石油技術協会誌 第 65 巻 第 1 号 (平成12年1月) JOURNAL OF THE JAPANESE ASSOCIATION FOR PETROLEUM TECHNOLOGY VOL. 65, NO. 1 (Jan., 2000)

総 説

バランス断面図の考え方と九州四万十帯の デュープレックス*

村田明広**

(Received September 16, 1999; accepted November 24, 1999)

Basic concept of balanced cross section and duplex structures of the Shimanto Terrane, Kyushu, Japan

Akihiro Murata

Abstract: Petroleum exploration requires an exact cross section. Balanced cross section construction (Dahlstrom, 1969) is a very useful way to extrapolate surface structures to the depths. The basic concept of his method is that the geometric features of any constructed section must be retrodeformable to the restored section. Bed lengths and areas must be equal both in deformed cross section and undeformed restored section.

Balanced cross section construction has been very successful in understanding complex structures of the fold and thrust belts of the orogenic belts, especially for duplex structures. But an application of the method to the accretionary terranes is very difficult, because original successions are not clarified. However in such a case, the concept of balanced cross section is essential to understand thrust structures. Some examples of the duplex structures of the Shimanto Terrane in Kyushu, Japan are described.

Key words: balanced cross section, thrust, duplex, fault-bend fold, normal fault, Shimanto Terrane, Kyushu

1. はじめに

石油・ガス探鉱を成功させるためには、地質構造を正確に把握する必要がある。地層の分布や、ボーリング、反射法地震探査などのデータから、よい断面図を描くことが地質構造の正確な把握につながる。バランス断面図(balanced cross section)(Dahlstrom, 1969a)は、変形前と変形後の地層の収支バランスを考慮して作られた

Copyright © 2000, JAPT

断面図である。バランス断面図作成法は、造山帯の褶曲・衝上断層帯や、伸張テクトニクス帯で正確な地質構造の把握に成功を収めてきた(Elliott and Johnson, 1980; Boyer and Elliott, 1982; Buchanan, 1996)。バランス断面図作成法は、地質図スケールの地質構造を扱う場合には必須の考えであるため、1980年代半ば以降に出版された欧米の構造地質学の教科書では、必ず取り上げられており(Suppe, 1985; Ragan, 1985; Ramsay and Huber, 1986; Marshak and Mitra, 1988; Davis and Reynolds, 1996; Park, 1997など)、特に Marshak and Mitra (1988) では練習問題も含めて多くのページが費やされている。

バランス断面図作成法を包括的にまとめたものとしては Woodward *et al.* (1989) があり、必須の文献となっている。邦文でも、村田 (1988)、中村 (1989, 1990)、シェリング (1991)、狩野・村田 (1998) などで簡単に

^{*} 平成11年5月26日, 平成11年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「油田構造形成とテクトニクス」にて講演 This paper was presented at the 1999 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Oil field structure and tectonics" in Makuhari, Chiba, Japan, May 26, 1999.

^{**} 徳島大学総合科学部 Faculty of Integrated Arts and Sciences, University of Tokushima

紹介されている。本稿では、村田(1988)、狩野・村田 (1998) などに従ってバランス断面図の基本的な考え方 について述べ、この考え方が四万十帯のデュープレック ス解析に生かせた例を紹介する。

2. バランス断面図の考え方

2.1 バランス断面図とは

断層の形態や変位、褶曲の形成などには多くの幾何学的な制約が存在するため、断面図に描かれている地層が変形前の状態に復元可能かどうかを念頭において、断面図を作成する必要がある。バランス断面図は、褶曲や断層などの変形を元に戻した時、変形前の地層が積み重なった状態(復元断面図;restored section)に過不足なく復元できるように作られている(図1)。バランス(balanced)という言葉は、作成された断面図内の変形した地層と変形前の復元断面図内の地層とが、釣り合っているという意味で使われている。

この基本的な考えは、バランス断面図という言葉が使われる前に、デコルマンの層準の深さを推定するのに使われていた(Chamberlain、1910)。デコルマンはほぼ水平な断層の上盤だけが褶曲する構造で、その上盤は盛り上がった背斜の両側にほぼ水平な地層が分布するという特徴を持っている。上に盛り上がった部分が、側方に短縮した部分と同じ量(断面図では面積)であることから、これを別に求めた地層の側方短縮量(長さ)で割ることによって、デコルマン層準の深さが求められたのである(Dahlstrom、1969 b; Woodward et al.、1989;狩野・村田、1998の図VII. 7-12参照)。

