

## 九州四万十帯の付加変形とその造構環境

### Accretionary Deformations and their Tectonic Environments of the Shimanto Terrane in Kyushu

坂井 卓\*  
Takashi Sakai

#### I. はじめに

四万十帯には、しばしば著しく剪断されたタービダイト層や、緑色岩—チャートなどの海洋性岩石を含む乱雑な層理の泥質岩層が出現する。これらは、より弱変形の深海成砕屑岩層とスラストで接した覆瓦衝上体をなし、帯状の構造配列をもつ。覆瓦スラストや非対称褶曲は、一般に海洋側への構造極性を示し、また、緑色岩や遠洋性堆積物を含む泥質の混在岩層にはしばしば顕著な構造ファブリックが発達する。そこで、この地帯の地層群の形成場は、沈み込み帯を伴う前弧地域に求められ、地質構造ならびに混在岩層の形成機構は、沈み込み—付加過程に帰せられてきた (例えば、勘米良・坂井, 1975; 勘米良, 1976, 1980; Suzuki & Hada, 1979; 平ほか, 1980; Taira et al., 1982, 1988など)。

混在岩層中の緑色岩—遠洋性堆積物については、これまでに、産状・時代・岩石学ならびに地球化学的性質・古地磁気学などに関する研究から、沈み込みに伴って消費された海洋性付加物質であることが明らかにされてきた (例えば, Sugisaki et al., 1979; Suzuki & Hada, 1979; 土谷ほか, 1979; 平ほか, 1980; 坂井・勘米良, 1981; Kodama et al., 1983; 小川・谷口, 1987; Taira et al., 1988; Suzuki, 1988; Naka, 1988など)。これらと陸源性砕屑岩層との混在作用については、構造性 (テクトニック・メランジュ)、堆積性 (オリストストローム)、あるいは両方、さらに最近ではダイアピルの成因などさまざまな見解が唱えられている。しかしながら、上記付加物質を含む泥質岩層の構造変形、ならびにフリッシュ相砕屑岩層との層序・構造的関係は不明な点が多く、混在岩層の形成と付加造構作用との関係についてはまだ、十分に把握されているとは言えない。

本論文では、九州四万十帯のサブダクション・コンプレックス帯をなす諸塚・北川・日向の地層群中で付加によって形成されたと考えられる堆積変形体について、メソスコピックな変形構造の幾何学的特徴の記載、変形相の識別を行い、付加変形とその造構環境を考察する。

#### II. 九州四万十帯中のサブダクション・コンプレックスの層序

九州四万十帯は北側より、諸塚、北川、日向、日南の4つの地層群に区分され、低～中角度で北あるいは北西へ傾斜する主要なスラスト (北側から古江衝上、延岡衝上、綾断層) によって南に若い層序・構造単位の構造的配置をなす (Fig. 1)。調査地域を含む九州東部ならびにその延長地域の大型化石ならびに浮遊性微化石に基づく年代証拠 (例えば、松本ほか, 1973; 中世古ほか, 1979; Nakaseko & Nishimura, 1981; 村田・佐藤, 1983; 小川内ほか, 1984; 加藤ほか, 1984; 加藤,

1985; 坂井ほか, 1984; 坂井, 1985, 1987; 奥村ほか, 1985; 西, 1987; Nishi, 1985, 1988; 酒井, 1988 など) に基づくと, 各地層群の陸源成砕屑岩層の時代は, 諸塚層群がアルビアン階後期~サントニアン階, 北川層群は, おそらく白亜紀末期~前期始新世と推定され, 日向層群は中期始新世~前期漸新世, 日南層群は後期漸新世~初期中新世に当たる (Fig. 1)。

このうち, 最南東部の日南層群を除いた北側の諸塚・北川・日向の3層群は, 緑色岩-遠洋性堆積物を特徴的に含むテクトニック・メランジュが存在すること, 海洋側に向く構造極性をもつ顕著な覆瓦スラスト・非対称褶曲構造の発達による地層の著しい側方短縮化が示されることなどから, サブダクション・コンプレックスに比較できる (勘米良・坂井, 1975; 坂井, 1978; 勘米良, 1980; 坂井・勘米良, 1981)。

サブダクション・コンプレックス帯の各地層群は共に類似の岩相層序と地質構造を示し, 岩相ならびに変形相の特徴によって, メランジュ, 下部フリッシュ, 上部フリッシュの3つの岩相・変形相単位に区分できる。各地層群中ではこれらのユニットは数 km 間隔で並走する北斜の覆瓦スラスト

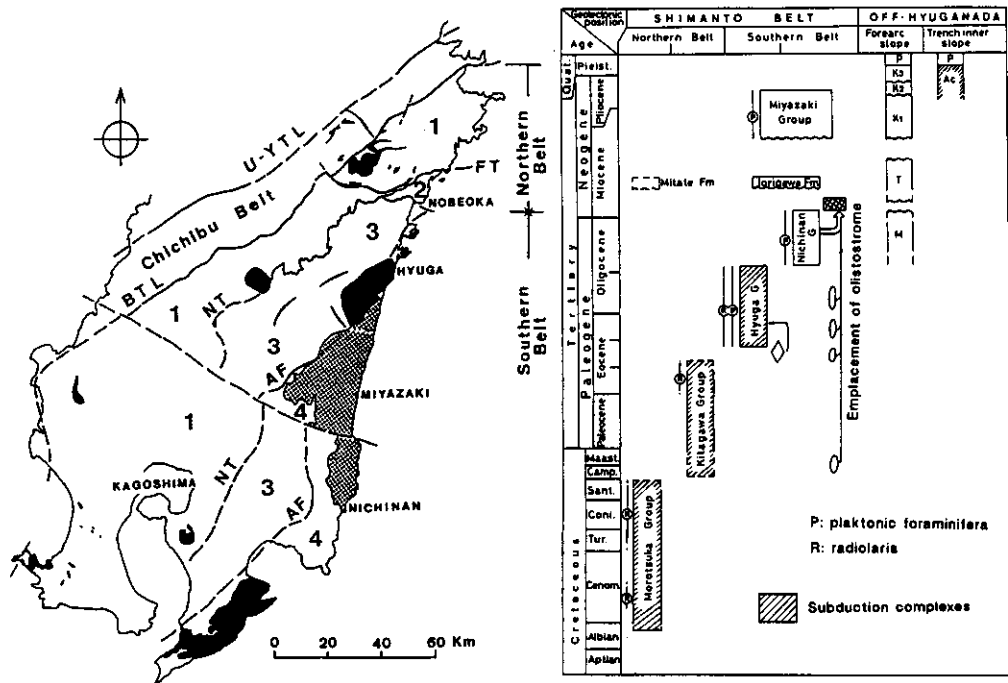


Fig. 1 Geotectonic division of the Shimanto Terrane in Kyushu.

Left: Major tectonostratigraphic divisions. 1-3, Early Cretaceous to Early Paleogene subduction complexes. 1, Morotsuka Group; 2, Kitagawa Group; 3, Hyuga Group; 4, Nichinan Group. Dotted: Miyazaki Group. Black: Felsic igneous rocks. U-YTL: Usuki-Yatsushiro Tectonic Line, BTL: Butuzo Tectonic Line, FT: Furue Thrust, NT: Nobeoka Thrust, AF: Aya Fault. Right: Stratigraphy of the Shimanto Terrane in Kyushu. Arrows indicate the replacement of age-known accreted oceanic rocks (rhombic), and olistoliths (ellipse). Stratigraphy of forearc region off-Hyuga is adapted from Okuda et al. (1979).

