

反転テクトニクス(inversion tectonics)とその地質構造表現

Inversion tectonics and its structural expression

中村光一*

Ko-ichi Nakamura

Abstract: The concept of 'inversion' was historically reviewed. Inversion is one of the superposed structure produced by intraplate deformation characterized by fault (or faults) reactivation. It occurs at failed rift or inactive back-arc basin under intraplate compression. Inversion near fold-and-thrust belt is also characterized by severe deformation of the synrift sediment. It is important to notice the types of anticlines in inverted basins to clarify the character of inversion. Five types can be recognized in anticlines within inverted basins, i.e., roll-over anticline formed during extension, fault-bend fold of synrift sediment associated with out-of-graben thrust, fault-propagation fold of synrift sediment, buttressing fold near the footwall associated with cover-detached thrust, and fault-propagation fold of postrift sediment. The structure of the Neogene Northeast Japan Arc could be interpreted by inversion tectonics. The ways to investigate subsurface fault geometry were discussed.

はじめに

反転(inversion)という用語は、最近新たなる意味づけをされて、再び普及しつつある古い用語である。反転およびそれに関連する用語の最近の用法は Bates & Jackson, eds. (1987) の "Glossary of Geology" 第3版にはまだ記載されていない。Allaby & Allaby, eds. (1990)には positive inversion と negative inversion (後述)について簡単な説明があるが、その前後の記述は適切ではない。"Glossary of Geology" には inversion という項目はないわけではない。結晶学における「反転」、物性論における「転移」、地形学における「地形の逆転(inversion of

relief)」、地球物理学の手法としての「逆問題」、気象学における「逆転」、さらには動詞 invert の用法として横臥褶曲の記載に用いられる overturn に等しい「逆転」が掲げられている。本論で議論する「反転」の古い用法とはこの内どれでもない。地形の逆転は、"Glossary of Geology" の記述では反転の古い用法に近いようにも読めるが、これは現在、差別侵食に関する用語として使われているので(町田他編, 1981; Summerfield, 1991), ここで言う反転の古い用法とは別物である。

反転の古い用法は、英語の辞書では米国発行の辞書(Dennis, ed., 1967; S. P. Parker, ed., 1984)には書かれておらず、英国発行の辞書で

1992年11月10日受付、1992年11月30日受理。

* 地質調査所海洋地質部。

も逆転褶曲に関してのみ書かれているとする (Wyatt, ed., 1986)が、同じ英國発行の Lapidus (1990)では構造地質学の用語として、「地殻のある部分の長期間継続する垂直方向の運動が反転すること」と、古い用法が記されている。ヨーロッパ (Visser, ed., 1981, p.81) およびロシア (Paffengolich, et al., 1978, p.285) では、辞書に古い用法が書かれている。本論では次節で反転の最近の意味について解説し、その上で古い用法とその意味について後節で詳述する。

近年、炭化水素鉱床探査(石油地質学)において、地震探査の普及によって、地下(地表下、あるいは海底面下, subsurfae)の情報が豊富に得られるようになり、そのデータを解析・解釈するために古い用語が新しい意味づけをされて使用されていることがある。それらの概念は地表探査を軸とする伝統的地質学に流れ込んでいながら、取得データの質の違いの問題もあって充分に定着していない状況が地質学の随所に見られる。反転もそのような状況に置かれている概念と捉えることができる。

1930年代より炭化水素鉱床探査に用いられた反射法地震探査(音波探査)は、1960年代に入つて音源、受信器、処理装置の大幅な進歩によつてはじめて普通に用いられる探査手法になった(初期の状況については例えば、J. M. Parker, 1985、最近の進歩については例えば、Brennan et al., 1990 参照)。更にその探査によって得られたデータが地質学に新しい概念をもたらし始めたのは1970年代に入ってからである (Beck, 1972; Beck & Lehner, 1974, 1975; Seely et al., 1974)。

反射法地震探査データが地質学に大きな影響を与えつつある分野は大別して二つある。ひとつは音響層序学 (seismic stratigraphy) から坑井データなども利用して体系化されたシーケンス層序学であり、堆積学、層序学に大きな影響を与えつつある(中村、準備中参照)。もうひとつは反射法地震探査データの構造地質学的解釈結果の構造地質学に対するフィードバックである。両方の影響の与え方に共通している要因は、伝統的な地質学の手法が地表調査に基づきお

き、一次データは基本的には地質図という平面的なデータとして得られ、断面はそのデータに基づいて描かれるのに対して、反射法地震探査の一次データは断面であることから、従来、平面的なデータから推定していた断面上の問題の少なくとも一部は現実のデータとして我々に示されてしまうという点である。わが国においては、欧米に較べて地質学界に占める石油地質関係の比重が小さく、大学において反射法地震探査データの取扱い方を教育しているところは未だに極めて少ないのでこうした影響が余り及ばず、新しい概念の普及も遅いのが実状であろう。

1970年代までは反射法地震探査の教科書といえば、物理探査法の教科書の色彩が強く、処理された地震探査記録をどのように解釈するか、その方法を地質学と関連づけて書かれているものはほとんどなかった。1980年代後半になって、Badley (1985), Smith et al. (1987), Drury (1987), Tearpock & Bischke (1991), Fagin (1991)など、処理法よりも解釈の手法に重点を置いた教科書がでてきた。以下の記述において反射法地震探査データの取扱い方について詳しく述べることはしないが、不案内な読者にあってはこれらの文献を参照されたい。反射法地震探査データの構造地質学的解釈については Bally et al. (1966), Harding & Lowell (1979), Bally, ed. (1983), Gibbs (1983), Lowell (1985), Gries & Dyer, eds. (1985), Coward & Gibbs (1986), Woodward et al. (1989), 中村 (1989a, 1990)などが参考になる。

断層の再活動による重複構造としての反転構造

反転に伴つて現れる様々な構造の呼称としての反転構造 (inversion structure) は、明らかに異なる年代の、異なるテクトニクス下で形成された種々の構造が一地域で重複してみられるという重複構造 (superposed structure) の一種である (Lowell, 1985)。様々な様式や組み合わせがあり得る重複構造の中で、反転構造に対してのみ特定の名称を設けて取り上げる理由、または、反転構造を他の重複構造から区別する特徴

は、断層の再活動(reactivation)である。ある地質時代に断層運動を主体とするテクトニクスによって形成された構造が、後の時代に、同じ断層(群)の異なる向きへ変位する再活動によって新たに修飾された構造が反転構造であり、その断層(群)の再活動の過程を構造反転(structural inversion)または単に反転と呼ぶ。従って、一部に再活動した断層を含んでいようとしても、主要には古い構造と無関係に新たに発達した断層などを特徴とする重複構造は反転構造には含めない。再活動した断層があっても変位の向きが変わらなければ重複構造を作らないので、反転構造とは言わない。また、wrench fault(断層面の傾斜がほぼ垂直な横すべり断層)などのように、一連の断層活動の中で変形が進むにつれて個々の副次断層の変位方向が変化するようなものも反転構造には含めない(Harding, 1985, 1990)。別の言い方をすれば、反転構造とは、異なるテクトニクスによって既存の断層が以前とは異なる向きの変位を持つ再活動をすることによってできた重複構造のことである。

ただし、石油地質学の分野では、歴史的には下に凸の形をした堆積場とそこにたまつた堆積物が上に凸の形態になることを盆地反転と呼び、断層の再活動の認定を要件とはしていない。これは、石油地質学におけるこの言葉の使用が反転の古い用法に即して行われたことに起因する。また、wrench faultに伴う構造がしばしば反転と記述されてきており、両者を区別しない人もいるので、反転について述べた論文がすべて上述の意味で反転および関連用語を使っているわけではないことに注意する必要がある(Cooper et al., 1989; Glennie, 1990参照)。一方、後述するように、反転テクトニクスを受けている地域においては、様々なスケールでwrench faultと反転構造が混在することさら厳格に区別して用いることも有益ではない。

反転の最も単純な形は、断層の変位の方位を同一とし、伸張テクトニクス(extensional tectonics)から短縮テクトニクス(compressional tectonics)への転換、もしくはその逆の転換に

伴って断層の変位の向きが反対になることによって形成されると考えられる。伸張テクトニクスから短縮テクトニクスへの転換においては、正断層構造に伴ってできた堆積盆地が断層の反対方向への再活動(正断層の逆断層としての再変位)によって隆起し、堆積場でなくなる。即ち、反転の過程で堆積盆地の幾何学的形態が下面が下に凹み、上面が平らな形から、上面が凸形をした堆積作用だけでは作ることのできない形に変化する。そのような堆積盆地を反転盆地(inverted basin)と呼ぶ。また、上面が凸形をした形に堆積盆地が変化することから伸張テクトニクスから短縮テクトニクスへの転換に伴って生ずる反転をpositive inversionと言う。従って、盆地反転はpositive inversionに際してのみ有効な概念である。

一方、短縮テクトニクスから伸張テクトニクスへの転換に際して生ずる構造反転とは、衝上断層が反対方向へ再活動して、造山帯内に構造盆地が生ずることを意味し、沈降が生ずるからnegative inversionと言われる(Glennie & Boegner, 1981)。衝上断層が正断層として再活動している例は、ロッキー山脈のコルディレラ褶曲・衝上断層帶において、新生代の伸張テクトニクスに伴って早くから認められている他(Bally et al., 1966; Dahlstrom, 1970; Royse et al., 1975; Sprinkel, 1979; Constenius, 1982; Corbett, 1982; Powell & Williams, 1989など)、北海でも認められている(例えば、Chadwick & Smith, 1988)。

しかし、negative inversionに際しては、堆積盆地を形成した断層が、古い断層の再活動であるというだけで、一般の伸張テクトニクスによって生ずる堆積盆地と異なる形態の堆積盆地が形成されるわけでも、短縮テクトニクスで形成された構造を修飾して伸張テクトニクスによって特徴ある重複構造ができるわけでもない。後述するようにSibson (1985)によって、アンダーソン型断層(Andersonian faulting, Anderson, 1951)として考えた場合、衝上断層は正断層として再活動しにくいことが指摘され、コルディレラ造山帶においても伸張テクト

ニクスに伴う正断層が衝上断層の再活動になっているところがひとつの正断層の一部にすぎないことがあることから(Axen et al., 1990), negative inversion という概念を積極的に使用する利点がないと考えられる。従って、最近では、反転と言えば positive inversion のみを意味するという傾向にある(Cooper et al., 1989; McClay, 1992)。以下の論述においては、反転は positive inversion の意味においてのみ使用する。

盆地反転の研究史

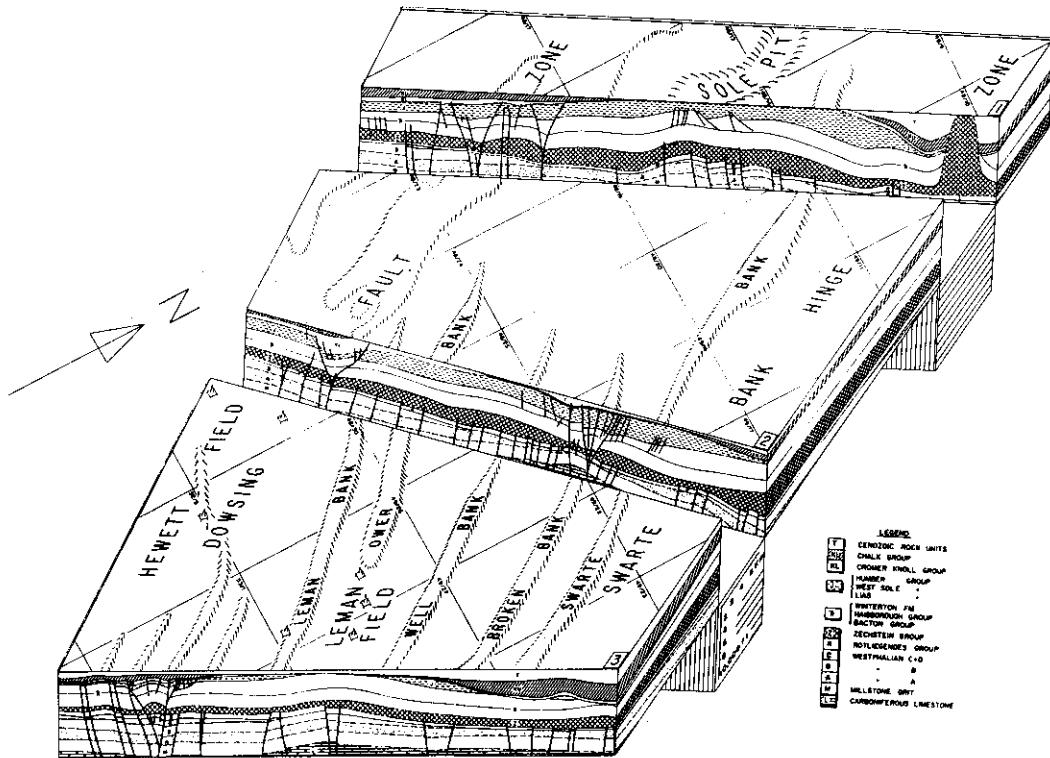
正断層の逆断層としての再活動による堆積盆地の隆起は Polish Trough (Pożaryski & Brochwicz-Lewiński, 1978 参照)などでは古くから知られていた。それに対して inversion という名称を与えたのは Voigt (1962)である。しかし、この言葉が普及したのは、Ziegler (1975a, b) が 1974 年の北西ヨーロッパの炭化水素鉱床に関する会議で使用してからである。この会議では、1964 年に北海油田が発見されて以来、精力的に行われた北西ヨーロッパ地域の炭化水素鉱床探鉱の成果が初めて広範囲に提示された。ヨーロッパにおいては Ziegler がその後何度も著した総説的論文(例えば 1978)や著作(例えば 1982)によってこの概念が広まった。

北海地域においては北部地域のリフト帯において石油を産し、南部地域の反転構造においてガスを産する(Glennie, ed., 1990)。この対照的な分布自身は、構造的と言うよりもガスの根源岩となっている石炭紀の石炭層と貯留岩となっている二疊紀 Rotliegend 砂岩の分布に支配されている(Glennie, 1986)。また、個々のガス田の構造を見ると、岩塩ドームに伴うものもあるが、構造反転に伴う背斜構造が重要な貯留構造になっている(Hillier, 1990; D'Heur, M., 1990; Mehenni & Roodenburg, 1990)。そのため、その構造解析と広域的なテクトニクスの解釈は南部北海地域における炭化水素鉱床の探査の上で重要な意味を持ってきた(Blair, 1975; Pegrum & Ljones, 1984; Gibbs, 1986)。このガス田地域

の反転構造のひとつである Sole Pit Inversion (第 1 図)の詳細なデータが、1980 年の 2 回目の北西ヨーロッパの炭化水素鉱床に関する会議で提示された(Glennie & Boegner, 1981)。彼らの示した地質時代毎の等層厚線図を抜粋して第 2 図に示す。この図では、伸張テクトニクス期の伸張に伴う堆積盆の沈降(initial subsidence または mechanical subsidence)が示されている三疊系の等層厚線図(第 2 図 b)や冷却沈降(thermal subsidence)が示されているジュラ系の等厚層線図(第 2 図 c)が断層で囲まれた堆積盆(第 2 図 a)に堆積中心を持つのに対して、構造反転の時代の白亜系の等層厚線図(第 2 図 d)はかつての堆積盆地が陸化して、堆積盆地を作った断層の周囲に主要な堆積場が存在している。即ち、positive inversion による堆積域の移動が示されている。北海のように反転の程度が小さい反転盆地においては、構造反転は地質構造図と関連づけた時代毎の等層厚線図によく表現される。盆地反転はこのようにして炭化水素鉱床探鉱において頻繁に用いられる等層厚線図によって認識された。Sole Pit Inversion の断層の性質については、その後様々な議論が出ているが(Walker & Cooper, 1987; Van Hoorn, 1987)，等層厚線図に示される堆積域の移動は正断層の逆断層としての再変位によって説明されるとして、反転の概念が石油地質学において確立した。その過程において、断層による変位は地質時代ごとに異なる音波探査記録の反射面(等時間面とみなすことができる)の断層を跨いだりによって認識されており、断層の露頭における擦痕などの調査によってではないことに注意する必要がある(第 3 図)。

更に構造反転が構造地質学の分野に広まったのは、Bally, ed. (1983) の 'Seismic expression of structural styles' の第 3 卷に構造反転の例として 4 つの地域の例(Plawman, 1983; Ziegler, 1983; Harding, 1983; Davis, 1983)が収録されてからである。それらの反射記録の例は、堆積盆地を限る断層が再活動して、初期の堆積層の層厚分布と後期の堆積層の層厚分布が異なった様相を示していることは明らかであったが、再活

反転テクトニクスとその地質構造表現



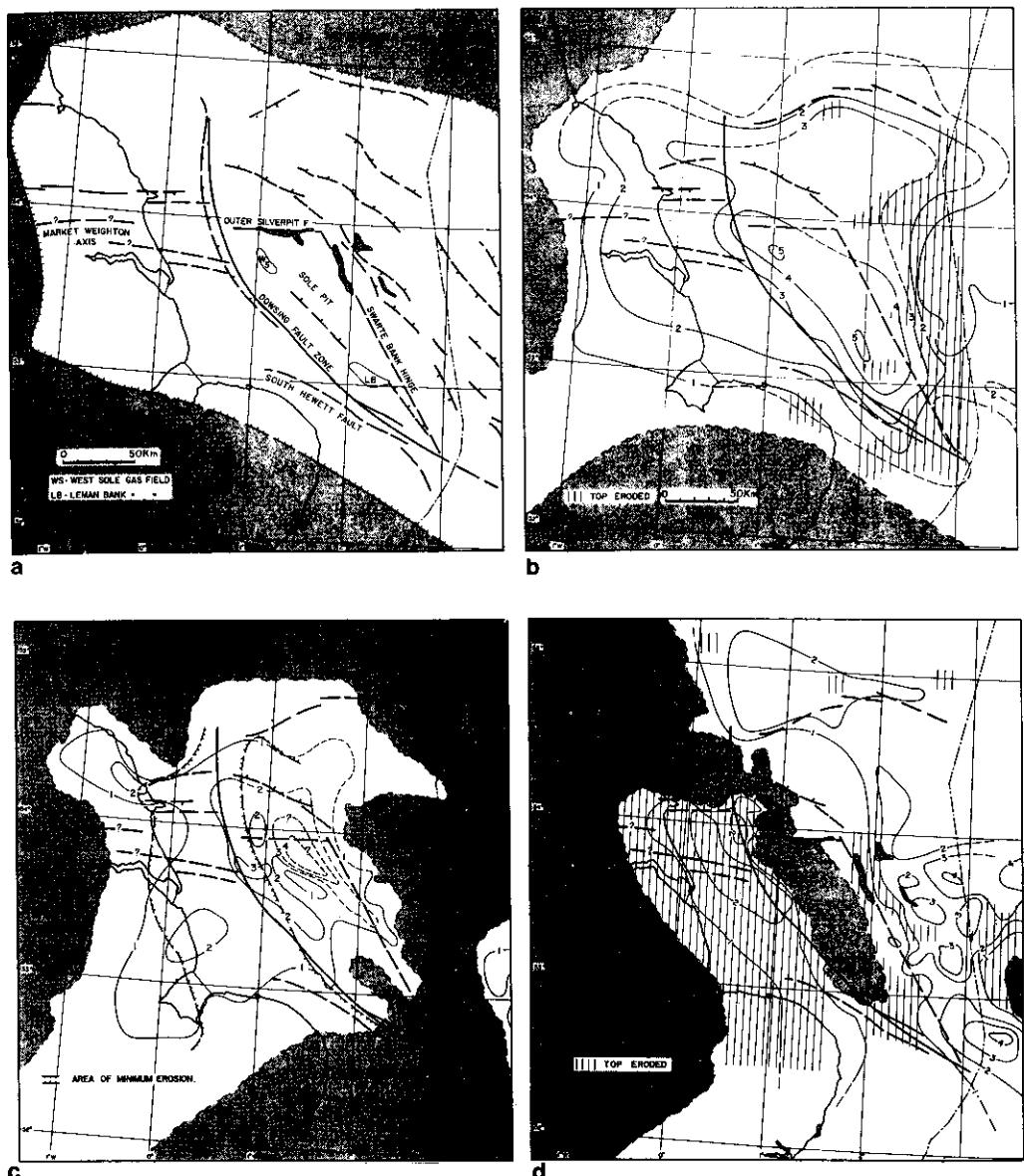
第1図 Sole Pit Inversion の俯瞰図(Glennie & Boegner, 1981)。

このように逆転の程度が小さいのが北海の反転構造の特徴である。位置について
は第5図参照。

動して反対方向に動いた逆断層の変位量は伸張テクトニクス期の正断層の変位量に較べて小さいものであった。

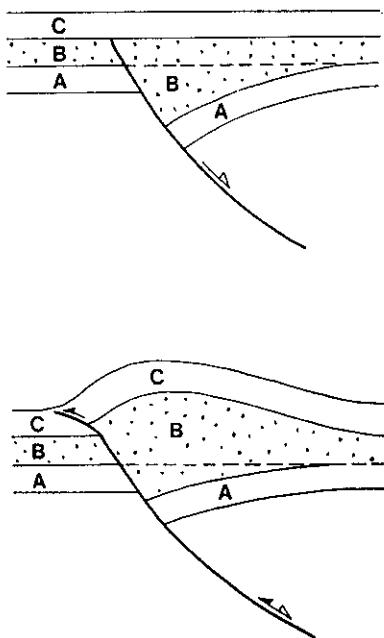
一方, Bally (1984)はピレネー山脈の衝上断層帯のモデルとして、他の褶曲・衝上断層帯(fold-and-thrust belt)と異なって、伸張テクトニクスの下で大陸地殻を伸張させた低角正断層群が構造反転を起こして、堆積盆地に堆積した地層を地質単位として造山帯に放出するモデルを考え、第4図のように低角正断層によってできた堆積盆地が構造反転に伴って、部分反転(partial inversion), 全反転(total inversion)が生ずるという模式図を示した。反転についての研究史においてこの論文の重要な点はふたつある。ひとつは、Bally (1981; 1982; Bally et al., 1981)は既に堆積盆地形成において低角正断層

やlistric normal faultの果たす役割を強調していたが(中村, 1990参照), この論文において初めて反転構造も深部において低角になっている正断層の逆断層としての再活動によって形成されている可能性を示したことである。もうひとつはBally et al. (1966)以来、すべて異地性(allochthonous)の thrust sheet の stacking patternで考えられていた造山帯の構成要素である褶曲・衝上断層帯(Boyer & Elliot, 1982; また, 中村, 1989a; 村田, 1990参照)の中に原地性(autochthonous)の stack (restack)がある可能性を示したことである。CowardらはBally (1984)と同様な考え方で西アルプス地域の地質を検討し、様々な反転構造の様相(structural style)で多様な地質構造を説明できると主張した(Coward & Gibbs, 1986; Gillcrist et al., 1987;



第2図 Sole Pit Inversion の構造および等層厚線図(Glennie & Boegner, 1981).

a) 構造 (Fig. 2a), b) 三疊紀層の等層厚線図 (Fig. 3a), c) ジュラ紀層の等層厚線図 (Fig. 3b), d) 後期白亜紀のチョーク層の等層厚線図 (Fig. 3d), 灰色部は陸域, 縦線部は該当層の頂部が削剥されている地域.



