications and correlation with the China Qinling-Dabie belt and the Japan Hida belt. *Island Arc*, **12**, 366-382.
- Kim, J.-M., Jang, B.-A., Obara, Y. and Kang, S.-S., 2008, Paleostress reconstructions based on calcite twins in the Joseon Supergroup, north-eastern Ogcheon Belt (South Korea). *Island Arc*, **17**, 57-69.
- Kim, K.H., Tanaka, T., Suzuki, K., Nagao, K. and Park, E.J., 2002, Evidence of the presence of old continental basement in Cheju volcanic Island, South Korea, revealed by radiometric ages and Nd-Sr isotopes of granitic rocks. *Geochem. Jour.*, **36**, 421-441.
- Kim, S.W., Kwon, S. and Ryu, I.-C., 2009, Geochronological constraints on multiple deformations of the Honam Shear Zone, South Korea and its tectonic implication. *Gondwana Res.*, **16**, 82-89.
- Kim, S.W., Oh, C.W., Choi, S.G., Ryu, I.-C. and Itaya, T., 2005, Ridge subduction-related Jurassic plutonism in and around the Okcheon metamorphic Belt, South Korea, and implications for northeast Asian tectonics. *Internat. Geol. Rev.*, **47**, 248-269.
- Kiminami, K. and Ishihama, S., 2003, The parentage of low-grade metasediments in the Sanbagawa Metamorphic Belt, Shikoku, Southwest Japan, based on whole-rock geochemistry. *Sediment. Geol.*, **159**, 257-274.
- 君波和雄・公文富士夫・宮本隆実・鈴木茂之・竹内 誠・吉田孝紀 (Kiminami, K., Kumon, F., Miyamoto, T., Suzuki, S., Takeuchi, M. and Yoshida, K.), 2000, 日本列島のペルム紀～白亜紀砂岩の改訂BI図と後背地の造構場. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 57, 9-18.
- 君波和雄・公文富士夫・西村年晴・志岐常正 (Kiminami, K., Kumon, F., Nishimura, T. and Shiki, T.), 1992, 火成弧に由来する砂岩の化学組成. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 38, 361-372.
- 君波和雄・齊藤圭一郎・向井哲也・武田賢治 (Kiminami, K., Saito, K., Mukai, T. and Takeda, K.), 2008, 四国西部の秩父累帯北部における構造層序. 地質雑誌 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **114**, 31-42.
- 君波和雄・戸田祐貴 (Kiminami, K. and Toda, Y.), 2007, 徳島県美馬市南部の三波川変成帯の変堆積岩の原岩層. 地質雑誌 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **113**, 158-167.
- 木村克己 (Kimura, K.), 2000, 丹波帯ジュラ紀付加コンプレックスのストラト系と運動像. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 55, 181-102.
- 木村克己・牧本 博・吉岡敏和 (Kimura, K., Makimoto, H. and Yoshio-ka, T.), 1989, 綾部地域の地質. 地域地質調査報告 (5万分の1地質図幅) [Geology of the Ayabe District. Quadrangle Series, scale 1: 50000], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 104p.
- Koizumi, K. and Ishiwatari, A., 2006, Oceanic plateau accretion inferred from Late Paleozoic greenstones in the Jurassic Tamba accretionary complex, southwest Japan. *Island Arc*, **15**, 58-83.
- Kojima, S., 1989, Mesozoic terrane accretion in northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions. *Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoeco.*, **69**, 213-232.
- 小嶋 智・亀高正男 (Kojima, S. and Kametaka, M.), 2000, 東アジアのジュラ紀付加コンプレックス. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 55, 61-72.
- Kojima, S., Kemkin, I.V., Kametaka, M. and Ando, A., 2000, A correlation of accretionary complexes of southern Sikhote-Alin of Russia and the Inner zone of Southwest Japan. *Geosci. Jour.*, **4**, 175-185.
- 近藤直門・足立 守 (Kondo, N. and Adachi, M.), 1975, 犬山市北方の中生層-特に坂祝礫岩について. 地質雑誌 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **81**, 373-386.
- 楠 利夫 (Kusunoki, T.), 1992, 西南日本内帯の中・古生界砂岩—モード解析と広域比較—. 地球科学 (*Earth Sci.*), **46**, 309-324.
- 楠 利夫・武蔵野 実 (Kusunoki, T. and Musashino, M.), 1989, 丹波帯砂岩の特性. 地球科学 (*Earth Sci.*), **43**, 75-83.

