

総説

音波探査プロファイルに基づいた海底活断層の認定
—fault related fold, growth strata 及び growth triangle の適用—

岡村行信*

Yukinobu OKAMURA (2000) Identification of offshore active faults on seismic profiles -application of fault related fold, growth strata and growth triangle-. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (2/3), p. 59-77, 18 figs.

Abstract: Seismic profiles generally show fault-related folds and flexures rather than faults themselves. In order to infer fault geometry and active fault movements, studies of fault-related folding, growth strata and growth triangles were reviewed. Folding styles can be divided into hinge migration folding and fixed hinge folding. The former is characterized by an increase of the width of a limb while its dip and thickness remain constant. In contrast, the latter type of folding occurs by limb rotation. A hinge migration folding is widely recognized in low-angle thrust belts developed in sedimentary sequences. Based on the difference of relationship between folds and faults, fold styles are divided into fault-bend folding, fault-propagation folding and detachment folding. The strata deposited during growth of folds form a "growth triangle" that preserves the history of fold growth. In contrast, faults involving basement rocks accompany folds of which hinges are almost fixed, that are characterized by a downward increase of limb rotation and change in thickness. The trishear model is one of the models, which can explain characteristics of fixed hinge folding. Growth strata may show growth triangle like structure in the trishear model. In and around the Transverse Ranges in southern California, balanced cross sections including detachments at mid-crustal level have been constructed. The amount and rate of contraction have been estimated based on restoration of the sections. It is expected that collecting deep seismic profiles and drilling data will clarify the amount and rate of contraction in Japan.

要 旨

音波探査プロファイルでは、断層そのものより断層運動に伴って形成される撓曲を含む褶曲構造が明瞭に観察できる。このような断層運動に伴う褶曲構造から断層の形態を推定し、活構造の解析を行うため、fault-related fold 及びそれから発展した growth strata 及び growth triangle に関する今までの研究をレビューした。褶曲の成長様式は、傾斜が一定のまま幅が増加することによって成長するヒンジ移動型と、幅が一定で傾斜が増すことによって成長するヒンジ固定型に区分できる。前者は、堆積層の中にデタッチメントが形成される低角逆断層帯で広く発達し、断層と褶曲の関係から fault-bend fold, fault-propagation fold 及び detachment fold に区分される。これらの褶曲構造の成長過程は growth triangle と呼ばれる特徴的な傾斜帯として保存されていて、活構

造の成長史を記録している。一方、基盤を含む断層とそれに伴う褶曲構造はヒンジ固定型の成長様式を持つと考えられている。Trishear モデルはそのような変型様式を説明する一つのモデルで、変形が始まる前に堆積した地層でも下位の地層ほど傾斜が大きくなり、地層の厚さも変化する。しかしながら、ヒンジ固定型の褶曲でも条件によって growth triangle と類似の構造が形成される。日本周辺海域でも growth triangle が認められ、断層の活動史が保存されている。カリフォルニア州南部の Transverse Ranges では、バランス断面法を適用した地殻深部まで含む断面が作成され、地殻の短縮量や短縮速度が地質学的なデータに基づいて求められている。日本でも、地殻深部の反射断面やボーリングデータを充実することによって、信頼できる地殻の短縮量や短縮速度を求めることが期待される。

*海洋地質部 (Marine Geology Department, GSJ)

keywords: fault related fold, growth strata, growth triangle, offshore active fault, seismic profile

1. はじめに

音波探査(反射法地震探査)プロファイルは、海底下の地質構造を視覚的に明らかにできるという大きな利点を持つが、音波を用いるため、陸上の露頭で観察するように高分解能で地質構造を観察できないという欠点がある。プロファイル上の分解能は、条件に恵まれた場合に音源の波長の1/8-1/4が限界であるといわれている(Sheriff, 1977), 実際にはそれより低い。音波の水中音速はほぼ1500m/秒であるから、10Hz, 100Hz, 1kHzの音波の波長はそれぞれ150m, 15m, 1.5mとなり、周波数の高い音源を用いた方が分解能の高いプロファイルを得ることができる。周波数が数kHz以上の音源を用いた場合には1m以下の分解能が期待でき、1回の地震イベントが識別できる可能性があるが、このように周波数の高い音波は水中或いは地層中での減衰が大きいため、水深が数百m以上の海域では海底下の構造調査に使えない。そのような水深の海域で質の高いデータを得るため、数十Hz以下の音波を用いるのが普通で、10m以下の分解能を得ることはほとんど不可能であるので、個々の地震イベントを明らかにすることもできない。

このように、音波探査による活断層調査は分解能が低いという大きな欠点があるが、断層周辺の褶曲構造まで精度良く明らかにできるという利点もある。断層運動は必ず褶曲構造を伴っているが、両者がどのように関係しているのか、バランス断面(balanced-cross section)に基づいた構造解析法の発展によって理解が深まってきた。この考え方を活断層周辺の音波探査プロファイルに適用することによって、直接観察できない地下深部の断層の形態も推定可能となるし、断層変位量や地殻短縮量も褶曲構造から推定できる可能性がある。

2. バランス断面法と活構造の解析

一般に、地表付近の断層及び褶曲などの地質構造は精度良く調査できるが、地下深部の構造は不明瞭なことが多い。そのような限られた地質構造のデータから地下深部の構造を推定する手法として考えられたのがバランス断面法である。その基本的な考え方は、褶曲が断層運動によって形成されたもので、断層変位をゼロに戻すと褶曲した地層も変形前の自然な形の地層に復元できるはずであるというものである(Dahlstrom, 1969; Elliott, 1983)。

変形前の地層を復元するためには、断層運動に伴ってどのように褶曲が成長するかを明らかにする必要がある。構造地質学の教科書によく描かれている模式的なブロックダイヤグラムでは、断層面が単純な平面なので、その断層面に沿って両側のブロックの変位を戻すだけで変形前の地質構造が復元できる。しかしながら、断層が

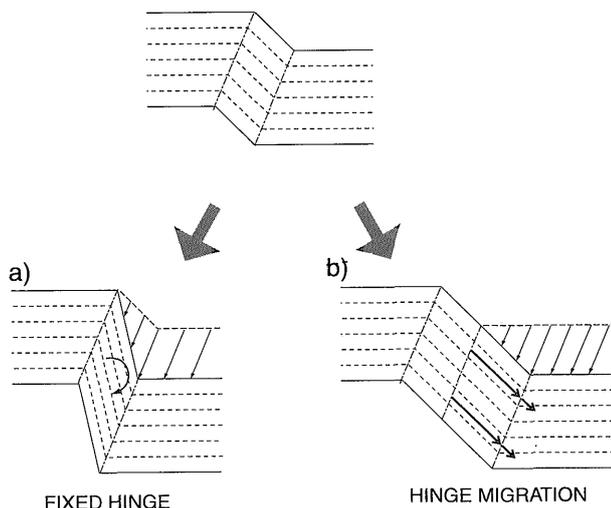
折れ曲がっていたり、断層面上で変位量が変わると、断層上盤の地層が褶曲する。このように断層運動によって形成される褶曲構造は、fault-related foldと呼ばれている。バランス断面法では、断層の折れ曲がりや変位量の変化を定量的に扱うことによって、断層と褶曲構造との関係を明確にした(Suppe, 1983; Suppe and Medwedeff, 1990)。その関係を用いることによって、褶曲構造から地下の断層の形を推定したり、断層運動に伴う褶曲の発達過程の推定が可能になった。

この方法に基づいて地質構造を解析し、その復元を行えば、断層の変位量、地殻の短縮量を求めることができ、地層の年代がわかれば変位速度や短縮速度も推定できるはずである。さらに、断層の成長中に堆積した地層(growth strata; Suppe *et al.*, 1992)の形態から、伏在断層の形態や最近の活動なども推定可能になる。このような考え方を適用した活構造の研究は日本ではまだ少なく、その有効性も十分に理解されていないと考えられる。本報告では、バランス断面法の発展によって明らかになった断層と褶曲の基本的な関係及び活構造の解析に重要なgrowth strataについて主に解説する。また最後に、活構造をバランス断面法で解析し短縮速度を推定した研究についても簡単に紹介する。

3. 2つのタイプの褶曲

褶曲構造はキック褶曲で近似できることが多い。キック褶曲を構成するキックバンドは、キックバンド内の地層の傾斜を一定に保ったまま幅を広げて成長するタイプと、幅が一定で傾斜が大きくなることによって成長するタイプに2分できる(第1図)(Fischer *et al.*, 1992; Suppe *et al.*, 1997)。前者をヒンジ(キックバンドの境界)移動型、後者をヒンジ固定型と呼ぶ。バランス断面法は低角逆断層帯の地質構造を推定するために発達してきたが、そこではヒンジ移動型の褶曲が広く発達している。一方、基盤を含む高角の逆断層に伴う褶曲ではヒンジ固定型の褶曲が形成されやすいと考えられる(例えばMcConnell, 1994)。

日本列島とその周辺海域に分布する活断層は、南海トラフや日本海溝を除いて、大部分の断層が基盤を含む逆断層や横ずれ断層であると考えられる。そのような断層とそれに伴う褶曲構造の解析にも、ヒンジ移動型の褶曲の考え方が有効である場合が多い。そこでまず、バランス断面法の考え方を理解するために、低角逆断層帯に広く発達するヒンジ移動型の褶曲について基本的な形態とgrowth strataについて解説し、ヒンジ固定型の褶曲については、その後に述べる。



第1図 2つのタイプのキンクバンドの成長様式。
 a) ヒンジが固定したままキンクの回転によって傾斜が増すことによって成長するタイプ (ヒンジ固定型), b) 傾斜が一定のままヒンジの移動することによって成長するタイプ (ヒンジ移動型)。

Fig. 1 Two types of growth pattern of kink bands
 a) fixed hinge type growth by kink band rotation between fixed hinges, b) hinge migration type growth by kink band migration with constant dip.

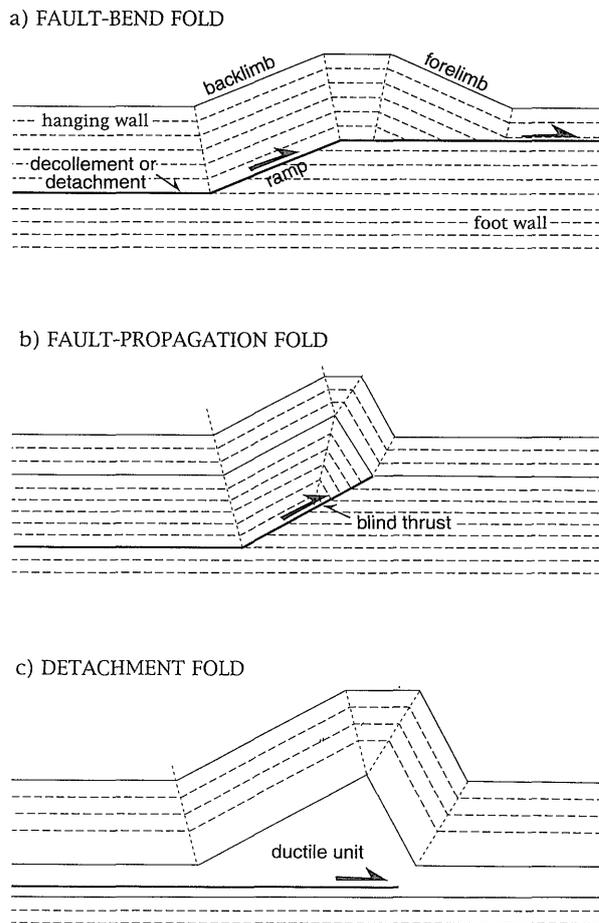
4. ヒンジ移動型の褶曲

4.1 低角逆断層と褶曲

単純な低角逆断層はデタッチメント (detachment) 或いはデコルマ (decollement) と呼ばれる地層に平行な断層と、それからほぼ一定の角度 (一般に40度以下) で立ちあがるランプ (ramp) と呼ばれる地層を斜めに切る断層からなる (Rich, 1934; 第2a 図)。このような形態は ramp-flat geometry と呼ばれる。断層の先端が地表に露出する場合は顕在逆断層 (emergent thrust), 地下で消滅する場合は伏在逆断層 (blind thrust; 第2b 図) と呼ぶ。このような逆断層が活動することによって、ランプの上に背斜構造が形成される。背斜構造の記述のため、上盤の移動方向を前側と呼び、背斜構造の前側の翼を前翼 (forelimb), 反対側を後翼 (backlimb) と呼ぶ (第2a 図)。背斜構造は断層との関係の違いによって, fault-bend fold (Suppe, 1983), fault-propagation fold (Suppe and Medwedeff, 1990) 及び detachment fold (Jamison, 1987) の3つの fault-related fold に区分される (第2 図)。これらの褶曲様式はさらにいくつかのタイプに細分できるが、最も単純で基本的な3つの褶曲について、断層との関係を解説する。

4.2 基本的な仮定

低角逆断層と褶曲との関係を考える際には、以下のよ



第2図 低角逆断層に伴う3つのタイプの背斜構造。

Fig. 2 Three types of fault-related folds.

a) fault-bend fold, b) fault-propagation fold, c) detachment fold.