第3図 盆地反転の模式図(Williams et al., 1989).

A, 伸張テクトニクス開始前に堆積した堆積物(prerift sediment), B, リフト形成期に半地溝内に堆積した堆積物(synrift sediment), C, 伸張テクトニクス後に堆積した堆積物(postrift sediment). ここで描かれている褶曲は本文でタイプ分けをしている褶曲の中では fault-bend fold である.

Coward et al., 1991).

構造反転を生じさせている場

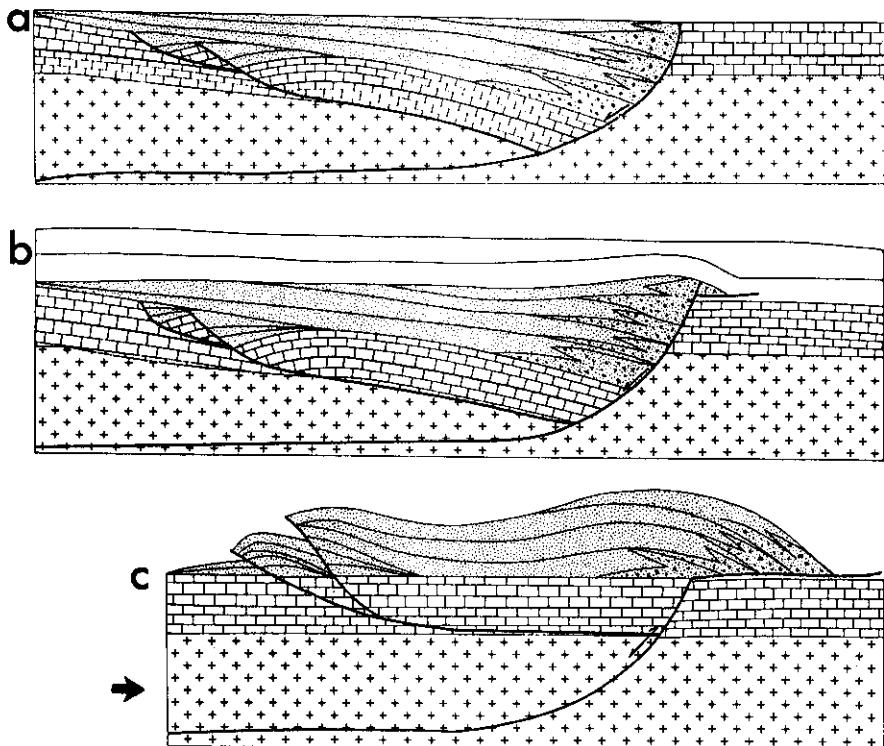
構造反転はすべてプレート内変形(intraplate deformation)である. 後述するように、構造反転の中にはプレート境界に絡む地質構造である褶曲・衝上断層帯に密接に関連するものがあるが、それらも含めてすべてプレート内変形である. なぜならば、褶曲・衝上断層帯を構成する地質体は、主衝上断層(root thrust)の造山帯前縁(forland)への前進(propagation)によって、衝上断層先端(thrust front, thrust tip)において衝上断層の下盤から上盤への地質体の移動、即ち、沈み込むプレートの上にあった堆積体がプ

レート物質境界を越えて沈み込まれる側に付加することによって形成されているのに対して、構造反転によって変形している地質体は褶曲・衝上断層帯に近接していてもどちらかのプレートに留まっているのでプレート内変形と考えることができる.

また、Harding & Lowell (1979)以来、構造様式(structural style)の分類として basement-involved structure (deformation) と detached structure (deformation) に大別するという分類が主に米国の炭化水素に関係した構造地質学者によって採用されているが(例えば、Bally, ed., 1983; Foster & Beaumont, eds., 1988)，その分類をあてはめるとすると、反転構造は基盤にあった断層の再活動によって生じた構造であるから basement-involved の構造になる(Bally (1983)はどこにでもあるという理由でどちらにも含めていないが).

現在、構造反転はかつて伸張テクトニクスが支配的であり、その後短縮テクトニクスに転じたすべての地域で見つかっている。テクトニクスの変化の原因は様々であるが、それらを大別すれば以下のようなになる。

- 1) 褶曲・衝上断層帯(造山帯)前縁から離れたところにあるかつてのリフト帯(failed rift)で、褶曲・衝上断層帯に生じている圧縮場の遠方において生じているプレート内圧縮応力によって、短縮変形としての構造反転がかつてのリフト帯の正断層群の再活動によって生じているもの。
- 2) 褶曲・衝上断層帯(造山帯)前縁の近く(foreland)にあるかつてのリフト帯で、褶曲・衝上断層帯に生じている圧縮場によって、短縮変形としての構造反転がかつてのリフト帯の正断層群の再活動によって生じているもの。
- 3) 特定の褶曲・衝上断層帯(造山帯)に原因を求めることができないプレート内応力によって、短縮変形としての構造反転がかつてのリフト帯の正断層群の再活動によって生じているもの。
- 4) 収束型プレート境界の背弧地域において、



第4図 Bally (1984)の盆地反転の模式図。

a) listric な正断層で形成された半地溝と堆積物、この図では prerift sediment の中に antithetic な正断層が描かれている、b) 部分反転(partial inversion), antithetic な正断層は再活動していない、c) 全反転(total inversion), antithetic な正断層が backthrust を形成している。listric な正断層とともに out-of-graben thrust となって postrift sediment の上に fault-bend fold を形成している。

かつて伸張テクトニクスのもとにあって生じた構造がその後の短縮テクトニクスによって構造反転しているもの。

以上の分類は、最初に述べたように、Harding (1985, 1990)に従って wrench fault に伴う構造と反転構造を区別して用いた上で行っている。Bally (1983)は反転構造として wrench fault に伴う構造を含めているので、「多くの場合、反転は横すべり断層に伴う」と述べている。1) では褶曲・衝上断層帯の foreland 側にあるものが多いが、hinterland 側にあるものもある。2) は概して反転の程度が大きく伝統的な石油地質学における反転の例とは異質であるので、

同一の概念でくらいい方が良いという考え方もあるが、foreland 側にある 1) の反転と、褶曲・衝上断層帯との位置関係の上で、明確な区別を定めることは難しいので別の用語を立てていない(Cooper, et al., 1989 参照)。

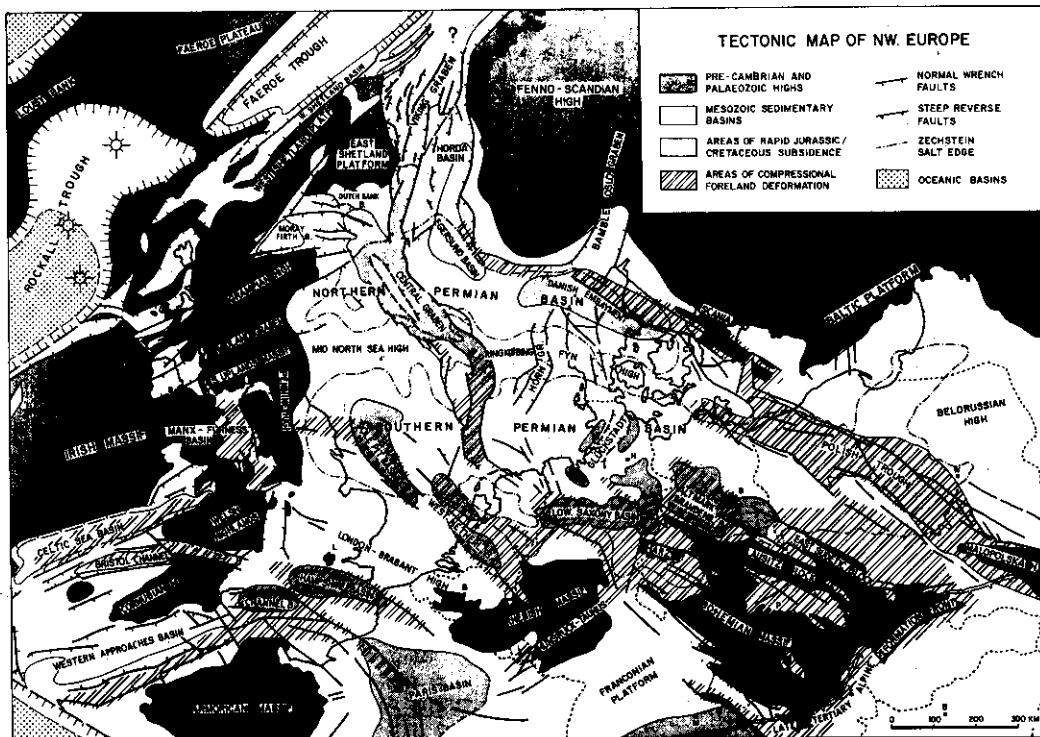
プレート内応力による failed rift の部分反転

これにはテクトニックな場としては、上述の 1) および 3) が該当する。反転構造の内、早くから認識され、炭化水素鉱床の探鉱対象になっているような構造は、すべて部分反転である。その反転の程度を断層に沿う変位量で評価

して見た場合、逆断層として再活動した変位量は正断層として動いた変位量の数十パーセント以下である。このように程度の小さい部分反転は、アルプス造山帯の前縁としての北西ヨーロッパ(第5図、Ziegler, ed., 1987)のように明らかに活動的プレート境界の短縮テクトニクスと強い相関のある地域だけではなく、オーストラリアとタスマニアの間のGippsland Basin(Davis, 1983; Etheridge et al., 1985; Etheridge, 1986)や中国東北部の華北断块区(Zha, 1984; Bally et al., 1986)などにおいて認められる。程度の小さい部分反転構造の音波探査記録においては、堆積層の層厚変化が認められても、断層の再活動以外に認められる構造は少なく、反転に伴う盆地堆積層の褶曲の内部構造が見られることはまずない(例えば、Badley et al., 1989参照)。

北西ヨーロッパに見られる構造反転はアルプ

スの衝上断層帶の前面(foreland)に生じた圧縮応力場によってできていると考えられている。このような圧縮応力場によるforeland deformationは白亜紀から第三紀のコルディレラ造山帯においてもララミー変動(Laramide)として広く知られており、基盤の逆断層を伴う隆起変形で特徴づけられる(Lowell, 1974; Lowell, ed., 1983; Blackstone, 1983, 1986; Brown, 1984)。ただし、北米においては既に衝上断層がクラトンの上にまで前進しており、再活動するような目だった断層が少ないので、反転構造はほとんどなく、逆断層は主に新たに生じたと考えられている。逆断層の深部における幾何学的形態については、長い間、論議的であったが、COCORPの大規模反射法地震探査によって衝上断層であることが明らかになった(Smithson et al., 1978)。後述するように、この逆断層によるクラトンを覆う堆積層の変形は構



第5図 北西ヨーロッパの構造図(Ziegler, 1987)。

斜線部が反転構造の見られる地域。Sole Pit Basinはイングランド東岸にある。

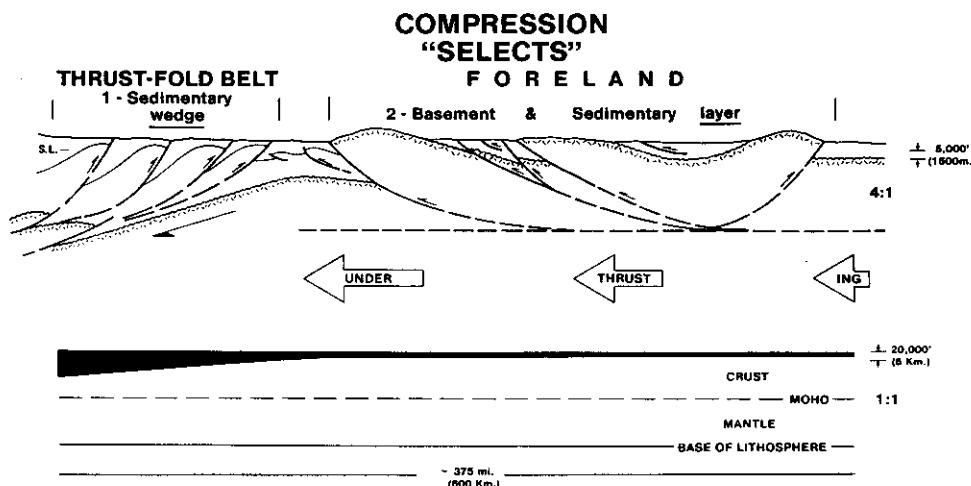
造反転に際しての post-rift sediment の変形と共通した特徴を持っている(第 3 図参照)。

衝上断層帯の圧縮応力がどのように前面のリソスフェアに伝わり、なぜ特定の場所にだけ断層変形が起こるかについては定説がない。Lowell (1983) および Bally (1984) はリソスフェアの中心部または地殻の中下部にデコルマの生ずる部分があることを想定した(第 6 図)。Beach (1987) は北西ヨーロッパの反転構造は地殻全体を切り、モホに達する detachment によってアルプス衝上断層帯と結びつく linked fault system になっていると考えた。しかし、現在までのところ、大規模反射法地震探査によっても特定のデコルマ面は検証されていない。

衝上断層帯の hinterland 側でも構造反転が見られる可能性がある。Hsu (1988) はタリム盆地などユーラシア大陸内にある盆地のいくつかが古生代に形成された背弧海盆である可能性を指摘した。もし、彼の指摘が正しければ、これらの伸張テクトニクスでできた残存背弧海盆にそって構造反転が見られるかもしれない。

反転の古い用法

Ziegler が述べているように、inversion という言葉は orogeny の理論の中で今世紀の前半から使われていた(in Cooper et al., 1989)。それは mobilist に対抗する fixist, その中でも特に、orogeny を deformation process と言うよりも、原語に近い mountain building process と言う意味に理解する(Sengör, 1990, 1991 参照)人々にとっては、地向斜(geosyncline)概念と結合すれば、当然すぎる概念でもあった(Rast, 1992)。即ち、地向斜をのちに褶曲運動を受けた厚く堆積物のたまる場(徳山・木村, 1968; 木村, 1971 参照)と定義し、そこが山脈になると考えれば、地向斜堆積物とは山にある堆積物となり(Hsu, 1982), fixist の立場では、山脈形成過程とは凹地がそこにためた堆積物ごと凸地形を形成することに他ならない。その過程は、反転、即ち、「地殻のある部分の長期間継続する垂直方向の運動が反転すること」(Lapidus, ed., 1990) によって実現される。今回、筆者は Stille



第 6 図 褶曲・衝上断層帯前縁の変形の模式図(Lowell, 1983)。

リソスフェアの動きを示す矢印より上は、縦横比 4 倍。水平に描かれている破線が推定されるデコルマ面。下は縦横比等倍。

などの反転の用語法を充分に調べる余裕がなかったので、筆者の知る限りで反転と言う言葉を最も鍵概念として使用している Belousovについてのみ述べる。

Belousov は、地向斜における昇降運動(ペロウソフ, 1958; oscillatory movement, Belousov, 1962)を二段階に分け、はじめは沈降の卓越する、まさに地向斜の形成期、第2段階を隆起の卓越する時期とし、その構造運動の転換を general reversal もしくは general inversion (Belousov, 1962, p.314)と呼んだ。Bellousov (1980)では第2段階のことを inversion stage と呼んでいる(p.139)。地向斜全域にわたって隆起が起こらない場合のことを particular inversion (Belousov, 1962, p.314)と呼ぶ。彼は inversion という言葉を様々なスケールで用い、複背斜・複向斜において noninverted および inverted という区別をする(Belousov, 1962, p.116; 1980, p.155)。noninverted な構造の場合、層序的に上位ほど地層の傾斜が緩いことで特徴づけられ、両者の区別は等層厚線図によって容易にできると述べている(北海の反転構造における等層厚線図の利用との類似に注意、第2図参照)。この特徴は陸背斜(anteclise)や陸向斜(syneclise)と同一であるとも述べている。陸背斜や陸向斜はクラトン上に堆積物のたまたた卓状地に特徴的な構造で、モスクワ陸向斜が典型的な例である。Belousov は、卓状地で研究を進めたロシア学派において確立した概念である inversion (例えば、Aleinikov et al., 1980)を、鍵概念として造山帯にまで拡大して適用したわけである。卓状地における堆積盆の進化は堆積盆間の堆積期間の同時性の正否(例えば、Sloss, 1972; Aleinikov et al., 1980)、汎世界的海水準変動、周囲の造山帯のフェーズとの関係、プレート内応力やマントルの動力学との絡みにおいてまだ議論が集束しない(中村、準備中参照)。また、Park (1988)は英国人でありながら、北海の盆地について書いたところでも反転の最近の用法について全く触れずに、inversion を Belousov (1962)を引用してプレート内の特徴的テクトニクスとしている。

このように、fixist の典型であり、山脈の形成だけを orogeny の課題として問題にする Belousov (ペロウソフ, 1958, v. 2, p.156; Belousov, 1962, p. 314)にとって、反転は鍵概念である。にもかかわらず、日本においてこの概念が見過ごされてきた理由は、普及させられた邦訳書の翻訳が不適切であったためと思われる。noninverted, inverted という言葉は、それぞれ対称褶曲、斜褶曲(非対称褶曲)という訳語が与えられているが(ペロウソフ, 1958, v. 1, p.155)，これは直前の複背斜・複向斜の非対称性(asymmetrical, Belousov, 1962, p.116)に関する記述に引きずられた誤訳である。その結果として、訳文は、地層の傾斜に関する上述の記述と「対称」という言葉の関係が理解できない文章になっている。さらに、構造運動の転換としての inversion のところでは、転化あるいは転換と訳されている(ペロウソフ, 1958, v. 2, p.156 および p.258 訳注)ために、両者の本来持っていた概念上の関連が全く損なわれている。ペロウソフ(1979)においては inversion stage は逆転段階と訳されているが、この本は「構造地質学原論」と言いながら、テクトニクスの記載が主で構造そのものに関する叙述が少なく、Bellousov (1980)のような追記(p.155~156)もないでの、「逆転」の本質的な意味は把握しにくくなっている。