トで繰り返し出現する覆瓦構造をなす (fig. 2:坂井・勘米良,1981;fig. 3:坂井ほか,1984)。上記ユニットは主要な覆瓦衝上体の中ではメランジュ・ユニットから下部フリッシュ,上部フリッシュ・ユニットの順に構造的に重なる見かけの岩相層序を示す。

なお,各累層ならびに各ユニットの岩相の特徴は坂井・勘米良(1981)および坂井・艸場(1989:印刷中)を参照されたい。

### III. 付加コンプレックスの変形相

諸塚・北川・日向の各累層群は,北斜の覆瓦スラストおよびそれに伴われる南フェルゲンツの曲げスリップ褶曲とによって著しく側方に短縮した構造をなす。この覆瓦スラストと曲げスリップ褶曲は各累層群の3つのユニットに共通して認められ,kmスケールの大規模な岩相単位の繰り返しから露頭での変形構造まで,最も普遍的に発達し,各累層群の明瞭な帯状配列を規制する構造である。ところが,メランジュ,下部フリッシュの泥質岩ユニットでは,各ユニットに共通の覆瓦スラスト,曲げスリップ褶曲構造による地層の帯状の覆瓦配列以前に形成された変形構造が識別できる。

泥質岩ユニットの早期の変形構造には,直接・間接的に付加作用に関連した変形構造 (syn-accretionary deformations) が見いだせる。以下に,泥質岩ユニット中に記録されている早期の変形構造,特にそのメスコピックな特徴を記述する。

#### 1. メランジュ・ユニット

これは強く剪断された泥質岩層中に,緑色岩・遠洋性堆積物を構造包有物として含む構造的混在岩層 (テクトニック・メランジュ) である。このユニットは,他のユニットに比べて変形・変成度が高く,泥質岩は著しく片理が発達したテクトナイトになっている。元来の成層構造は完全に失われているが,それに代わって普遍的片理や岩塊の配列に示される構造ファブリックが発達する。メランジュ・ユニットの最も重要な相構造 (Facies structure: Uemura, 1981) はトランスポーズ構造である。これは地層が過度に折り畳まれることにより,顕著な層理の破壊と片理を伴っている。以下に,メスコピックな変形構造の特徴を述べる。

**A. 層理の破壊:** このユニット中では,普通,コンピーテントなタービダイト層は3次元的に延長を絶たれたレンズとなり,構造包有物として,周囲を密で強い鱗片状片理が発達した泥岩に取り囲まれて現れる。その産状は一見,擬礫岩あるいは含礫泥岩状の産状を呈する (Fig. 2-A,B) が,レンズの形態は,普通,菱形および長柱~紡錘形を示し,孤立化した褶曲冠部もよく認められる。

普通,レンズは露頭断面の方位により異なる形態を示す。注意深く観察すると,露頭断面によって菱形と長柱~紡錘形の2つのタイプが識別され,露頭断面によってそれぞれのタイプが卓越あるいは独占的に発達していることに気付く。先ず,菱形の内部構造が層理と斜交する剪断面で裁断されていることから,明らかに剪断作用によって形成されたものである (Fig. 2-A1, B2)。この層理の破断とレンズ化は後で述べる褶曲構造に伴って形成されている。つまりこの剪断性レンズは褶曲軸と直行する a c 面で出現する (Fig. 2-A1, B2)。剪断性レンズは菱形の長軸を周囲の泥質岩の片理と平行に配列しているが,褶曲軸を基準として個々の菱形レンズのエッジの非対称性のパターンが変わる。レンズのエッジはさらに偏平化され,しばしばブーゲンが重複して形成されることがある。次に,長柱~紡錘形のレンズは褶曲軸を含む a b 面に卓越的に現れる (Fig. 2-A2, B1)。a b

面では層理の分断化は a c 面のそれに比べて弱く、コンピーテント層はある程度延長性をもつ。ここでは、コンピーテント層の層理や葉理などの内部構造はレンズの外形と調和的に膨縮するブーダン構造を示す。つまり、層理の破断は a c 面に鉛直な圧縮あるいはそれと平行な展張によって生じたレンズであり、基本的には層理と斜交する剪断作用は関与していない。ブーダンの両端には、しばしば石英脈が伴なわれ、高い変形度を示す諸塚層群では neck line と平行な条線が認められる。

**B. 片理：**メランジュ・ユニットには普遍的で密な片理が発達している。これは多少とも湾曲し、不連続な形状をもつが、砂岩レンズ周辺では湾曲の度合いが大きくなり、いわゆる鱗片状片理となる。片理表面は良く研磨され、すべり条線を伴っている。これとほぼ平行に不連続な石英分結脈が発達し、縞状の外見を呈する。鏡下では黒く密なすじとして現れ、pressure solution の発達が顕著である。野外観察からは、後述の褶曲構造との密接な随伴関係が示される。つまり、基本的には軸面片理としての成因をもち、transposition 片理 (Sander, 1911; Weiss, 1972) に比較できる。砂岩レンズの追跡によって求められる褶曲包絡面 (S1) と片理面 (S2) とは常に斜交する関係をもつ (Fig. 2-A1)。a c 面では特に鱗片状となっているが、これは葉層やラミナが軸面と平行な細片化

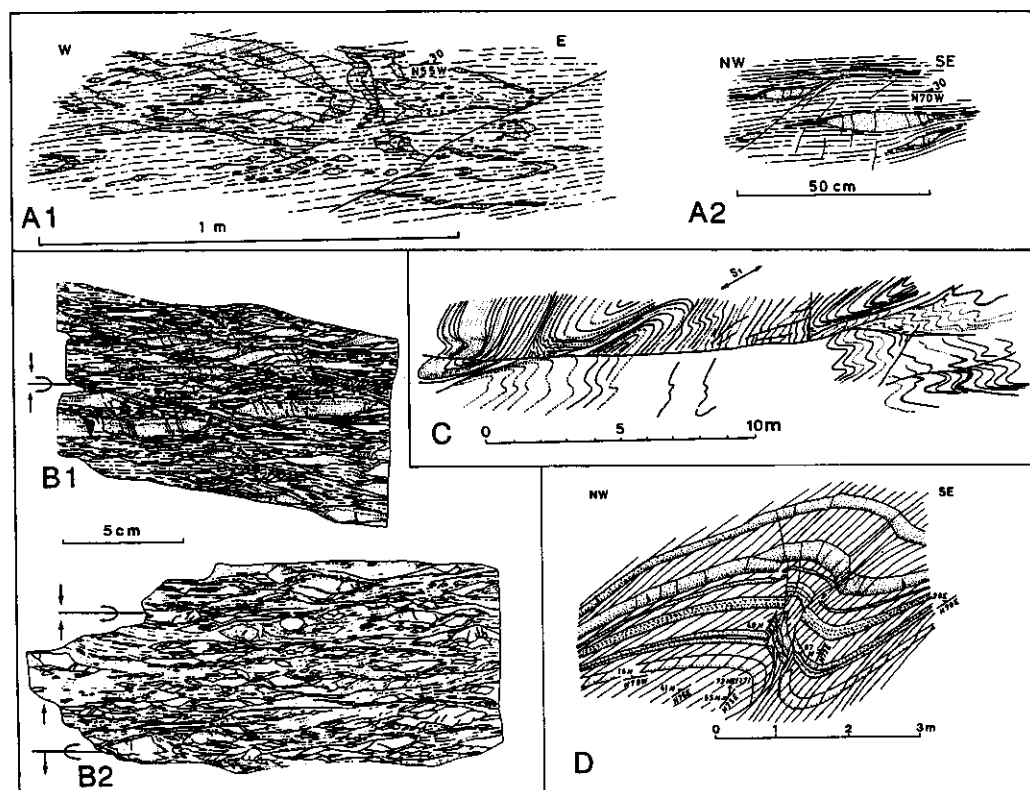


Fig. 2 Sketches showing two types of accretion-induced deformations.

Transposed structures in the Melange Units of the Morotsuka (A) and Kitagawa Groups (B). Shear folds in the Lower Flysch Units of the Kitagawa (C) and Hyuga Groups (D). Note the different type of sandstone lenses in two cross-sections; rhomboidal shear lenses and extensional boudinages, perpendicular and parallel to b-axis of folds, respectively.