- Kwon, S., Sajeev, K., Mitra, G., Park, Y., Kim, S.W. and Ryu, I.-C., 2009, Evidence for Permo-Triassic collision in Far East Asia: The Korean collisional orogen. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **279**, 340-349.
- Kwon, S.-T., Cheong, C.-S. and Sagong, H., 2006, Rb-Sr isotopic study of the Hwacheon granite in northern Gyeonggi massif, Korea: A case of spurious Rb-Sr whole rock age. *Geosci. Jour.*, **10**, 137-143.
- Li, S.Z., Zhao, G.C., Sun, M., Wu, F.Y., Liu, J.Z., Hao, D.B., Han, Z.Z. and Luo, Y., 2004, Mesozoic, not Paleoproterozoic SHRIMP U-Pb zircon ages of two Liaoji granites, eastern block, North China Craton. *Internat. Geol. Rev.*, **46**, 162-176.
- Li, X.-H., Li, Z.-X., Li, W.-X., Liu, Y., Yuan, C., Wei, G. and Qi, C., 2007, U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to founding of a subducted flat-slab? *Lithos*, **96**, 186-204.
- Li, Z.-X. and Li, X.-H., 2007, Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, **35**, 179-182.
- Lin, W., Faure, W.L., Monie, P., Schaefer, U. and Panis, D., 2008, Mesozoic extensional tectonics in eastern Asia: the south Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China). *Jour. Geol.*, **116**, 134-154.
- Ling, W.L., Xie, X.L., Liu, X.M. and Cheng, J.P., 2007, Zircon U-Pb dating on the Mesozoic volcanic suite from the Qingshan Group stratotype section in eastern Shandong Province and its tectonic significance. *Sci. China, Ser. D*, **50**, 813-824.
- Liu, S., Hu, R., Gao, S., Feng, C., Yu, B., Qi, Y., Wang, T., Feng, G. and Coulson, I.M., 2009, Zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of adakitic volcanic rocks from Jiaodong, Shandong Province, Eastern China: Constraints on petrogenesis and implications. *Jour. Asian Earth Sci.*, **35**, 445-458.
- Livaccari, R.F., Burk, K. and Sengor, A.M.C., 1981, Was the Laramide orogeny related to subduction of an oceanic plateau? *Nature*, **289**, 276-289.
- 松岡 篤・山北 聡・榊原正幸・久田健一郎 (Matsuoka, A., Yamakita, S., Sakakibara, M. and Hisada, K.), 1998, 付加体地質の観点に立った秩父累帯のユニット区分と四国西部の地質. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **104**, 634-653.
- Murata, A., 1981, Large decke structures of the Kurosegawa and Sambosan terrains in Kyushu, Southwest Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo*, **20**, 277-293.
- Murphy, J.B., van Staal, C.R. and Keppie, J.D., 1999, Middle to Late Paleozoic Acadian orogeny in the northern Appalachians: A Laramide-style plume-modified orogeny? *Geology*, **27**, 653-656.
- 中江 訓 (Nakae, S.), 2000, 西南日本内帯ジュラ紀付加複合体の広域対比. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no.55, 73-98.
- Natal'in, B., 1993, History and modes of Mesozoic accretion in southeastern Russia. *Island Arc*, **2**, 15-34.
- Nutman, A.P., Sano, Y., Terada, K. and Hidaka, H., 2006, 743 ± 17 Ma granitic clast from Jurassic conglomerate, Kamiasso, Mino Terrane, Japan: the case for South China Craton provenance (Korean Gyeonggi Block?). *Jour. Asian Earth Sci.*, **26**, 99-104.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I.-C., Okada, T., Hyodo, H. and Itaya, T., 2004, Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon metamorphic belt, South Korea: tectonic implications in East Asia. *Island Arc*, **13**, 387-402.
- Oh, C.W. and Kusky, A.T., 2007, The Late Permian to Triassic Hongseong-Odesan collision belt in south Korea, and its tectonic correlation with China and Japan. *Internat. Geol. Rev.*, **49**, 636-657.
- 尾上哲治・永井勝也・上島 彩・妹尾 護・佐野弘好 (Onoue, T., Nagai, K., Kamishima, A., Seno, M. and Sano, H.), 2004, 九州・四国の三宝山付加コンプレックスの玄武岩類の起源. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **110**, 222-236.
- Pei, F., Xu, W., Yang, D. and Zhao, Q., 2006, SHRIMP zircon U-Pb dating and its geological significance of Chibaisong gabbro in Tonghua area, Jilin province. *Sci. China, Ser. D*, **49**, 368-374.