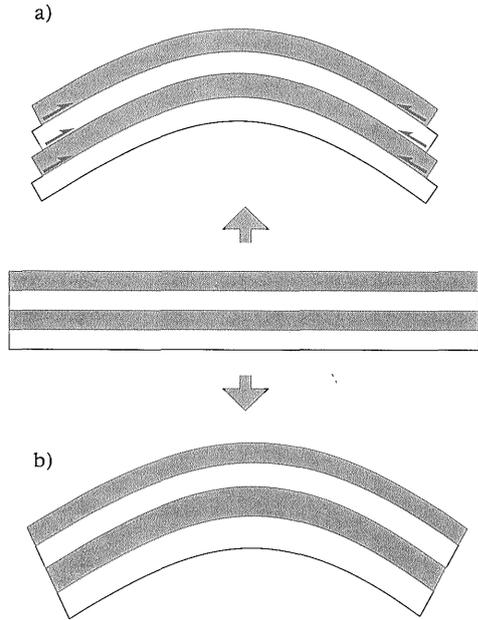
うな仮定を前提としている (Suppe, 1983)。

- 地層の厚さと体積は、変形後も維持される。

厚みのある地層が褶曲すると内部に歪みが生じるが、それは層理面に沿った滑りで解消され、地層の厚さは保持される (parallel behavior; 第3 図) と仮定する。体積と厚さが変化しなければ、地層の長さも保持される。逆に、層理面に沿った滑りが生じなければ、地層が一定の厚さを保てない (第3 図)。

- 地層の形態はキンク褶曲で近似する。

かつては、同心円状の形態を持つと仮定して地下の褶曲構造を推定していたが (バスク法)、実際には地層の傾斜がほぼ一定の部分と狭い範囲で変化している部分とに明瞭に分かれていることが多く、キンクバンドの集合体として近似できる (第4 図)。傾斜が一定の領域は homogeneous dip domain (本報告では等斜帯と呼ぶ)、その境界は dip domain boundary, hinge, axial surface などと呼ばれる (本報告では軸面と呼ぶ)。地質構造をこのようにキンク褶曲で近似することによって、地層の長さや断面積の計算が容易になり、地層と地質構造の定量的



第3図 地層の曲げに伴う変形の模式図。
 a) 層理面に沿った滑りが生じるタイプ。地層の厚さが一定に保たれる。b) 層理面に沿った滑りが生じないタイプ。地層の厚さが変化する。
 Fig. 3 Deformation of sedimentary layer due to buckling.
 a) Buckling with layer parallel slip. Bed thickness and length remain constant.
 b) Buckling without layer parallel slip. Bed thickness and length vary.

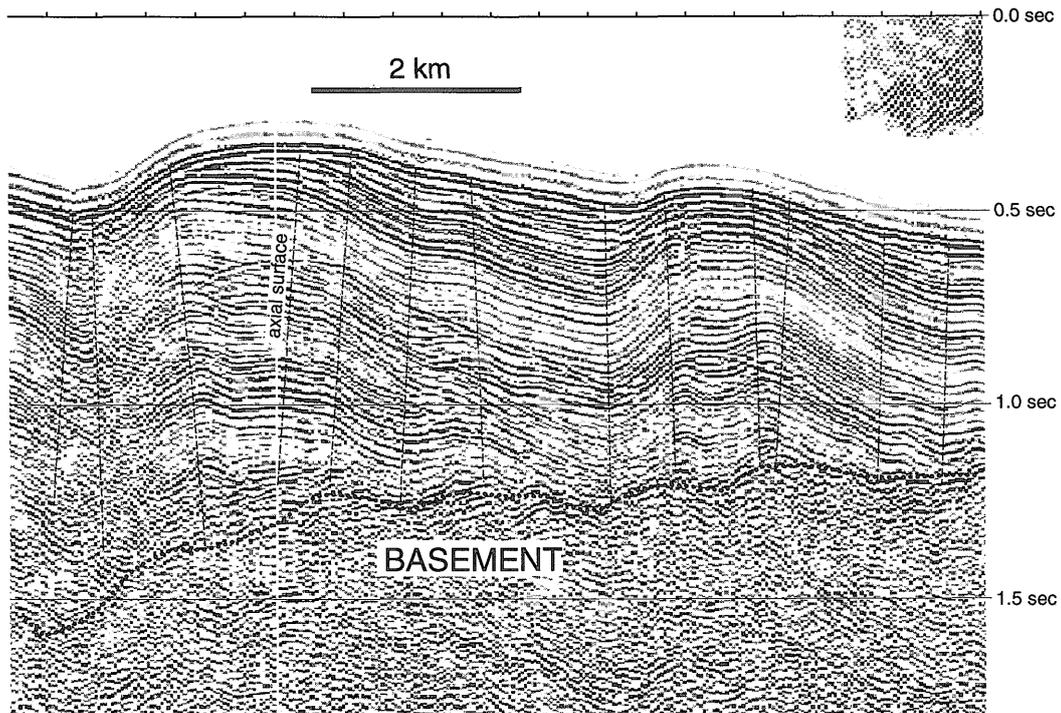
な扱いが容易になる。また、キンクした両側の地層の厚さが変化しなければ、軸面は両側の等斜域の間の角度を2等分した方向に伸びることになる(第5図)。

・地下には空間が生じない。
 断層の上盤が完全な剛体だとすると、断層の折れ曲がりを通じた上盤と下盤の間に空間が形成されることになる。実際には岩石自身が大規模な地下の空間を支える強度を持たず、上盤が断層に密着するように折れ曲がる。従って、断層の折れ曲がりがあれば上盤も折れ曲がって軸面が形成される。逆に地表付近の軸面の下方延長上に断層の折れ曲がりが存在することが推定できる。

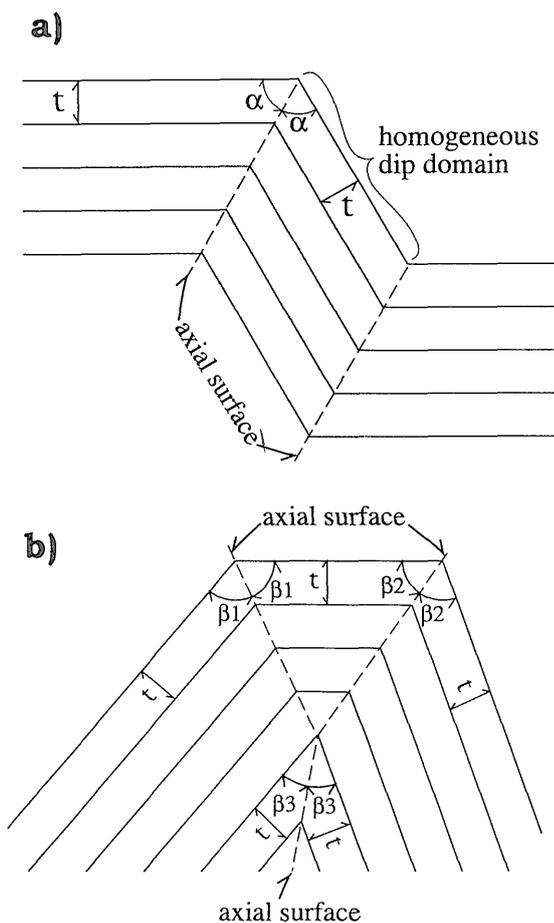
・断層下盤は変形しない。
 断層の下盤は変形しない。ただし、実際には堆積物からなる下盤には、圧密などによる変形が生じているので、厳密な地質構造の検討には下盤の変形も考慮する必要がある。

・褶曲の外側では上盤に層理面滑りが生じない。
 褶曲の形成は層理面の滑りを必要とするが、それは背斜構造の中で生じ、背斜構造の外側まで達しない。

以上の仮定を基に、不完全な地質構造データから地質断面を完成させたり、地質断面上で断層変位を戻し、自然な形に地層になるかどうかを検証でき、その断面図が信頼できるかどうかを検証可能になる。



第4図 キンクバンドの集合として近似できる褶曲構造。日本海の佐渡海嶺で地質調査所が取得したシングルチャンネルのプロファイルでマイグレーション処理がされている。破線が軸面。
 Fig. 4 Migrated single channel seismic profile of Sado Ridge in eastern margin of Japan Sea. Folds can be approximated by kink bands. Broken lines are axial surfaces.



第5図 キングバンドの形態。
軸面が地層の折れ曲がりを2分する方向に発達すると、その両側の地層の厚さが変化しない。
Fig. 5 Kink band geometry.
Bed thicknesses are constant through kink bands which are bounded by bisecting axial surface.

4.3 fault-bend fold

fault-bend fold は層準の異なるデタッチメントを結ぶランプ上に形成される (第6図; Rich, 1934). Suppe (1983) は、先に述べた仮定に基づいて fault-bend fold と断層の形態との関係を三角関数を用いた数式で表すことが可能であることを示した。ここでは基本的な断層と褶曲の関係についてのみ述べる。

背斜構造は前翼、後翼及び背斜上面の平坦面からなり、前翼及び後翼の前側と後ろ側に、合計4つの軸面が形成される (第6c, d図)。上盤ランプと下盤ランプは最初と同じ場所にあったが、断層が変位するにつれて、上盤ランプが前側に移動していくことになる。

前翼は上盤ランプが前方のデタッチメントに押しつけられた部分に相当する。前側の向斜軸面は上盤ランプの前端から上に伸びており、褶曲が成長する間も上盤に対して固定されている。一方、前翼後ろ側の背斜軸面は下盤ランプ前端から上に伸び、下盤に対して固定されてい

る (第6c図)。このため、この背斜軸面は断層の変位に伴って上盤の地層の中を後ろ側に移動する (roll)。断層の変位量がランプの長さを超えると、上盤ランプ全体が前側のデタッチメント上に乗ることになり、前翼全体が上盤に対して固定される (第6d図)。