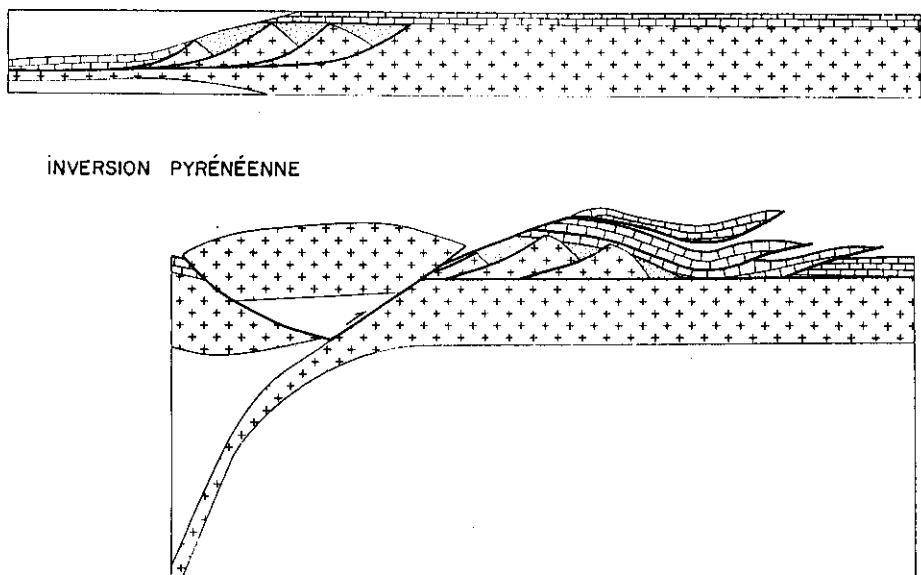
地向斜という概念は米国生まれの概念であり(Dott, 1979), fixist は米国にも多数いたわけであるが、米国の辞書に反転の古い用法が見られない理由はよくわからない。たぶん、米国の造山帯は衝上断層が顕著で、反転という概念があてはまりにくいためであろう。造山運動論と結合した古い用法である「反転」はプレートテクトニクスの受容とともに消えたが、その起源は大陸内の堆積盆地の沈降と上昇の記載にあるために、石油地質学の分野において、プレートテクトニクスの受容後も使用されることになった。しかし、言葉の履歴を知る者ほど、造山帯に密接した地域においてこの用語を使用することは、fixist の影がチラつくので抵抗があるのであろう(Cooper et al., 1989)。

褶曲・衝上断層帯(造山帯)前縁の近くにおける 程度の大きな反転

反転の程度の大きい褶曲・衝上断層帯前縁地域の研究は、概ね次のような問題関心から進められてきた。造山帯の Wilson cycle を考えると、大陸は伸張テクトニクスによって引き裂かれ(break-up)，そこに海洋地殻と非活動的大陸縁辺堆積盆地が形成される。プレート運動によって海洋地殻が沈み込み、大陸の衝突(collision)が起こる時、伸張テクトニクスによって生じた正断層構造を骨格とする非活動的大陸縁辺堆積盆地が衝突帯に巻き込まれることはかなりの確率で生ずる。伸張された大陸リソスフェアが衝突によって再び短縮されることが、衝突過程のどこかで起こっているのではないかという問題関心である(例えば，Helwig, 1976; Winslow, 1981)。つまり、restackされた原地性の基盤があるのではないかということである(第7図)。Jackson(1980)は、Zagros褶曲・衝上断層帯の地殻内で生じている地震の発震機構の解析から、伸張テクトニクス下で形成された正断層が短縮テクトニクス下で逆断層として再活動して

いるのではないかと論じた。

アルプス造山帯の北西部においてはコルディレラ造山帯などと同様、thin-skinned tectonicsに基づくバランス断面(balanced cross-section)の考え方(Dahlstrom, 1969, また, 中村, 1989a; 村田, 1988, 1990参照)で thrust sheet の累重様式が解析されたが(Boyer & Elliot, 1982; Butler, 1985, 1986)，西アルプス地域は、伸張した大陸地殻の上のにのった堆積層が薄く、伸張テクトニクス期の地質構造に規制されて層相の変化が激しく、均一に近い厚さの堆積層の存在とその中に、主に層準に規制されて発達する floor thrust を前提とする thin-skinned tectonics の考え方方は当てはまらないのではないかと考えられた(例えば, Tricart, 1984; Lemoine et al., 1986; Lemoine and Trümpy, 1987)。西アルプス地域においてはリフト帯に堆積している堆積物が短縮変形している。その変形の原因を基本的には基盤の塑性的な短縮変形と堆積物の不均質な物性に求める立場(Gratier & Vialon, 1980; Tricart & Lemoine, 1986; de Graciansky et al., 1989)と堆積物(cover)を基盤(basement)から引き剥す衝上断層を考える立場(Beach, 1981;



第7図 Bally (1984)のピレネーの restack した造山帯の模式図。

Davies, 1982; Butler, 1989) があった。後者の立場は基本的に thin-skinned tectonics の延長線上に立つものである。両者ともリフト形成期の正断層の逆断層としての変位を認めるが、変位の程度は大きくなない。前者においては短縮変形の相当部分が基盤の塑性的な変形でまかなわれ、後者においては衝上断層の変位によって堆積物の変形は造山帯中心部の短縮変形と相殺されると考えられている。Coward らはそれに対して、堆積物の変形が基本的に正断層の逆断層としての再活動に伴う短縮変形と相殺するモデルを提出した(Gillcrist et al., 1987; Coward et al., 1991)。これらの考え方の間では基盤から引き剥される堆積層の中に見られる変形のセンス、正断層に直接接して堆積した堆積層の変形の解釈がそれぞれ異なる(第 8 図)。また、露頭で観察される断層のうち、どれが短縮テクトニクスによって形成された新しい断層で、どれが伸張テクトニクス下で形成された断層の再活動かの解釈が異なる。これらの真偽の程が論文の記述から直ちに判明することはまずない。更に、地質単位の取り扱いは、詳細な地質図作成の上に立つ解釈によって可能になる訳であるから、研究者間で一致しない結論が多い。しかし、このような議論は、「反転」の用法の歴史的文脈からすれば、mobilist の間での fixism の復活である。

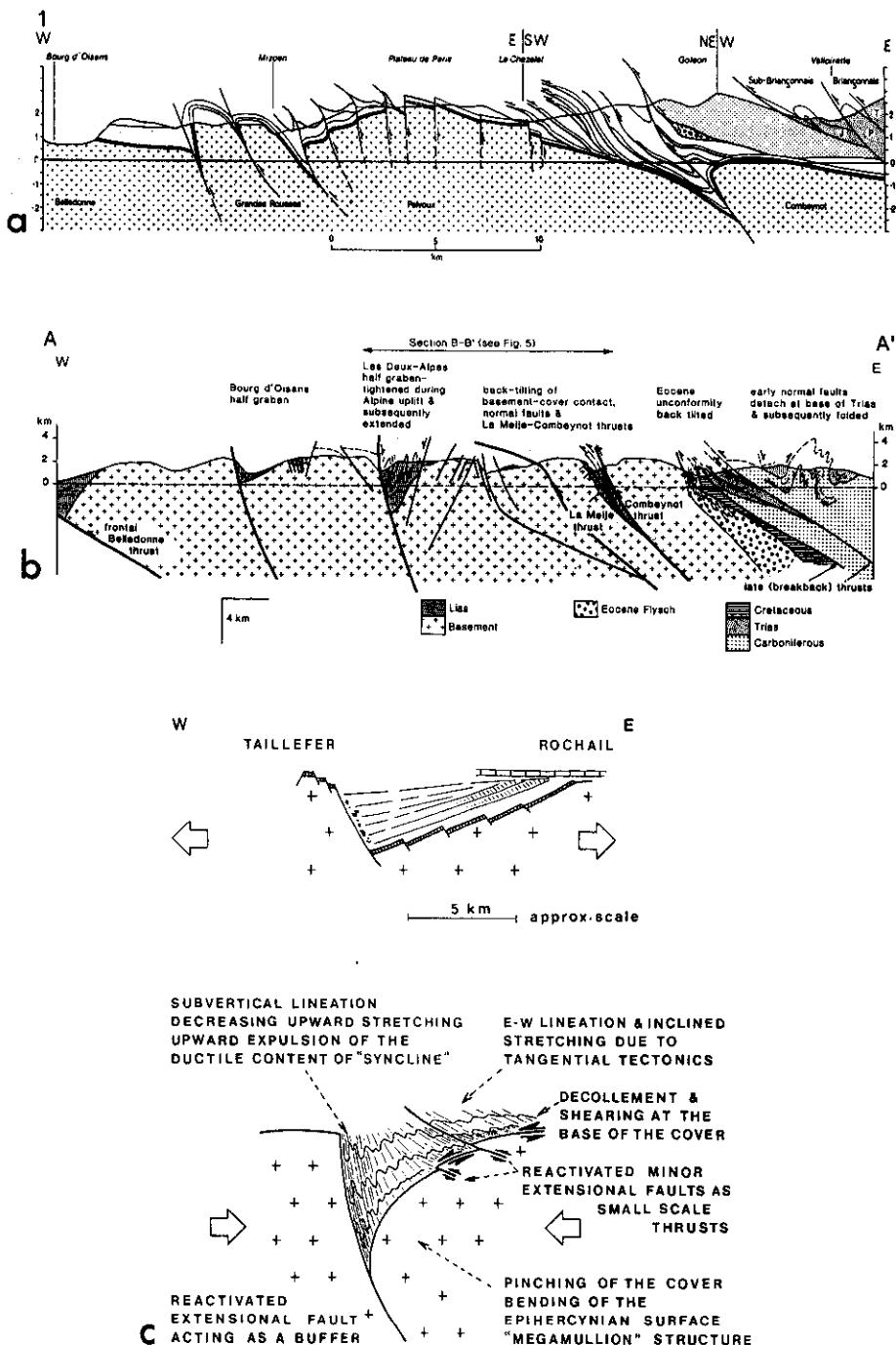
フランスにおいては、立場はそれぞれ異なるとは言え、構造反転による造山帯の新しい解釈が西アルプス地域(Lemoine & de Graciansky, 1988など)とピレネー地域(Martinez et al., 1989; Roure et al., 1989など)において進み、一種、流行の感がある(Letouzey, 1990)。最近、Cluzel et al. (1991) は朝鮮半島の沃川帯(Ogcheon Belt)は古生代のリフト帯が反転したものであると主張している。彼らが反転であるとする根拠は堆積物の堆積相の側方変化が非活動的縁辺堆積盆地の堆積相変化に似ており、随伴する火成岩の地球化学的性質がプレート内火成活動に分類できるから、沃川地向斜の堆積物はプレート内のリフト帯に堆積したものであり、沃川帯の衝上断層はリフト帯の正断層群が

反転したものであろうと推定しているだけであって、断層そのものから正断層の再活動の証拠を見いだしているわけではない。

背弧地域の反転構造

背弧地域において反転構造が最初に明瞭に示されたのはインドネシアのスマトラ島の産油地帯である(第 9 図)。ここは戦前からパレンバンの産油地帯として知られ、太平洋戦争の最中に日本人の地質家が多く地質調査に従事し、褶曲構造が明らかにされていたところである(例えば、橋本, 1961)。これらの褶曲構造はスマトラ断層の横すべりにともなう Riedel shear による褶曲と解釈されてきた(例えば、Harding, 1974)。しかし、1960 年代末にデジタル方式による地震探査が開始されて、その褶曲構造が地下の断層に大きく規制された構造であることが判明し(Mertosono & Nayoan, 1974; Roezin, 1974; Harsa, 1978)、褶曲帯の地下に第三紀はじめの伸張テクトニクス下でできたリフトの存在が明らかになり(de Coster, 1974)、構造反転の存在が明らかになった(Eubank & Makki, 1981; Harding, 1983)。

Letouzey (1990) および Letouzey et al. (1990) はスマトラ島と同一のスンダ島弧系に属し、より東側の背弧海域である Sunda Shelf の構造反転を示した。この海域はオーストラリア大陸の大陸縁がチモール島において衝突し、その結果インドネシア島弧の北縁に back-arc thrust ができているので(Silver et al., 1983; McCaffrey & Nabélek, 1984; Breen et al., 1989)、テクトニックな場としては褶曲・衝上断層帶前縁と同じ様な場となる(Bally (1975); Bally & Snellson (1980) の A-subduction)。しかし、Letouzey の示した 4 つの例の内、スラウェシ(セレベス)島に近い 3 つの例(第 10 図、①~③)は断面上の堆積層の層厚分布から考えて構造反転していることは間違いないと考えられるが、構造方向がジャワ海溝の沈み込み帯や back arc thrust に斜交し、むしろスラウェシ島の Southeast Arm に沿う構造に平行しているので、スンダ島弧系

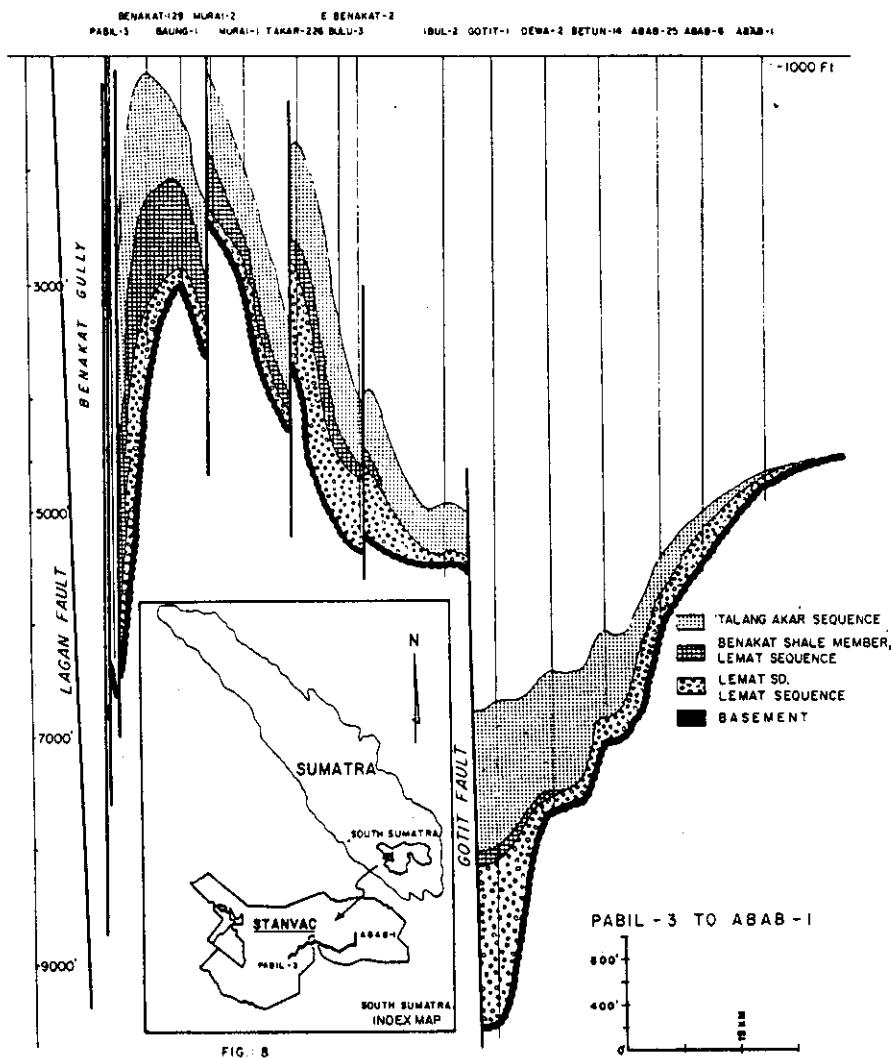


第8図 西アルプスのほぼ同じ地域の断面図。

a) Beach (1981), b) Coward et al. (1991), c) de Graciansky et al., (1989).

a) の Mizoën と Le Chazelet (E/SW) の間が b) の Section B-B' に相当。b) の Les Deux-Alpes half graben が c) の下図に相当。

反転テクトニクスとその地質構造表現

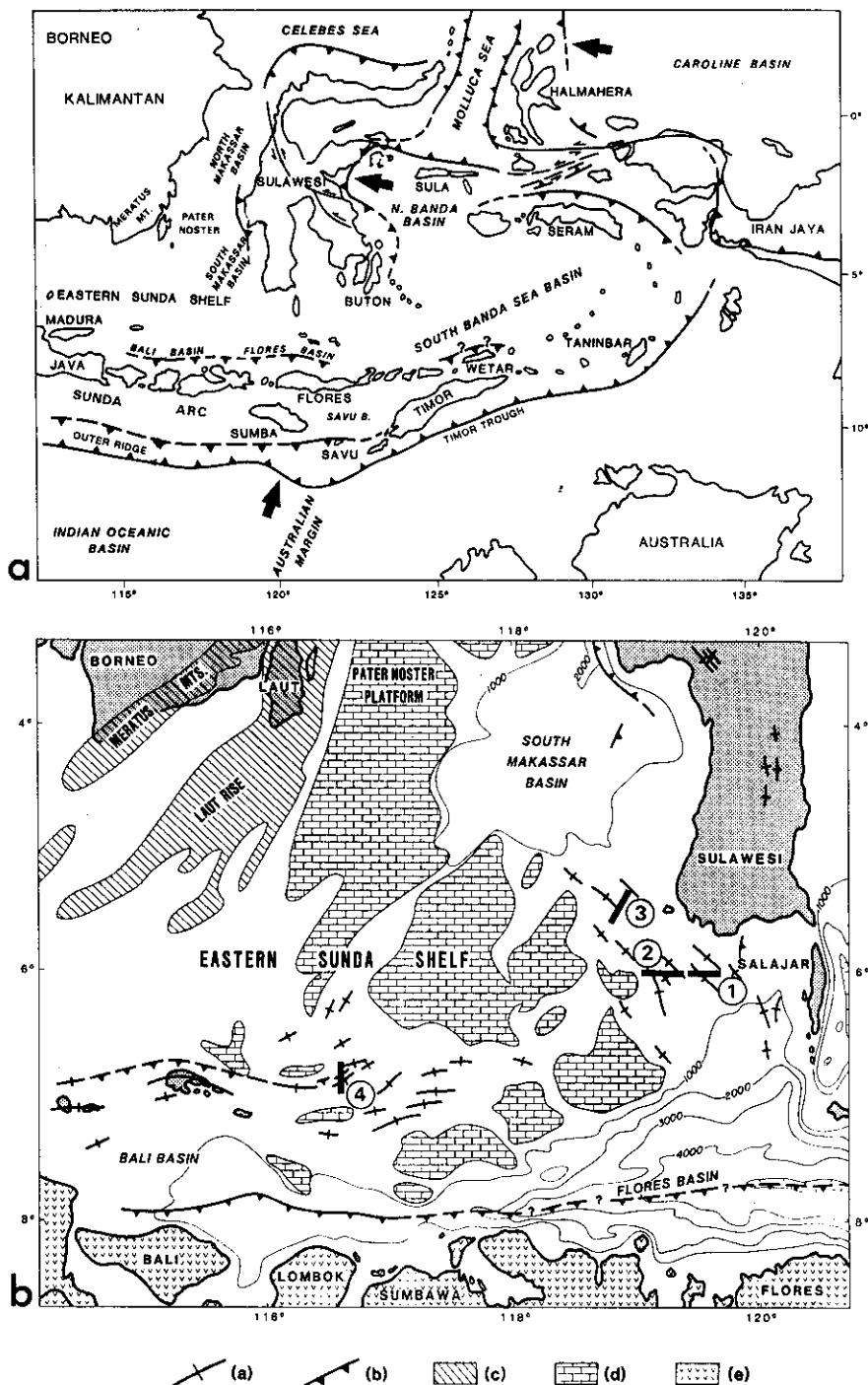


第9図 スマトラ島の産油地帯の坑井データに基づく構造断面(Harsa, 1978).