- Ramos, V.A., Cristallini, E.O. and Perez, D.J., 2002, The Pampean flat-slab of the Central Andes. *Jour. S. Amer. Earth Sci.*, **15**, 59-78.
- Sagong, H., Kwon, S.-T. and Ree, J.-H., 2005, Mesozoic episodic magmatism in South Korea and its tectonic implication. *Tectonics*, **24**, TC5002, doi: 10.1029/2004TC001720.
- 酒井 彰 (Sakai, A.), 1992, 秩父累帯南帯砂岩の地域的組成変化. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 38, 227-236.
- 酒井 彰 (Sakai, A.), 1997, 秩父帯南帯からみたジュラ紀付加体の粗粒砕屑物の起源. 日本地質学会第 104 年学術大会講演要旨 (104th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 25.
- Sakai, A., 1997, Geology and sandstone petrography of the Chichibu terrane in eastern Kyushu, Southwest Japan. Ph. D. Thesis, Kyushu Univ., 75p.
- 酒井 彰 (Sakai, A.), 1999, 砂岩組成と堆積物の特徴からみた秩父帯南帯と四万十帯北帯. 日本地質学会第 106 年学術大会講演要旨 (106th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 271.
- 酒井 彰・寺岡易司・宮崎一博・星住英夫・坂巻幸雄 (Sakai, A., Teraoka, Y., Miyazaki, K., Hoshizumi, H. and Sakamaki, Y.), 1993, 三重町地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). [Geology of the Miemachi District. Quadrangle Series, scale 1: 50000] 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 115p.
- Saleeby, J., 2003, Segmentation of the Laramide slab-evidence from the southern Sierra Nevada region. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **115**, 655-668.
- Sano, Y., Hidaka, H., Terada, K., Shimizu, H. and Suzuki, M., 2000, Ion microprobe U-Pb zircon geochronology of the Hida gneiss: Finding of the oldest minerals in Japan. *Geochem. Jour.*, **34**, 135-153.
- Shibata, K. and Adachi, M., 1972, Rb-Sr and K-Ar geochronology of metamorphic rocks in the Kamiasso conglomerate, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **78**, 265-271.
- Shibata, K. and Adachi, M., 1974, Rb-Sr whole-rock ages of Precambrian metamorphic rocks in the Kamiasso conglomerate from central Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **21**, 277-287.
- Shu, L.S., Zhou, X.M., Deng, P., Wang, B., Jiang, S.Y., Yu, J.H. and Zhao, X.X., 2009, Mesozoic tectonic evolution of the Southwest China Block: New insights from basin analysis. *Jour. Asian Earth Sci.*, **34**, 376-391.
- Suzuki, K., Adachi, M. and Tanaka, T., 1991, Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study. *Sediment. Geol.*, **75**, 141-147.
- Syracuse, E.M. and Abers, G.A., 2006, Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications. *Geochem. Geophys. Geosys.*, **7**, Q0517, doi: 10.1029/2005GC001045.
- 立花直子・岡田博有・佐野弘好 (Tachibana, N., Okada, H. and Sano, H.), 1992, 美濃帯ジュラ紀砕屑物の堆積と砂岩組成および堆積環境. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 38, 121-133.
- Taira, A. and Tashiro, M., 1987, Late Paleozoic and Mesozoic accretion in Japan and eastern Asia. In Taira, A. and Tashiro, M. eds, *Historical Biogeography and Plate Tectonic Evolution of Japan and Eastern Asia*. TERRAPUB, Tokyo, 1-43.
- 高見美智夫・磯崎行雄・西村祐二郎・板谷徹丸 (Takami, M., Isozaki, Y., Nishimura, Y. and Itaya, T.), 1990, 山口県東部の弱変成ジュラ紀付加コンプレックス (玖珂層群) の原岩形成年代と変成年代. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **96**, 669-681.
- 高見美智夫・磯崎行雄・西村祐二郎・板谷徹丸 (Takami, M., Isozaki, Y., Nishimura, Y. and Itaya, T.), 1993, 弱変成付加体の K-Ar 年代測定における砕屑性白雲母の混入と接触変成作用の影響—山口県東部ジュラ紀付加体の例—. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **99**, 545-563.
- Takami, M. and Itaya, T., 1996, Episodic accretion and metamorphism of Jurassic accretionary complex based on biostratigraphy and K-Ar geochronology in the western part of the Mino-Tanba Belt, Southwest Japan. *Island Arc*, **5**, 321-336.