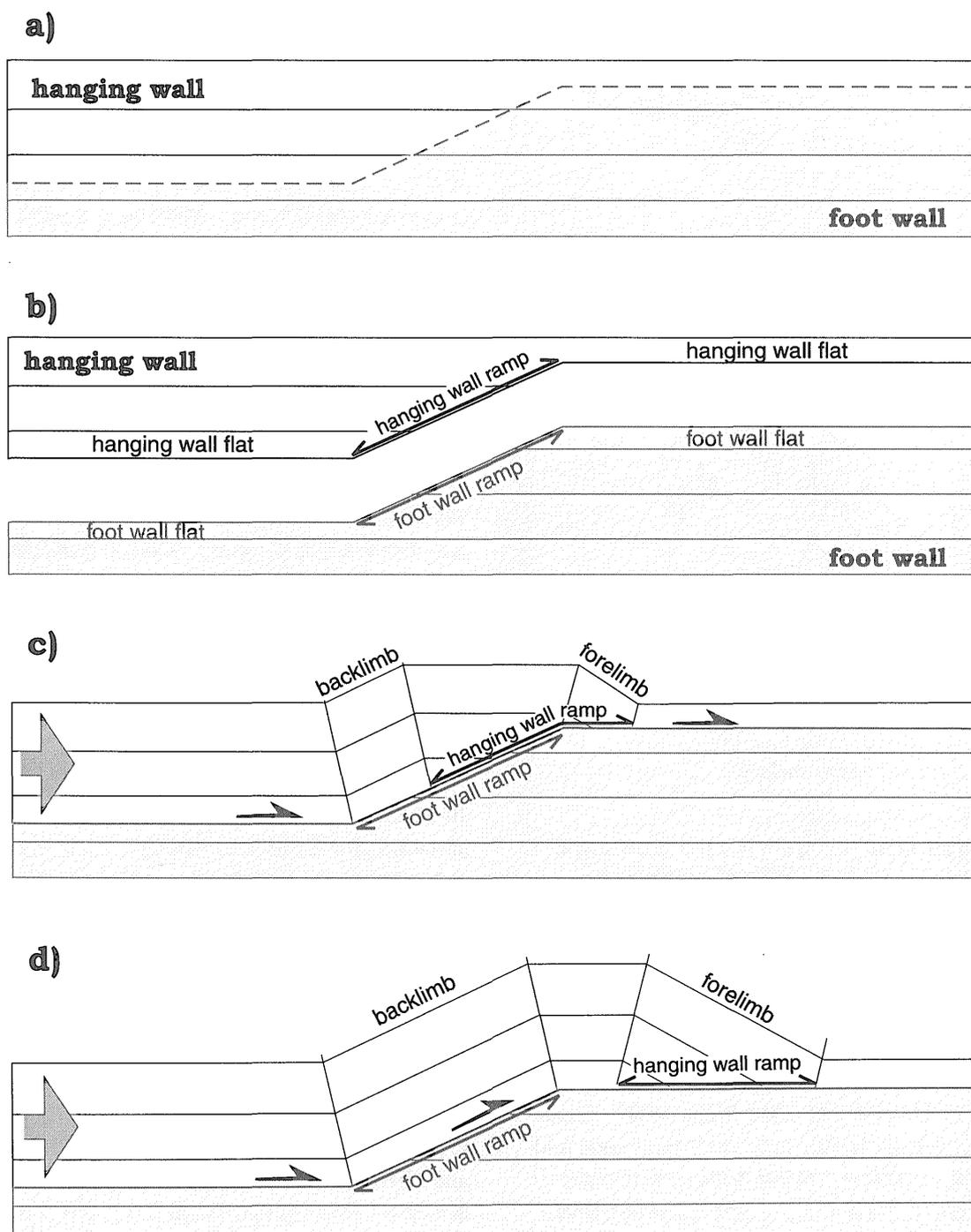
後翼はランプより後ろ側の上盤が下盤ランプに乗り上げるために形成される。前側の背斜軸面は上盤ランプの下端から上に伸びており、褶曲が成長する間も上盤の地層に対して固定されている (第6c図)。一方、後翼後ろ側の向斜軸面は下盤ランプ下端から上に伸び、下盤に対して固定されていて、断層の変位に伴って上盤の地層の中を移動する (第6c図)。断層の変位量がランプの長さを超えると、後翼前側の背斜軸面は、下盤ランプの上端に固定されることになるので、上盤の地層中を後ろ側に移動することになる (第6d図)。この褶曲では軸面の位置は断層の折れ曲がりに対応していることから、地表付近の背斜構造が、地下深部の断層の折れ曲がりの存在を推定する手がかりを与えてくれる。前翼及び後翼の傾斜が背斜構造の成長中も一定で、軸面が移動して幅が広がることによって背斜の規模が大きくなる。断層の変位量がランプの長さを超えた後は、背斜構造の高さは変わらず、背斜上面の平坦部の幅が広がるだけとなる。

上盤が断層の折れ曲がりを超えると、そこですべり量が変化する。実際には向斜軸面ではすべり量は増加し、背斜軸面では減少する。ただし、向斜軸面での増加率は10-20%以下であるのに対して、背斜軸面での減少率は40-60%に達する。従って、階段状にランプとデタッチメントが繰り返すと、地表付近では断層変位量はかなり減少することがある。

4.4 fault-propagation folds

この褶曲は伏在断層に伴う背斜構造で、ランプ上で変位量が上方に減少し、断層が途中で消滅する場合に形成される (Suppe and Medwedeff, 1990; 第7図)。ランプより後ろ側の上盤は前へ滑るが、断層の先端より前には滑らないので、背斜構造として上に盛り上がる。Suppe and Medwedeff (1990) は fault-propagation folds を地層の厚さと体積が維持しつつ成長するタイプと背斜軸が固定されつつ成長するタイプに区分し、それぞれの断層と褶曲の形態を三角関数を用いて表現している。この褶曲は前翼が急傾斜或いは逆転する閉じた背斜を形成する 경우가多く、fault-bend folds のように背斜軸面の移動が簡単に生じるとは考えにくいことから、背斜軸が固定されるタイプの褶曲が考えられた。この場合には前翼の地層の厚さは一定でなく、条件によって厚くなったり、薄くなったりする。

背斜構造の内側では、前翼と後翼が1つの背斜軸面で接し、外側では背斜軸面が2つに分かれて、前翼と後翼との間に平坦な頂部が形成される (第7図)。背斜軸面が

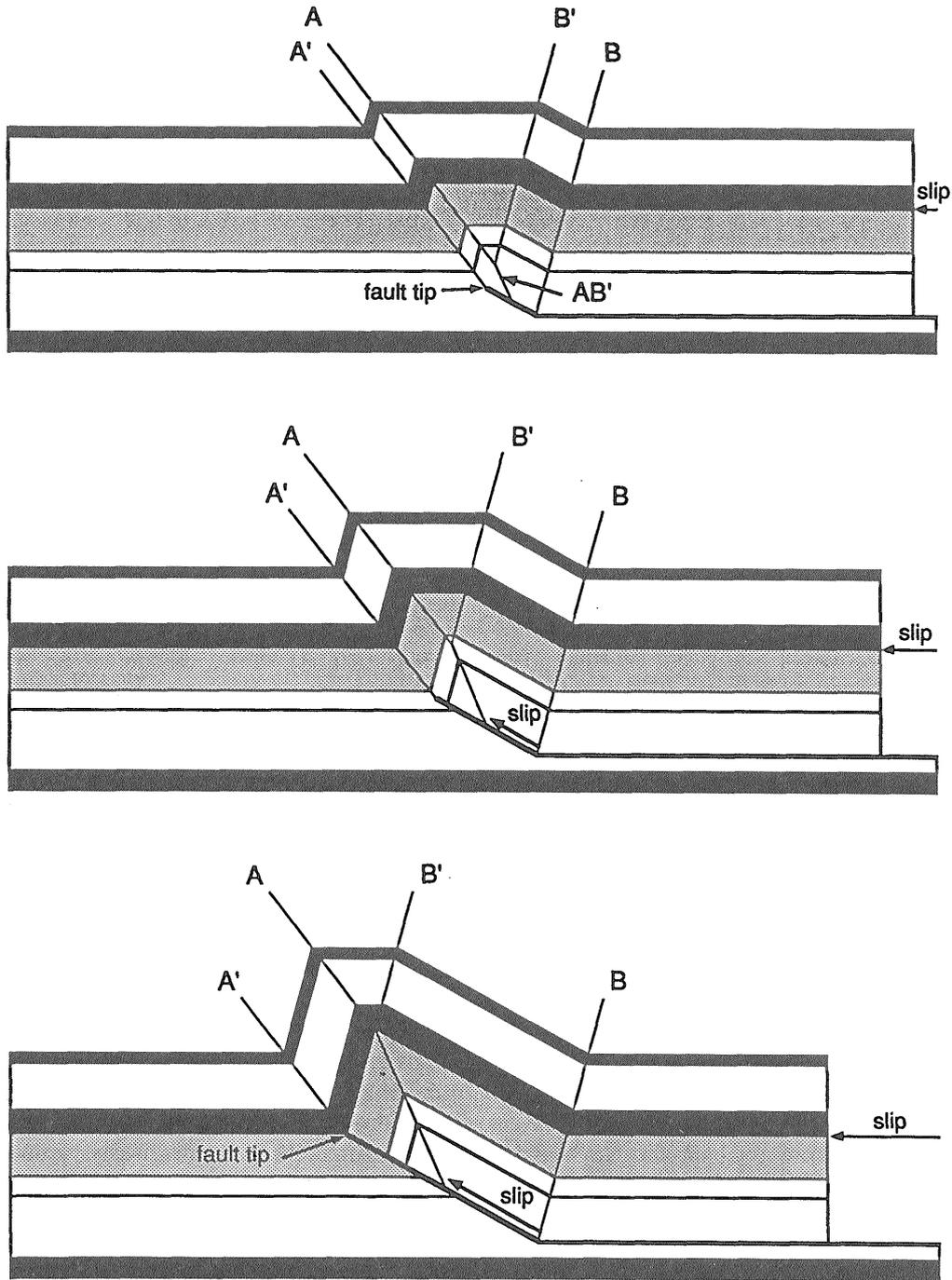


第6図 模式的なfault-bend foldの成長様式。

a) 断層の形成前, b) 上盤と下盤にそれぞれに定義されるランプとフラット(デコルマ), c) 断層変位量がランプの長さを越えない状態。前翼と後翼の境界は上盤及び下盤のランプの端に規制されている。d) 断層変位量がランプの長さを越えた状態。前翼は上盤ランプに, 後翼は下盤ランプに規制されている。

Fig. 6 Growth of fault-bend fold.

a) pre-faulting, b) ramp and flat are defined in a hanging wall and a foot-wall, c) fault displacement is less than the length of the ramp. Hinges of the forelimb and the backlimb are fixed to the ends of ramps, d) fault displacement exceeds the length of the ramp. Hinges of the forelimb and backlimb are fixed to a hanging wall ramp and a foot wall ramp, respectively.



第7図 fault-propagation foldの成長様式 (Suppe and Medwedeff, 1990).
断層が成長するにつれて、背斜構造の頂部平坦域の幅が狭くなる。さらに断層の成長が続くと、断層が堆積層を突き抜ける。

Fig. 7 Growth of fault-propagation fold (Suppe and Medwedeff, 1990).
Apical flat of anticline narrows as the fault propagates and finally the fault breaks through the sedimentary unit.

2つに分かれる層準は、断層の先端 (fault tip) の層準と同じである。断層の発達に伴って、断層の先端は上に伸びつつ背斜構造が成長する。前翼の前側の向斜軸面は断層先端から上に伸びるので、地層中を前側に移動してい

く。背斜軸面が2分する点も断層の成長とともに上位の層準に移動するため、前翼の後側の背斜軸面は後側に、後翼の前側の軸面は前側に移動することになる。ただし、背斜軸固定型では前翼の後側の背斜軸面は移動しないと

する。いずれの場合でも、背斜上面の平坦部は狭くなる。後翼後側の向斜軸面は下盤のランプ下端から上に伸びるので、上盤中を後側に移動する。後翼の傾斜はランプの傾斜と同じである。このタイプの褶曲も、地層の傾斜は一定で翼の幅が広がることによって成長すると想定されている。

この構造が発達し続けると、断層が堆積層を突き抜けて地表に達するか、褶曲前方の地層中にデタッチメントを形成するが、その場合には背斜は fault-propagation fold の形を部分的に保存したまま fault-bend fold として成長する (Suppe and Medwedeff, 1990; Mercier *et al.*, 1997など)。

4.5 detachment fold (decollement fold)

デタッチメントの中で断層変位量が減少して消滅する場合に、その上盤に形成される背斜構造である (Jamison, 1987; 第3図)。ランプを伴わない fault-propagation fold と考えることができる。このような褶曲が形成されるには、背斜の核になる部分で流動的な変形が生じる必要がある。前述の2つのタイプの褶曲はランプの角度が背斜構造の形態をほぼ決定しているが、この褶曲ではランプ角度に相当する後翼の傾斜だけでなく、デタッチメント上の流動的に変形する地層の厚さと背斜構造の振幅との比が褶曲の形態を決める重要な要素となる。また、褶曲が成長するに従って、前翼及び後翼の傾斜が大きくなることも、他の2つのタイプの褶曲とは異なる。

4.6 実際の褶曲構造

以上3つタイプの褶曲様式について、最も単純な形態を述べた。実際の褶曲構造はもっと複雑である。断層のランプ上にはいくつもの折れ曲がり形成され、低角逆断層帯では、断層が重なり合うように形成される覆瓦構造 (imbricate structure) やデュプレックス (duplex) 構造が形成される (村田, 1988)。そのような場合でも同じ考え方で、断層と褶曲の関係が解明されている。一方、はじめに述べたいくつかの仮定が成立しない場合も多い。Jamison (1987) は3つのタイプの褶曲様式について基本的な形態は保ちつつ、前翼の厚さが変化すると断層及び褶曲の形態がどう変化するかを明らかにした。また、Mitra (1990) 及び Mosar and Suppe (1993) は、fault-propagation fold の背斜構造の後ろ側まで層理面に沿った滑りを生じさせることによって、背斜構造の形態が変化することを示した。Chester and Chester (1990) は fault-bend fold のランプの先端部に fault-propagation fold が成長するモデルを公表している。さらに、複雑に折れ曲がっている断層の上盤に形成される褶曲構造のモデリングも可能になっている (例えば Medwedeff and Suppe, 1997)。これ以外にも様々な条件で形成される褶曲構造について研究が進みつつある (例えば, *Journal of*