と、層面すべりとによる回転のためである。a b 面では砂岩クラストの回転は微弱で、むしろ板状の単純な偏平化が示される。

包有される緑色岩ならびに多色粘土岩—チャートも著しい偏平化を受け、碎屑岩と同様に著しい変形を示す (fig. 4: 坂井・勘米良, 1981)。泥岩中に含まれるハイアロクラスタイトは墨流し状の流動変形を示すが、これは片理ならびに褶曲の形態から判断して、互いの間のダクティリティ・コントラストが小さかったためと考えられる。

今井ほか(1971)によれば、諸塚・日向層群のメランジュ・ユニット中の緑色岩はその変成鉱物の検討から、それぞれ、アクチノ閃石帯、ブドウ石—パンペリー石帯に属するとされた。一方、泥質岩には強い片理が発達し、他のユニットの泥質岩に比べて、イライトの鏡下での定向性は明瞭である。また、予察の段階であるがx線解析からはより高い結晶度が示される。

**C. 褶曲:**メランジュ・ユニットでは初生的な成層構造がほとんど完璧に失われているが、しばしば孤立した褶曲冠部を見い出せる。褶曲冠部が欠損する場合でも、レンズの上下判定や菱形の非対称性を利用して褶曲の存在を推定できる (Fig. 2-B)。褶曲自体の形態や輪郭は剪断による変位が弱い部分や同一の砂岩レンズの追跡できる場合に近似的に把握することができる。

このタイプの褶曲は、軸面とほぼ平行な剪断作用によるコンピーテント層の剪断破壊、それに沿う変位による層理の分化・孤立化、そして片理と平行な長軸の再配列を伴っており、トランスポーズ褶曲 (Sander, 1911) に相当する。これは剪断褶曲が過度に締め付けられることに加えて、軸面と平行な著しい flattening を伴うことによって形成されたと考えられる (Turner & Weiss, 1963; Hobbs, 1965)。

褶曲形態ならびに幾何学的性質は、露頭において元来同一層と見なされる砂岩レンズの追跡から褶曲の輪郭が把握できるものについて褶曲の姿勢・波形を検討した。一般に、強く閉じた形態を示し、翼間隔は一般に $30^\circ$ 以下である。軸面のトレンドはユニット中の広域的片理とほぼ平行関係にあるが、軸線はかなりプランジし、レクライン褶曲 (recline folds) に近い姿勢を示す (Fig. 4)。後期の断層や褶曲によって修飾されている場合を除いて、軸面は平面であるが、軸線は露頭あるいは地域によって方向とプランジ角が変化する。また、褶曲の規模は小さく、一般に、振幅 (A)・波長 (W) とともに 1 m を越えない。しかし、その比は高く、 $A/W$  は 1 に近い (Fig. 5)。

トランスポーズ褶曲については、層理の連続性が絶たれて、元来の多層構造が失われているために、その波形は近似的なものであり、曲げ褶曲に属する系列の褶曲とは直接波形の幾何学的性質を比較することはできない。しかしながら、このタイプの褶曲は他のユニットのそれと閉塞度ならびに短縮度が著しく大きい特徴をもつ。

## 2. 下部フリッシュ・ユニット

このユニットは末端相タービダイトを主体とする岩相で、北川・日向層群では、上部に泥質の地滑り堆積物を伴う。これには、早期に形成された変形構造で基本的に異なる2つの変形相が識別できる。一つは、スレート劈開を伴う剪断褶曲によって特徴づけられる変形相で、ユニット主部の黒色泥岩ならびに末端相タービダイト・泥岩互層の細粒碎屑性堆積物中に発達する。他の一つは、北川・日向層群において、このユニット上部の乱雑相堆積物中に出現するもので、重力滑動に起因するさまざまな層理の破壊と混在の様式を示す。以下、2つの変形相の構造的特徴を略述する。

**A. 剪断褶曲とスレート劈開:**このユニットの主体を占める成層した細粒相堆積物中には、卓越した相構造として、小褶曲とそれに伴われるスレート劈開を認めることができる。この褶曲は劈

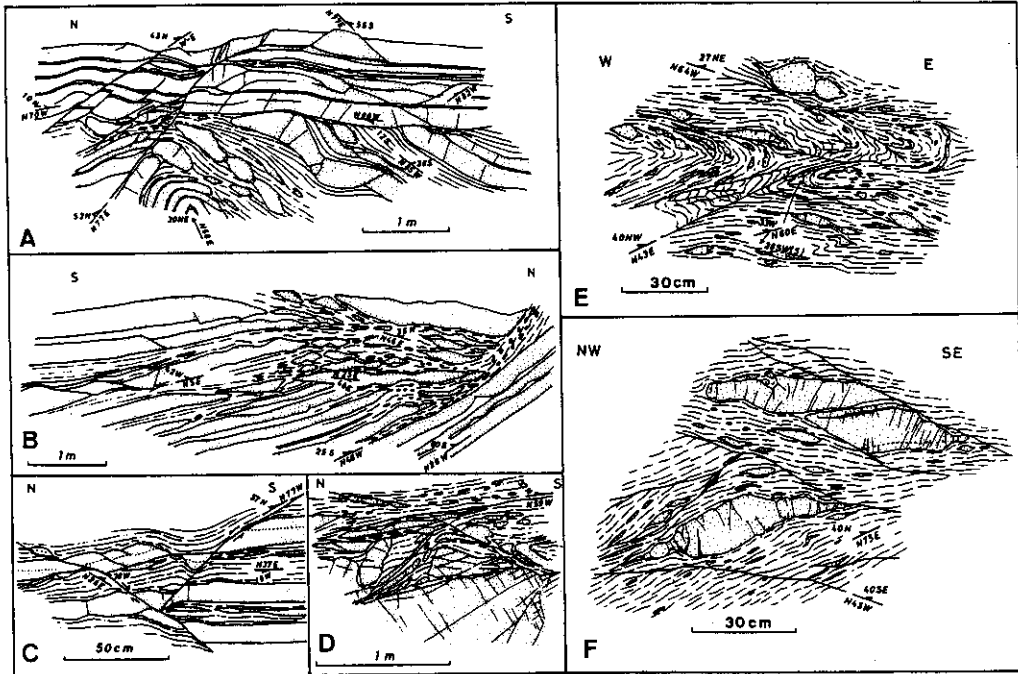


Fig. 3 Sketches showing some gravity-induced deformations in the upper part of the Lower Flysch Units.

A-D: Kitagawa Group; C and D: Hyuga Group. Note the co-existence of rhombic shear lens and extensional boudinage, associated with slump folds (A,D), and gravity sliding plane (B). Tilting and disruption of competent layers by conjugative listric faults (C). Later tectonic deformations in olistostrome, E: flexural-slip folding in the scaly cleaved slate with lenses, F: flattening of shear lenses, after the emplacement of gravity sliding.