バランス断面図の作成とは、地表調査での地層・断層の走向・傾斜やボーリングのデータ、反射法探査のデータなどから、ランプ背斜(後述)などの幾何学的な制約による地質構造を見落とさずに認識し、より正確で真実に近い断面図を描くことである。衝上断層帯では、地表で観察される褶曲構造から、地下に階段状の形態(フラット-ランプ-フラット)をもつ衝上断層の存在や、デュープレックス(後述)の存在が推定される場合が多い(Dahlstrom、1969a; Elliott and Johnson、1980; Boyer and Elliott、1982)。また、バランス断面図と復元断面図の比較によって(図1)、衝上断層帯の短縮量の最小値を見積もることができる(Hossack、1979; Woodward et al., 1989)。

2.2 バランス断面図作成のための仮定

バランス断面図作成時には、変形は平面歪であることを仮定する。これは、褶曲軸の方向や衝上断層・正断層の走向方向には、伸張・短縮が起こらないということである。この仮定により、断面線の方向を褶曲軸、あるいは衝上断層や正断層の走向に直交するように選ぶと、断面図内での地層の移動のみを考えればよいことになる(Woodward et al., 1989)。断面図は垂直な面で作ることがほとんどなため、褶曲軸がプランジしているところではバランス断面図を作ることができない。また、横ずれ断層が断面図を横切る場合は、地層が断面図から飛び出すため、バランス断面図を作ることができない。次に、変形による地層の体積変化はないことを仮定する。これにより、変形の前後の地層の量のバランスを考えることができる。また、褶曲は平行褶曲であることを仮定

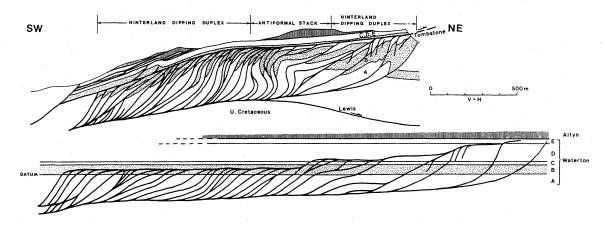


図1 バランス断面図の例

北米コルディレラ造山帯中のデュープレックス。下の復元断面図には,後で形成される断層が描かれている。Reprinted from Journal of Structural Geology, Vol. 8, Mitra G. and Boyer, S. E., "Energy balance and deformation mechanisms of duplexes", p. 291–304, Copyright (1986), with permission from Elsevier Science.

する。平行褶曲が卓越するのは,基本的に非変成の地質 体である。

2.3 バランス断面図の作成

バランス断面図は、断面図内で一次元で表現されるす べての層準の地層の長さが、変形前の復元断面図と同 じ長さになるように作られる (線長バランス; linelength balancing) (図1)。また、ある厚さをもった地 層は断面図内で二次元で表現され、変形の前後で同じ面 積になるように作られる(面積バランス; area balancing) (Woodward et al., 1989)。復元断面図に将来 形成される断層を描き入れることによって(図1)、断 層によって囲まれたそれぞれのブロックの面積が変形の 前後で同じになるように断面図が描かれる。これらの作 業で、断層に沿う地層の動きが合理的かどうかが十分 チェックされなければならない。仮にバランスしていて も、復元断面図内でひと続きの断層が Z 字のように折 れ曲がって描かれるとか (Ramsay and Huber, 1986の Fig. 24.5, 24.15を参照), 断層の動きが不合理なもの があれば、再検討されなければならない。図1の例で は、復元断面図内で将来形成されるフラットがいくつか の層準に存在することが分かり、 ランプの位置も合理的 に表現されている。