Structural Geology, vol. 19, no. 3-4)。このようなモデルを先に作って、実際の褶曲構造とを比較する手法 (forward modeling) は、地下深部の構造を推定する大きな助けとなる。

4.7 褶曲様式の変化の原因

Jamison (1993) は異なる様式の褶曲が形成される原因は、圧縮応力場で断層と褶曲のどちらが先に形成されるかによって決定されると考えた。それによると、fault-bend fold はランプを含むデタッチメントがまず形成され、それに従って褶曲が成長しているケースで、fault-propagation fold はランプの形成と褶曲の成長が同時に起こり、detachment fold はランプの形成前に褶曲が生じる。すなわち、褶曲様式は曲げと断層のどちらが優勢かで決まり、それは地層の力学的な性格と応力状態によって決まる。

Jamison (1993) は、Wyoming-Idaho-Utah スラスト帯に発達するいくつかの背斜構造を比較検討し、それぞれの背斜の形態から3種類のどのタイプの褶曲かの判定を行うとともに、同じような力学的性格を持つ地層でも異なる褶曲様式が形成されている理由を考察した。それによると、一般に垂直応力が小さい状態で水平圧縮応力が大きくなると褶曲が先に生じやすく、detachment fold ができる。その際、流動的に変形する物質がなければ fault-propagation fold になる。一方、垂直応力が大きい状態で水平圧縮応力が大きくなると、断層が先に形成されやすくなり、fault-bend fold が発達する。即ち、同じような力学的性質を持つ地層でも、地下深部では fault-bend fold が形成されやすく、浅部ほど fault propagation fold 或いは detachment fold が形成されやすい。

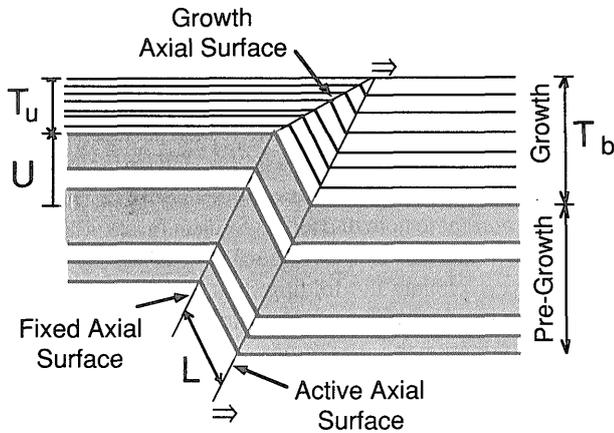
5. ヒンジ移動型褶曲に伴う growth strata

5.1 growth triangle

Suppe *et al.* (1992) は褶曲が成長している期間に堆積した地層を growth strata と呼んだ。上に述べたように、ヒンジ移動型の褶曲は褶曲翼の傾斜が増加するのではなく、軸面の移動と翼の幅の増加によって成長する。その上に新たな地層が堆積すると、軸面が移動した部分だけ地層が傾斜することになる。すると、上位の地層ほど傾斜域の幅が狭くなるので、結果として上方に狭くなる三角形の断面を持つ傾斜帯 (growth triangle) が形成される (Suppe *et al.*, 1992; 第8図)。成長するキンクバンド上に形成される growth triangle は、両側の軸面の動き方によって5つの異なる成長パターンに整理できる (第9図, Suppe *et al.*, 1992)。

Growth triangle を含む等斜帯は3つのタイプの軸面によって境される (第8図)。活動的軸面 (active axial surface) は移動している軸面で、pre-growth strata か

ら growth strata 中にまで直線的に伸びる。固定軸面 (fixed axial surface) は pre-growth strata に固定された軸面で growth strata には形成されない。成長軸面 (growth axial surface) は固定軸面の上端と活動的軸面の上端を結ぶ軸面で、growth strata 中にしか形成されない。固定軸面と成長軸面との境界の折れ曲がり断層の形成開始層準となり、それより上位に growth triangle が形成される。

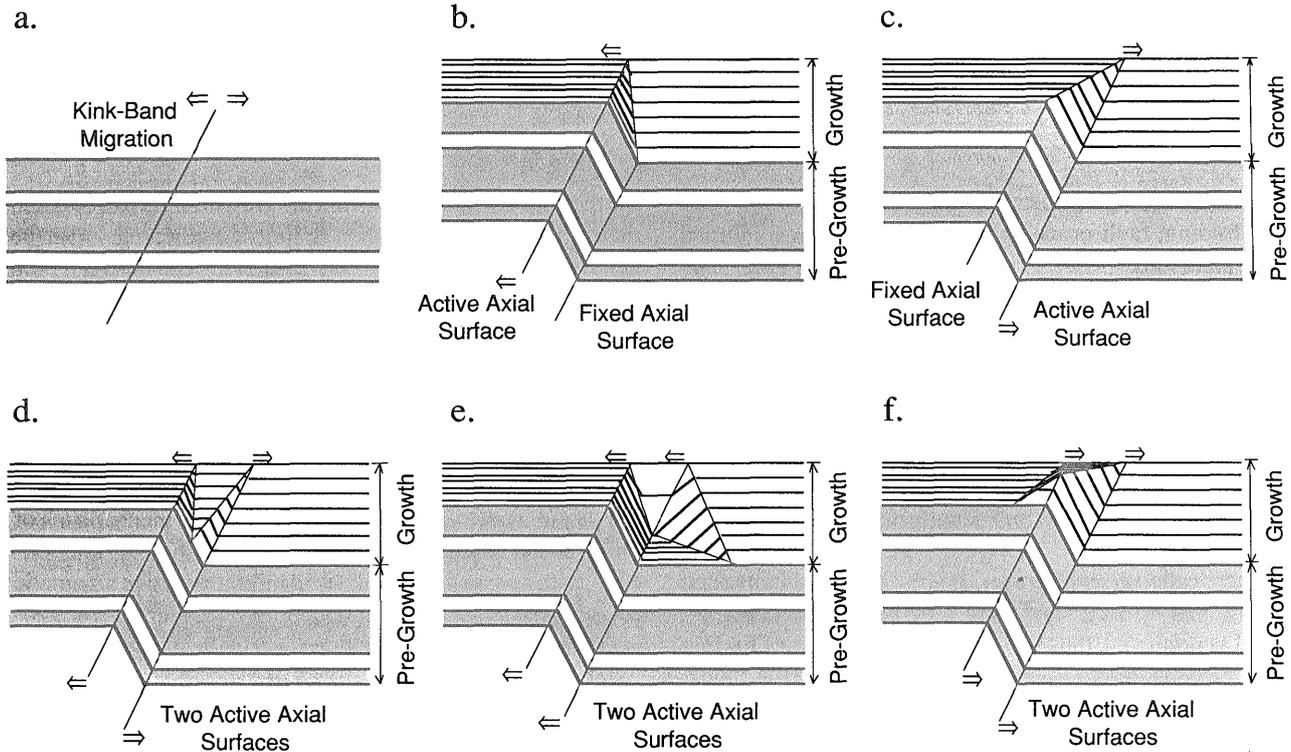


第 8 図 ヒンジの移動に伴う growth strata の形態 (Suppe et al., 1992).
Fig. 8 Configuration of growth strata due to axial surface migration (Suppe et al., 1992).

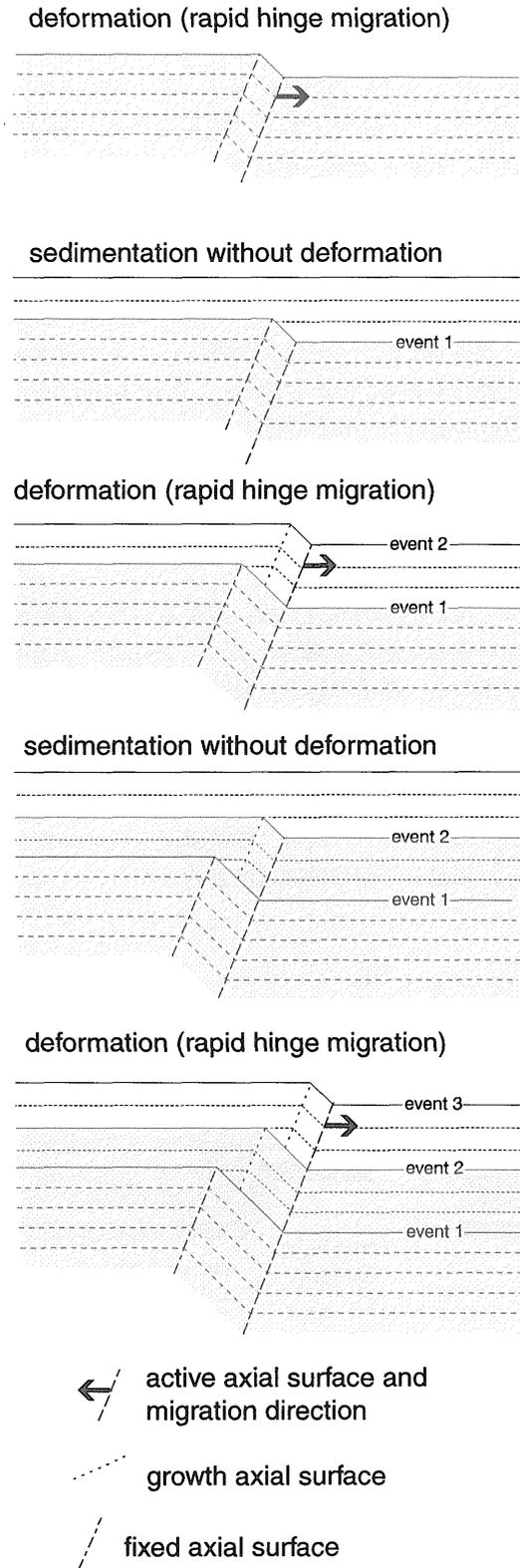
堆積速度或いは褶曲の成長速度が変化すると、成長軸面の傾きが変化する。また、堆積作用や圧密の違いによって growth triangle の形態が変化することもある。褶曲が地震に伴って間欠的に成長する場合には、軸面の移動も間欠的に起こるため、成長軸面が断続的に雁行配列することになる (第10図; Suppe et al., 1997)。1回の地震時の断層変位量は数 m のオーダーであるので、雁行の規模も同じ程度であると推定される。音波探査プロフィールでこれを認定するには、特に高い分解能が必要であるが、撓曲帯でも一つ一つの地震イベントが記録されている可能性がある。ここでは、主に fault-bend fault 及び fault-propagation fold に伴う growth triangle の特徴を Suppe et al. (1992) に基づいて紹介する。

5.2 fault-bend folds に伴う growth strata (Suppe et al., 1992)

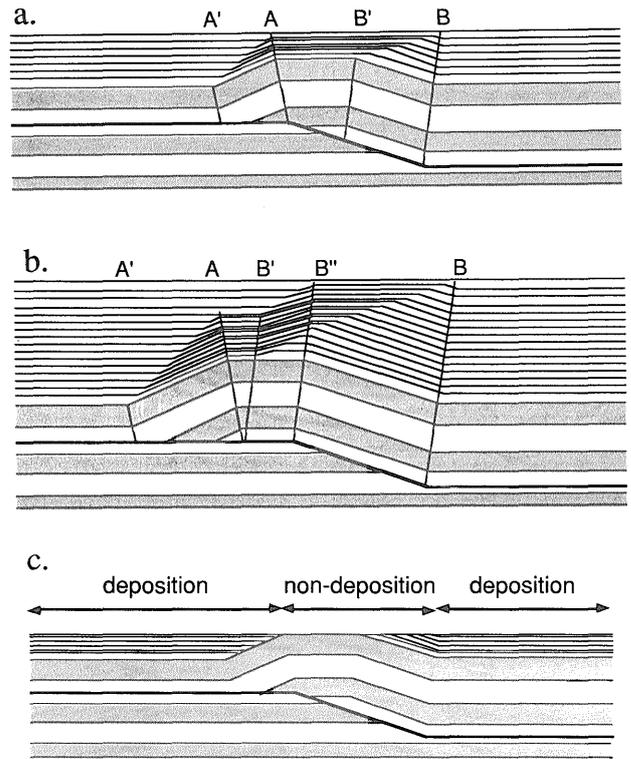
fault-bend fold の場合には、変位量がランプの長さを超えない場合と超える場合によって growth triangle の形態が異なる。前者の場合には前翼及び後翼の後側が活動的軸面となり、両翼の前側が固定軸面となる (第11a 図)。水平なデタッチメントから立ち上がる単純なランプの場合、ランプ上での変位量は後翼の pre-growth strata のキックの幅に等しくなる。変位量がランプの長さを超えると、後翼の両側の軸面は活動的となるのに対して、



第 9 図 ヒンジ移動様式の違いによる 5 種類の growth triangle の形態 (Suppe et al., 1992).
Fig. 9 Configuration of five types of growth triangles due to the difference of axial surface migration (Suppe et al., 1992).