- 竹内 誠 (Takeuchi, M.), 2000, 美濃-丹波帯のジュラ紀粗粒砕屑物の起源. 地質学論集 (*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 55, 107-121.
- Tan, J., Wei, J.H., Guo, L.L., Zhang, K.Q., Yao, C.L., Lu, J.P. and Li, H.M., 2008, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and phenocryst EPMA of dikes, Guocheng, Jiaodong Peninsula: Implications for North China Craton lithosphere evolution. *Sci. China, Ser. D*, **51**, 1483-1500.
- Tanaka, S., Kuroyanagi, Y., Suzuki, K. and Adachi, M., 2002, Permo-Triassic and Early-Middle Jurassic granitoid clasts from the Jurassic conglomerates in the Mino Terrane, central Japan. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.*, **49**, 15-30.

- 田中姿郎・鈴木和博・足立 守 (Tanaka, S., Suzuki, K. and Adachi, M.), 2000, 美濃帯北東部, 月夜沢峠地域のジュラ紀礫岩から産出した約 178 Ma の CHIME 年代を示す花崗岩質岩礫 (予報). 名古屋大博物館報告 (*Bull. Nagoya Univ. Mus.*), **16**, 33-41.
- 寺岡易司・宮崎一博・星住英夫・吉岡敏和・酒井 彰・小野晃司 (Teraoka, Y., Miyazaki, K., Hoshizumi, H., Yoshioka, T., Sakai, A. and Ono, K.), 1992, 犬飼地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅) [*Geology of the Inukai District. Quadrangle Series, scale 1: 50000*], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 129p.
- Teraoka, Y. and Okumura, K., 2003, *Geological Map of East Asia, scale 1: 3,000,000*. Geol. Surv. Japan, AIST.
- 寺岡易司・奥村公男・村田明広・星住英夫 (Teraoka, Y., Okumura, K., Murata, A. and Hoshizumi, H.), 1990, 佐伯地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), [*Geology of the Saeki District. Quadrangle Series, scale 1: 50000*], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 78p.
- 豊原富士夫 (Toyohara, F.), 1976, 山口県東部の三郡—山口帯—“領家帯”の地質構造. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **82**, 99-111.
- Trumbull, R. B., Riller, U., Oncken, O., Scheuber, E., Munier, K. and Hongn, F., 2006, The time-space distribution of Cenozoic volcanism in the south-central Andes: a New data compilation and some tectonic implications. In Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Gotze, H.-J., Ramos, V., Strecker, M. R. and Wigger, P., eds., *The Andes*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 29-43.
- Valencia-Moreno, M., Iriondo, A. and Gonzalez-Leon, C., 2006, Temporal constraints on the eastward migration of the Late Cretaceous-early Tertiary magmatic arc of NW Mexico based on new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ hornblende geochronology of granitic rocks. *Jour. S. Amer. Earth Sci.*, **22**, 22-38.
- 脇田浩二 (Wakita, K.), 1984, 八幡地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅), [*Geology of the Hachimam District. Quadrangle Series, scale 1: 50000*], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 89p.
- 脇田浩二 (Wakita, K.), 1991, 谷汲地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 図幅) [*Geology of the Tamigumi District. Quadrangle Series, scale 1: 50000*], 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 53p.
- Wakita, K. and Metcalfe, I., 2005, Ocean Plate Stratigraphy in East and Southeast Asia. *Jour. Asian Earth Sci.*, **24**, 679-702.
- Wang, L.G., Qiu, Y.M., McNaughton, N.J., Groves, D.J., Luo, Z.K., Huang, J.Z., Miao, L.C. and Liu, Y.K., 1998, Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the northwestern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geol. Rev.*, **13**, 275-291.
- Wee, S.M., Choi, S.G., Ryu, I.C. and Shin, H.J., 2006, Chemical characteristics of the Cretaceous Jindong granites in the southwestern part of the Gyengsang Basin, Korea: focussed on adakitic signatures. *Econ. Environ. Geol.*, **39**, 555-566. (in Hangul with English abstract)
- Wu, F.-Y., Han, R.-H., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Zhai, M.-G. and Park, S.-C., 2007a, Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, **238**, 232-248.
- Wu, F.-Y., Lin, J.-Q., Wilde, S.A., Zhang, X.-O. and Yang, J.-H., 2005a, Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 103-119.
- Wu, F.-Y., Yang, J.-H., Wilde, S.A., Liu, X.-M., Guo, J.-H. and Zhai, M.-G., 2007b, Detrital zircon U-Pb and Hf isotopic constraint on the crustal evolution of North Korea. *Precambrian Res.*, **159**, 155-177.