バランスの検証を受けていない断面図は、地表付近で基本的な地質構造を表現していても、地下では復元できない不完全なものである(Elliott、1983;Woodward et al.、1989)。かつて頻繁に用いられたバスク法を使えば、地表で得られたデータが同じなら誰が描いても同じ断面図が得られるという長所はあったが、地層が低角で円弧状の同心褶曲をしている地域以外では、実際とは異なる断面図が描かれていたことになる。また、バスク法では下位層準になるほど地層は大きな半径の円弧の連なりとなるため、次第に"水平的"になっていく。このため下位層準の地層は、上位層準のものよりも水平的な広がりが小さくなってしまう。バスク法で描かれた断面図から復元断面図を作成すると、下位層準ほど地層が短くなってしまうため、真実を表していないことは明らかである(Ragan、1985の Fig. 12.12参照)。

2.4 露頭解釈におけるバランス断面図の有用性

バランス断面図の考え方は、露頭観察においても有効である。地層が断層によりずれている場合は、断層の両側の地層の対応(断層の変位量)を明らかにして、初めて地質構造を把握できることになる。Williams and Chapman(1983)は衝上断層を伴う褶曲を観察できる露頭のバランス断面図を作成し、復元断面図に、その後に形成される断層を描き入れることによって、断層の変位量変化を推定した。これは、露頭観察だけでは決して

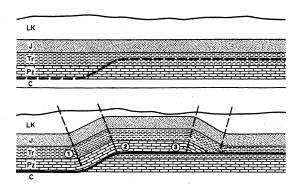


図2 断層折れ曲がり褶曲

北米コルディレラ造山帯の例。ランプの上で、全体として頂部の平らな背斜を作るので、ランプ背斜と呼ばれる。①と②は下盤のフラット・ランプの境界にできる褶曲。③およびその右手の褶曲は上盤の下限(hangingwall cutoff)の形態による褶曲。Reprinted from Journal of Structural Geology, Vol. 8, Boyer, S. E., "Styles of folding within thrust sheets: examples from the Appalachian and Rocky Mountains of the USA and Canada", p. 325-339, Copyright (1986), with permission from Elsevier Science.

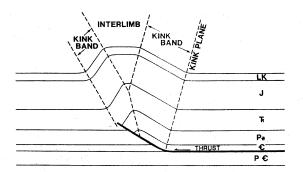


図3 断層伝播褶曲

衝上断層に伴う例で、衝上断層に沿う変位量を上盤の地層が褶曲することで吸収している。 Reprinted from Journal of Structural Geology, Vol. 8, Boyer, S. E., "Styles of folding within thrust sheets: examples from the Appalachian and Rocky Mountains of the USA and Canada", p. 325-339, Copyright (1986), with permission from Elsevier Science.

明らかにできないことである。

2.5 バランス断面図の注意点

同じデータから、いくとおりものバランス断面図を作

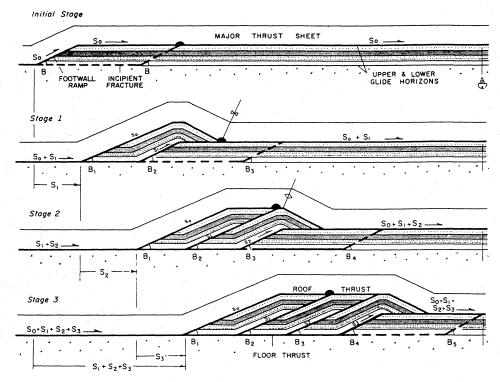


図4 デュープレックスの形成過程

初期段階に示されたランプの位置で、上盤が下盤の一部をはぎ取り上盤に貼り付かせる(第1段階)。その繰り返しにより(第2および第3段階),デュープレックスが形成される。Reprinted from AAPG Bulletin, Vol. 66, Boyer, S. E. and Elliott, D., "Thrust systems", p. 1196-1230, Copyright (1982), with permission from the American Association of Petroleum Geologists.