開との随伴関係から剪断褶曲 (shear folds) にあたる。

一般に、軸部の波形はシェブロン形を示し、多くの場合、Ramsay (1967) の Class 2 に相当する相似褶曲である。また、南フェルゲンツの強い非対称性をもち、back limb は常に forelimb に比べて長い (Fig. 2-C,D)。軸面は通常、翼間隔の 2 等分面より低角度をなすことが多い。従って劈開が長翼と準平行に発達することがあるために (Fig. 2-C)、しばしば層面劈開と見誤ることがある。

褶曲軸面は低～中角度で北西側に傾き、軸線の傾斜角も変化に富む (Fig. 4)。翼間角は  $20^{\circ}$ ～ $40^{\circ}$  と閉じているが、トランスポーズ褶曲よりも大きい (Fig. 4)。規模は比較的小さく、普通、振幅は 1m を越えないことが多い。振幅・波長比は小さく、普通、0.5～0.1 程度である (Fig. 5)。タービダイト層がより厚層をなす部分では波長は数 m～10m と長くなることもあり、規模と岩相との間に正の相関が認められる。トランスポーズ褶曲の場合と同様に褶曲の姿勢は変化に富み、曲げスリップ褶曲に比べてプランジ角は大きい (Fig. 4)。

剪断褶曲はしばしば調和的な低～中角度のスラストをその翼部に伴い、著しい地層の短縮化を示す。しかしながら、比較的規模が大きい例外的な場合を除いて、上記の小褶曲が S、Z 形の非対称褶曲群として一つ次元の大きな大褶曲をつくることはない。また、幾つかの対の向・背斜の褶曲群が裁断されずに観察できる場合、褶曲包絡面は南側に傾斜する。

一方、剪断褶曲の軸面劈開として形成されるスレート劈開はしばしばアコーディオン・タイプの扇形をなすことがあり、タービダイト砂岩中では劈開の屈折を示す。しかし、一般的には、変成度の高い地層群中ほど劈開はより密で、システムテックに発達する。劈開に沿う剪断は弱く、層理の全体的な破壊や転移を生ずるには至っていない (Fig. 2-C,D)。褶曲翼部ではスラストを伴うことも多い。しかし、一般に、軸部でのコンピーtentな砂岩層の破壊は微弱で、軸と平行あるいは垂直な断面のいずれでも層理の分断・喪失は見られない。また、メランジュ・ユニットのように、石英分結脈は普遍的に発達することはない。鏡下では、変成作用の高い諸塚層群では片理に沿ってイライトの卓越した定向配列が認められる。しかし、北川層群から日向層群へと弱くなる傾向を持つ。なお、日向層群中で劈開の発達が弱い泥岩層では、粗く、微細で不連続な葉片状のファブリックを示すことがある。また、一部の褶曲軸部にはスレート劈開と平行に発達する砂岩岩脈が認められ、Maxwell (1962) の指摘のように、脱水過程での片理形成が示唆される。

**B. 未固結・重力滑動変形：**北川・日向の地層群では下部ユニット上部に、乱雑な層理を持つ泥質岩層が出現する。これらには、含礫泥岩や土石流などの高粘性の重力流堆積物のほかに、元来の成層構造がスランプ褶曲や伸張性断層によって著しく変形され、混在化したもの、さらに日向層群の場合ではさまざまな岩塊を含み、露頭から地質図に表示できる規模のものまで、多様な混在岩層が認められる。つまり、下部フリッシュ・ユニット上部は、地層単位としてのスランプ・土石流

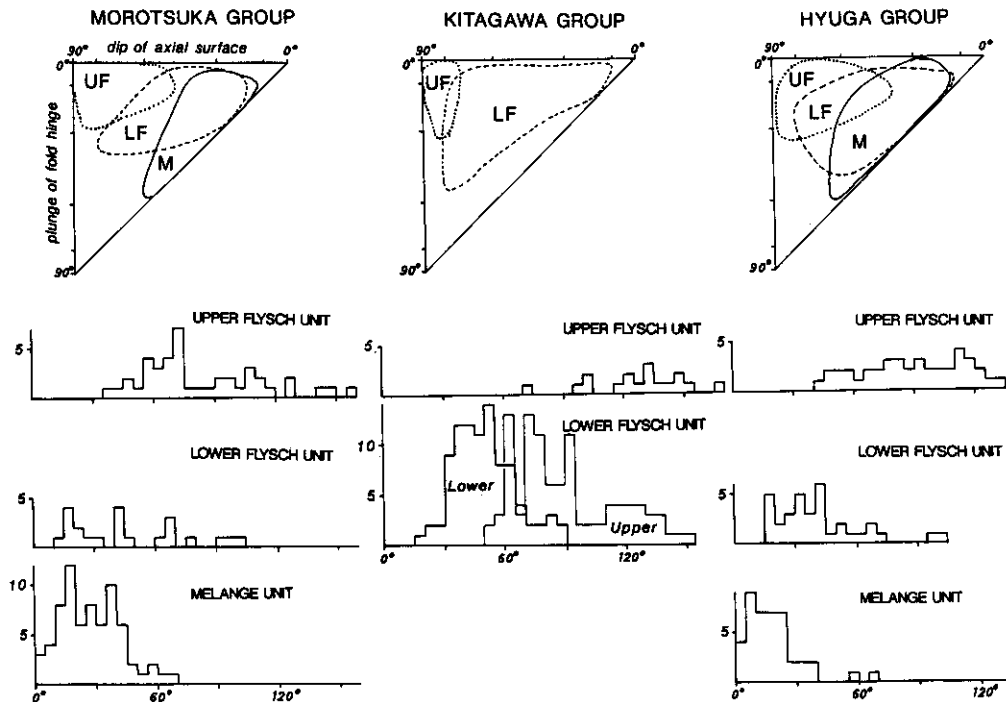


Fig. 4 Fold geometries of the subduction complexes of the Shimanto Terrane in Kyushu. Top: Attitude of folds. Letters M, and LF indicate the syn-accretionary transpose folds and shear folds in the Melange and Lower Flysch Units, respectively, and letter UF is the post-accretionary flexural-slip folds in the Upper Flysch Units. Bottom: Frequency of interlimb angle of folds in each Unit.

堆積物から、岩相単位の乱雑堆積物が含まれ、後者は構成岩相の均一性や、微化石証拠からブローケン・フォーメーションやオリストストローム（例えば、Hsu, 1974）に比較できる。本ユニット中の露頭規模の変形構造は、基本的に層理の側方への流動化を示すものであるが、形態的には多様な変化をもち、さらに後期の造構時階の剪断作用が加わって、複雑な混在様式を示す場合がある。ここでは、下部フリッシュ・ユニット上部の造構環境を考察する上で重要な初生的な成層構造の喪失に関連した変形と、剪断性オリストストロームについて述べる。

(1) 層理の破壊・流動化：本ユニットの乱雑な堆積体は、含礫泥岩、土石流堆積物などの礫質の泥質岩層を除いて、かなりの部分は、もともと泥岩に富む均一なタービダイト相の砂・泥互層からなっていたと考えられる。これには、スランプ褶曲による層理の流動および伸張性断層による層理の破壊・分断化が顕著である。

褶曲構造は、同一あるいは近接した露頭内での幾何学的性質の変化が著しく、一般に非調和な形態を持つ。コンピーテント層は軸部で同心円状の褶曲形態を示すことが多いが、強く閉じている場合、軸面は周囲の地層のトレンドと平行関係をもち、しばしば翼部が引き伸ばされて rootless folds になっている。軸部には普通、層面すべりは伴わないが、弱い軸面劈開を伴うことがある。また、翼部や断層に沿って展張性プーダンを伴うことがある (Fig. 3-A,D)。