正断層によってできた半地溝群に堆積した堆積物が反転している。

の背弧地域と考えるのは適当でないかもしれない。また、Flores thrust の北側に位置する構造反転した向斜構造(第10図、④)は、flexural slip をしながら褶曲が進行している時に海水準変動もしくは広域的な隆起によって不整合ができる、それが修飾されていると考えても説明することができる。即ち、Letouzey は向斜構造が不整合で切られた後にたまたま堆積物の層厚分布と向斜構造の関係が flexural slip によって向

斜構造の中に半地溝(half graben)を作った証拠であると述べているが、これでは同一の向斜構造が引き続く、短縮、伸張、短縮のテクトニクスに応じて、同一の面で違う向きに flexural slip をしていることになる。むしろ、短縮テクトニクスが進行している中で不整合が形成された際に不整合面自身に起伏があり、その上位に堆積した堆積層の層厚分布を規制したと考える方が自然に思える。Sunda Shelf における構造



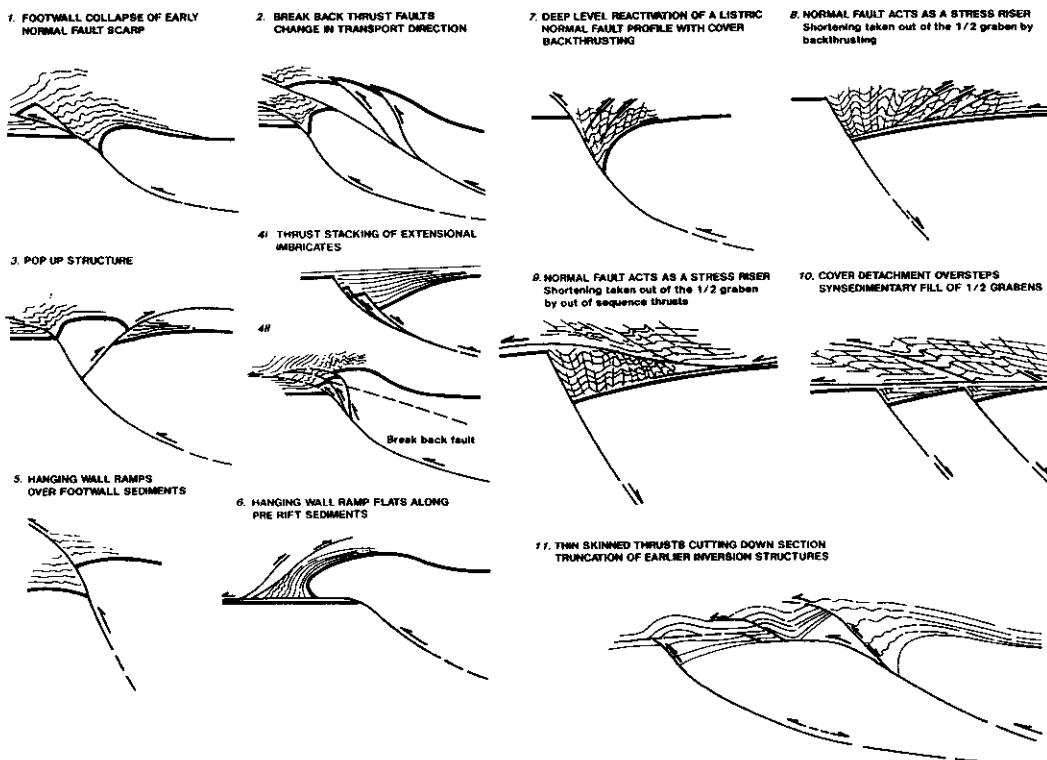
第10図 a) インドネシア東部のテクトニックマップ, b) Sunda Shelf の構造図, a: 反転構造内の背斜構造または再活動した背斜構造, b: 衝上断層, c: 褶曲帯, d: プラットフォーム炭酸塩岩, e: スンダ火山弧(Letouzey et al., 1990).

反転は A-subduction の開始から褶曲・衝上断層帯の形成と構造反転の関係を考える上で、また、東北日本の背弧側の構造との比較においても興味深い事実を示していると思われるが、提示されている資料がまだ少なく、スマトラ島の構造反転を示す地域との間に挟まれる地域の構造もよくわからないので、詳しい検討はまだできない。

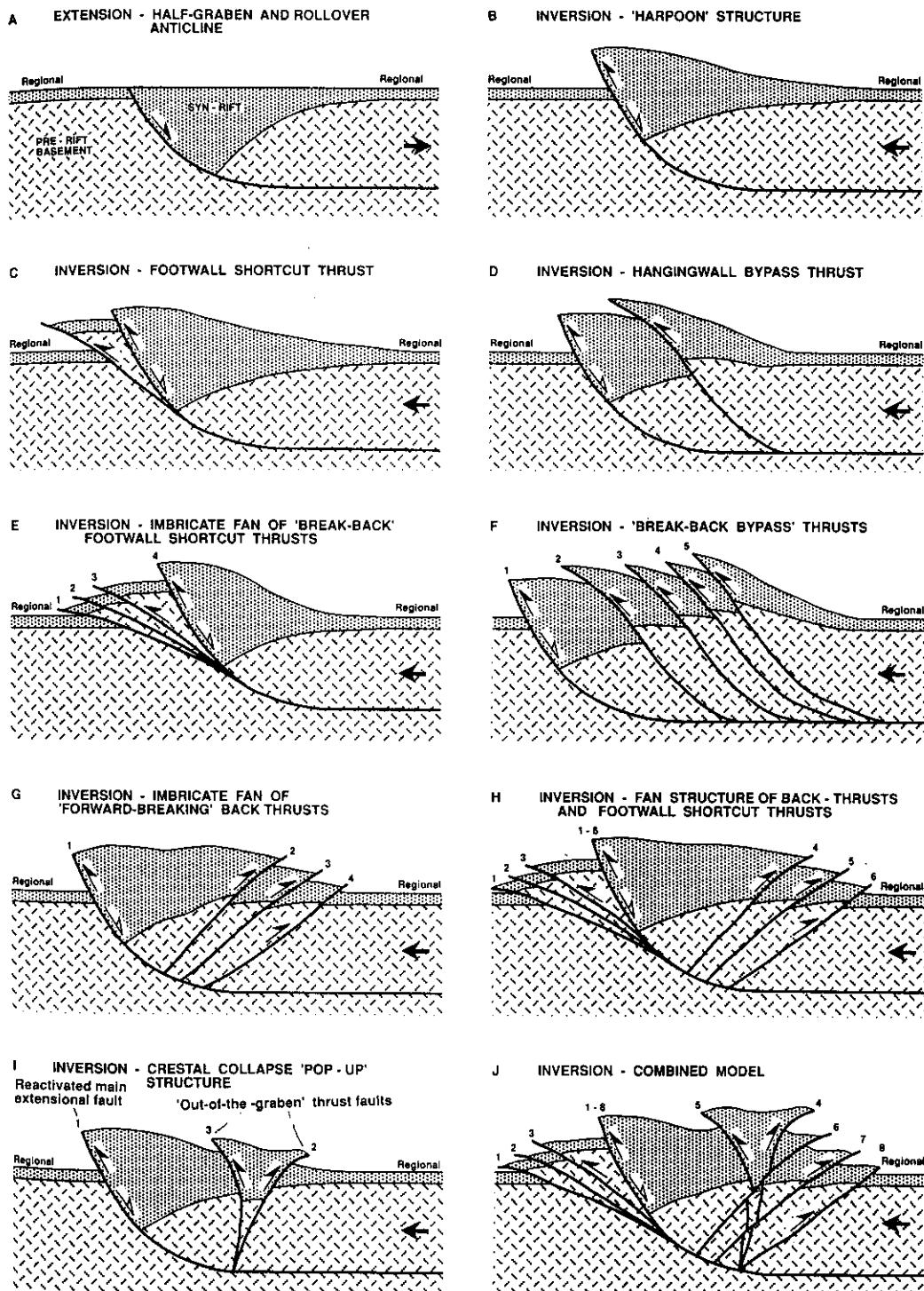
反転構造の内部変形様式と構造地質学的問題

西アルプス地域の研究を通じて、反転構造に伴う構造の概念が整理されてきた(Coward & Gibbs, 1986; Gillcrist et al., 1987; Coward et al., 1991)。それらは地質解釈の概念装置として生まれ出されたものである(第11図)。一方、砂箱を使ったアナログ・モデルによっても構造反転に際して、どのような構造が形成されるか研究さ

れ(Buchanan & McClay, 1991; McClay & Buchanan, 1992)，反転構造について整理された(第12図)。これらはあくまでも構造解釈のための概念装置であるが、地表調査に基づいて確立されてきた構造地質学の概念と異なり、モデル先行で注意して使う必要のある概念である。反転という概念は地震探査記録という断面上のデータに基づいておいているが、ここに示されたような細部にわたってまで地下の地質構造が記録に見えるわけではない。先述したように西アルプス地域の地質構造の解釈についてはまだ異論がある。アナログ・モデルのなかで見られるような thrust sequence があれば、バランス断面図に基づいて復元断面図(restored section)を作ることが可能であるはずだが、現実のデータで書かれた例は存在しない。従って、これらの成因的(genetic)な概念の使用に際しては地表調査や地震探査記録において正断層が逆断層として再



第11図 Coward et al. (1991)による反転構造の内部変形様式。
西アルプス地域の地質データに基づく。



第12図 McClay & Buchanan (1992)による反転構造の内部変形様式。
砂箱を用いたアナロジーモデルによる。

活動した際に逆断層に成因的に関係して新たに生じた構造であるという根拠が示される必要がある。これらの概念の中で比較的成因的な関係が示しやすいものは footwall shortcut thrust と back thrust であろう。

構造反転に伴って元の盆地の最も堆積層の厚い部分に背斜構造ができやすい。北海ではそれが有力な炭化水素鉱床の貯留構造になっている。しかし、反転盆地に見られる背斜構造には少なくとも 5 種類の型があると考えられる。

第 1 は、構造反転の際にできた構造ではなく、伸張テクトニクス期に正断層の listric な形態に支配されてできる roll-over anticline である (Hamblin, 1965; Xiao & Suppe, 1992, 第 13 図 a) 参照)。roll-over anticline は正断層が深部において傾斜を変えて、低角になることによって上盤側が断層にそって変位するにつれて変形する一種の fault-bend fold (Suppe, 1983; Jamison, 1987; Medwedeff, 1989, 第 13 図 b) 参照) であ

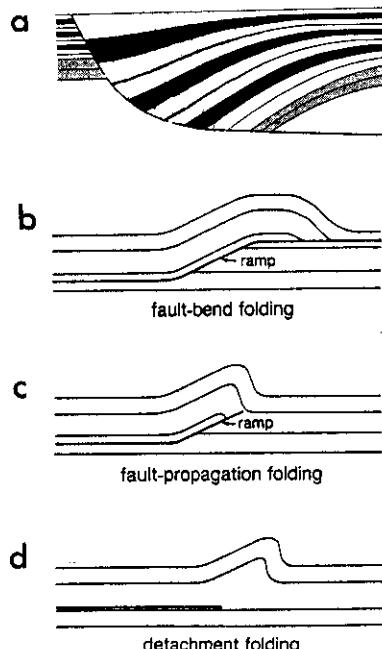
る。この構造が構造反転にさいしても保存されることはアナログ・モデル (Buchanan & McClay, 1991; McClay & Buchanan, 1992) によって確認されている。

第 2 は、Bally (1984) が示したように、盆地内堆積物 (synrift sediment) が listric な正断層の上を逆に滑って盆地のそとに押し出されたような形になることによって、fault-bend fold を作るものである (第 4 図参照)。これは衝上断層において thrust sheet が ramp から flat に移り変わることで fault-bend fold を作るのと同様である。

第 3 は、盆地内堆積物の fault-propagation fold (Suppe, 1985; Jamison, 1987; Suppe and Medwedeff, 1990; Mitra, 1990; Mosar & Suppe, 1992, 第 13 図 c) 参照) である。Sibson (1985) は、クーロンの法則に従う均質な物体に対する純粋剪断 (pure shear) で考えるアンダーソン型断層をとりあえず仮定し、既存の断層の応力場に対する異なる角度に対してその断層が再活動する応力条件と、断層の外の未破壊の部分が破断する応力条件を比較して断層が再活動をする条件を求めた。その結果、高角正断層は逆断層として再活動しにくく、衝上断層は低角正断層として再活動しにくいことを示した。これは listric な正断層の再活動を考えた場合、深部の低角の部分は逆断層として動きやすいが、浅所の高角の部分は動きにくいことを意味する。このような場合、逆断層として動く変位は浅所において盆地内堆積物の変形として解消されると考えられるが、効果としては fault-propagation fold と同じである。

第 4 は、盆地内堆積物が、基盤との間に発達する detachment fault によって基盤から引き剥され、正断層の下盤に向かって動く時、detachment fault の上盤の変位が正断層の下盤でブロックされた場合、変位を解消するために褶曲するものである (第 8 図、第 11 図 8)、butressing)。

第 5 は、out of graben thrust や backthrust による被覆層 (postrift sediment) の fault-propagation fold である。この種の褶曲は、衝



第 13 図 fault-related fold.

a) roll-over anticline, b) fault-bend fold, c) fault-propagation fold, d) detachment fold.
a) Xiao & Suppe, 1992; b)~d) Namson, 1987.

上断層帶前縁堆積盆地では構造反転がなくとも、被覆層に対して基盤から生じた断層が成長していくれば形成される(例えば、Petersen, 1983)。

以上のように、構造反転を特徴づけるものは盆地内堆積層および被覆層の褶曲であるが(第3図)、その成因は色々あり、第1の場合や第5のある場合のように直接構造反転に結びつかないものもあり得ることは注意を要する。また、構造反転を被っているような地域においては、短縮テクトニクス下で正断層が回転して逆傾斜になり、上盤側になったもとの下盤に背斜状の‘compression dome’(Pegrum & Ljones, 1984)が生じる場合もあり、上述の背斜構造との適切な峻別も必要である。

適切な峻別がなされれば、充分な地震探査断面がないような地域においても、地表地質図上の褶曲の形態、特に、地下の断層の傾斜の変化を反映した背斜構造中のkinkに注目して、バランス地質断面図の手法によって、地下の褶曲と断層の形態および位置を推定することができる可能性がある。ただし、半地溝盆地内堆積物の褶曲を考える場合、盆地の一般走向に直交して層厚が著しく変化すると考えられるので、層厚が変化しない堆積層の褶曲を扱っている褶曲・衝上断層帯のモデルをそのまま当てはめるわけにはいかない。また、上述のような褶曲、特にfault-propagation foldを考えた場合、逆断層の成長する側の翼において地層の傾斜が急になりやすい。そのような場合、listricな逆断層であれば、断層が成長するほど褶曲に与える変位は水平方向の短縮よりも背斜の成長、隆起の成分が大きくなると考えられるので、急傾斜の翼においてpost-buckle flattening(Price & Cosgrove, 1990)を起こしやすくなり、thinned front limb(Mosar & Suppe, 1992)になる。このような褶曲の翼においては、地層の引き延ばしが行われているので、その程度を適切に評価しなければ、正しいバランス地質断面とはならない(中村, 1991)。さらに、褶曲の成長と堆積が同時に進行することによる褶曲の幾何学的形態への影響(Mount et al., 1990; Suppe et al., 1992)

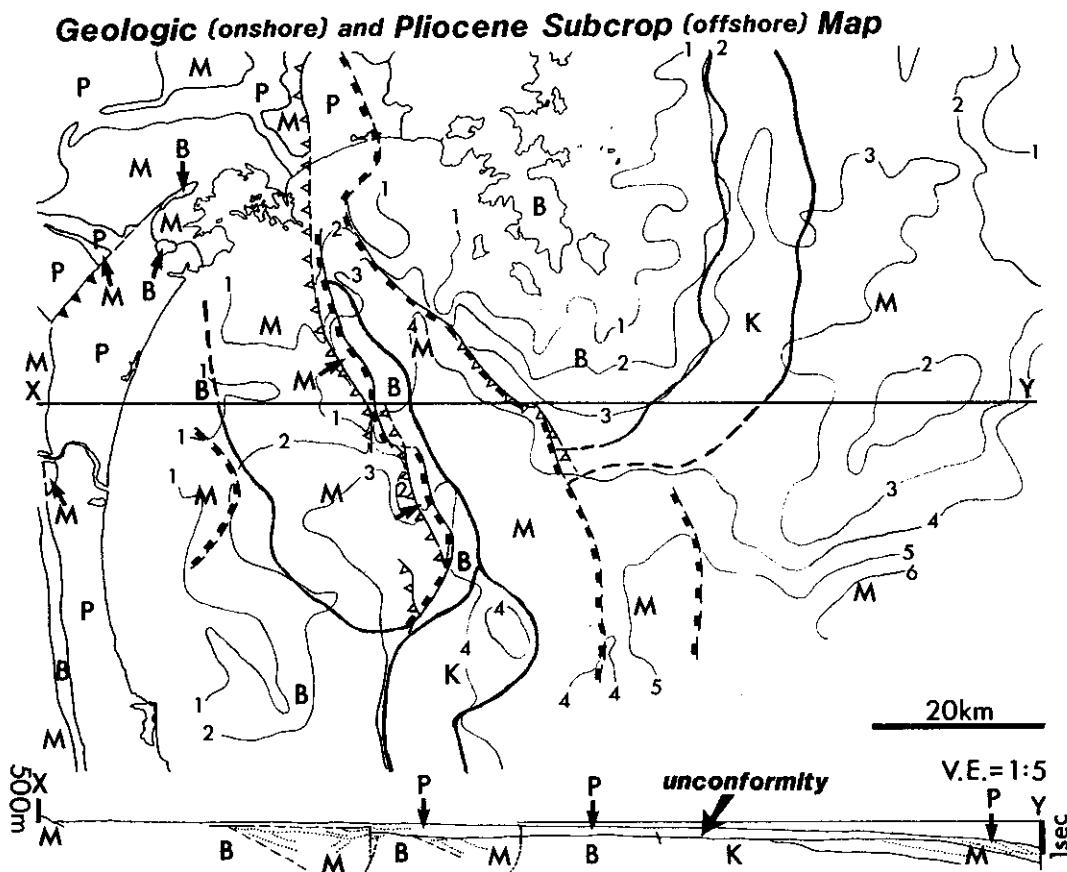
も考慮する必要がある。また、このような作業を進めていく場合、従来の地質図に多い、クレスト線(crest line)でのみ背斜の位置を示す方法は不十分で、地層面の曲率が最大になるヒンジ線(hinge line)をあわせて示すようにしなければならない。fault-related foldの場合、ヒンジ線はひとつの背斜に対して1本とは限らない。

応力場の変化を平面内で考えた場合、断面で考えた場合の応力場の変化以上に反転構造が多様になる。特に、伸張テクトニクス期における展張場に対して斜交もしくは直交する圧縮軸を持つ応力場に置かれた場合、伸張テクトニクスで生じた高角正断層やtransfer fault(Gibbs, 1984)がlistricな正断層の低角部分における断層の再活動変位方向との絡みにおいて、様々な反転構造やwrench fault特有の構造を示すと考えられる(Etheridge, 1986; Gibbs, 1986; Letouzey, 1990)。

大陸地殻を持つプレート内の地震発生(seismicity)は海洋性のプレートと異なって、大陸地殻内の既存の断層の影響が大きいと考えられてきた(McKenzie, 1972; Sykes, 1978; Smith & Bruhn, 1984)。Sibson(1985), Etheridge(1986), Letouzey(1990)らが強調するように、既存の断層の方向と傾斜が断層の再活動に大きな影響を与えるとすれば、反転構造の注意深い解析はプレート内の応力を知るうえで重要なデータとなるであろう。特に、どこも一様に反転が起こっているわけではなく、不均質な様相はリソスフェアのレオロジーとも絡んで未解決の問題が多いので、深部構造の注意深い推定と反転活動の時期の精度の高い推定が問題解決の鍵となるであろう。

仙台湾における反転構造

仙台湾には、中期中新世に形成された半地溝群が短期間に埋積された後、少し反転した部分反転盆地(partially inverted basin)が存在する(第14図、中村他, 1989, 1990/1992)。ここにその概要を述べるが、解析の基礎となったデータ、



第14図 仙台湾の反転構造(中村他, 1990/1992).

海域は後期中新世末期の不整合面直下の地質単位を示す。B: 中生代の地層(陸域)および音響基盤(海域), K: 上部白亜系から古第三系, M: 中新統, P: 鮮新統および第四系. 等層厚線は鮮新統および第四系の往復走時, 0.1秒単位.