成することが可能である。衝上断層帯で短縮量の最小値が出せるのは、削剝されてしまった地層を最小に見積もって断面図を作成するからである。しかしながら、真の短縮量を出すことはできない。また、デュープレックスの存在が地下に推定される場合、デュープレックス全体の量(断面図では面積)が分かっても、その中のブロックの個数や個々の形態は分からない。つまり、バランス断面図は存立可能で容認しうる断面図のひとつであるだけで、真の地質構造を示すとは限らない。

また、対象地域を支配する地質構造を十分理解していないと、誤った断面図を作成してしまう。バランス断面図作成に適さない地質体でも、ある一定の条件のもとで断面図が作成されている場合も多い。平行褶曲が卓越するとは思われない変成岩地帯の断面図や、地殻スケールの断面図がバランス断面図の手法で描かれ、さまざまな議論が展開されている(Butler, 1983など)。一方、バスク法によって異なる多様な地質体で似たような断面図が描かれたことがあるのと同じように、バランス断面図作

成法でも似たような断面図がしばしば描かれている。これは手法の同一性によるもので、地質条件が同じではないということを認識しておく必要がある(Ramsay and Huber, 1986)。バランス断面図作成法を適用する地質体がどのような変形条件に置かれたかを露頭観察によって確認し、断面図に反映させなければならない。また、文献に描かれているバランス断面図についても、地質体によってできる議論の限界があることに注意する必要がある。

3. バランス断面図の活用

3.1 断層折れ曲がり褶曲と断層伝播褶曲

大規模な衝上断層帯で、地表調査やボーリングのデータを考慮して断面図を作成すると、地表では背斜構造を作っているのに、深い所では地層がほぼ水平に横たわっているだけという場合が多いことが明らかになってきた。このような場合には、地下に衝上断層が存在し、断層折れ曲がり褶曲(fault-bend fold)(図2)や、断層

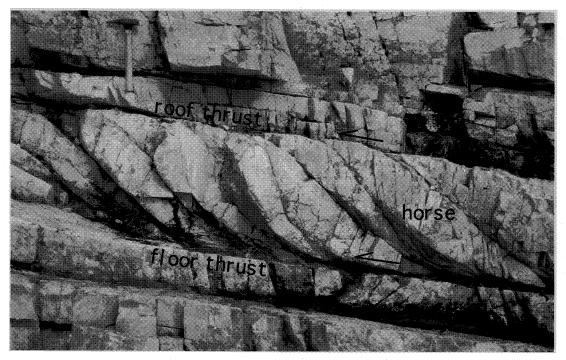


図5 露頭スケールのデュープレックス スコットランドのモイン衝上断層帯の例で、後背地傾斜デュープレックスである。東京地 学協会の許可により村田(1988)から再版、一部修正。

伝播褶曲(fault-propagation fold)(図3)と解釈されることが多い。

フラット-ランプ-フラットの階段状の衝上断層が活動 する時,上盤の地層の強度はそれほど大きくないので, 折れ曲がった断層面の上を空隙を作ることなく移動す る。断層の変位方向での断面では、地層は"消失"しな いし、新たに空隙が"付加"することもないので、バラ ンス断面図の考えで地質構造を解析することができる。 断層折れ曲がり褶曲は、階段状の衝上断層の形態を反映 してキンクバンドの形態をとる(図2) (Suppe. 1983)。この褶曲は横曲げ (bending) 褶曲の一種であ り、ランプの上盤に見られる場合は、特にランプ背斜 (ramp anticline) と呼ばれる (図 2)。この衝上断層 は、全体として低角なため、ランプ背斜付近では地表に 達しない。なお、フラット-ランプ-フラットの衝上断層 の場合, 露頭での小規模な衝上断層の観察から, 上盤だ けが変形する上述のランプ背斜モデルよりも、同時に下 盤も変形する場合が多いという指摘がある(Ramsay, 1992)

断層伝播褶曲(図3)は、衝上断層の変位量が上盤 の褶曲によって吸収されて減少するもので、衝上断層の 先端部でこのような褶曲が形成される。褶曲の形態か ら、地下に存在する衝上断層の形態、変位量の減少、そして断層の先端位置の推定が行われる(Suppe *et al.*, 1992; Mosar and Suppe, 1992)。