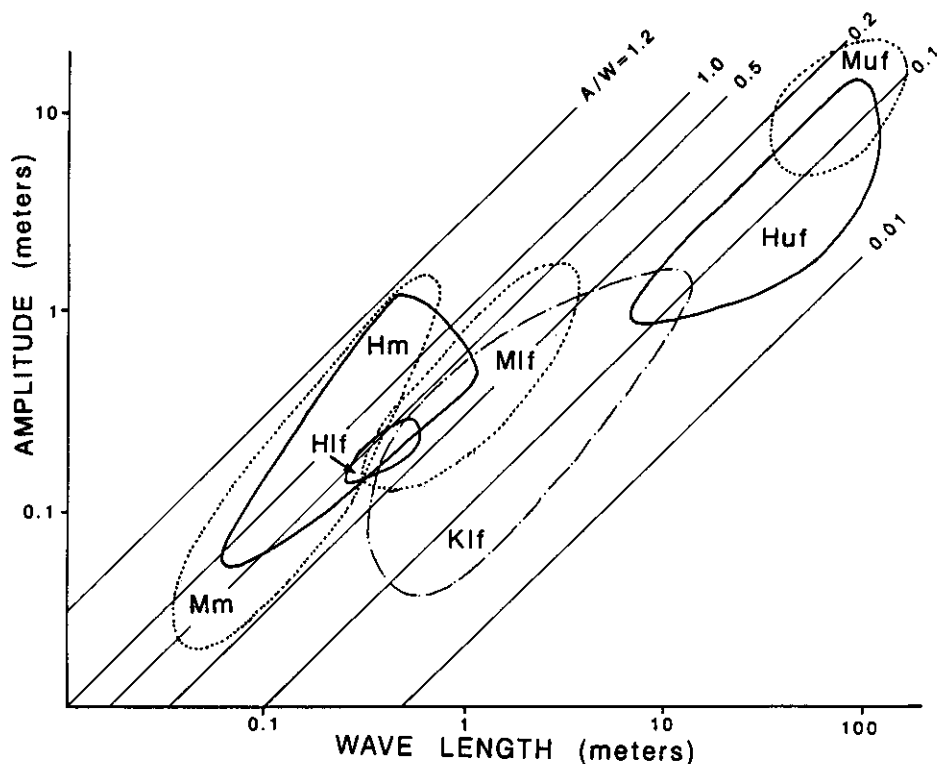


Fig. 5 Wave length and amplitude of folds in subduction complexes, the Morotsuka (M), Kitagawa (K), and Huga Groups (H).

Small letters, m, lf, uf indicate the transpose folds, shear folds, and flexural-slip folds in the Melange, Lower Flysch and Upper flysch Units, respectively.



コンピーテント層中にはその層理と低～高角度で斜交する断層がよく発達する。このような断層は、層理に対してアンチセティックな関係をもつことが多く、層理に対して正の変位を示す。中～高角の正断層は最も高い頻度で発達するもので、しばしば共役なセットをなす (Fig. 3-A,B,C)。また、層理に対して準平行もしくは低角度の滑り面に取れんする。また、より高角な断層は泥質岩中へは、次第に低角度となって泥岩中の劈開中に取れんしてしまうか、砂岩層の上・下面ですべり面を形成する。つまり、断層面はしばしばリストリックな形態を持ち、砂岩層の層理面との交線は湾曲しながら分岐・取れんしている。北川層群ではこれに砂岩岩脈を伴うことがある。これらには特徴的にアンチセティックな傾動を伴う (Fig. 3 C)。

リストリックな正断層のためにコンピーテントな砂岩層は剪断による層理の破壊を受け、傾動を伴う変位のために層理の分断化が生じ、露頭断面では菱形のレンズが形成される。さらに変位が増大すると、砂岩層レンズの長軸が泥岩中の劈開と平行に再配列し、レンズが泥岩中に孤立化した混在岩を形成する (Fig. 3-B,D)。コンピーテント層の分断化から分離そしてレンズとしての孤立化までは同一露頭における一連の変形過程として観察できる。

孤立化が進行した部分には菱形のレンズの定向配列が顕著となり、周囲の泥質部には砂岩レンズを取り囲むように鱗片状劈開が発達するようになる。この片理構造は、砂岩レンズの回転・再配列

Stage	Style of Deformations	Fold Type	Foliation Type	Disruption of Bedding	Mechanism of Deformations	Strain state
1						
2		Shear folds	Bedding cleavage incipient	Shearing along foliation planes		$0 < K < 1$
3		Flexural (-slip) folds Transverse folds	Bedding cleavage slaty	Rhombic lenses (perpendicular to b-axis) Boudinage (parallel to b-axis)	Layer parallel flattening (compaction) progressive lateral shortening	$K \neq 1$
4		"Dewatering"	Slaty cleavage Transposed foliation		progressive flattening	$0 < K < 1$
5						$0 \ll K < 1$

Fig. 6 Progressive deformations and structural features of accreted trench-fill turbidite sequence.

Stage 1: pre-accretionary unconsolidated state (1), stage 2: beginning of folding and tectonic dewatering due to offscraping process, stages 3 and 4: development of shear folding and lateral shortening of offscraped sediments, stage 5: intense flattening parallel to axial surface due to increasing of confining pressure.

に伴う泥質部の流動に起因していることは疑いない。その発達が局所的であることに加えて、新たに生成した粘土鉱物や石英分結脈なども伴っていない。

本ユニット中には前記のリストリック断層によるレンズのほかに、層理と平行な引っ張りによる膨縮構造、ブーゲンも普通に認められる。これは、より細粒の薄い砂岩層～葉層のほか、しばしば、スランプ褶曲や変位の大きな低角度正断層に沿って発達する (Fig. 3-A,B)。これらの変形構造の間には明瞭な変形時階は認め難く、むしろ共存的である。これらは、砂岩・泥岩の間のダクティリティ・コントラストや変位速度、滑動過程に生じる運動・物性変化などを反映した一連の流動過程で生じた構造と見なせる。

(2) 剪断性オリストストローム：日向層群の下部フリッシュ・ユニット上部中には強く剪断され、鱗片状片理が発達した泥質の乱雑堆積物が広く出現する。これには岩相ならびに微化石証拠から、隣接するメランジュ・上部フリッシュ・ユニットに由来する大小さまざまな角礫を包有し、規模の大きな地滑り体 (オリストストローム) に比較できる。オリストストロームには後期の構造変形を受け、剪断面や褶曲の発達のためにテクトニック・メランジュ状の外見を示すことがある (Fig. 3-E,F)。しかし、いずれにしても既存のファブリックを変形させており、トランスポーズ構造とは区別できる。元々の菱型の形態に伸長性ブーゲンが重複して形成されている場合もあり、オリストリスの再配列には片理に垂直な封圧が関与したことが示唆される (Fig. 3 F)。

下部フリッシュ・ユニット中では以上述べたさまざまな変形とともに土石流堆積物の乱雑な層理が複雑に重なって現れる。この様なバリエーションはおそらく、斜面堆積物自体の物性、変位の位置、変位量、変位速度などさまざまな因子を反映した結果と考えられる。

#### IV. 付加構造とその造構環境—四万十帯の剣ぎ取り付加と底付け付加

各累層群のメランジュ、下部フリッシュ・ユニットの示相構造の間には褶曲の幾何学的形態、随伴する片理との関係、コンピーテントな砂岩層の分断様式、さらに変成度などに顕著な違いが認められる。両ユニット中の強い側方短縮性の相構造は末端相タービダイト相の泥質岩層に形成されているが、岩相自体は極めて良く類似している。微化石証拠に富む日向層群を例にとると、この泥質堆積物はほぼ同時代の海溝充填堆積物に比較できる (坂井・艸場, 1989: 印刷中)。つまり、両ユニットの被変形層の岩相と時代とは等価であったと見なすことができる。また、両者は隣接して出現すること、同一の覆瓦スラストにより、重複変形を受けていることから、変形に要した時間はほとんど同じと見なすことができる。高次の構造レベルを示すトランスポーズ構造と、より低次の剪断褶曲とは共に広域的な剪断場で形成された褶曲構造であるが、それぞれのユニットで独立した変形相をなす。以上の事実は、両ユニット中の短縮構造が沈み込み帯の異なった造構環境でほぼ同時に形成されたことを意味しよう。

下部フリッシュ・ユニットでは剪断褶曲の幾何学的性質、例えば褶曲の姿勢、閉塞度、振幅・波長比など、またスレート劈開の発達程度が地域によって変化する。このような変化は若いユニットほど大きい。一部で認められる砂岩岩脈を伴う例は、剪断褶曲の形成が十分な砂岩層の固結前に始まったことを示唆する。

トランスポーズ褶曲と剪断褶曲は、褶曲の形態、それらの幾何学的特徴や規模、片理の随伴関係などに類似の性質をもち、基本的にはスリップ褶曲の系列に属する。最も明瞭な相違点は、片理に伴うコンピーテント層の分断・偏平化に示される。九州の四万十帯サブダクション・コンプレックスの場合、剪断褶曲からトランスポーズ褶曲への変化は、褶曲の強い締め付けに起因する (Turner