地質時代に関する検討、地質構造に関する議論の詳細については、中村・石原・駒澤(1990/1992)を見ていただきたい。

仙台湾内には北北西-南南東方向に走る3列の正断層によって3つの半地溝ができる。第14図の断面図には、その内、中央と東側の2つの半地溝が示されている。中央の半地溝内堆積物は、その分布から松島湾層群から一部志田層群に相当する地層であると考えられる。仙台湾内の新生代の地層には顕著な広域的不整合がある、半地溝群を埋積する地層はこの不整合より下位にある。第14図の平面図はこの不整合

面上の地質図(subcrop map)と陸域の地質図を合成したものである。この不整合面の上のる地層は坑井データなどから、仙台層群より上位の地層に対比され、不整合面の形成時期は中新世最末期と推定される。第14図にはこの不整合面より上位の地層の等層厚線を合わせて示しているが、仙台湾の大陸棚縁に発達する更新世のデルタ堆積物により、沖合いで層厚が厚くなる傾向とともに、半地溝の分布域の層厚が薄くなり、その周囲が厚くなる傾向も認められる。仙台湾内においては、半地溝を形成した正断層のちょうど同じ位置、もしくは近傍でこの不整合

面より上位の地層を、東落ちの変位で変形させているところがあり、陸域との対比などから先の正断層の逆断層としての再活動と考えられる。不整合面より上位の地層の等層厚線の示しているものは、盆地反転と判断できる。

海域の地質データから松島地域の松島湾層群に見られる正断層をともなう複背斜構造は半地溝形成期の roll-over anticline, 旭山撓曲帯は半地溝形成期の正断層の逆断層としての再活動の表現、長町—利府線に伴う北西方向の衝上断層運動は back thrust と解釈することができる。仙台湾内の半地溝群の反転では、伸張テクトニクス期の伸張方向は現在の方向で東北東—西南西方向であるのに対して、逆断層は、特に南部において正断層に斜交し、短縮方向はほぼ東西と考えられる。こうしたことから、長町—利府線は純粹な back thrust というよりも、伸張テクトニクス期の transfer fault の上に、伸張テクトニクス期の伸張方向に斜交する短縮によって衝上断層ができたと推定することができる。

日本の他の地域における反転構造存在の可能性

日本の他の地域(主に陸域)において反転構造が存在する可能性について多少 speculative ではあるが、今後の議論のため、構造解析をする手法を交えて議論する(中村, 1988, 1989b)。日本海における反転構造については、本号の岡村・佐藤・渡辺・山本の論文を参照していただきたい。

日本の新生代の地質において、伸張テクトニクス期にできた正断層が短縮テクトニクス期に逆断層として再活動したのではないかと推定したのは、筆者の知る限り、Takeuchi (1978) が最初である。(基盤の運動を議論する多くの論者が昇降運動もしくは上下運動という言い方をするが、内容を見ると、構造的には正断層群もしくは逆断層群の形成である。明確に変位の向きの違う再活動を指摘している場合に限定する。) 彼は信越地域の地質構造の説明に際して、北村(1963)の示した断層モデルにヒントを得て、cylindrical な断層の再活動による傾動運動

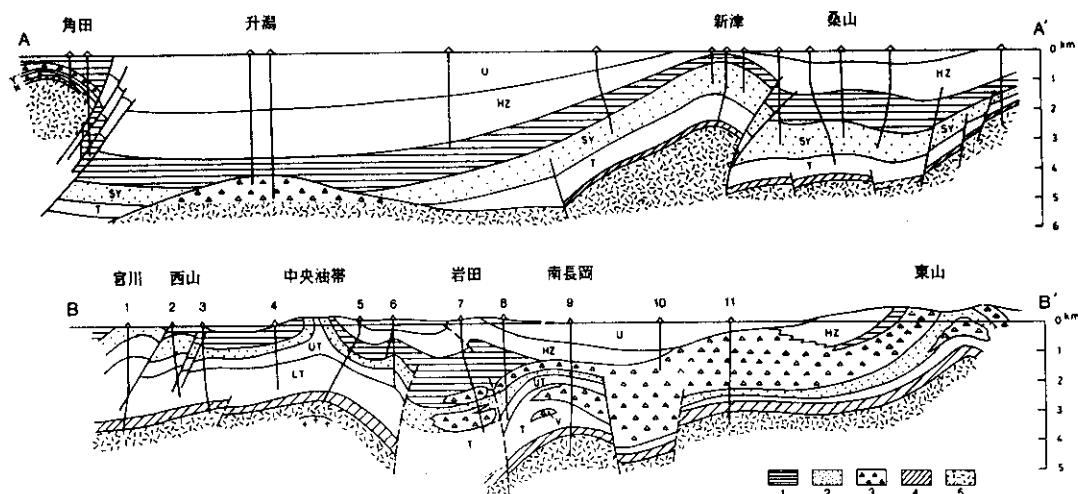
の反転という模式図を示した。また、中村和善 (1982a, b) は高田平野南部の富倉背斜において、国安(1981, 1982)は三浦半島の剣崎背斜において基盤中の断層運動の逆転による背斜の形成のモデルを示した。信越地域においては、1960年代から70年代にかけて褶曲の形成が水平方向の短縮によるものか、基盤内にはいった断層の垂直方向の運動によるものかという議論があった(新津背斜団体研究グループ, 1977 参照)。小松・渡辺(1968)は西山油田の小断層解析により、側方圧縮による褶曲の形成と上方への押し上げを論じ、Kimura (1968) や鈴木尉元他 (1971) は基盤の断層による変位にともなう被覆層の変形として第三系の褶曲を議論した。また、植村・高橋(1974)は基盤の傾動隆起とその傾動地塊を境する断層から被覆層にのびる断層と被覆層の変形を議論した。新津背斜団体研究グループ(1977)は、油田褶曲の形成要因として、側方圧縮による座屈褶曲か、垂直昇降運動による曲げ褶曲かという議論をし、小断層解析結果に基づいて後者であると結論づけた。

褶曲の成因としてこうした二分論をとる考えは、この時期の日本の構造地質学者を支配した考え方であった。しかし、同じ時期に既に、池辺他(1968)の第8図などによって明らかに側方短縮と大きな垂直成分を持つ逆断層を示す断面が描かれていたことに注意が払われなかった。これらの断面は坑井データの他に陸上の地震探鉱結果も参考にして描かれたと考えられる。これらの断面図を見れば、二分論が褶曲形成機構を考える上でもしろ障害になるのは明かであったはずである(小松・渡辺, 1968 参照)。坑井データや地震探査断面が公表されていなかつたし、たとえ公表されていたとしても、当時の地震探査断面は構造地質学の研究に役に立ったかどうかは疑問があるが、少なくとも断面が描かれた根拠が充分に示されなかつたことによって無視を誘発したことは確かであろう。当時の構造地質学は小断層解析が盛んで、テクトニックな応力場を求めるに主要な目標があり、褶曲の幾何学的形態から地下の構造の幾何学を推定することに力点はなかつた。しかし、二分論に立

つにしても、その解答は本来地下の幾何学的論理的かつ現実的な推定から得られるはずであったと思われる。確かに重力等のデータに基づいて基盤ブロックを画する断層が描かれてきたが、その多くは直線による格子状で、断層の幾何学についての検討はされたことがないし、表層の褶曲形態と地下の断層変位についての関係が詳細に検討されたこともない。一方、石油地質学においても、少し深部の構造は軽視されており、力学的に説明のできない断面図(例えば、片平(1970)の第7図)や深部のバランスしない断面図(例えば、片平(1974)の第13、14図)が描かれており、この傾向はその後も続いている(例えば、天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会、1982)。これは同時期の北米における深部の構造に対する関心とその推定手法の開発努力(例えば、Berg, 1962; Bally et al., 1966)と比較しても大きく立ち後れていたというべきであろう。

側方応力によって説明することができない油田地域の褶曲形態の特徴(鈴木尉元他, 1971; 新津背斜団体研究グループ, 1977)の内、向斜の従属性の性格、箱型褶曲、背斜軸に直交し、層理面に平行な引張軸をもつ小断層解析結果は側方短縮による深部逆断層の形成と被覆層への

propagationで説明することが可能である(中村, 1991)。Tateishi (1988)は、新潟堆積盆は中新世に背弧の伸張テクトニクスによって生じたリフト帯であると論じた。信越地域の背斜構造には中新世の地層の厚いところが背斜軸部になっているところがあり、リフト帯の断層の幾何学と合わせ考えると、反転構造が存在する可能性が高い。しかし、すべての構造が反転で説明できるとは思えない。小松(1990)の示した断面図(第15図)からは中央油帯において被覆層の中でのdetachmentが要請されるが、中央油帯の浅部の短縮変形が深部のどの短縮変形と補償されるか、にわかに判断できない。(鈴木宇耕(1989)の第17図は直江津沖の地震探査断面において2層のデコルマ面を描いているが、解釈の線が太く入れられているので解釈の根拠を子細に検討するのは難しい。また、少なくともこのlistricな逆断層の形態を重力滑動で説明することは無理がある。) 表層の短縮変形の深部における補償関係のひとつ可能性は、正断層の逆断層としての再活動によって短縮変形でまかなわれるというものであり、かつ正断層による変位自身も逆転によって解消しているために、地震探査断面で深部が無構造に見えるというも



第15図 新潟油田褶曲断面図(小松, 1990)

1: 西山層, 2: 椎谷層, 3: 火山岩類, 4: 七谷層, 5: 緑色凝灰岩, U: 魚沼層,
HZ: 灰爪層, UT: 寺泊層上部, LT: 寺泊層下部, T: 寺泊層(未区分)

のである(極端な例として、全反転、第4図c)。また、中央油帯とその延長の角田背斜は異なった構造として描かれているが、異なっていればその間の接続の幾何学と短縮の程度の差が問題になる。また、新津背斜は基盤を含むcompression dome (Pegrum & Ljons, 1984)なのか、緑色凝灰岩層のなかにdetachmentもしくは反転構造があるのかも問題である。日本の石油地質学の分野においては、基本的にはBerg (1962)をモデルにして第15図の新津背斜や角田背斜のような断面図が描かれてきたが、北米においてもforelandの変形様式は色々あることが知られるようになっており(Brown, 1983; 1984; Petersen, 1983など)、その幾何学の現実性については改めて検討が必要であろう。さらに、背斜軸部を通る逆断層もしくは背斜に密接に絡んだ逆断層を側方短縮で説明する場合、概ねWillis (1923)やde Sitter (1956)に依拠して過褶曲の逆転翼における断層の生成をモデルで解釈されてきており、fault-bend faultやfault propagation faultに基づく解釈の可能性が議論されたことはないことも大いに検討の余地がある。反転構造を取り込んだ信越地域の地質構造の解析は、今までの議論のかみ合わなかつた点を収束させる可能性があると考えられる。

秋田油田地域においては、北由利衝上断層系(大沢他, 1984; 粟田他, 1986; 大沢他, 1989)の形成機構をどの様に考えるかが最大の問題である。北由利衝上断層系の断面図が描かれた手法については述べられたことがないので議論することは難しいのであるが、発表された断面の特徴として、断層上盤に背斜があり、断層を境に向斜がなればキンクしたように描かれているから、これも基本的には過褶曲の逆転翼における断層生成が暗黙のうちに仮定されているのではないかと考えられる。しかし、発表された個々の油田の断面図(例えば、菊地・小草, 1982)を見ると、むしろ断層下盤の地層はあまり褶曲していないものが多い。また、仁賀保衝上断層群のように、大きなスケールで見ればひとつの背斜構造のなかに多数の衝上断層が入っているものがあるが、これは過褶曲では起こりにくい現

象である。衝上断層群という形で断層が複数生じるものはむしろthrust tipにおけるimbricate fanと考えたほうが妥当と考えられる。そのように考えれば、デコルマにせよ、基盤断層にせよ、断層の方が先に存在しているわけで、過褶曲とは異なるモデルとなる。断層の上面に背斜があることから、fault-bend foldかfault-propagation foldが候補として上がるが、fault-bend foldはrampからflatへの移り変わりに際して形成されるのに対して北由利衝上断層系ではflatは存在しないから、fault-propagation foldである可能性が高い。fault-propagation foldにおいては前進する断層の先端が前進を停止して、より高角の断層が分岐して前進する例が知られている(Mitra, 1990)。北由利衝上断層系は最近になってから存在が明らかになったことから分かるように、地表調査ではほとんど幾何学を解明することができないものである。褶曲の幾何学を明かにするためには、地震探査断面上に坑井データの岩相層序対比だけではなく、可能な限り時間の鍵となる凝灰岩層や微化石のdatumを落として検討しなければならない。なぜならば、fault propagation foldの場合、断層の地表面への出現に先だって堆積体の幾何学に影響を与えるsynsedimentary tectonicsになるから、構造をはさんで同時異相になる可能性が高いからである。その作業を経て、堆積の影響を加味したバランス断面図(Mount et al., 1990; Suppe et al., 1992)に基づいて復元断面図が描かれてはじめて、断層が新たに生じたものか、既存の断層の再活動によるものか、確度の高い判断ができるであろう。さらに、北由利衝上断層系のように堆積物が充分圧密を受けていない状態の中に断層が成長する場合、坑井データに対するgeohistory analysisにおけるback-strip法(Watts & Ryan, 1976)に類した手法で堆積物の圧密と荷重による沈降の補正をして断層の幾何学を決める必要があるであろう。現時点においては北由利衝上断層系の起源について判断できないが、反転構造と考えた場合、どのような幾何学がありうるか考察する。

北由利衝上断層系を跨ぐ地域は中期中新世のリフト帯であると考えられているが(土谷, 1986, 1990; 鈴木宇耕, 1989), 北由利衝上断層系の西側の synrift sediments および青沢層相当層が東側よりも薄く, 北由利衝上断層系より東側において, 大沢他(1989)の第1図のように青沢層および synrift sediment である山内層等の地層が北由利衝上断層系近傍で最も厚く, 東に向かって薄くなるのであれば, 北由利衝上断層系の位置にリフト形成期に東に傾斜した低角正断層が存在しており, 北由利衝上断層系は基本的にその低角正断層の逆断層としての再活動である可能性がある。その場合, 秋田沖の部分反転した半地溝堆積盆地群の断層群はほとんど西に傾斜しているので(岡村他, 本号), リフト形成時には北由利衝上断層系の西側の秋田沿岸域に, 即ちリフト帯の中心に, ホルストがあつたことになるが, リフトの幾何学としてありえないことではない(Rosendahl, 1987; Morley, 1988; Morley et al., 1990, また, 中村, 1990参照)。この問題は北由利衝上断層系の西側において, deep reflection 地震探査が実施され, 深い坑井が実現されて, synrift sediment の厚さが決められなければ解決しない。

北由利衝上断層系において, リフト期に西傾斜の正断層が存在していた場合, 反転構造となる可能性はひとつある。それは断層の回転によって断層の上盤と下盤が入れ替わった上で再活動する場合である。その場合, 衝上断層の上盤側には compression dome ができる可能性がある。秋田から新潟の油田褶曲にともなう断層の生成をどう考えるかは, 日本海中部地震の評価と合わせて, A-subduction の開始がどのように始まるかという褶曲・衝上断層帶の進化を考える上で重要な問題を含んでいる。

伸張テクトニクス期の伸張方向と斜交する短縮によって部分反転しているのではないかと推定される半地溝としては, 秩父盆地があげられる。Yamaji & Takahashi (1988) および高橋(1992)は, 地質構造およびビトリナイト反射率のデータから, ほぼ四角形の平面的分布を示す秩父盆地は東北東ー西南西走向の南縁を限る断

層と北北西ー南南東走向の東縁を限る断層が正断層として機能してきた半地溝であり, その後の短縮テクトニクスによる変形によって南西隅がもっとも盆地深部が露出している形態をしていると述べている。高橋(1992)は盆地南縁の正断層の逆向きの再活動, および盆地の東縁を限る断層については正断層が右横すべり成分をともなう逆断層としての再活動を推定している。しかし, 推定された引張応力の方向は北西ー南東であるので, この応力場からほぼ東北東ー西南西走向と北北西ー南南東走向の正断層を作ることは難しい。盆地内堆積物の分布から考えて南東隅が最大沈降であることは間違いないであろうが, 南縁と東縁の断層そのものが半地溝の正断層であったかどうか即断しがたい。

東北日本第三紀造山運動論の幻影の 成立根拠と反転テクトニクス

反転の古い用法との絡みにおいて, 東北日本の第三系を対象として地向斜造山運動論が戦後数十年にわたって議論されてきた客観的根拠を最後に議論しておきたい。東北日本の第三系に地向斜造山運動論が適用され, 多くの人々のパラダイムとなって研究や議論を支配し, プレートテクトニクスの登場によって, 地向斜造山論自身が崩れ去るまでだれも anomaly (Lightman & Gingerich, 1991)に気がつかなかったのは, いつに地向斜造山論を mountain building process であると fixist の立場で理解する, 換言すれば, 地向斜が地背斜的隆起をする(古い用法としての反転)というのが地向斜造山論であると理解することが背景にあったからである。それ故, 東北日本の第三系の地質の枠組みとして反転テクトニクスを提案しても(中村, 1988, 1989b), それは既にずっと議論してきたことであるという反論が予想されるから, 違いを明確にするために議論する。

磯崎・丸山(1991)は1941年から1956年を日本における「地向斜造山論輸入の時代」, 1956年から1975年を「地向斜造山論普遍化の時代」としているが, 筆者は輸入とあてはめだけが横行

したとは考えない。むしろ、欧米での議論を、欧米における地域地質の知識をもとに完全に咀嚼して議論した人はひとりもいなかつたし、地質構造発達史を叙述する用語法としてそれぞれの論者が自分の理解をもとにあてはまりそうな用語を借用してきた歴史があっただけであると考える。地向斜造山論の枠組みの基礎となった地域地質の理解があれば、むしろあてはまらないことが明確に理解できたであろう。(Miyashiro (1991) は global-scale regional geology というが、これは一種の形容矛盾で、regional geology はあくまでも個別的であり、個々の地域における確かな記載的実態をともなった知識が重要である。彼が例に挙げた人々は必ずしも世界をカバーしていないが、いくつかの地域の地質について確かな知識を持った人々であったと言うべきであろう。) geological science は physical science のなかにあって唯一、人間の一生を越えた長さの自然の歴史を扱う科学であるから、その論述のためには、現在目の前に存在していない過去の自然を記述する用語(例えば、地向斜)と自然の変化の時間ステップを記述する用語(例えば、地質時代区分、造山運動のフェーズ、時階)が必要である。プレートテクトニクス成立以前にこれを求めるすれば、どこかの地域の地域地質から抽象された用語を用いるしかなかった。地向斜 *geosyncline* は米国で生まれた用語であるが、欧洲において早くも変形された使い方がされている(Dott, 1979)。一方、米国においては *geosynclinal sediments* (後の欧洲の用法では *miogeosynclinal sediment*) はほぼ *passive continental margin sediments* と等価であるから、*geosyncline* という言葉を嫌ってさすがに最近減ってきてているといふものの、プレートテクトニクス受容後も多くのプレートテクトニクスの立場にたつ地質家が使用しているし、堆積機構の解析もされている(例えば、Bond et al., 1983; Bond & Kominz, 1988)。従って、地向斜の米国での用法から欧洲での用法、また他の地域の文献に現れる用法を見ると、絶えず便宜的な臭いがつきまとう。堆積盆(地)と言ってしまえば良いようなものを地向斜という

のは、堆積体の形状にクラトン上の堆積盆地や最近の堆積盆地のような実感をともなった概念とは少しあげはなれたところがあるからである。換言すれば、actualism の立場に立って、山地の上にある堆積物の堆積場を記述しても、明確に現在の地球の上のどういう部分に相当するという特定ができなかつたために、「地向斜」という用語が必要になった。だから地向斜造山運動論のパラダイムとしての呪縛性を問うとすれば、Sengör が言うように、どう説明しようとしたか、mobilist の立場か、fixist の立場か、また、orogeny を deformation process を研究することを考えるか mountain building process を研究することを考えるか(Sengör, 1990), actualist の立場に立って世界同時の変動といった立場は拒否するか否か(木村, 1969; Sengör, 1991)あたりが最も重要ということになる。

そういった点から日本の地質構造発達史に関する議論を見ると、東京大学の小林貞一に対抗して、人々が自分の造山運動論を作り、提案していた時期、1950年代から1960年代前半が最も呪縛性が強かったように考えられる。日本の戦後の地質構造発達史に関する議論は地向斜造山運動論というよりも小林の造山運動論のパラダイムとの緊張関係で捉えた方が理解しやすいし、プレートテクトニクスの受容をめぐる反応もその緊張関係で築き上げたパラダイムとプレートテクトニクスのパラダイムとの関係で考えた方が人々が何故プレートテクトニクスの受容に時間を必要としたか理解しやすい。小林との緊張関係が少なかった人、もしくは分野ほど受け入れが早かったというべきであろう。岩石学者の受け入れが早かったのは世界的傾向であり、そもそも地向斜造山論の様々なパラダイムと緊張関係が少なかった分野というべきである。

小林の著作の中では第三紀の造山運動という概念は微妙で、大八洲地殻変動群(Oyashima series of crustal movement)という言葉で佐川造山などとは区別されているが、大八洲造山運動(Oyashima orogenesis)という言い方をしているところもある(Kobayashi, 1941, p.248;