第10図 間欠的なヒンジ移動によって形成される断続的な成長軸面の模式図。
 Fig. 10 Discontinuous growth of an axial surface due to intermittent migration of an active axial surface by earthquakes.



第11図 fault-bend foldに伴うgrowth triangle (Suppe *et al.*, 1992). fault-bend foldでは下盤のランプ上で隆起するため、隆起域が上盤の移動方向とは逆に移動している。a) 断層変位量がランプの長さを超えない場合、c) 断層変位量がランプの長さを超えた場合、d) 堆積速度が背斜構造の隆起速度より遅い場合。

Fig. 11 Growth triangle related fault-bend fold (Suppe *et al.*, 1992). The uplifting area migrates backward relative to the direction of hanging wall migration because the area is fixed to foot-wall ramp. a) fault displacement is less than the length of the ramp, b) fault displacement exceeds the length of the ramp, c) sedimentation rate is lower than uplift rate of the anticline.

前翼の両側の軸面は固定される(第11b図)。このような場合には、前翼が非活動的に見えることに注意が必要である。

fault-bend foldingでは上盤がランプを通過する際に隆起する。上盤全体を堆積物が覆う場合には、ランプ上の隆起域で堆積速度も小さくなるため、堆積速度の遅い領域(隆起している領域)が、断層変位の方向に対して後側に移動するように見える(第11b図)。深部の断層の形態が知られていない場合には、growth strataの形態だけを見ていると、その非対称性から実際の断層の変位方向と逆方向の断層の動きを想定してしまう可能性がある。

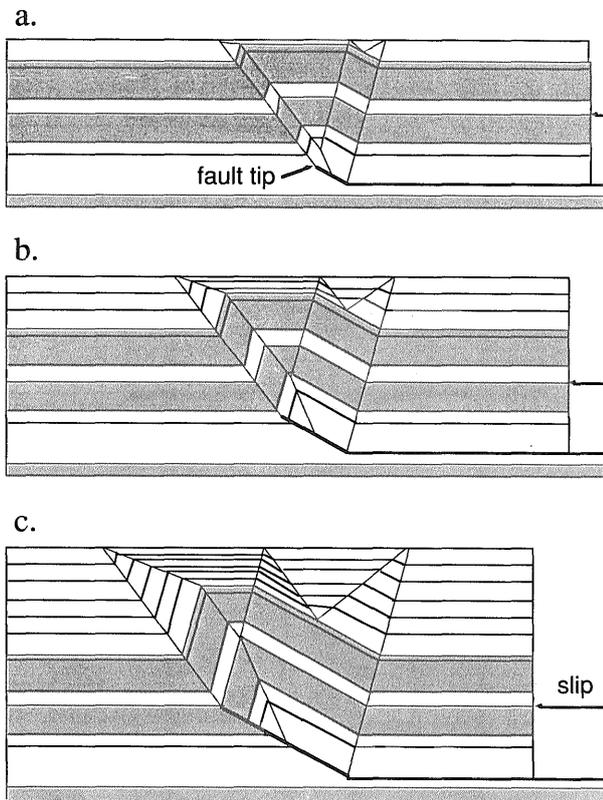
堆積速度が小さくなると後翼では水平に近い growth

axial surfaceが傾斜不整合 (angular disconformity) として形成され、前翼では地層は水平にたまって pre-growth strata にオンラップするため、growth triangle は形成されない (第11c 図)。断層変位が進行すると growth strata を含む地層に浸食面が形成されたり、褶曲したりする。

Shaw and Suppe (1994) は、Transverse Ranges 南方沖の Santa Barbara Channel において、fault-bend fold に伴う明瞭な growth triangle を示している。

5.3 fault-propagation fold に伴う growth strata (Suppe et al., 1992)

先に述べたように、fault-propagation fold には背斜軸が固定されるタイプと、背斜軸が移動するタイプがあるが、軸面の移動という観点から見ると、前翼の背斜軸の挙動が違うだけである。背斜軸が固定されるタイプの fault-propagation fold では、前翼の前側の向斜軸面が活動的で後側の背斜軸面が非活動的となる (第12図)。ここ



第12図 fault-propagation fold に伴う growth triangle (Suppe et al., 1992).

隆起域 (堆積速度が小さい領域) は、fault-bend fold とは逆に上盤の移動方向と同じ方向に移動する。

Fig. 12 Growth triangle related fault-propagation fold (Suppe et al., 1992).

Uplifting area (low sedimentation zone) migrates forward, which is reverse to that of fault-bend fold.

で形成される growth triangle は fault-bend fold の前翼とは左右が逆になる。後翼の両側の軸面はそれぞれ活動的であり、2つの対称的な三角形の撓曲帯が形成される。堆積速度が背斜構造の隆起速度より小さいと、後翼の前側の growth triangle は形成されない。そこからランプの上にわたって、時間に斜行する不整合 (time-transgressive angular disconformity) が形成される。背斜軸移動型の場合には、前翼の後ろ側の背斜軸面も活動的となるため、前翼にも2つの growth triangle が形成される (Storti and Poblet, 1997)。

5.4 detachment fold に伴う growth strata

detachment fold は背斜構造の核を構成する流動的な変形をする地層の厚さや挙動によって、様々な成長様式を持つ可能性がある。そのため、growth strata の形態も成長様式によって異なってくる。Storti and Poblet (1997) 及び Poblet et al. (1997) などによって翼の幅が一定の場合、翼の傾斜が一定の場合、幅及び傾斜の両方が変化する場合について、growth strata 及び growth triangle が様々な形態を形成し得ることが示されている。

5.5 断層変位量の推定

以上述べたような、growth triangle は断層の活動史を記録しているとはいえ、それから直接断層の変位量を求められるとは限らない。正確に変位量を求めるためには、断層の深部構造まで正確に明らかにして、断層及び褶曲構造全体を変形前の状態に復元する必要がある。しかしながら、実際に地下深部の正確な褶曲構造を求めることは困難である。一方、地下深部の断層の形態が正確にわからなくても、後翼の地質構造からおおよそその変位量を推定することが可能な場合がある。Suppe et al. (1992) はランプ上に形成された後翼の長さが断層の傾斜角の違いによってどのように変化するかを計算しグラフに示している。それによると、fault-bend fold で断層変位量がランプの長さより短い場合、後翼の長さは断層変位量の1-2倍にほぼ収まる。さらに、断層の傾斜が50°以下であれば断層変位量は後翼の長さの1-1.25倍に収まる。fault propagation fold の場合も、後翼の傾斜が15-25度の間であれば、変位量は後翼の幅の0.4-0.6倍になる。このような関係を用いることによって、断層の変位量のある程度の精度で推定することが可能である。

6. ヒンジ固定型の褶曲

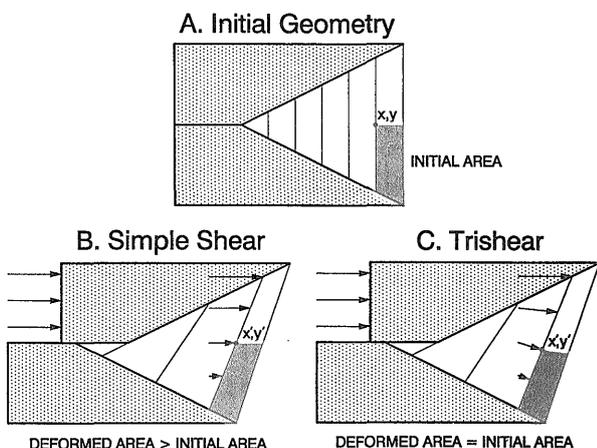
今まで述べてきたヒンジ移動型の褶曲は、上盤が堆積層だけからなり、層理面に沿った滑りが起こる場合に形成される。一方、上盤が変成岩、火成岩などの剛性の高い岩石からなる場合には、層理面滑りが生じにくいので、

上記のようなヒンジ移動型の褶曲が簡単に形成されるとは考えにくい。このような基盤を含む逆断層に伴う変形は、基盤自身の変形と基盤を覆う堆積物の変形と区別して考える必要があるが(例えば, Narr and Suppe, 1994), ここでは基盤を覆う地層に形成される褶曲についてのみ、簡単に紹介する。

ロッキー山脈では、基盤を含む逆断層に伴って、それを覆う地層の中に非対称な断面の背斜構造が広く形成されている。この褶曲も前翼の中で断層が消滅することから fault-propagation fold に区分されるが、ヒンジ移動型の褶曲とは異なり、軸面がほぼ固定されたまま前翼が成長していると考えられている (fixed-hinge folding; Brown, 1988; Erslev, 1991; Fischer *et al.*, 1992; McConnel, 1994など)。

その特徴は以下のようにまとめられている (Erslev, 1991; McConnel, 1994)。1) 背斜構造の前翼は基盤と被覆層との境界付近で断層に収束し、上位に向かって広がる。2) 前翼の傾斜は下位層ほど大きく、閉じた背斜構造を形成するが、上位ほど緩やかになり開いた背斜構造に変化する。3) 前翼には不均質な厚さの変化が認められ、向斜軸では厚く、背斜軸では薄くなる傾向がある。4) 地層は幅広い範囲で徐々に傾斜を変化させるため、明瞭な軸面が定義できない。

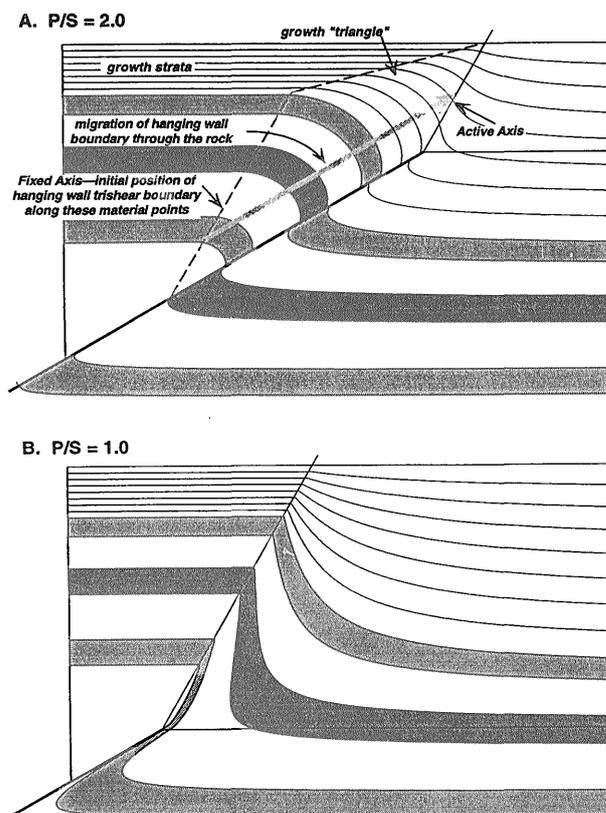
このような褶曲形態を説明するために、Erslev(1991)は断層の先端 (fault tip) を頂点とし、上部へ広がる三角形の剪断帯での変形が前翼を形成するという trishear モデルを提案した(第13図)。剪断帯は断層の延長上に上下対称な形を考えることによって、その成長中も地層の体積を一定に保つことができる。剪断帯内では断層の成長とともに地層が回転するが、その両端での変位量は同じであるので、断層に近い剪断帯の幅が狭い部分ほど回転角度が大きく、断層から離れた幅が広い部分ほど回転角度が小さくなる (第13図)。剪断帯の中の変型様式は、



第13図 trishearモデルの模式図 (Erslev, 1991).
Fig. 13 Schematic cartoon of the trishear model (Erslev, 1991).