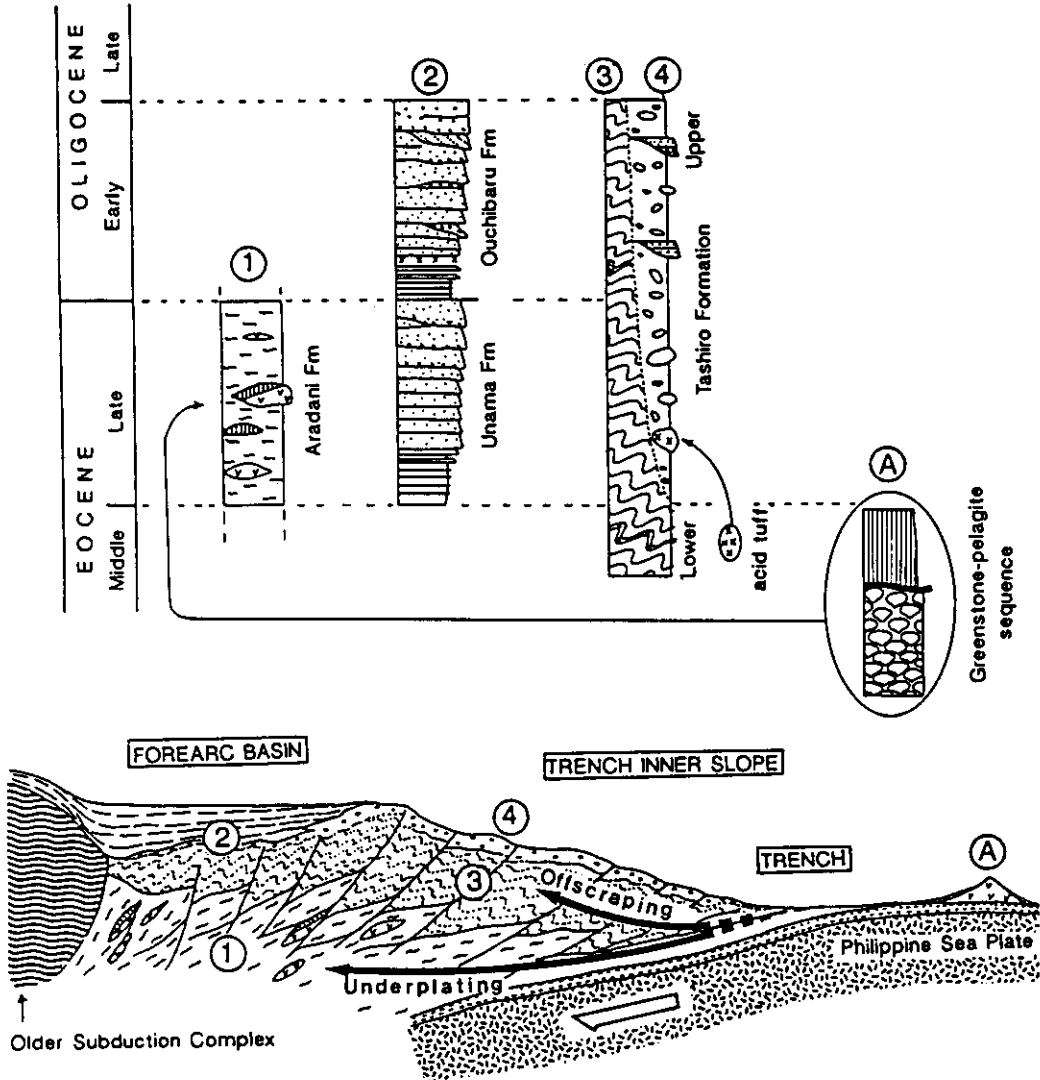


Fig. 7 Tectonostratigraphic reconstruction of the Hyuga Group and convergent forearc model.

Top: lithology and stratigraphy of the Melange (1), Upper Flysch Flysch (2), Lower Flysch Units (lower (3) and upper (4) formations), and the oceanic sequence (A). Bottom: Inferred sedimentary and deformationary site of each unit in forearc environments.

& Weiss, 1963)。つまり、メランジュ・ユニットの延性的変形は、軸面に鉛直な押しつぶしのためにコンピーテント層の層理が完全に喪失され、平均延性度 (mean ductility) が増大したことに起因する (Fig. 6)。

非対称の剪断褶曲は層理に平行な短縮と単純剪断で形成される (Smythe, 1971)。剪断褶曲の片理の発達には軸面と平行な XY 面上での短縮歪の増加に伴って、ペンシル構造からスレート劈開へと移行し、X 軸に伸張する押しつぶしの領域 ( $1 > K > 0$ ) となる (Ramsay & Huber, 1983)。褶曲軸方向に強い伸張を示すトランスポーズ褶曲は中間・最小歪比 ( $R_{yz}$ ) 増加に比べて最大・中間歪比 ( $R_{xy}$ ) が低く、より強い押しつぶしの歪領域 ( $1 > K \geq 0$ ) で形成されたと判断される (Fig. 6)。Toriumi &

Teruya (1988) は、九州—琉球四万十帯の変形・変成環境を変成鉱物組成とチャート中の放散虫遺骸を用いた歪解析を行い、付加体の10—15kmの深さで平面歪による累進的変形過程と結論した。諸塚層群中のチャート中では確かに高い伸張が示される。しかしながら、鏡下でのチャート中の放散虫遺骸や周囲の泥質岩中の碎屑粒子には pressure solution が認められ、これは延岡衝上付近ほど顕著となっている。pressure solution のために、実際以上に、鏡下では X 軸方向の歪が誇調された疑いがある。一方、Needham (1987) は九州の諸塚層群を含む四万十帯メランジュに、構造トレンドと平行な伸張性砂岩レンズが発達することを指摘した。これは Toriumi & Teruya (1988) の放散虫化石の最大歪軸方向と直行する。メランジュ・ユニット中の砂岩レンズの伸長方向は、剪断と押しつぶしの2つの機構によって形成されたもので、その最大伸長方向は基本的に、構造トレンドと斜交する上記の非円筒状トランスポーズ褶曲に規制されている。つまり、トランスポーズ褶曲の軸線は曲線をもち、場所によっては著しく突出した形態をもつことが予想される。従って、Y 軸と褶曲軸との斜交の程度に応じて  $R_{xy}$  比は変化し、平行に近いほど高い値を示すことになる。

トランスポーズ構造に伴う片理と平行なブーダンの形成、曲った軸線をもつ非円筒状の褶曲形態、さらに緑色片岩相下部の変成作用などから判断して、メランジュ・ユニットの造構環境は脆性・延性変形境界に近い延性的変形領域であったと推定される。ここで、トランスポーズ構造を形成した押しつぶしに関与した短縮作用の性質が問題となる。これは、片理面と鉛直な押しつぶしが沈み込みに伴う水平的な側方短縮化か、あるいは鉛直方向からの封圧かのいずれかである。Karig (1985) は、剥ぎ取られた覆瓦スライスは島弧側へ系統的な傾動 (Moore, 1978) が起こるために、付加体内部の応力—歪環境は沈み込み帯に沿う非共軸性の単純剪断から上方にはほぼ水平な押しつぶしの純粋剪断へと変化すると考えた。しかしながら、この見解は実際の四万十帯の変形相の分布と時代極性を説明できない。メランジュ・ユニットの押しつぶし作用は、全体の延性的変形特性から封圧に依存すると推測される。つまり、剪断褶曲からトランスポーズ褶曲への移行は、封圧の増加に伴い、単純剪断が卓越する非共軸性変形から封圧による押しつぶしの共軸性変形へと累進的に生じたと考えられる (Fig. 6)。