小林, 1951, p.16). しかし、彼の著作の分量の中で第三紀の変動についての議論は極めて少ない。大塚彌之助は造山運動を orogenic movement, tektonogenesis の訳語としての用法と mountain building, orogenesis の訳語としての用法に区別し、前者は造構造運動と同義語として(渡辺(編), 1930, 造山運動の項), 奥羽地方の新生代地向斜地域と称しても、瑞穂ーフォッサ・マグナ褶曲帯の運動は造構造運動であるとして、狭義の造山運動とはしていない(大塚, 1942)。第三紀の地向斜造山運動論が登場するのは戦後である。戦後の第三紀の地向斜造山運動論の全般的検討は本節の目的ではないので、北村 信と杉村 新およびプレートテクトニクスを日本に定着させる上で積極的な役割を果たした人々の地向斜造山論の理解を議論する。

北村の場合、地向斜造山運動をまとめた形で述べたのは、北村(1959)のみで、北村(1963)以降は時階論による造構造運動史を述べているのだが、その基本的内容は北村(1959)で形成されたものが引き継がれている。北村(1959)は「たしかに、東北地方の新第三系は地向斜型の堆積物によって構成されており、北上山塊・阿武隈山塊以西の地域は同一海域下で形成されたものではあるが、この海域内で地向斜的沈降を示す地帯が、時間の推移とともに、東より西へ移行してゆき、これより相(phase)をずらして追いかける様に、地背斜的性格の隆起・上昇の地帯が、おなじく南北に細長い地帯をなして東から西へ移動したものである事が明らかになった。」(p.80~81, 原文は北上山塊のあとは太字)と述べている。これは fixist にして mountain building process を議論する地向斜造山運動論の立場からの見方であって、結果として、基盤の構造方向に関する議論はあるものの、沈降盆地を形成した構造に対する関心が薄れ、沈降と隆起の古地理的分布を追うことに議論が収斂することとなる。

後年、山路・佐藤(1989)や Yamaji (1990)が示した冷却沈降のモデルは、McKenzie (1978)のモデルを前提として提起されたので、当時議論されなかったことは間うことができない。し

かし、その前提としてのリフト形成による沈降の基礎となった夾炭層の正断層によって画された盆地構造(山路, 1989; Yamaji, 1990)は、既に炭田地域の調査によって明らかにされていたわけであるから(例えば、斎藤・大沢, 1956), 視点が違つていれば、当時既に議論の対象になつたかもしれない。確かに、北村(1963)や、さらには、Minato et al. (1956)や藤田(1960)も盛岡一白河構造線沿いの大きな正断層や陥没による地向斜の発生を議論はしているが、大縮尺の地質図における構造の議論と沈降の開始の関係についての議論はない。今日の議論に接続する中新世と第四紀の応力場の違いと引張応力場による地溝性陥没の形成について議論をしたのは、中村一明(1969)が最初である。具体的な石油の探鉱を目的とする地質調査であれば、石油に係わりそうもない地質構造の研究がされないのはやむを得ないことかもしれないが、構造発達史を研究する以上、地向斜形成の要因は何か、また、変形の様式はどのように、他の造山帯と比較してどうか、という問題は大きな問題であるはずである。にも係わらず、地向斜造山論に立つことによって、地向斜形成以後のことしか対象にならないというのはパラダイムによる呪縛といふべきであろう。

今日のプレートテクトニクスの立場から見れば、米国生まれの古典的地向斜概念の基礎となったア巴拉チア、コルディレラの地向斜は海洋底拡大に際して生じた受動的大陸縁辺の堆積体である(例えば、Bond & Komlinz, 1988 参照)。その初期形態はリフトであるから、中新世の東北日本に何らかの類似性があったのは当然であるが、堆積相が全く異なっているわけだから、地質の実態に基づいた議論をしていれば、安易な対比は生じなかつたはずである。

Sugimura et al. (1963)は瑞穂造山という言葉を提案した。杉村自身、「東日本島弧系(千島・東北日本・伊豆-マリアナ)において、中新世以降現在まで続く地殻変動・火山活動・深成変成作用の総称。大八州造山と異なる点は、日本海溝周辺の活動を含めた点、東日本島弧系に地域とその方向とを限った点および中新世以降に

年代を限った点であり、グリーンタフ変動と異なる点は、日本海溝周辺の活動を含める点と造山運動とみなす点である。名称の由来は、羽越フォッサマグナ地帯の瑞穂褶曲の名を拡張したもの。」(地学団体研究会地学事典編集委員会, 1970, p.1063)と述べている。これは、杉村の師である大塚の用語を継承しながら、大塚とは立場の違う造山運動の理解である。杉村をこのように導いたのは、後の著作(Sugimura & Uyeda, 1973)の用語法とあわせて考えれば、戦後展開されたオランダ学派の地向斜と海溝におけるdown-bucklingを結び付ける議論に従ったからであると考えられる(Miyashiro, 1991; 都城, 1992参照)。この時点において、杉村はfixistにして mountain building processを議論することが造山論であるという立場になってしまい、造山論の一環として、東北日本の新生代の火山性物質噴出量を議論することになる(Sugimura et al., 1963)。Sengör (1990)が述べているように、火山による山脈の形成をもって造山運動とする人はいないわけだが、それに近い立場に陥ったというべきである。杉村の造山論は Sugimura & Uyeda (1973)の第2章において展開されている。この章は、一般的には同書の日本語版と思われている、上田・杉村(1970)には無い叙述である(杉村, 1992参照)。そこにおいては、Uetu-Fossa Magna idiogeosyncline, Kitakami-Abukuma geanticline, Off-Sanriku-Zyoban geosynclineといったオランダ学派由来の言葉で造山論が語られている。同書は様々な事情で出版が遅れたらしいが(杉村, 1992), 出版当時は、既に、付加体の存在も知られ、forearc basinやbackarc basinの用語、堆積様式が議論されていた頃であったから(例えば, Seely et al., 1974; Karig, 1974; Dickinson, 1974a, b), その後の島弧発達史の議論に全く寄与しない結果となっている。確かに、Deweyも地向斜の用語法で造山帶の多様性を語ろうとした時期があり、idiogeosyncline, island arc-orthotectonic orogenなどという言葉を使っていたこともある(Dewey & Bird, 1970b)。しかし、Hamilton (1969)がフランシスカン带やGreat

Valley Sequenceの現在の島弧系に対する対比をおこなってから、actualismの立場にたてば、現在の島弧系の実態を観察した上で、プレートテクトニクスとの関連において、actualisticな用語で記載していくというのが筋であったはずであり(例えは、Dickinson, 1971, 1973; Karig, 1970, 1971, 1973), 日本周辺においても, Ludwig et al. (1966), 堀田(1967), 岩淵(1968), 村内・浅沼(1970)などの先駆的な仕事があったわけであるから、こうした方向に進まなかつたことも地向斜造山論の呪縛というべきではないだろうか。

杉村たちの場合、島弧は典型的な造山帶であるというもうひとつの呪縛が認められる。杉村の共同研究者である松田時彦は、「従来の地向斜論が現実の地向斜造山帶の地史・構造から生まれたように、それに対する疑問もまた現実の地向斜造山帶から生まれた。前者の基本になったのはア巴拉チヤやアルプスであったが、後者のそれは環太平洋とくに日本の造山帶であった。今ではア巴拉チヤ・アルプスではなくて、環太平洋地帯にみられる造山帶こそ基本型であるという主張やうけとり方は、かなり一般的である。」(松田, 1975, p.214)と述べているが、この認識こそ、オランダ学派の名残であるとともに、造山運動に関して、日本と世界の議論が喰み合わない元凶である。確かに、松田が執筆に参加した(Matsuda & Kitamura, 1974), Spencer, ed. (1974)は中生代、新生代の造山帶として環太平洋の島弧系を網羅的に取り上げており、Matsuda et al. (1967)やMatsuda & Uyeda (1971)が受け入れられる素地も一般的に存在していた。また、Deweyも初期の論文において、造山帶としては、コルディレラ型、島弧、ヒマラヤ型(大陸と大陸の衝突型), ニューギニア型(大陸と島弧の衝突型)の4つがあると述べている(Dewey & Horsfield, 1970)。しかし、同時に古典的な地向斜(米国の Hall, Dana におけるgeosyncline, 欧州やKayにおけるmiogeosyncline)はプレートテクトニクスの立場からすると、受動的大陸縁辺の堆積体であるから、島弧には存在せず、島弧は造山帶の一要素

となって、mountain beltの分類としては先の4つから島弧が抜け落ちるという理解が基本である(Dewey & Bird, 1970a)。ところが、日本においては、造山帯の分類をする際に、事実上、コルディレラ型と島弧を同一視するという見方が一般的となっている(松田, 1971; 都城, 1979a; 磯崎・丸山, 1991)。

日本においては、次の2点が無視されて両者が事実上同一視されている。まず、Dewey & Bird (1970a)は、コルディレラ型造山帯は受動的大陸縁辺(Atlantic-type continental margin)のすぐそばで海洋プレートのサブダクションが始まっていると述べている点である。これは造山運動によって変形される堆積物がサブダクションに関係した堆積体であるだけではなく、サブダクションの前に堆積したもの(地向斜堆積物)を含むことを意味する。次に、この型の造山帯においては、衝上断層の向きや堆積物の供給が造山帯の中心から対称になると述べている点である。Bally (1975)やBally & Snelson (1980)のA-subduction, B-subductionと言う分類はこの文脈において理解することができる。ロッキー山脈の造山帯前縁盆地は内陸側にあって、Dewey & Bird (1970a)もロッキー山脈の衝上断層帯の断面図を掲げており、コルディレラ型の造山運動を語る力点は明らかにそちらにある(Suppe, 1985; Park, 1988参照)。これは島弧と同一視しては語れない点である。

コルディレラ造山帯を語るのに際して、内陸の衝上断層帯を無視するという傾向は都城(1965)に始まる。都城は後の著作(1979b)においても、コルディレラ造山帯において衝上断層帯を事実上無視した書き方をしている。彼の北米の地質のまとめは、衝上断層帯という造山帯の基本要素を事実上無視しており、Dewey & Bird (1970a)も引用しておらず、古い地向斜造山論の解説から一歩も抜けでていないものである。ある意味では、コルディレラにおける本来の地向斜堆積物の無視は、北米においてeugeosynclineをもとめたKay (1951)の遺産である。都城(1979a)もそうした点から眺めてみると、造山論と言いながら、大陸地殻の変形と

その様式についてほとんど何も書いておらず、欧米における大陸地殻の変形に対する関心(例えば、Molnar, 1988)と比較しても異常である。

また、都城(1965)は地向斜造山論の立場で書かれた本である。プレートテクトニクスの立場に立って考えた場合、鉱物の熱力学的関係で決定される変成相が地質体において変成分帶という形で変成相系列として認識できる根拠がもつとも怪しくなるのが低温高圧変成作用であるはずである。なぜならば、そこは堆積体のサブダクションの異なる場所での付加があり、定常的なサブダクションでは地表に上昇しえないと考えられるからである(磯崎・丸山, 1991参照)。にもかかわらず、都城が今日までそうした立場で問題提起をしたことがないのは、基本的にはオランダ学派に従ってdown-bucklingによってできた凹地に堆積物がたまると考えた枠組みを海溝系においてもさして変更なく適用可能とみなしてきた(actualismの不徹底)からかもしれない。

島弧における造構造運動の時間的変遷を研究するのに際しては、徹底したactualismの立場にたって、可能な限りアナロジーを世界中から探して比較することが必要であろう。島弧の前弧盆地、背弧盆地そして弧内盆地については類型的なモデルは書かれても、現在の地質構造を実態的に示した例は極めて少ない。それは、褶曲・衝上断層帯の研究と比較すると明瞭である。島弧における反転テクトニクスの意義もそうした作業を通じて明らかになるであろう。

おわりに

反転テクトニクスに関する論文集であるCooper & Williams, eds. (1989)は英国地質学会の出版物としては異例に早く品切れになっており、このテーマについての大陸系の地質家の関心の高さを窺わせている。1993年10月には再度英国地質学会が盆地反転に関する国際シンポジウムを開催することが予告されており、反転テクトニクスに関する新たなデータの集積と理論的展開が期待される。

筆者が inversion という言葉を初めて知ったのは Bally, ed. (1983) によってであるが、盛んに議論されていることを知ったのは Bally et al. (1986) を読んだり、村田明広氏(徳島大学)を通して 1987 年に Coward & Gibbs (1986) のコピーを入手してからである。本論で述べているように、この概念は欧米の石油地質学において育ってきた概念であるので、多くの基礎的なデータが各地の石油地質関係の会議に係わる論文集に収録されており、文献入手するのに多大の労力と時間を必要とした。仙台湾の構造が反転で説明できることに確信を持ったのは 1988 年に Glennie & Boegner (1981) を読んでからである。インドネシアにおいて発行された文献の入手に際しては、当時バンコクに赴任されておられた石原丈実氏(地質調査所海洋地質部)に、APEA Journal については木村勝弘氏(石油公団)にお世話をになった。

本論は木村克己氏(地質調査所地質部)の強いお勧めなくして仕上がりなかった。木村克己氏、伊藤谷生氏(千葉大学)および小玉喜三郎氏(地質調査所企画室)には原稿を読んでいただき、色々と不備な点を指摘していただいた。以上の方々に深く感謝する。

今から 20 年前の 1972 年秋、大学 1 年生として、カリフォルニア工科大学に赴任される直前の金森博雄氏と松田時彦氏のゼミに参加したことが今日の筆者の人生設計を決めている。絶余曲折あって、地質学に本格的に手を染めるようになったのは、1977 年秋からであるが、1972 年の熱のこもった授業は、杉村 新氏も同道された北伊豆の見学(11月 26 日、かつて北伊豆地震のあった日)とともに、今も感謝している。

文献

- Allaby, A. and Allaby, M., eds., 1990: "The concise Oxford dictionary of earth sciences." 410p., Oxford Univ. Press, Oxford.
- Aleinikov, A. L., Bellavin, O. V., Bulashevich, Yu. P., Tavrin, I. F., Maksimov, E. M., Rudkveich, M. Ya., Nalivkin, V. D., Shablinksaya, N. V. and Surkov, V. S., 1980: Dynamics of the Russian and West Siberian platforms. in Bally, A. W., Bender, P. L., McGeechan, T. R. and Walcott, R. I., eds., "Dynamics of plate interiors." Amer. Geophys. Union, Geodynamic Ser., 1, 53-71.
- Anderson, E. M., 1951: "The dynamics of faulting." 2nd ed., 206p., Oliver and Boyd, Edinburgh.
- 栗田泰夫・大沢 稔・片平忠実(1986)秋田県日本海沿岸地質断面図, 北村 信(編)“新生代東北本州弧地質資料集.”2, 付録, 2p., 宝文堂.
- Axen, G. J., Wernicke, B. P., Skelly, M. F. and Taylor, W. J., 1990: Mesozoic and Cenozoic tectonics of the Sevier thrust belt in the Virgin River Valley area, southern Nevada. in Wernicke, B. P., ed., "Basin and Range extensional tectonics near the latitude of Las Vegas, Nevada." Geol. Soc. Amer. Mem., 176, 123-153.
- Badley, M. E., 1985: "Practical Seismic Interpretation." 266p., International House Resources Development Co. (ISBN 90-277-2100-9, D. Reidel), Boston.
- Badley, M. E., Price, J. D. and Backshall, L. C., 1989: Inversion, reactivated faults and related structures: seismic examples from the southern North Sea. in Cooper, M. A. and Williams, G. D., eds., "Inversion tectonics." Geol. Soc. Lond. Spec. Pub., no. 44, 201-219, London.
- Bally, A. W., 1975: A geodynamic scenario for hydrocarbon occurrences. Proc. 9th World Petrol. Congr., Tokyo, 2, 33-44, Applied Sci. Pub., Essex.
- Bally, A. W., 1981: Atlantic-type margins. in Bally, A. W., Watts, A. B., Grow, J. A., Manspeizer, W., Bernoulli, D., Schrei-

- ber, C. and Hunt, J. M. "Geology of passive margins." Amer. Assoc. Petrol. Geol., Educ. Course Note Ser., no. 19, 1-1-1-48, Tulsa.
- Bally, A. W., 1982: Musings over sedimentary basin evolution. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A, **305**, 325-338.
- Bally, A. W., 1983: Tectonics of compressional provinces-introduction. in Bally, A. W., ed. "Seismic expression of structural styles-a picture and work atlas." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Studies in Geology, no. 15, **3**, 3.1.
- Bally, A. W., ed., 1983: "Seismic expression of structural styles-a picture and work atlas." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Studies in Geology, no. 15, 3 vols., Tulsa.
- Bally, A. W., 1984: Tectogenèse et seismique réflexion. Bull. Soc. géol. France, Ser. 7, **26**, 279-285.
- Bally, A. W., Bernoulli, D., Davis, G. A. and Montadert, L., 1981: Listric normal faults. in Blanchet, R. and Montadert, L., conveners. "Geology of continental margins." Oceanol. Acta, **4**, Suppl. 87-101.
- Bally, A. W., Chou, I.-M., Clayton, R., Eugster, H. P., Kidwell, S., Meckel, L. D., Ryder, R. T., Watts, A. B. and Wilson, A. A., 1986: "Notes on sedimentary basins in China-Report of the American sedimentary basins delegation to the People's Republic of China." U.S. Geol. Surv., Open-File Report 86-327, 108p.
- Bally, A. W., Gordy, P. L. and Stewart, G. A., 1966: Structure, seismic data and orogenic evolution of the Southern Canadian Rocky Mountains. Can. Petrol. Geol. Bull., **14**, 337-381.
- Bally, A. W. and Snelson, S., 1980: Realms of subsidence, in Miall, A. D., ed., "Facts and principles of world petroleum occurrence." Can. Soc. Petrol. Geol. Mem., **6**, 9-94.
- Bates, R. L. and Jackson, J. A., eds., 1987: "Glossary of Geology." 3rd ed., 788p., Amer. Geol. Inst., Alexandria.
- Beach, A., 1981: Thrust structures in the eastern Dauphinois Zone (French Alps), north of the Pelvoux Massif. Jour. Struct. Geol., **3**, 299-308.
- Beach, A., 1987: A regional model for linked tectonics in north-west Europe. in Brooks, J. and Glennie, K. W., eds., "Petroleum geology of North West Europe." 1, 43-48, Graham & Trotman, London.
- Beck, R. H., 1972: The oceans, the new frontier in exploration. Austral. Petrol. Expl. Assoc. Jour., **12**, Pt. 2, 7-28.
- Beck, R. H. and Lehner, P., 1974: Oceans, new frontier in exploration. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **58**, 376-395.
- Beck, R. H. and Lehner, P. with collaboration of Diebold, P., Bakker, G. and Doust, H., 1975: New geophysical data on key problems of global tectonics. Proc. 9th World Petrol. Congr., Tokyo, **2**, 3-17, Applied Sci. Pub., Essex.
- ペロウソフ, V. V. 著, 湊 正雄・井尻正二 監修, 1958 : "構造地質学." 3 vols., 築地書館, 東京, 1954年ロシア語版の邦訳.
- Belousov, V. V., 1962: "Basic problems in geotectonics." 809p., McGraw-Hill, New York, 1954年ロシア語版の英訳.
- ペロウソフ, V. V. 著, 藤田至則監訳, 1979 : "構造地質学原論." 368p., 共立出版, 東京, Belousov, V. V., 1975: "Osnovy geotektoniki." 262p., Nedra, Moscow (ロシア語)の邦訳.
- Belousov, V. V., 1980: "Geotectonics." 330p., Springer-Verlag, Berlin, Belousov, V. V., 1975: "Osnovy geotektoniki." 262p., Nedra, Moscow の1976年改訂版(ロシア語版)