剪断帯の広がり角度及び断層の成長とともに剪断帯がどのように移動するかによって大きくかわる。剪断帯の広がり角度が小さいと狭い剪断帯の中に歪みが集中するし、角度が大きいと広い剪断帯の中で歪みが分散する。さらに Erslev (1991) は剪断帯の先端が下盤の基盤に固定されるか、上盤に固定されるかによって褶曲の形態が異なることを示した。剪断帯の先端が下盤の基盤に固定された場合には、剪断帯下側の境界は固定され、剪断帯の上側の境界が後ろ側に移動する。結果として、断層の成長に従って上盤の基盤に変形が広がり、緩やかにカーブした背斜構造が形成される。一方、上盤に固定されている場合には、剪断帯上側の境界は固定され、剪断帯の下側の境界が上に向かって移動する。そのため、上盤の基盤には変形が及ばず、それを覆う地層の背斜軸は折れ曲がり閉じた形態になる。基盤の強度が高く、剛体的に振る舞う場合には剪断帯の頂点は上盤に固定され、逆の場合には下盤に固定されると考えられる (Erslev, 1991)。McConnel (1994) は剪断帯上側の境界を上盤に固定し、下側の境界を下盤に固定するモデルを公表している。この場合には、断層の成長とともに剪断帯が上盤側と下盤側に分断されることになる。

Hardy and Ford (1997) 及び Allemendinger (1998)



第14図 trishearモデルにおけるP/S比の違いによる褶曲形態の違い (Allemendinger, 1998).
Fig. 14 Difference of fold geometry due to the difference of P/S ratio (Allemendinger, 1998).

は Erslev (1991) の trishear モデルを発展させ、断層先端の移動量 (propagation) と断層の変位量 (slip) と速度との比 (P/S 比) を導入して様々な褶曲の形態を表現できる数値モデルを開発した。Erslev (1991) の剪断帯の先端が下盤の基盤に固定されるケースは $P/S = 0$ 、上盤に固定されるケースは $P/S = 1$ に相当する。P/S 比が小さいと変形は広い範囲に及ぶとともに、剪断帯の下部では剪断量が大きくなり逆転した地層が形成される (第14b 図)。P/S 比が1より大きいと断層の先端の propagation が早いため、剪断歪みは断層延長上の狭い範囲に集中する。この場合には剪断帯上側の境界は前側に移動し、剪断帯下側の境界は後ろ側 (上側) に移動する。上盤ではヒンジ移動型の褶曲で軸面が前方に移動するのと類似の現象が起こり growth triangle 状の傾斜帯が形成される (第14a 図)。ただし、実際の傾斜帯は幅広く、向斜軸面が不明瞭になる上、下位ほど傾斜が大きいことなどから、ヒンジ移動型の褶曲とは区分できる。Allemendinger (1998) は、P/S 比が時間によって変化する場合、剪断帯角度が時間とともに変化する場合、断層面が途中で折れ曲がって fault-bend fold を伴う場合、断層が堆積層を突き抜けて breakout する場合など、様々なケースでの褶曲の形態を示している。

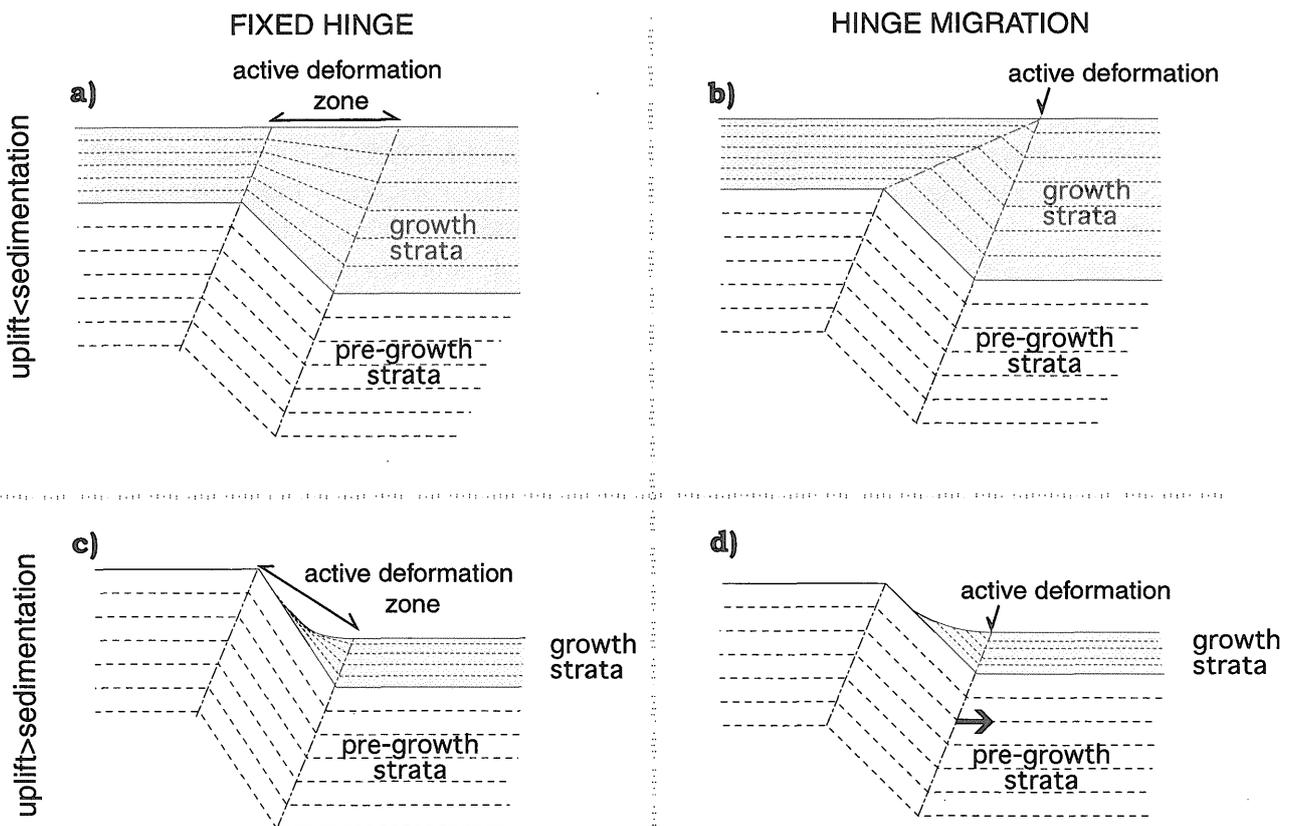
このような褶曲様式はヒンジ移動型の褶曲様式と比較

して、背斜前翼は回転しながら成長して回転量は断層に近い下部ほど大きくなり、前翼の層厚が褶曲の成長とともに変化するという違いがある。

7. 活撓曲の変型様式

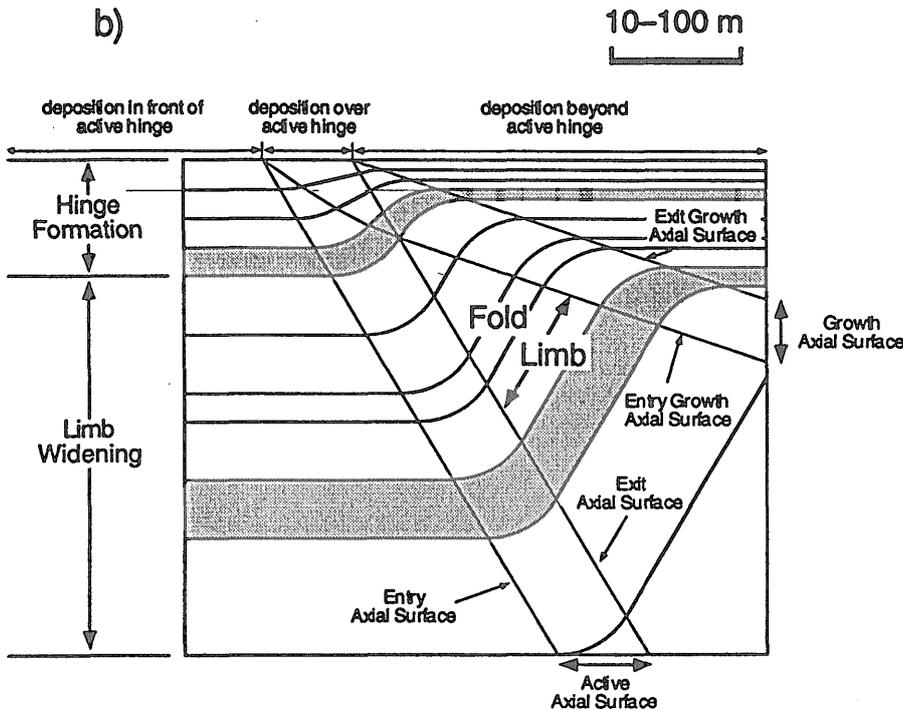
活撓曲や活褶曲の成長様式がヒンジ移動型であるかヒンジ固定型であるかによって、growth strata の形態や新しい変形の生じる場所に大きな違いが生じる (第15 図)。

ヒンジ移動型の場合には、変形が活動的軸面に集中する。従って、最近の変形量・速度を議論するには撓曲全体の地質構造を必ずしも必要とせず、活動的軸面付近の変形を明らかにすればよい。上盤の隆起速度が堆積速度を上回る場合には、前翼が断層崖を形成し、新しい地層は前翼の基部にしか堆積しない。fault-propagation fold の場合には、崖の基部に活動的軸面が形成されるので、新たな変形が新しい地層の分布域に集中し (第15b, d 図)、最近の変動についても精度良く調査できる可能性が高い。一方、fault-bend fold では前翼前翼基部の軸面は移動しないため、前翼の基部の堆積物には変形が生じない (第11c 図)。その場合には、fault-bend fold から前側にデタッチメントとして断層が伸びて、fault-propaga-



第 15 図 ヒンジ移動型及びヒンジ固定型の撓曲に伴う growth strata の違い。

Fig. 15 Difference of growth strata implied by the hinge migration and fixed hinge kink band models.



第16図 ヒンジ帯の移動による growth strata (Suppe *et. al.*, 1997). 幅のあるヒンジ帯を考慮することによって, growth triangle内の地層の回転(上方への傾斜の減少)が説明可能。

Fig. 16 Growth strata formation by hinge zone migration (Suppe *et. al.*, 1997) Rotation of beds (upward decrease of dip) can be explained by migration of hinge zone leading to an increase in dip during a passage of the zone.

tion fold か地表に達する断層を形成するはずである。いずれのタイプの褶曲であっても、後翼後ろ側の向斜軸面が移動するので、そこに注目することによって新しい変形を見いだせる可能性がある。後翼の growth triangle も活構造の解析には重要である (Shaw and Suppe, 1994)。

一方、ヒンジ固定型の撓曲では撓曲帯全体が回転するため、変形が前翼全体に分散することになる。このため、崖の基部にしか新しい地層が堆積していない場合には、変形の一部しか見ることができないことに注意が必要である (第15d 図)。

どちらの型の撓曲であるかは、growth strata の傾斜に累積性が認められるかどうかで判断できるはずであるが (第15図)、判定が困難な場合もある。

ピレネー山脈南東部の Sant Llorenç de Morunys には、撓曲構造の成長中に堆積した碎屑岩類が発達している (Riba, 1976)。Ford *et al.* (1997) はその撓曲構造成因を明らかにするために、ヒンジ移動型 fault-propagation fold 及びヒンジ固定型の trishear fault-propagation fold について、どのように growth strata が成長するか、数値モデル化して比較した。それによると、ヒンジ移動型の fault-propagation fold では、前翼の傾斜及び地層の厚さが一定し、鋭角の軸面を持つ。一方、trishear fault-propagation fold では、下部の逆転した地層から上部のほぼ水平な地層まで徐々に傾斜が変化し、厚さも背斜頂部に向かって薄くなる。さらに軸面は丸みを帯びた形態を持つ。また、前述したように growth triangle に似た構造が形成されるように見えるが、ヒンジ移動型の growth triangle に比較して前側の境界が不明

瞭になる。後翼の growth triangle は軸移動型では2つの組み合わせせからなるが、trishear モデルでは1つしかできないなどの違いがある。このような比較から、trishear モデルが Sant Llorenç de Morunys の撓曲構造をうまく説明できると結論した。

それに対して、同じ撓曲構造を研究した Suppe *et al.* (1997) は、従来軸面で急に傾斜が変化するとしていたのを、ある幅の中で傾斜が変化するというヒンジ形成帯を導入し、それが移動することによって、地層の回転が徐々に生じ、上方に向かって傾斜が緩やかになる撓曲帯の構造が形成されるとした (第16図)。その上で、Sant Llorenç de Morunys の撓曲構造に発達する成長軸面の雁行配列は、第10図に示したような間欠的なヒンジ形成帯の移動によって形成されたと考えた。