最近の現世海溝で行われた付加体の構造解析から、付加作用はこれまでの覆瓦スラストによる剥ぎ取り付加 (例えば、Seely et al., 1974; Karig, 1974; Karig & Sharman, 1975; Seely, 1979 など) のみならず、付加体深部での底付け付加の存在が明らかにされた (Watkins, et al., 1981; Moore et al., 1982)。特に、底付け付加はテクトニック・メランジュの形成に関係した機構と見なされた (Cowan, 1978; 1982; Moore et al., 1982; 加賀美ほか, 1983; Silver et al., 1985; Sample & Moore, 1987)。加賀美ほか (1983) は、南海トラフの音響断面ならびに音響物性の特徴に基づいて、その延長の四万十帯の地質構造と比較し、タービダイト層は覆瓦スラスト帯での剥ぎ取り作用、海洋底玄武岩・遠洋性堆積物を含むメランジュは多重階層デコルマン帯での底付け作用による付加体に相当すると考えた。

剥ぎ取り付加は、主に海溝斜面下底部での海溝充填堆積物が浅所で剥ぎ取られて海溝斜面の基盤を肥大・成長させる。ここでは、海洋プレートの沈みこみによって生じる単純剪断と付加体側からの荷重圧のために、未固結の海溝堆積物の機械的な脱水・剪断作用が累進的に進行する (Moore et al., 1986; Lundberg & Moore, 1986)。海溝斜面下では固結化に伴い、堆積物の側方短縮が起こり、非対称の剪断褶曲と早期の覆瓦スラストによるパイルナップが形成されるだろう。一方、付加体深部では引き続き強い剪断作用に加えて、高い封圧のために、変成され、延性的変形をもつテクトニック・メランジュが形成される環境となる。

また、底付け付加では、海山の破片以外に海洋地殻やその上位の遠洋性堆積物の構造的剥ぎ取りも生じる可能性もあろう。

## V. まとめ

以上の議論から、九州四万十帯のサブダクション・コンプレックス中の付加変形体は次のように整理できる。Fig. 7 には、微化石年代、堆積相、変形相の解析から復元された日向層群の前弧環境と付加過程を示す。

(1) 下部フリッシュ・ユニット：未固結の海溝充填の泥質タービダイトの何割かが海溝斜面下底部で剥ぎ取り付加を受ける際に、単純剪断と短縮作用のために脱水を伴う剪断褶曲、デコルマが形成され、褶曲ナップの積み重なりを作る。海溝斜面上では斜面崩壊により、背後の前弧海盆や海段堆積物、一部には付加された海山の破片を含むオリストストロームが被覆する。

(2) メランジュ・ユニット：何割かの沈み込んだ海溝堆積物は強い剪断変形とともに鉛直の封圧のために著しい押しつぶしを受け、底付け付加が生じる。この過程で剪断褶曲はトランスポーズ構造へと変化し、高い圧力のために層理の完全な破壊を生じて延性的変形挙動を示すことになる。

## 文 献

- Cowan, D. S., 1978: Origin of blueschist-bearing chaotic rocks in the Franciscan Complex, San Simeon, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. **89**, 1415-1423.
- 1982: Deformation of partly dewatered and consolidated Franciscan sediments near Piedras Blancas Point, California. in Legett, J. K., (ed.), *Trench-Forearc Geology*. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, no. 10, 439-457.
- 1985: Structural styles in Mesozoic and Cenozoic melanges in the western Cordillera of North America, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. **96**, 451-462.
- Dikinson, W. A., and Seely, D. R., 1977; Structure and stratigraphy of forearc regions. *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bull.*, v. **83**, 2-31.
- Hobbs, B. E., 1965: Structural analysis of the rocks between the Wuyungale Batholith and the Cooperharis thrust, New South Wales. *Geol. Soc. Australia Jour.*, v. **12**, 1-24.
- Hsu, K. J., 1974: Melanges and their distinction from olistostromes. in Dott, R. H. Jr., and Shaver, R. H. (eds.), *Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation*. *SEPM Spec. Pub.*, no. 19, 321-333.
- 今井功・寺岡易司・奥村公男, 1971:九州四万十帯北東部の地質構造と変成分帯. *地質雑*, v. **77**, 207-220.
- 加賀美英雄・塩野清治・平 朝彦:南海トラフにおけるプレートの沈み込みと付加体の形成. *科学*, v. **53**, 429-438, 岩波書店.
- 勘米良亀齡, 1976:過去と現在の地向斜堆積体の対応, I・II. *科学*, v. **46**, 284-291, 371-378.
- 1980:日本の地質. *岩波講座*, v. **15**, 325-350.
- ・坂井 卓, 1975:四万十川累層群の形成場は現在の海底ではどのような所に対応するか? *GDP連絡紙*, II-1-(1), *構造地質*, no. 3, 55-64.
- karig, D. E., 1974: Evolution of arc systems in the Western Pacific. *Earth and Planet. Sci. Ann. Rev.* v. **2**, 51-75.
- 1985: Kinematics and mechanics of deformation across some accreting processes. in Nasu, N. et al., (eds.), *Formation of Active Ocean Margins*, 155-177, *Terra Sci. Pub. Comp.*, Tokyo.
- and Sharman, III, G. L., 1975: Accretion and subduction in trenches. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. **86**, 377-384.
- 加藤高政, 1985:日南層群の層位学的研究. *東北大学地質古生物研報*, no. 87, 1-23.
- ・中川久夫・尾田太良・長谷川四郎・安田尚登, 1984:日南層群の層序と構造(予報). 齊藤常正ほか編, *総研研究成果報告書「日本の古第三系の生層序と国際対比」*, 113-130.
- Kodama, K., Taira, A., Okamura, M., and Saito, Y., 1983: Paleomagnetism of the Shimanto Belt in Shikoku, southwest Japan. in Hashimoto, M., and Ueda, S. (eds.), *Accretionary Tectonics in the Circum-Pacific Regions*. 231-241, *Terra Sci. Pub.*, Tokyo.