- ア語)の英訳。
- Berg, R. R., 1962: Mountain flank thrusting in Rocky Mountain foreland, Wyoming and Colorado. Amer. Assoc. Petrol. Geol., **46**, 2019-2032.
- Blackstone, D. L., Jr., 1983: Laramide compressional tectonics, southeastern Wyoming. Contrib. Geol., Univ. Wyoming, **22**, 1-38.
- Blackstone, D. L., Jr., 1986: Foreland compressional tectonics: southern Bighorn basin and adjacent areas, Wyoming. Geol. Surv. Wyoming, Rep. Investigations, no. 34, 32p.
- Blair, D. G., 1975; Structural styles in North Sea oil and gas fields. in Woodland, A. W., ed., "Petroleum and the continental shelf of Nort-West Europe." 1, 327-338, Appl. Sci. Pub., Barking.
- Bond, G. C. and Kominz, M. A., 1988: Evolution of thought on passive continental margins from the origin of geosynclinal theory (~1860) to the present. Geol. Soc. Amer. Bull., **100**, 1909-1933.
- Bond, G. C., Kominz, M. A. and Devlin, W. J., 1983: Thermal subsidence and eustasy in the lower Paleozoic miogeocline of western North America. Nature, **316**, 742-745.
- Boyer, S. and Elliot, D. 1982: Thrust systems. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **66**, 1196-1230.
- Breen, N. A., Silver, E. A. and Roof, S., 1989: The Wetar back arc thrust belt, eastern Indonesia: the effect of accretion against an irregularly shaped arc. Tectonics, **8**, 85-98.
- Brennand, T. P., van Hoorn, B. and James, K. H., 1990: Historical review of North Sea exploration, in Glennie, K. W., ed., "Introduction to the petroleum geology of the North Sea." 3rd ed., 1-33, Blackwell, Oxford.
- Brown, W. G., 1983: Sequential development of the fold-thrust model of foreland deformation, in Lowell, J. D., ed., "Rocky Mountain foreland basins and uplifts." Rocky Mount. Assoc. Geol., 57-64, Denver.
- Brown, W. G., 1984: "Basement involved tectonics, foreland areas." Amer. Assoc. Petrol. Geol., Contin. Educ. Course Note Ser., no. 26, 92p.
- Buchanan, P. G. and McClay, K. R., 1991: Sand-box experiments of inverted listric and planar fault systems. Tectonophys., **188**, 97-115.
- Butler, R. W. H., 1985: The restoration of thrust systems and displacement continuity around the Mont Blanc massif, NW external Alpine thrust belt. Jour. Struct. Geol., **7**, 569-582.
- Butler, R. W. H., 1986: Thrust tectonics, deep structure and crustal subduction in the Alps and Himalayas. Jour. Geol. Soc., Lond., **143**, 857-873.
- Butler, R. W. H., 1989: The influence of pre-existing basin structure on thrust system evolution in the Western Alps. in Cooper, M. A. and Williams, G. D., eds., "Inversion tectonics." Geol. Soc. Lond. Spec. Pub., no. 44, 105-122, London.
- Chadwick, R. A. and Smith, N. J. P., 1988: Evidence of negative structural inversion beneath central England from new seismic reflection data. Jour. Geol. Soc. Lond., **145**, 519-522.
- 地学团体研究会地学事典編集委員会, 1970 : "地学事典" 1540p., 平凡社, 東京.
- Cluzel, D., Jolivet, L. and Cadet, J.-P., 1991: Early middle Paleozoic intraplate orogeny in the Oghon belt (South Korea): a new insight on the Paleozoic buildup

- of East Asia. *Tectonics*, **10**, 1130-1151.
- Constenius, K., 1982: Relationship between the Kishenehn basin, and the Flathead listric normal fault system and Lewis thrust salient. in Powers, R. B., ed., "Geologic studies of the Cordilleran Thrust Belt." 817-830, Rocky Mount. Assoc. Geol., Denver.
- Cooper, M. A., Williams, G. D., de Graciansky, P. C., Murphy, R. W., Needham, T., de Paor, D., Stoneley, R., Todd, S. P., Turner, J. P. and Ziegler, P. A., 1989: Inversion tectonics-a discussion. in Cooper, M. A. and Williams, G. D., eds., "Inversion tectonics." *Geol. Soc. Lond. Spec. Pub.*, no. 44, 335-347, London.
- Cooper, M. A. and Williams, G. D., 1989: "Inversion tectonics." *Geol. Soc. Spec. Pub.*, no. 44, 375p., London.
- Corbett, M. K., 1982: Superposed tectonism: Northern Idaho-Wyoming thrust belt. in Powers, R. B., ed., "Geologic studies of the Cordilleran Thrust Belt." 341-356, Rocky Mount. Assoc. Geol., Denver.
- Coward, M. P. and Gibbs, A. D., 1986: "Structural interpretation with emphasis on extensional tectonics." Joint Association for Petroleum Exploration Courses (JAPEC), Course Notes no. 49, 362p.. Geol. Soc., London, この本は一般的の入手は難しいが、今まで北海の地質に関する入門のコース (Glennie, ed., 1990参照)とともにJAPECのコースの中で最も頻繁に開催されているコースの教科書であり、かつ反転の地質構造様式についてのCoward等の考えを広めることに寄与し、論文に引用もされるので掲げた。
- Coward, M. P., Gillcrist, R. and Trudgill, B., 1991: Extensional structures and their tectonic inversion in the Western Alps. in Roberts, A. M., Yielding, G. and Freeman, B., eds., "The geometry of normal faults." *Geol. Soc. Spec. Pub.*, no. 56, 93-112, London.
- Dahlstrom, C. D. A., 1969: Balanced cross sections. *Can. Jour. Earth Sci.*, **6**, 743-757.
- Dahlstrom, C. D. A., 1970: Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, **18**, 332-406.
- Davies, V. M., 1982: Interaction of thrusts and basement faults in the French External Alps. *Tectonophys.*, **88**, 325-331.
- Davis, P. N., 1983: Gippsland basin, southeastern Australia. in Bally, A. W., ed. "Seismic expression of structural styles-a picture' and work atlas." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Studies in Geology, no. 15, **3**, 3.3-19.3.3-24.
- de Coster, G. L., 1974; The geology of the Central and South Sumatra Basin. Indonesian Petrol. Assoc., Proc. 3rd Ann. Conv., 77-110.
- de Graciansky, P.C., Dardeau, G., Lemoine, M. and Tricart, P., 1989: The inverted margin of the French Alps and foreland basin inversion. in Cooper, M. A. and Williams, G. D., eds., "Inversion tectonics." *Geol. Soc. Lond. Spec. Pub.*, no. 44, 87-104, London.
- Dennis, J. G., ed., 1967: "International tectonic dictionary, English terminology." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem., no. 7, 196p.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970a: Mountain belts and the new global tectonics. *Jour. Geophys. Res.*, **75**, 2625-2647.
- Dewey, J. F. and Bird, J. M., 1970b: Plate tectonics and geosynclines. *Tectonophys.*, **10**, 625-638.
- Dewey, J. F. and Horsfield, B. 1971: Plate tectonics, orogeny and continental growth.

- Nature, **225**, 521-525.
- de Sitter, L. U., 1956: "Structural geology." 552p., McGraw-Hill, New York.
- D' Heur, M., 1990; Eldfisk field-Norway, Central Graben, North Sea. in Beaumont, E. A. and Foster, N. H., eds., "Structural Traps IV, tectonic and nontectonic fold traps," 27-56, Treatise Petrol. Geol., Atlas of oil and gas fields, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa.
- Dickinson, W. R., 1971: Clastic sedimentary sequences deposited in shelf, slope and trough settings between magmatic arcs and associated trenches. Pacific Geol., **3**, 15-30.
- Dickinson, W. R., 1973: Reconstruction of past arc-trench systems from petrotectonic assemblages in the island arcs of the Western Pacific. in Coleman, P. J., ed. "The Western Pacific, island arcs, marginal seas, geochemistry." 569-601, Crane, Russak & Co., New York.
- Dickinson, 1974a: Sedimentation within and beside ancient and modern magmatic arcs. in Dott, R. H., Jr. and Shaver, R. H., eds. "Modern and geosynclinal sedimentation." Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Pub., no. 19, 230-239.
- Dickinson, 1974b: Plate tectonics and sedimentation. in Dickinson, W. R., ed. "Tectonics and sedimentation." Soc. Econ. Paleontol. Mineral., Spec. Pub., no. 22, 1-27.
- Dott, R. H., Jr., 1979: The geosyncline-First major geological concept "made in America." in Schneer, C. J., ed., "Two hundred years of geology in America." 239-264, Univ. Press New England, Hanover.
- Drury, S., 1987: "Basin analysis techniques, Part II, Basin tectonics," The Open Univ., Science: A Third Level Course, S338, Block 3, 57p., The Open Univ. Press, Milton Keynes, この本は実際には Smith et al. (1987)と合本になっている。
- Etheridge, M. A., 1986: On the reactivation of extensional fault systems. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A., **317**, 179-194.
- Etheridge, M. A., Branson, J. C. and Stuart-Smith, P. G., 1985: Extensional basin-forming structures in Bass Strait and their importance for hydrocarbon exploration. Austral. Petrol. Expl. Assoc. Jour., **25**, 341-361.
- Eubank, R. T. and Makki, A. C., 1981: Structural geology of the Central Sumatra Back-arc basin. Indonesian Petrol. Assoc. Proc. 10th Ann. Conv., 153-196.
- Fagin, S. W., 1991: "Seismic modeling of geologic structures, applications to exploration problems." Geophys. Development Ser., **2**, 269p., Soc. Explor. Geophys., Tulsa.
- Foster, N. H. and Beaumont, E. A., eds., 1988: "Structural concepts and techniques." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Treatise Petrol. Geol., Reprint Ser., no. 9-11, 3 vols., Tulsa.
- 藤田至則, 1960: 東北日本におけるグリンタフ地向斜の古地理的・造構史的変遷に関する法則性. 地球科学, no. 50-51, 22-35.
- Gibbs, A. D., 1983: Balanced cross-section construction from seismic sections in areas of extensional tectonics. Jour. Struct. Geol., **5**, 153-160.
- Gibbs, A. D., 1984: Structural evolution of extensional basin margins. Jour. Geol. Soc. Lond., **141**, 609-620.
- Gibbs, A. D., 1986: Strike-slip basins and inversion: a possible model for the Southern North Sea Gas Areas, in Brooks, J., Goff, J. C., van Hoorn, B., eds., "Habitat of Palaeozoic gas in N.W. Europe."

- Geol. Soc. Spec. Pub., no.23, 23-35, London.
- Gillerist, R., Coward, M. and Mugnier, J.-L., 1987: Structural inversion and its controls: examples from the Alpine foreland and the French Alps. *Geodinamica Acta*, **1**, 5-34.
- Glennie, K. W., 1986; Development of N.W. Europe's Southern Permian Gas Basin, in Brooks, J., Goff, J. C., van Hoorn, B., eds., "Habitat of Palaeozoic gas in N.W. Europe." Geol. Soc. Spec. Pub., no.23, 3-22, London.
- Glennie, K. W., 1990; Outline of North Sea history and structural framework, in Glennie, K. W., ed., "Introduction to the petroleum geology of the North Sea." 3rd ed., 34-77, Blackwell, Oxford.
- Glennie, K. W., ed., 1990: "Introduction to the petroleum geology of the North Sea." 3rd ed., 402p., Blackwell, Oxford.
- Glennie, K. W. and Boegner, P. L. E., 1981: Sole Pit inversion tectonics. in Illing, L. V. and Hobson, G. D., eds., "Petroleum Geology of the Continental Shelf of North-West Europe." 110-120, Heydon and Son, London.
- Gratier, J.-P. and Vialon, P., 1980: Deformation pattern in a heterogeneous material: folded and cleaved sedimentary cover immediately overlying a crystalline basement (Oisans, French Alps). *Tectonophys.*, **65**, 151-180.
- Gries, R. R. and Dyer, R. C., eds., 1985: "Seismic exploration of the Rocky Mountain Region." 300p., Rocky Mountain Assoc. Geol. and Denver Geophys. Soc., Denver.
- Hamblin, W. K., 1965: Origin of "reverse drag" on the downthrown side of normal faults. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **76**, 1145-1164.
- Hamilton, W., 1969: Mesozoic California and the underflow of Pacific mantle. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **80**, 2409-2430.
- Harding, T. P., 1974: Petroleum traps associated with wrench faults. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **58**, 1290-1304.
- Harding, T. P., 1983: Structural inversion at Rambutan oil field, south Sumatra basin, in Bally, A. W., ed., "Seismic expression of structural styles-a picture and work atlas." Amer. Assoc. Petrol. Geol. Studies in Geology, no. 15, **3**, 3.3-13- 3.3-18.
- Harding, T. P., 1985: Seismic characteristics and identification of negative flower structures, positive flower structures and positive structural inversion. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **69**, 582-600.
- Harding, T. P., 1990: Identification of wrench faults using subsurface structural data: criteria and pitfalls. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **74**, 1590-1609.
- Harding, T. P. and Lowell, J. D., 1979: Structural styles, their plate-tectonic habitats and hydrocarbon traps in petroleum provinces. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **63**, 1016-1058.
- Harsa, A. E., 1978: Some of the factors which influence oil occurrence in the South and Central Sumatra Basin. Proc. Regional Conf. Geol. Mineral. Res. SE Asia, 151-163, Geol. Surv. Indonesia.この会議は1975年に開かれているのでしばしばHarsa (1975)と引用される。
- 橋本克巳, 1961: “南スマトラ堆積盆地について、特にその集油褶曲の総括的研究。” 電力中央研究所, 電気事業委員会資料室, 資料海外, no.71. 173p.
- Helwig, J., 1976: Shortening of continental crust in orogenic belts and plate tectonics.

- Nature, **260**, 768-770.
- Hillier, A. P., 1990: Leman field. in Beaumont, E. A. and Foster, N. H., eds., "Structural Traps I, tectonic fold traps," 51-75, Treatise Petrol. Geol., Atlas of oil and gas fields, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa..
- 堀田 宏, 1967 : 日本海における堆積層の構造. 北海道大学地球物理学研究報告, **18**, 111-131..
- Hsü, K. J., 1982: Geosynclines in plate-tectonic settings: sediments in mountains. in Hsü, K. J., ed., "Mountain building processes," 3-12, Academic Press, London.
- Hsü, K. J., 1988: Relict back-arc basins: principles of recognition and possible new examples from China. in Kleinspehn, K. L. and Paola, C., eds., "New perspectives in basin analysis." 245-263, Springer-Verlag, New York.
- 池辺 穂・石和田靖章・河井興三・山田陽一・加藤正和, 1968 : 新潟平野の地下地質, 石油技術協会誌, **33**, 198-208.
- 磯崎行雄・丸山茂徳, 1991 : 日本におけるプレート造山論の歴史と日本列島の新しい地体構造区分, 地学雑誌, **100**, 697-761.
- 岩淵義郎, 1968 : 日本列島東方沖の海溝地形について. 地質学雑誌, **74**, 37-46.
- Jackson, J. A., 1980: Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts. Nature, **283**, 343-346.
- Jamison, W. R., 1987: Geometric analysis of fold development in overthrust terranes. Jour. Struct. Geol., **9**, 207-219.
- Karig, D. E., 1970: Ridges and basins of the Tonga-Kermadic island arc system. Jour. Geophys. Res., **75**, 239-254.
- Karig, D. E., 1971: Structural history of the Mariana island arc system. Geol. Soc. Amer. Bull., **82**, 323-344.
- Karig, D. E., 1973: Comparison of island arc-marginal basin complexes in the north-west and south-west Pacific. in Coleman, P. J., ed. "The Western Pacific, island arcs, marginal seas, geochemistry," 355-364, Crane, Russak & Co., New York.
- Karig, D. E., 1974: Evolution of arc systems in the western Pacific. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., **2**, 51-75, Ann. Rev. Inc., Palo Alto.
- 片平忠実, 1970 : 新潟県長岡平野とその周辺地域の地質発達史. 石油技術協会誌, **35**, 59-66.
- 片平忠実, 1974 : 新潟堆積盆地のグリーンタフ中に胚胎する炭化水素鉱床—新潟県中越・下越地方の石油地質学的研究(そのⅡ)ー. 石油技術協会誌, **39**, 337-356.
- Kay, M., 1951: "North American geosynclines." Geol. Soc. Amer., Mem. **48**, 143p.
- 菊地芳朗・小草欽治, 1982 : 秋田・山形地域, 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, "日本の石油・天然ガス資源, 《新版》技術報告書" 101-148.
- Kimura, T., 1968: Some folded structures and their distribution in Japan. Jap. Jour. Geol. Geophys., **34**, 1-26.
- 木村敏雄, 1969 : 造山運動と時間: そのフェーズとサイクル. 地学雑誌, **78**, 299-340.
- 木村敏雄, 1971 : 地向斜の概念. 日本鉱山地質学会特別号, no.4, "鉱床形成の場の基礎的諸問題." 第1編, 1-16.
- 北村 信, 1959 : 東北地方における第三紀造山運動について—(奥羽脊梁山脈を中心として)—. 東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告, no.49, 98p.
- 北村 信, 1963 : グリーンタフ地域における第三紀造構運動. 化石, no.5, 123-137.
- Kobayashi, T., 1941: The Sakawa orogenic cycle and its bearing on the origin of the Japanese Islands. Jour. Fac. Sci., Imp.

- Univ. Tokyo, Sec.II, **5**, 219-578.
- 小林貞一, 1951: “日本地方地質誌, 総論—日本の起源と佐川輪廻。”353p., 朝倉書店, 東京。
- 小松直幹, 1990: 新潟油田地域の褶曲—形態と形成過程. 地質学論集, no.34, 149-154.
- 小松直幹・渡辺亨, 1968: 小断層より解析した西山油田の地質構造(予報). 石油技術協会誌, **33**, 157-162.
- 国安稔, 1981: 三浦半島剣崎背斜の形成モデル. 構造地質研究会誌, no.26, 117-126.
- 国安稔, 1982: スケールモデル実験からみた反転型褶曲の形成過程. 月刊地球, **4**, 78-84.
- Lapidus, D. F., ed., 1990: “Collins dictionary of geology.” 565p., Collins, London.
- Lemoine, M., Bas, T., Arnaud-Vanneau, A., Arnaud, H., Dumont, T., Gidon, M., Bourbon, M., de Graciansky, P.-C., Rudkiewicz, J.-L., Megard-Galli, J. and Tricart, P., 1986: The continental margin of the Mesozoic Tethys in the Western Alps. Marine Petrol. Geol., **3**, 179-199.
- Lemoine, M. and de Graciansky, P.-C., coordinators, 1988: “Tethyan continental margin in the Alps.” Bull. Soc. Geol. Fr., Ser. 8, **4**, 597-797.
- Lemoine, M. and Trümpy, R. 1987: Pre-oceanic rifting in the Alps. Tectonophys., **133**, 305-320.
- Letouzey, J., 1990: Fault reactivation, inversion and fold-thrust belt. in Letouzey, J., ed., “Petroleum and tectonics in mobile belts.” 101-127, Editions Technip (ISBN 2-7108-0579-0), Paris.
- Letouzey, J., Werner, P. and Marty, A., 1990: Fault reactivation and structural inversion. Backarc and intraplate compressive deformations. Example of the eastern Sunda shelf (Indonesia). Tectonophys., **183**, 341-362.
- Lightman, A. and Ginderich, O., 1991: When do anomalies begin? Science, **255**, 690-695.
- Lowell, J. D., 1974: Plate tectonics and foreland basement deformation. Geol., **2**, 275-278.
- Lowell, J. D., 1983: Foreland deformation. in Lowell, J. D., ed., “Rocky Mountain foreland basins and uplifts.” Rocky Mount. Assoc. Geol., 1-8, Denver.
- Lowell, J. D., ed., 1983: “Rocky Mountain foreland basins and uplifts.” Rocky Mount. Assoc. Geol., 392p. Denver.
- Lowell, J. D., 1985: “Structural styles in petroleum exploration.” OGCI Publications, 477p., Oil & Gas Consultants International Inc. (ISBN 0-930972-08-2), Tulsa, この本はHarding and Lowell (1979)を導入にしてLowellの論文、書き下しをくわえて石油地質現場技術者向けのShort Courseの教科書として編集されたものである。ヨーロッパで生まれた概念である反転の概念を北米に広める上でBally, ed. (1983), Harding (1985)とともに重要な役割を果たした。
- Ludwig, W. J., Ewing, J. I., Ewing, M., Murauchi, S., Den, N., Asano, S., Hotta, H., Hayakawa, M., Asanuma, T., Ichikawa, K. and Noguchi, I., 1966: Sediments and structure of the Japan trench, Jour. Geophys. Res., **71**, 2121-2137.
- Martinez, A., Vergés, J., Clavell, E. and Kennedy, J., 1989: Stratigraphic framework of the thrust geometry and structural inversion in the southeastern Pyrenees: La Garrotxa area. Geodinamica Acta, **3**, 185-194.
- 町田貞・井口正男・貝塚爽平・佐藤正・樋根勇・小野有五(編), 1981: “地形