このようにヒンジ移動型モデルと trishear モデルは対極するモデルとして発展してきたが、それぞれ修正が加えられることによって、growth strata の構造には明瞭な違いがなくなってきている。その原因として、変形が生じる領域が移動しているという共通点を持つことが挙げられる。Allemendinger (1998) も両モデルは対立するものではなく、互いにそれぞれの欠点を補うモデルであると述べている。両者の考え方を融合することによって、現実に近い構造のモデル化が可能になると考えられる。

8. 日本周辺海域の growth strata

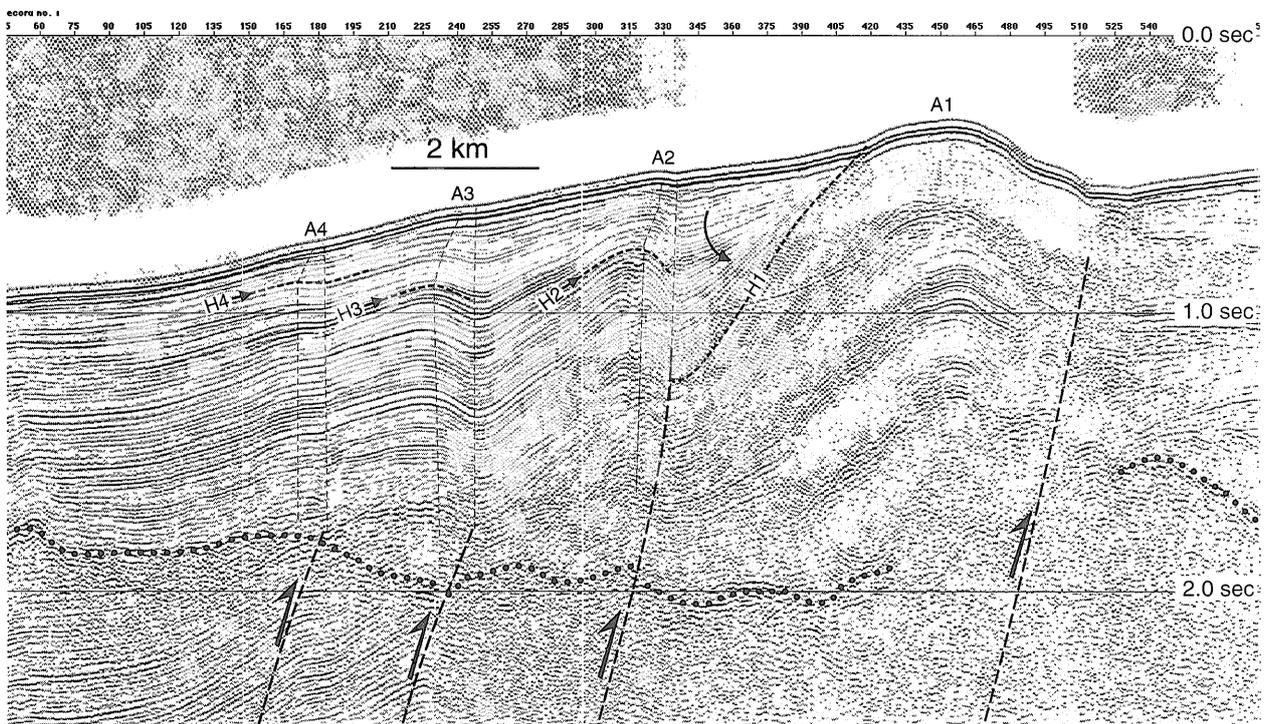
今までに述べた growth strata が日本周辺海域でどのように認められるかを、日本海東縁及び大阪湾で得られた

プロフィールで示す。

日本海東縁には基盤を含むと考えられる高角逆断層が広く発達している (Okamura *et al.*, 1995). ここに示したのは、山形県酒田沖のプロファイルで、近くの飛島を中心とする背斜構造の一部である (第17図). 全体として非対称な断面を持つ大きな背斜構造であるが、後翼上に小規模な背斜構造が3つ並んでいる。最も東側の背斜構造 (A1) では前翼の構造は不明瞭であるが、後翼は回転しつつ成長している。それに対して、後翼上の3つの背斜構造 (A2-A4) は上部に growth triangle を伴っており、ヒンジ移動型の褶曲構造であることがわかる。最も東側の背斜構造は後翼の回転によって成長したが、このような変形はリトリックな形態を持つ逆断層運動によって形成可能である (Mitra, 1993) ので、ヒンジ固定型の褶曲を考える必要はない。後翼上の3つ背斜構造 (A2-4) に伴う growth triangle は向斜軸が活動的軸面であることから、fault-propagation fold 的な成長様式が推定され、少なくとも断層面の折れ曲がり を反映した

fault-bend fold ではないことがわかる。最も東側の背斜構造 (A1) の形成開始は後翼の回転開始の層準 (H1) によって、後翼上の背斜 (A2-A4) の形成開始は growth triangle の基底層準 (H2-4) によって知ることができ、それらを比較することによって、西側の背斜ほど形成開始が新しいことがわかる。

大阪湾のプロファイル (第18図) は横ずれ成分が優勢な大阪湾断層を横断するものである (横倉ほか, 1998). 主断層に沿って形成される撓曲帯は上部で growth triangle が認められる。ここでもその向斜軸面が海底まで直線的に伸び活動的軸面の特徴を持ち、背斜軸面が固定されているように見えることから、fault-propagation fold 的な成長様式と考えられる (第12図). ただし、growth triangle の上部に向かって傾斜の増加が見られることから、前翼の回転も同時に進行している。先に述べたように、このような成長様式はヒンジ形成帯の移動 (Suppe *et al.*, 1997), 或いは trishear モデルのいずれでも説明できる。

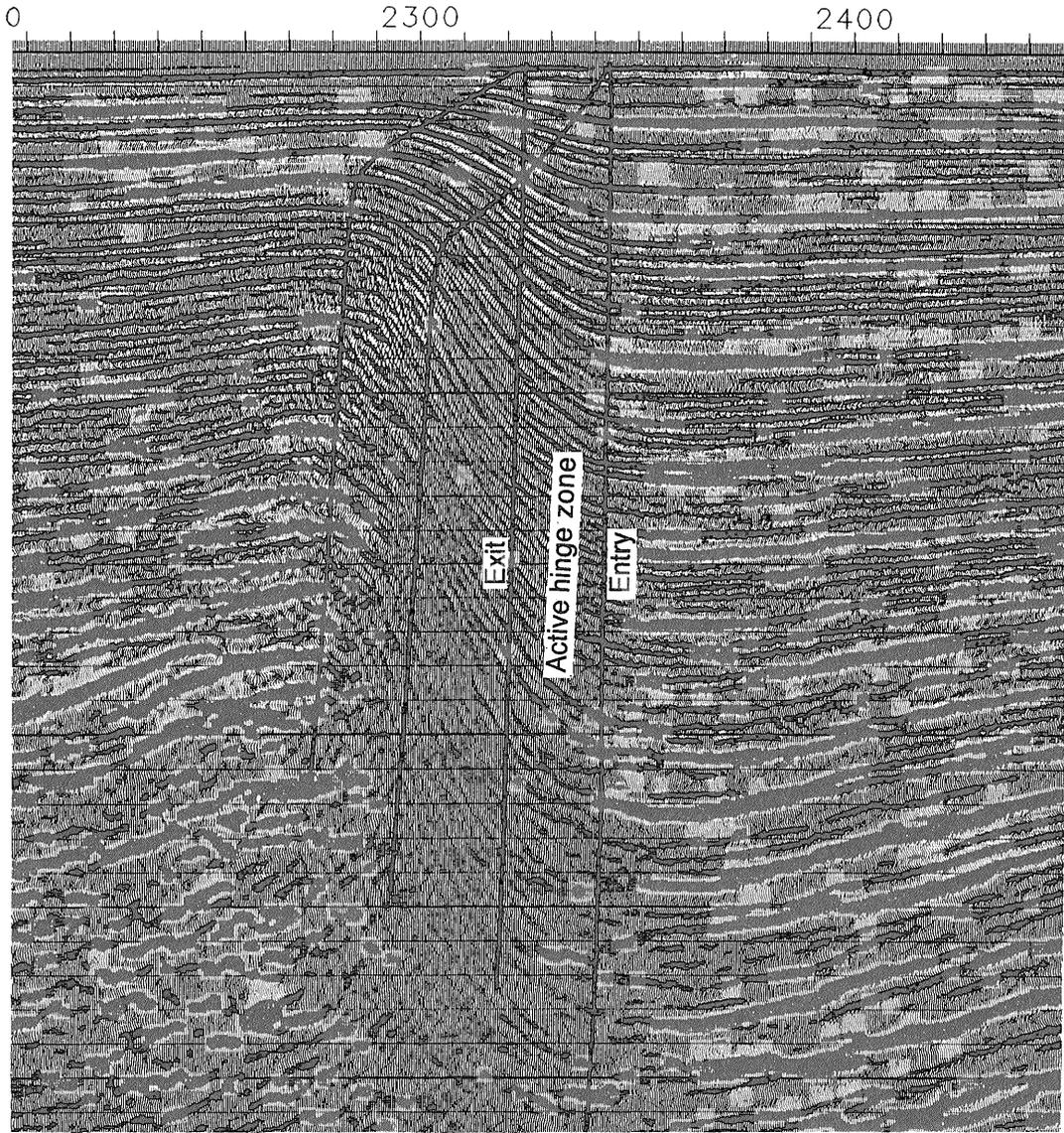


第17図 日本海酒田沖の非対称な背斜構造に認められる growth strata.

細い破線が軸面。最も規模の大きい背斜 (A1) の前翼は不明瞭で後翼は回転が顕著である。その西側の小規模な背斜群 (A2-A4) には growth triangle が認められる。後翼回転と growth triangle から推定されるそれぞれの背斜の形成開始層準を H1, H2, H3, H4 で示した。地質調査所が取得したシングルチャンネルのデータでマイグレーション処理されている。

Fig. 17 Example of growth strata observed in an anticlinorium off Sakata, Japan Sea, on a migrated single channel seismic profile collected by Geological Survey of Japan.

Thin broken lines are axial surfaces. The largest anticline (A1) shows growth by backlimb rotation, but the growth structure is obscure in the forelimb. Growth triangles are recognized on the forelimbs of major anticlines (A2-A4). H1, H2, H3 and H4 are stratigraphic positions at which anticlines have started to grow, which are inferred from the rotation of backlimb of A1 anticline and growth triangles.



第18図 大阪湾断層に伴う撓曲帯(横倉ほか, 1998より引用)。

基盤を含み, 横ずれ成分が優勢な断層であると考えられるが, growth triangleを伴う撓曲帯を形成する。ここでは, Suppe *et al.* (1997) のactive hinge zoneの考えを適用した解釈を示す。

Fig. 18 Seismic section showing a kink band associated with Osaka-wan fault (Yokokura *et al.*, 1998).

The fault is presumed to contain major strike-slip component. Large-scale flexure zone accompanies growth triangle that can be interpreted by hinge zone migration model or by the trishear model. Caption is based on hinge zone migration model.