- Wu, F.-Y., Yang, J.-H., Wilde, S.A. and Zhang, X.-O., 2005b, Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Jurassic granites in the Liaodong Peninsula, NE China. *Chem. Geol.*, **221**, 127-156.
- Wu, Y.-B., Hanchar, J.M., Gao, S., Sylvester, P.J., Tubrett, M., Qiu, H.-N., Wijbrans, J.R., Brouwer, F.M., Yang, S.-H., Yang, Q.-J., Liu, Y.-S. and Yuan, H.-L., 2009, Age and nature of eclogites in the Huwan shear zone, and the multi-stage evolution of the Qinling-Dabie-Sulu orogen, central China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **277**, 345-354.
- Xie, X., Xu, X., Zou, H., Jiang, S., Zhang, M. and Qiu, J., 2006, Early J₂ basalts in SE China: Incipience of large-scale late Mesozoic magmatism. *Sci. China, Ser. D*, **49**, 796-815.
- Xu, B., Grove, M., Wang, C., Zhang, L. and Liu, S., 2000, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology from the northwestern Dabie Shan: constraints on the evolution of Qinling-Dabie orogenic belt, east-central China. *Tectonophysics*, **322**, 279-301.
- 山本博文 (Yamamoto, H.), 1985, 根尾南部地域および伊吹山地域の美濃帯中・古生層. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **91**, 353-369.
- 山崎 徹・大和田正明・今岡照喜・白木敏一 (Yamasaki, T., Owada, M., Imaoka, T. and Shiraki, K.), 1999, 蛍光 X 線分析装置による岩石試料中の主成分および微量成分の定量分析. 山口大機器分析センター報告 (*Rept. Center Instru. Anal. Yamaguchi Univ.*), **7**, 22-31.
- Yang, J.-H., Wu, F.-Y., Chung, S.-L., Wilde, S.A., Chu, M.-F., Lo, C.-H. and Song, B., 2005, Petrogenesis of Early Cretaceous intrusions in the Sulu ultrahigh-pressure orogenic belt, east China and their relationship to lithospheric thinning. *Chem. Geol.*, **222**, 200-231.
- Zhai, M.Z., Guo, J., Li, Z., Chen, D., Peng, P., Li, T., Hou, Q. and Fan, Q., 2007, Linking the Sulu UHP belt to the Korean Peninsula: Evidence from eclogite, Precambrian basement, and Paleozoic sedimentary basins. *Gondwana Res.*, **12**, 388-403.
- Zhang, X., Cawood, P.A., Wilde, S.A., Liu, R., Song, H., Li, W. and Snee, L.W., 2003, Geology and timing of mineralization at the Cangshang gold deposit, north-western Jiaodong Peninsula, China. *Mineralium Deposita*, **38**, 141-153.
- Zhou, X.M. and Li, W.X., 2000, Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeast China: implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, **326**, 269-287.
- Zhou, X., Sun, T., Shen, W., Shu, L. and Niu, Y., 2006, Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, **29**, 26-33.

(要 旨)

君波和雄・木下生一・今岡照喜, 2009, 西南日本のジュラ紀付加体砂岩におけるジュラ紀中世の組成変化とその意義. 地質雑, **115**, 578-596. (Kiminami, K., Kishita, S. and Imaoka, T., 2009, Marked change in sandstone composition during the Middle Jurassic in Jurassic accretionary complexes of SW Japan, and geologic significance. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 578-596.)

九州東部の南部秩父帯～四万十帯北縁部および山口県東部の丹波帯 (玖珂層群) の砂岩について, 火山岩岩片量や全岩化学組成を検討した. Zr/Nb-Ti/Nb ダイアグラムから, ジュラ紀付加体砂岩は, 高 Ti 型と高 Zr 型に区分できる. 高 Ti 型の砂岩は, SiO₂ に乏しく, 火山岩岩片や TiO₂, MgO, Na₂O, V に富み, おもに火成弧から供給されたと推定される. 高 Zr 型の砂岩は, SiO₂ に富み, 火山岩岩片や TiO₂, MgO, Na₂O, V に乏しく, おもに花崗岩類や大陸基盤から供給されたと推定される. ジュラ紀中世のある時期に高 Ti 型の砂岩から高 Zr 型の砂岩に変化した. 供給源におけるこの変化は, 大きな海台の沈み込みに起因するスラブの低角化とフラット・スラブの形成によって説明される.