- 学辞典” 767p. 二宮書店, 東京.
- 松田時彦, 1971: 造山帯に関する最近の考え方. 日本鉱山地質学会特別号, no.4, “鉱床形成の場の基礎的諸問題.” 第1編, 17-31.
- 松田時彦, 1975: 地向斜概念とプレートテクトニクス. 地図研専報, **19**, 213-217.
- Matsuda, T. and Kitamura, N., 1974: Northeast Japan. in Spencer, A. M., ed. “Mesozoic-Cenozoic orogenic belts.” Geol. Soc. Spec. Lond. Pub., no. 4, 543-552, London.
- Matsuda, T., Nakamura, K. and Sugimura, A., 1967: Late Cenozoic orogeny in Japan. Tectonophys., **4**, 349-366.
- Matsuda, T. and Uyeda, S., 1971: On the Pacific-type orogeny and its model: extension of the paired belts concept and possible origin of marginal seas. Tectonophys., **11**, 5-27.
- McCaffrey, R. and Nábělek, J., 1984: The geometry of back arc thrusting along the eastern Sunda Arc, Indonesia: constraints from earthquake and gravity data. Jour. Geophys. Res., **89**, 5171-6179.
- McClay, K. R., 1992: Glossary of thrust tectonics terms. in McClay, K. R., ed., “Thrust tectonics.” 419-433, Chapman & Hall, London.
- McClay, K. R. and Buchanan, P. G., 1992: Thrust faults in inverted extensional basins. in McClay, K. R., ed., “Thrust tectonics.” 93-121, Chapman & Hall, London.
- McKenzie, D., 1972: Active tectonics of the Mediterranean region. Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc., **30**, 109-185.
- McKenzie, D., 1978: Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth Planet. Sci. Lett., **40**, 25-32.
- Medwedeff, D. A., 1989: Growth fault-bend fold-ing at Southeast Lost Hills, San Joaquin Valley, California. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **73**, 54-67.
- Mehenni, M. and Roodenburg, W. Y., 1990: Fulmar field-U. K., South Central Graben, North Sea. in Beaumont, E. A. and Foster, N. H., eds., “Structural Traps IV, tectonic and nontectonic fold traps,” 113-139, Treatise Petrol. Geol., Atlas of oil and gas fields, Amer. Assoc. Petrol. Geol., Tulsa..
- Mertosono, S. and Nayoan, G. A. S., 1974: The Tertiary basinal area of Central Sumatra. Indonesian Petrol. Assoc., Proc. 3rd Ann. Conv., 63-76.
- Minato, M., Yagi, K. and Hunahashi, M., 1956: Geotectonic synthesis of the Green Tuff regions in Japan. Bull. Earthq. Res. Inst., **34**, 237-265.
- Mitra, S., 1990: Fault-propagation folds: geometry, kinematic evolution and hydrocarbon traps. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **74**, 921-945.
- 都城秋穂, 1965: “変成岩と変成帯.” 458p., 岩波書店, 東京.
- 都城秋穂, 1979a: プレート・テクトニクスに もとづく造山論. 都城秋穂・安芸敬一編 “変動する地球III—造山運動—.” 岩波講座地球科学, **12**, 35-144, 岩波書店, 東京.
- 都城秋穂, 1979b: 北アメリカ. 都城秋穂編 “世界の地質.” 岩波講座地球科学, **16**, 99-142, 岩波書店, 東京.
- Miyashiro, A., 1991: Reorganization of geological sciences and particularly of metamorphic geology by the advent of plate tectonics: a personal view. Tectonophys., **187**, 51-60.
- 都城秋穂, 1992: プレート・テクトニクスの成 立した頃のことと, 日本におけるプレート反対運動. 号外地球, no.5, 12-17.

- Molnar, P., 1988: Continental tectonics in the aftermath of plate tectonics. *Nature*, **335**, 131-137.
- Morley, C. K., 1988: Variable extension in Lake Tanganyika. *Tectonics*, **7**, 785-801.
- Morley, C. K., Nelson, R. A., Patton, T. L. and Munn, S. G., 1990: Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **74**, 1234-1253.
- Mount, V. S., Suppe, J. and Hook, S. C., 1990: A forward modeling strategy for balancing cross sections. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **74**, 521-531.
- Mosar, J. and Suppe, J., 1992: Role of shear in fault-propagation folding. in McClay, K. R., ed., "Thrust tectonics." 123-132, Chapman & Hall, London.
- 村田明広, 1988 : Balanced Cross Section と Duplex. 地学雑誌, **97**, 504-512.
- 村田明広, 1990 : 造山帯前縁部の地質構造, 大原 降・西田 孝(編) “地球環境の変容.” 96-103, 朝倉書店, 東京.
- 村内必典・浅沼俊夫, 1970 : 房総一常磐沖海域における Seismic Profiler 観測と 2, 3 の考察. 国立科学博物館研究報告, **13**, 337-357.
- 中村一明, 1969 : 島弧のテクトニクス 1 仮説. 日本地質学会第76年学術大会, 総合討論会資料, “グリーンタフに関する諸問題.” 31-38.
- 中村和善, 1982a : 新潟県高田平野南方地域における後期新生代の構造運動—その 1. 堆積盆の変遷と基盤の運動像—. 地質学雑誌, **88**, 155-175.
- 中村和善, 1982b : 新潟県高田平野南方地域における後期新生代の構造運動—その 2. 地質構造の形成と基盤の運動像—. 地質学雑誌, **88**, 343-362.
- 中村光一, 1988 : Extensional tectonics, lower-plate margin, basin inversion—日本海縁辺の弱化した大陸地殻の地質構造の枠組. 日本地質学会第95年学術大会(沖縄)講演要旨, 453.
- 中村光一, 1989a: Balanced cross-section 法と GGT. 月刊海洋, **21**, 85-89.
- 中村光一, 1989b: 東北日本後期新生代の partly inverted basin の構造様式(第195回地質調査所研究発表会講演要旨). 地質調査所月報, **40**, 583-584.
- 中村光一, 1990 : '90年代前半の Extensional Tectonics. 月刊地球, **12**, 741-762.
- 中村光一, 1991 : 難波山背斜逆転帯における post-buckle flattening と, 油田褶曲形成過程における意味. 日本地質学会第98年学術大会(松山)講演要旨, 289.
- 中村光一, 準備中: シーケンス層序学と堆積盆および気候変動のダイナミクス. 地質調査所月報投稿予定.
- 中村光一・石原丈実・駒澤正夫, 1990/1992 : 金華山沖海底地質図, 海洋地質図 no.33, 地質調査所.
- 中村光一・駒澤正夫・石原丈実, 1989 : 背弧リフト形成時の前弧の分裂—新第三紀における北上山地と阿武隈山地間の海峡形成と閉塞のテクトニクス. 日本地質学会第96年学術大会(水戸)講演要旨, 415.
- 新津背斜団体研究グループ, 1977 : 新潟油田新津背斜の形成機構. 地球科学, **31**, 70-82.
- 大沢 稔・池辺 稔・平山次郎・栗田泰夫・高安泰助, 1984 : 能代地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1図幅), 91p., 地質調査所.
- 大沢 稔・土谷信之・片平忠実・菊地芳朗・大口健志, 1989 : 秋田県南部-山形県北部油田地帯の深部地質構造. 地質学論集, no.32, 133-142.
- 大塚彌之助, 1942 : “日本の地質構造.” 280p., 同文書院, 東京.
- Paffengolich, K. N. et al., 1978: "Geologichrsky slobari." 2 vols., Nedra, Moscow, (in

- Russian).
- Park, R. G., 1988: "Geological structures and moving plates." 337p., Blackie, Glasgow.
- Parker, J. M., 1985: Seismic exploration in the Rockies-some reflections. in Gries, R. R. and Dyer, R. C., eds., "Seismic exploration of the Rocky Mountain Region." 5-12, Rocky Mountain Assoc. Geol. and Denver Geophys. Soc., Denver.
- Parker, S. P., ed., 1984: "McGraw-Hill dictionary of earth sciences." 837p., McGraw-Hill, New York.
- Pegrum, R. M. and Ljons, T. E., 1984; 15/9 Gamma Gas Field offshore Norway, new trap type for North Sea Basin with regional structural implications, Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **68**, 874-902.
- Petersen, F. A., 1983: Foreland detachment structures. in Lowell, J. D., ed., "Rocky Mountain foreland basins and uplifts." Rocky Mount. Assoc. Geol., 65-77, Denver.
- Plawman, T. L., 1983: Fault with reversal of displacement, central Montana. in Bally, A. W., ed., "Seismic expression of structural styles-a picture and work atlas." Amer. Assoc. Petrol. Geol., Studies in Geology, no. 15, **3**, 3.3-1-3.3-2.
- Powell, C. M. and Williams, G. D., 1989: The Lewis Thrust/Rocky Mountain trench fault system in Northwest Montana, USA: an example of negative inversion tectonics? in Cooper, M. A. and Williams, G. D., eds., "Inversion tectonics." Geol. Soc. Lond. Spec. Pub., no. 44, 223-234, London.
- Pożaryski, W. and Brochwicz-Lewiński, W., 1978: On the Polish Trough. Geol. Mijnbow, **57**, 545-557.
- Price, N. J. and Cosgrove, J. W., 1990: "Analysis of geological structures." 502p., Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Rast, N., 1992: Orogenic belts. in Nierenberg, W. A., ed., "Encyclopedia of earth system science." **3**, 501-513, Academic Press, San Diego.
- Roezin, S., 1974: The discovery and development of the Petapahan oil field, Central Sumatra. Indonesian Petrol. Assoc., Proc. 3rd Ann. Conv., 111-127.
- Rosendahl, B. R., 1987: Architecture of continental rifts with special reference to East Africa. Ann. Rev. Earth Planet. Sci., **15**, 445-503.
- Roure, F., Choukroune, P., Berastegui, X., Munoz, J. A., Villien, A., Matheron, P., Bareyt, M., Seguret, M., Camara, P. and Deramond, J., 1989: ECORS deep seismic data and balanced cross sections: geometric constraints on the evolution of the Pyrenees. Tectonics, **8**, 41-50.
- Royse, F., Jr., Warner, M. A. and Reese, D. L., 1975: Thrust belt structural geometry and related stratigraphic problems. Wyoming-Idaho-Northern Utah. in Bolyard, D. W., ed., "Deep drilling frontiers of the Central Rocky Mountains." 41-54, Rocky Mount. Assoc. Geol., Denver.
- 斎藤正次・大沢 稔, 1956: 5万分の1地質図幅「阿仁合」および説明書, 48p., 地質調査所.
- Seely, D. R., Vail, P. R. and Walton, G. G., 1974: Trench slope model. in Burk, G. A. and Drake, C. L., eds., "The Geology of continental margins." 249-260, Springer-Verlag, New York.
- Sengör, A. M. C., 1990: Plate tectonics and orogenic research after 25 years: a Tethyan perspective. Earth Sci. Rev., **27**, 1-201.
- Sengör, A. M. C., 1991: Timing of orogenic

- events: a persistent geological controversy. in Müller, D. W., McKenzie, J. A. and Weissert, H., eds., "Controversies in modern geology." 405-473, Academic Press, London.
- Sibson, R. H., 1985: A note on fault reactivation, *Jour. Struct. Geol.*, **7**, 751-754.
- Silver, E. A., Reed, D., McCaffrey, R. and Joyodawiryo, Y., 1983: Back arc thrusting in the eastern Sunda Arc, Indonesia: a consequence of arc-continent collision. *Jour. Geophys. Res.*, **88**, 7429-7448.
- Sloss, L. L., 1972: Synchrony of Phanerozoic sedimentary-tectonic events of the North American craton and the Russian Platform. *Proc. 24th Intern. Geol. Congr.*, Sec. 6, 24-32, Montreal.
- Smith, R. B. and Bruhn, R. L., 1984: Intraplate extensional tectonics of the eastern Basin-Range: Inferences on structural style from seismic reflection data, regional tectonics and thermal-mechanical models of brittle-ductile deformation. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 5733-5762.
- Smith, S., Sellwood, B. and Wilson, C., 1987: "Basin analysis techniques, Part 1, Geophysical techniques." The Open Univ., Science: A third level course, S338, Block 3, 131p., The Open Univ. Press (ISBN 0-335-16315-7), Milton Keynes.
- Smithson, S. B., Brewer, J., Kaufman, S., Oliver, J. and Hurich, C., 1978: Nature of the Wind River thrust, Wyoming, from COCORP deep-reflection data and from gravity data. *Geol.*, **6**, 648-652.
- Spencer, A. M., ed., 1974: "Mesozoic-Cenozoic orogenic belts." *Geol. Soc. Spec. Lond. Pub.*, no. 4, 809p., London.
- Sprinkel, D. A., 1979: Apparent reverse movement on previous thrust faults along the eastern margin of the Basin and Range Province, North-Central Utah. in Newman, G. W. and Goode, H. D., eds., "Basin and Range symposium" 135-143, *Rocky Mount. Assoc. Geol.*, Denver.
- 杉村 新, 1992: 「弧状列島」の思い出. 号外地球, no. 5, 39-45.
- Sugimura, A., Matsuda, T., Chinzei, K. and Nakamura, K., 1963: Quantitative distribution of late Cenozoic volcanic materials in Japan. *Bull. Volcanol.*, **26**, 125-140.
- Sugimura, A. and Uyeda, S., 1973: "Island arcs." *Develop. Geotectonics*, **3**, 247p., Elsevier, Amsterdam.
- Summerfield, M. A., 1991: "Global geomorphology." 537p., Longaman, Essex.
- Suppe, J., 1983: Geometry and kinematics of fault-bend folding. *Amer. Jour. Sci.*, **283**, 684-721.
- Suppe, J., 1985: "Principles of structural geology." 537p., Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- 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." 105-121, Chapman & Hall, London.
- Suppe, J. and Medwedeff, D. A., 1990: Geometry and kinematics of fault-propagation folding. *Ectogae Geol. Helv.*, **83**, 409-454.
- 鈴木 宇耕, 1989: 日本海東部新第三系堆積盆地の地質. 地質学論集, no. 32, 143-183.
- 鈴木 尉元・三梨 昂・影山邦夫・島田忠夫・宮下美智夫・小玉喜三郎, 1971: 新潟第三系堆積盆地に発達する褶曲の形成機構について. 地質学雑誌, **77**, 301-315.
- Sykes, L. R., 1978: Intraplate seismicity, reactivation of preexisting zones of weakness, alkaline magmatism and other tectonism postdating continental frag-

- mentation. Rev. Geophys. Space Phys., **16**, 621-688.
- 高橋雅紀, 1992: 中部日本の新第三紀テクトニクスにおける中新世秩父盆地の地質学的位置. 埼玉県立自然史博物館研究報告, no.10, 29-45.
- Takeuchi, A., 1978: The Pliocene stress field and tectonism in the Sin-Etsu region, central Japan. Jour. Geosci. Osaka City Univ., **21**, 37-52, 1978.
- Tateishi, M., 1988: Sedimentary facies and tectonics of Cenozoic back-arc margin of central Japan. Jour. Paleont. Soc. Korea, **4**, 21-29.
- Tearpock, D. J. and Bischke, R. E., 1991: "Applied subsurface geological mapping." 648p., Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1982 : “日本の石油・天然ガス資源, 《新版》技術報告書” 455p.
- 徳山 明. 木村敏雄, 1968: 地向斜の堆積物. 地質学論集, no.1, 5-11.
- Tricart, P., 1984: From passive margin to continental collision: tectonic scenario for the Western Alps. Amer. Jour. Sci., **284**, 97-120.
- Tricart, P. and Lemoine, M., 1986: From faulted blocks to megamullions and mega-boudins: Tethyan heritage in the structure of the Western Alps. Tectonics, **5**, 95-118.
- 土谷信之, 1986: 秋田県中部における中新世中期塩基性岩の海底火成活動. 地質調査所月報, **37**, 353-366.
- Tsuchiya, N., 1990: Middle Miocene back-arc rift magmatism of basalt in the NE Japan arc. Bull. Geol. Surv. Jap., **41**, 473-505.
- 上田誠也・杉村 新, 1970 : “弧状列島.” 156p., 岩波書店, 東京.
- 植村 武・高橋 明, 1974 : 基盤の運動像と被覆第三系の褶曲—新潟県北部櫛形山脈の例-. 地質調査所報告, no.250-2, 1-21.
- Van Hoorn, B., 1987: Structural evolution, timing and tectonic style of the Sole Pit inversion. Tectonophys., **137**, 239-284.
- Visser, W. A., ed., 1980: "Geological nomenclature." 540p., Martinus Nijhoff, London, これは Roy. Geol. Mining Soc. Netherlands の出版物である.
- Voigt, E., 1962: Über Randtröge vor Schollerrändern und ihre Bedeutung im Gebiet der Mitteleuropäischen Senke und angrenzender Gebiete. Zeitschr. Deutsch. Geol. Ges., **114**, 378-418.
- Walker, I. M. and Cooper, W. G., 1987: The structural and stratigraphic evolution of the northeast margin of the Sole Pit Basin. in Brooks, J. and Glennie, K. W., eds., "Petroleum geology of North West Europe." 1, 263-275, Graham & Trotman, London.
- 渡辺 貫(編), 1935 : “地学辞典.” 1726p., 古今書院, 東京.
- Watts, A. B. and Ryan, W. B. F., 1976: Flexure of the lithosphere and continental margin basins. Tectonophys., **36**, 25-44.
- Williams, G. D., Powell, C. M. and Cooper, M. A., 1989: Geometry and kinematics of inversion tectonics. in Cooper, M. A. and Williams, G. D., eds., "Inversion tectonics." Geol. Soc. Lond. Spec. Pub., no. 44, 3-15, London.
- Willis, B., 1923: "Geologic structures." 295p., McGraw-Hill, New York.
- Winslow, M. A., 1981: Mechanisms for basement shortening in the Andean foreland fold belt of southern South America. in McClay, K. R. and Price, N. J., eds., "Thrust and Nappe Tectonics." Geol. Soc. Spec. Pub., no. 9, 513-528, London.
- Woodward, N. B., Boyer, S. E. and Suppe, J.,

- 1989: "Balanced geological cross-sections: an essential technique in geological research and exploration." 28th Intern. Geol. Congr. Short Course in Geology, 6, 132p., Amer. Geophys. Union, Washington, D.C.
- Wyatt, A., ed., 1986: "Challinor's dictionary of geology." 6th ed., 374p., Univ. Wales Press, Cardiff.
- Xiao, H. and Suppe, J., 1992: Origin of rollover. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **76**, 509-529.
- 山路 敦, 1989: 温海附近の地質と羽越地域における前期中新世のリフティング. 地質学論集, no.32, 305-320.
- Yamaji, A., 1990: Rapid intra-arc rifting in Miocene northeast Japan. Tectonics, **9**, 365-378.
- 山路 敦・佐藤比呂志, 1989: 中新世における東北本州弧の沈降運動とそのメカニズム. 地質学論集, no.32, 339-349.
- Yamaji, A. and Takahashi, M., 1988: Estimation of relative depth of burial using vitrinite reflectance: implications for a sedimentary basin formation by basement tilting. Jour. Coal Geol., **10**, 41-50.
- Zha, Q., 1984: Jizhong Depression, China-its geologic framework, evolutionary history and distribution of hydrocarbons. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., **68**, 983-992.
- Ziegler, P. A., 1975a: North Sea basin history in the tectonic framework of North-Western Europe. in Woodland, A. W., ed., "Petroleum and the continental shelf of Nort-West Europe." 1, 131-149, Appl. Sci. Pub., Barking.
- Ziegler, P. A., 1975b: Outline of the geological history of the North Sea. in Woodland, A. W., ed., "Petroleum and the continental shelf of Nort-West Europe." 1, 165-190, Appl. Sci. Pub., Barking.
- Ziegler, P. A., 1978: Northwestern Europe: tectonics and basin development. Geol. Mijnbouw, **57**, 589-626.
- Ziegler, P. A., 1982: "Geological atlas of Western and Central Europe." 130p. with 40 plates, Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam.
- Ziegler, P. A., 1983: Inverted basins in the Alpine foreland. in Bally, A. W., ed. "Seismic expression of structural styles-a picture and work atlas." Amer. Assoc. Petrol. Geol., Studies in Geology, no. 15, **3**, 3.3-3.3.3-12.
- Ziegler, P. A., 1987: Compressional intra-plate deformations in the Alpine foreland-an introduction. Tectonophys., **137**, 1-5.
- Ziegler, P. A., ed., 1987: "Compressional intra-plate deformations in the Alpine foreland." Tectonophys. (Special Issue), **137**, no. 1-4, 420p.
- 追記: バランス断面図の手法については、さらに、 Mitra, S. and Fisher, G. W. ed., 1992: "Structural geology of fold and thrust belts." 254p., Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 参照。
- 第14図の長町-利府線の衝上断層の上盤表示は誤っている。本文中の記述についても仙台平野部は修正の必要がある。指摘をしていただいた杉山雄一氏(地質調査所環境地質部)に感謝する。