9. 地殻短縮量の推定

最初に述べたように, バランスした断面を作成し, 変形前の地層に復元することによって, その地域が全体としてどのくらい短縮したか, 或いは伸張したかを求めることが可能になる。さらに, 短縮或いは伸張変形の開始及び終了年代が明らかになれば, 平均的な変形速度を知ることができる。最近, 地質断面の作成とその復元, 或いはその逆のモデリングが可能なコンピューターソフトウェアが開発されていて, 地質断面図さえ完成できれば, 変形前の地質構造を復元し, 地殻短縮量(正断層の

場合には伸張量)を推定することは容易になっている。しかしながら, 精度の高い地質断面図をまず作成することが, 信頼できる地質構造の復元のために欠かせない。そのための基本的なルールは Woodward *et al.* (1989) にまとめられている。デタッチメント深度が浅い低角逆断層帯では, 十分なボーリングデータと反射断面があれば上盤全体の構造を精度良く明らかにすることは可能であるが, 上部地殻全体を切るような断層帯ではデタッチメント深度が10kmより深くまで達するため, 上盤全体の地質断面を精度良く明らかにすることは容易でない。バランス断面法を適用した地質断面図の作成は数多く

行われているが、活構造の評価を目的とした例として、カリフォルニア南部のトランスバース山地 (Transverse Ranges) での研究を簡単に紹介する。アメリカ西海岸に沿って発達するサンアンドレアス断層はロサンゼルス北側で big bend と呼ばれる東側への折れ曲がりが生じているが、その西～南西側に東西方向の逆断層群が過去約500万年前以降に成長し、トランスバース山地が形成された (Yerkes, 1985)。Namson and Davis (1988) は、石油探査のために得られた反射断面及びボーリングデータを活用して、サンアンドレアス断層の北側から断層をまたがって南側のトランスバース山地を横断する長さ123kmのバランスさせた南北断面を、地層の長さが保存され、ヒンジ移動型の fault-bend fold 及び fault-propagation fold によって褶曲構造が発達したという仮定の基で作成した。その断面には、地下数 km から十数 km のデタッチメント及びそれから派生したランプとその上で成長する背斜構造が示されている。断層運動を復元することによって過去200-300万年間に約53km 短縮したと推定し、短縮速度を17-27mm/y と見積もった。またランプで地震の危険性が高いことを指摘した。Huftile and Yearts (1995) は Namson and Davis (1988) の断面図よりやや南側の Ventura Basin を含む断面図を3本作成し、Pleistocene の地層の堆積時の地質構造を復元し、この地域の地殻短縮速度を10-14mm/y と推定するとともに、GPS の観測値とよく一致するとした。Shaw and Suppe (1994) はこの南方沖の Santa Barbara Channel の音波探査プロフィールに認められる growth triangle の形態と年代に基づいて、短縮量を約20km、短縮速度を2.6mm/y とした。

トランスバース山地東部では、Davis *et al.* (1989) がサンアンドレアス断層からロサンゼルス南方まで達する長さ112kmのバランスした断面を作成した。地表の地質構造に加えて石油探査のためのボーリングなど地下データを用いている。それだけではユニークな地質構造が決められず、7つの異なる復元可能な断面を示しているが、大部分の断面でデタッチメントは地下10-15kmに推定している。その復元によって南北方向の短縮は最低で15km、おそらく21-30kmに達するという結果を得ている。また、短縮運動が4.0-2.2 Ma に始まったとして短縮速度は3.8-13.5mm/y と推定している。この速度は、地表に現れている活構造だけから推定された値よりかなり大きく、fault-related fold の考え方を取り入れて、伏在断層も考慮することが重要であると指摘している。その断面のすぐ西側で1994年に Northridge 地震が発生したが、Davis and Namson (1994) は地表の地質構造や深さ数 km のボーリングデータに加えて、その地震及び余震の位置やメカニズムを組み合わせることによって、地下深部の断層の形態を推定し、精度の良いバランスさせた断面を作成するとともに、断層の変位速度や地震の発

生間隔の推定を行った。このように、地質学的なデータ以外の情報を用いることも、精度の良い断面を作成するためには有効である。

以上の断面は、基本的にヒンジ移動型の褶曲と仮定して断層の形態や変形前の地質構造の復元を行っている。しかしながら、変成岩や火山岩の基盤を含んでいる場合には、ヒンジ移動型の褶曲という前提が正しいとは限らない。Schneider *et al.* (1996) は Davis *et al.* (1989) が復元した断面のすぐ近くに位置する Los Angeles 盆地北縁では、前翼の地層が下位ほど傾斜が大きくなることから、基盤の剪断に伴う翼の回転によって成長するヒンジ固定型の褶曲構造であると解釈している。ただしこの場合でも、地層の長さが保たれると仮定して地殻短縮量を求めている。

日本では、佐藤・平田 (1998) が千屋断層を含む奥羽山地で反射断面などを基に地質断面図を作成し、断面図上で地層の長さ断面積が変化しないと仮定して、地質構造の復元し、地殻短縮量を推定した。また、岡村 (1998) は日本海東縁海域の逆断層運動に伴う地殻の短縮量をシングルチャンネルの反射断面だけ、同じ仮定に基づいて推定している。これらの研究を、Transverse Ranges で行われた研究と比較すると、地質断面図を作成する基となったデータの質及び量がかなり劣っていて、それが短縮量の推定値にもかなりの誤差が含まれる可能性を残している。今後、推定精度を向上させるためには、ボーリングコアの採取なども含めた総合的な研究が望まれる。

10. おわりに

バランス断面法については、今まで何度か日本で紹介されているが (例えば中村, 1989; 村田, 1988)、活構造の評価にどのように用いるのか十分に検討されているとは言いがたい。そのため、反射断面を用いた活断層の認定は、地層が切れているかどうかに注意が集まり、それに伴う褶曲構造には十分な検討が加えられていなかった。本レビューで紹介したバランス断面法の考え方と fault-related fold 及び growth strata 或いは trishear モデルを反射断面に適用することによって、従来は十分に考慮されていなかった褶曲の形態から断層の形態と運動についての情報が得られるようになる。ロサンゼルス盆地では、このような考え方によって多くの伏在断層が明らかにされ、この地域の地震発生ポテンシャルの推定に大きな役割を果たした。日本列島でも同様の考え方を適用することによって、今まで見逃されていた伏在断層が見つかる可能性がある。ただし、日本列島に分布する断層がここで紹介したような fault-related fold や growth strata 或いは trishear モデルの考え方で説明できるとは限らないし、どのような違いや特徴があるのかを検討することも重要である。残念ながら、そのような検討を

行うための十分なデータが得られていないことも事実である。

本レビューでは、バランス断面を作成するための数学的な記述については、筆者の能力を超えるため、触れることができなかった。今後、活構造や日本列島の地殻構造を定量的に明らかにしていくためには、数学的な意味も理解した上でモデルの適用或いは修正が必要になってくると考えられる。

謝辞 本報告は工業技術院特別研究のサブテーマの一つである「海域活断層の評価手法の研究」の一環としてまとめられたものである。原稿の査読をお願いした地質調査所の木村克己博士には多くの不備を指摘して頂き、内容が大きく改善された。記して感謝いたします。

文 献

- Allmendinger, R. W. (1998) Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds. *Tectonics*, **17**, 640-656.
- Brown, W. G. (1988) Deformation style of Laramide uplifts in the Wyoming foreland. In C. J. Schmidt and C. J. Perry, Jr eds., *Interaction of the Rocky Mountain Foreland and the Cordilleran thrust belt*, Memoir of Geological Society of America Bulletin, no. 171, 1-25.
- Chester J. S. and Chester F. M. (1990) Fault-propagation folds above thrusts with constant dip. *Journal of Structural Geology*, **12**, 903-910.
- Dahlstrom, C. D. A. (1969) Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **6**, 743-757.
- Davis, T. L. and Namson, J. S. (1994) A balanced cross-section of the 1994 Northridge earthquake, southern California. *Nature*, **372**, 167-169.
- Davis, T. L., Namson J. and R. F. Yerkes (1989) A cross section of the Los Angeles area: seismically active fold and thrust belt, the 1987 Whittier Narrows Earthquake, and earthquake hazard. *Journal of Geophysical Research*, **94**, 9644-9664.
- Elliott, D. (1983) The construction of balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology*, **5**, 101.
- Erslev, E. A. (1991) Trishear fault-propagation folding. *Geology*, **19**, 617-620.
- Fischer, M. P., Woodward, N. B. and Mitchell, M. M. (1992) The kinematics of break-thrust folds. *Journal of Structural Geology*, **14**, 451-460.
- Ford, M., Williams, E. A., Artoni, A., Vergés J. and Hardy, S. (1997) Progressive evolution of a fault-related fold pair from growth strata geometries, Sant Llorenç de Morunys, SE Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, **19**, 413-441.
- Hardy, S. and Ford, M. (1997) Numerical modeling of trishear fault propagation folding. *Tectonics*, **16**, 841-854.
- Huftile, G. J. and Yeats, R. S. (1995) Convergence rates across a displacement transfer zone in the western Transverse Ranges, Ventura basin, California. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 2043-2067.
- Jamison, W. R. (1987) Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. *Journal of Structural Geology*, **9**, 207-219.
- Jamison, W. R. (1993) Stress controls on fold thrust style. In McClay, K. R. ed., *Thrust Tectonics*, Chapman & Hall, London, 155-164.
- McConnell, D. A. (1994) Fixed-hinge, basement-involved fault-propagation folds, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, **106**, 1583-1593.
- Medwedeff, D. A. and Suppe, J. (1997) Multibend fault-bend folding. *Journal of Structural Geology*, **19**, 279-292.
- Mercier, E., Outtani, F. and Lamotte, D. F. (1997) Late-stage evolution of fault-propagation folds: principles and example. *Journal of Structural Geology*, **19**, 185-193.
- Mitra, S. (1990) Fault-propagation folds: Geometry, kinematic evolution, and hydrocarbon traps. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, **74**, 921-945.
- Mitra, S. (1993) Geometry and kinematic evolution of inversion structures. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **77**, 1159-1191.
- Mosar, J. and Suppe, J. (1993) Role of shear in fault-propagation folding. In McClay, K. R. ed., *Thrust tectonics*, Chapman & Hall, London, 123-132.
- 村田明広 (1988) Balanced Cross Sectionと Duplex. *地学雑誌*, **97**, 96-104.
- 中村光一 (1989) Balanced cross-section 法と

- GGT—構造地質学におけるインバージョン—
月刊地球, **21**, 85-89.
- Nanson, J. and Davis, T. (1988) Structural transect of the western Transverse Ranges, California: Implications for lithospheric kinematics and seismic risk evaluation. *Geology*, **16**, 675-679.
- Narr, W. and Suppe, J. (1994) Kinematics of basement-involved compressive structures. *American Journal of Sciences*, **294**, 802-860.
- 岡村行信 (1998) 日本海東縁域の逆断層と地殻短縮量の推定の試み, 月刊地球, **20**, 460-465.
- Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R. and Satoh, M. (1995) Rifting and basin inversion in the eastern margin of the Japan Sea, *The Island Arc*, **4**, 166-181.
- Poblet, J., McClay, K., Storti, F. and Muñoz, J. A. (1997) Geometries of syntectonic sediments associated with single-layer detachment folds. *Journal of Structural Geology*, **19**, 369-381.
- Rich, J. L. (1934) Mechanic of low-angle overthrusting as illustrated by Cumberland thrust block, Virginia, Kentucky, and Tennessee. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, **18**, 1584-1596.
- Riba, O. (1976) Syntectonic unconformities of the Alto Cardener, Spanish Pyrenees: a genetic interpretation. *Sedimentary Geology*, **15**, 213-233.
- 佐藤比呂志・平田 直 (1998) 活断層の深部構造と日本列島の成立. 科学, **68**, 63-71.
- Schneider, C. L., Hummon, C., Yeats, R. S. and Huftile, G. L. (1996) Structural evolution of the northern Los Angeles basin, California, based on growth strata. *Tectonics*, **15**, 341-355.
- Shaw, J. H. and Suppe, J. (1994) Active faulting and growth folding in the eastern Santa Barbara Channel, California. *Geological Society of America Bulletin*, **106**, 607-626.
- Sheriff, R. E. (1977) Limitations on resolution of seismic reflections and geologic detail derivable from them, in Payton, C. E. ed., *Seismic stratigraphy - applications to hydrocarbon exploration*,. Memoir of American Association of Petroleum Geologists, no. 28, 3-14.
- Storti, F. and Poblet, J. (1997) Growth stratal architectures associated to decollement folds and fault-propagation folds. Inferences on fold kinematics. *Tectonophysics*, **282**, 353-373.
- Suppe J. (1983) Geometry and kinematics of fault-bend folding. *American Journal of Sciences*, **283**, 684-721.
- Suppe, J. Chou, G. T. and Hook, S. C. (1992) Rates of folding and faulting determined from growth strata. In McClay, K. R. ed., *Thrust Tectonics*, Chapman & Hall, London, 105-121.
- Suppe, J. and Medwedeff, D. A. (1990) Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Eclogae geologicae*, **83**, 409-454.
- Suppe, J., Sabat, F., Munoz, J. A., Poblet, J., Roca, E. and Verges, J. (1997) Bed-by-bed fold growth by kink-band migration: Sant Llorc de Morunys, eastern Pyrenees. *Journal of Structural Geology*, **3**, 443-461.
- Wooward, N. B., Boyer, S. E. and Suppe, J. (1989) Balanced geological cross-sections: an essential technique in geological research and exploration. AGU Short Course in Geology, **6**, 132p.
- Yerkes, R. F. (1985) Geology and seismologic setting. In Ziony, J. I. ed. *Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region - an earth-science perspective*, USGS professional paper, no. 1360, 25-42.
- 横倉隆伸・加野直巳・山口和雄・宮崎光旗・井川 猛・太田陽一・川中 卓・阿部 進 (1998) 大阪湾における反射法深部構造探査, 地調月報, **49**, 571-591.

(受付: 1999年10月28日; 受理: 2000年1月19日)