- Lundberg, N., and Moore, J. C., 1986: Macroscopic structural features in Deep Sea Drilling Project cores from forearc regions. in Moore, J. C. (ed.), *Structural Fabrics in Deep Sea Drilling Project Cores from Forearcs*, Geol. Soc. Amer. Mem., no. 166, 13-44.
- 松本達郎・大塚裕之・大木公彦, 1973: 鹿児島県下の四万十帯から産した白亜紀化石. 地質雑. v. 79, 703-704.
- Maxwell, J. C., 1962: Origin of slaty and fracture cleavage in the Delaware Water Gap Area, New Jersey and Pennsylvania. Geol. Soc. Amer. *Buddington* volum, 281-311.
- Moore, J. C., 1978: Orientation of underthrusting during latest Cretaceous and earliest Tertiary time, Kodiak Islands, Alaska. *Geology*, v. 6, 209-213.
- , Cowan, D. S., and Karig, D. E., 1982: Structural styles and deformation fabrics of accretionary complexes. *Geology*, v. 10, 77-79.
- , Watkins, J. S., Shipley, T. S., McMiller, K. J., Bachman, S. B., and Lundberg, N., 1982: Geology and tectonic evolution of a juvenile accretionary terrane along a truncated convergent margin: Synthesis of results from Leg 66 of the Deep Sea Drilling Project, southern Mexico. Geol. Soc. Amer. Bull., v. 93, 847-861.
- , Roeske, S., Lundberg, N., Schoonmaker, J., Cowan, D. S., Gonzales, E., and Lucas, S. E., 1986: Slaty fabrics from Deep Sea Drilling Project cores from forearcs. in Moore, J. C., (ed.), *Structural Fabrics in Deep Sea Drilling Project Cores from Forearcs*. Geol. Soc. Amer. Mem., no. 166, 75-88.
- 村田正文・佐藤 徹, 1983: 薩摩半島中部の四万十層群の放散虫化石群集. 日本地質学会第91学術大会要旨, 161.
- Naka, J., 1988: Volcanostratigraphic sequence of greenstones in the Setogawa Terrane, Central Japan. in Taira, A., and Ogawa, Y. (eds.), *The Shimanto Belt, Southwest Japan: Studies on the evolution of an accretionary prism*, *Modern Geol.*, v. 12, 243-282.
- 中世古幸次郎・西村明子・菅野耕三, 1979: 四万十帯の放散虫化石の研究 (白亜系放散虫を中心として). 大阪微化石研究会誌, 特別号, no. 2, 49p.
- Nakaseko, K., and Nishimura, A., 1981: Upper Jurassic and Cretaceous Radiolaria from the Shimanto Group in Southwest Japan. *Sci. Rep., Coll. Gen. Educ. Osaka Univ.*, v. 30, 133-203.
- Needham, D. T., 1987: Asymmetric extensional structures and their implications for generation of melanges. *Geol. Mag.* v. 124, 311-318.
- 西 弘嗣, 1987: 浮遊性有孔虫化石分帯による日向層群田代層の構造解析: 付加帯の構造解析の一例. 九大理研報, v. 15, 59-81.
- Nishi, H., 1985: Litho- and biostratigraphy of the Oligocene-Miocene Nichinan Group in the Miyazaki Prefecture, Kyushu. *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ., Ser. D., Geol.*, v. 25, 289-317.
- 1988: Structural analysis of partly of the Shimanto accretionary complex, Kyushu, Japan, based on planktonic foraminifera zonation. in Taira, A., and Ogawa, Y. (eds.), *The Shimanto Belt, Southwest Japan: Studies on the Evolution of an Accretionary Prism*, *Modern Geol.*, v. 12, 47-70.
- 小川勇二郎・谷口英嗣, 1987: 前弧域のオフィオリティック・メランジュと縦帯の形成. 九大理研報, v. 15, 1-23.
- Ogawa, Y., 1982: Tectonics of some forearc belts in and around the arc-arc crossing area in central Japan. in Leggett, J. K. (ed.), *Trench-Forearc Geology*. Geol. Soc. London, Spec. Pub., no. 10, 138-157.
- 小川内良人・岩松暉・田邊暁子, 1984: 宮崎県延岡市北東部の四万十層群の層序および地質構造. 鹿児島大理学部紀要 (地学・生物), no. 17, 67-88.
- 奥村義久・熊谷 誠・玉木貴裕, 1979: 西南日本外帯沖の堆積盆地の分布と性格: 特に構造発達史について. 石油技協, v. 44, 279-290.
- 奥村公男・寺岡易司・杉山雄一, 1985: 蒲江地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 地質調査所, 58p.
- Ramsay, J. G., 1967: *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, 568p.
- , and Huber, M. I., 1983: *Modern Structural Geology, Vol. 1: Strain Analysis*, Academic Press, 307p.
- 酒井治孝, 1988: 九州四万十帯南帯の都井岬オリストストローム I. 崩壊前の堆積環境と層序の復元. 地質雑, v. 94, 733-747.
- 坂井 卓, 1978: 宮崎県五ヶ瀬川中流域の四万十層群の地質構造と層序. 九大理研報 (地質), v. 13, 23-38.
- ・勘米良龜, 1981: 宮崎県北部の四万十帯の層序ならびに緑色岩の層序・構造的位相. 九大理研報 (地質), v. 14, 31-48.
- ・西国弘嗣・齊藤常正・中世古幸次郎・西村明子, 1984: 東九州四万十帯の微化石層序と地質構造. 齊藤常正ほか

- か編：総研成果報告書「日本の古第三系の生層序と国際対比」, 95-112.
- ・艸場 敬・西 弘嗣・小守道郎・渡辺正幸, 1987: 宮崎県日南地域の四万十帯オリストストーム：特にオリストリスの変形構造と配置の機構について, 九大理研報 (地質), v. 15, 166-199.
- ・——1989: 南九州上部四万十層群の形成環境と前弧モデルの吟味, 堆積学研究会報, v. 15, (印刷中).
- Sample, J. C., and Moore, J. C., 1987: Structural style and kinematics of an underplated slate belts, Kodiak and adjacent islands, Alaska. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 99, 7-20.
- Sander, B., 1911: Über Zusammenhänge Zwischen Teilbewegung und Gefüge in Gesteinen. *Tschermak's Minera. Petrolgr. Mitt.*, v. 30, 381-384.
- Seely, D. R., 1979: The evolution of of structural highs bordering major forearc basins. in Watkins, J. S., Montadert, L., and Dickerson, P.W. (eds.), *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins*. Amer. Assoc. Petrol. Geologists Mem., no. 29, 245-260.
- , D. R., Vail, P. R., and Walton, G. G., 1974: Trench solpe model. in Bulk, C. A., and Drake, C. L. (eds.), *The Geology of Continental Margins*. 249-260, New York, Springer-Verlag.
- Silver, E. A., Ellis, M. J., Breen, N. A., and Shipley, T. H., 1985: Comments of growth of accretionary wedges. *Geology*, v. 13, 6-9.
- Smythe, D. K., 1971: Viscous theory of angular folding by flexural flow. *Tectonophys.* v. 12, 415-430.
- Sugisaki, R., Suzuki T., Kanmera, K., Sakai, T., and Sano, H., 1979: Chemical composition of green rocks in the Shimanto belt, southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 85, 455-466.
- Suzuki, T., 1988: Geochemistry of metabasalts in the Shimanto Belt. in Taira, A., and Ogawa, Y. (eds.), *The Shimanto Belt, Southwest Japan: Studies on the Evolution of an Accretionary Prism*, *Modern Geology*, v. 12, 225-242.
- T., and Hada, S., 1979: Cretaceous tectonic melange of the Shimanto belt in Shikoku, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, v. 85, 467-479.
- 平 朝彦・田代正之・岡村 真・甲藤次郎, 1980: 高知県四万十帯の地質と起源, 「四万十帯の地質と古生物」, 林野弘済会高知支部, 319-389.
- Taira, A., Okada, H., Whitaker, J. H. McD., and Smith, A. J., 1982: The Shimanto Belt of Japan: Cretaceous-lower Miocene active margin sedimentation. in Leggett, J. K. (ed.), *Trench-Forearc Geology*, *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, no. 10, 5-26.
- , Katto, J., Tashiro, M., Okamura, M., and Kodama, K., 1988: The Shimanto Belt in Shikoku, Japan: Evolution of Cretaceous to Miocene accretionary prism. in Taira A., and Ogawa, Y. (eds.), *The Shimanto Belt, Southwest Japan: Studies on the Evolution of an Accretionary Prism*, *Modern Geol.*, v. 12, 5-45.
- Toriumi, M., and Teruya, J., 1988: Tectono-metamorphism of the Shimanto Belt. in Taira, A., and Ogawa, Y. (eds.), *The Shimanto Belt, Southwest Japan-Studies on the Evolution of Accretionary Prism*, *Modern Geol.*, v. 12, 303-324.
- 土谷信之・坂井 卓・勸米良龜齡, 1979: 九州耳川中流域における四万十帯緑色岩類の産状と岩石学的特徴, *地質雑*, v. 85, 445-454.
- Turner, F. J., and Weiss, L. E., 1963: *Structural Analysis of Metamorphic Tectonites*. McGraw-Hill, 545p.
- Uemura, T., 1981: Deformation Facies, series and grades. *Joru. Geol. Soc. Japan*, v. 87, 297-305.
- Watkins, J. S., et al., 1981: Accretion, underplating, and tectonic evolution, Middle America Trench, south Mexico: Result from Leg 66 DSDP, in Blanchert, R., and Montadert, L. (eds.), *Geology of Continental Margins*; *Int. Geol. Congr.*, 26th, Paris, Colloque 3, *Oceanologica Acta*, 213-244.
- Weiss, L. E., 1972: *Minor Structures of Deformed Rocks*. Springer-Verlag, 431p.