3.2 デュープレックス

バランス断面図の考えを理解するうえで, デュープ レックスはよい例となる。衝上断層帯でゆるい背斜構造 がみられる場合に、その下に低角な衝上断層が存在し、 それに沿って同一層準の地層が覆瓦状に詰め込まれた デュープレックス(図4)の存在が明らかになってき た。デュープレックスは覆瓦状構造(imbricate structure) の一種で、いくつかの衝上断層が上方でひとつの 衝上断層に合流するものである(Boyer and Elliott, 1982)。デュープレックスの上限の衝上断層はルーフ衝 上断層 (roof thrust), 下限はフロアー衝上断層 (floor thrust) であり、内部の衝上断層で囲まれたそれぞれの ブロックはホース (horse) と呼ばれる (図 4, 5)。 デュープレックスは、階段状形態を持つ衝上断層のラン プの位置で、上盤側が下盤側を次々にはぎ取って上盤側 に組み込んでいくことによって形成される (図 4) (Boyer and Elliott, 1982)。それぞれのホースは、まず フラットからランプの部分を通過する時に向斜の変形を 受け、次にランプの部分を通過する時は平面的に戻さ

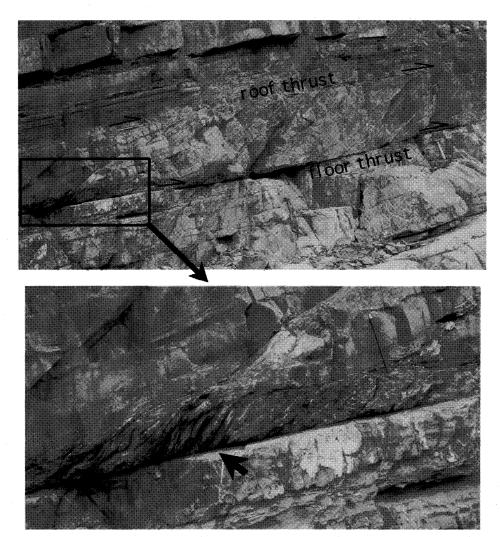


図6 デュープレックスの中のデュープレックス イングランドの石炭系中の例で、露頭スケールの後背地傾斜デュープレックスがあり、そ のフロアー衝上断層の中で、断層破砕岩がさらに小規模なデュープレックスを作ってい る。東京地学協会の許可により村田(1988)から再版、一部修正。

れ、最終的にランプからフラットの部分を通過する時は 背斜の変形を受ける。また、次のホースが形成される時 には、1つ前の背斜の片翼はほぼ元の形に戻る(図4)。

小規模なデュープレックスは、露頭でその全体像を把握することができる(図 5)(村田、1988)。これは、ホースの長さよりも個々の衝上断層の変位量が小さい後背地傾斜デュープレックス(hinterland-dipping duplex)であり、それぞれのホースはS字を引き延ばして逆にしたような形態をしている。

デュープレックス形成時には、次々と下盤側をはぎ 取っていくため、ルーフ衝上断層は初期に形成されたも のから活動を停止していくが、フロアー衝上断層はデュープレックス構造完成まで活動し続ける(図 4)。図 6 は、デュープレックスのフロアー衝上断層に伴って活動の初期に形成された断層破砕帯が、さらに小規模なデュープレックスを形成している例で、フロアー衝上断層が活動し続けた証拠である(村田、1988)。なお、このデュープレックスについては、上述の Boyer and Elliott(1982)のモデルではうまく説明できず、ルーフ、フロアー衝上断層とも活動的なフレキシュラルスリップモデルのほうがよいとする考えが出されている(Tanner、1992)。

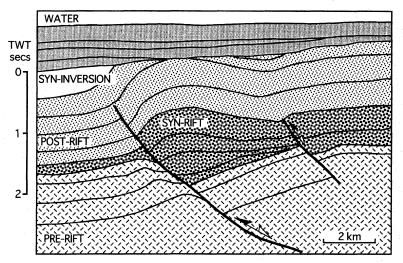


図7 正断層から衝上断層へのインバージョンの例

反射法地震波探査断面解釈図。中央の断層の右側の粗い砂目の部分は,リストリック正断層のハーフグラーベンに堆積した syn-rift の堆積物である。これが堆積後に衝上運動を受けたために,その上限では衝上断層の変位が認められるが,下限では正断層の変位が残っている。上盤の post-rift の地層は,断層伝播褶曲をしている。Reprinted from "Basin Inversion" (eds. by Buchanan, J. G. and Buchanan, P. G.) (Geol. Soc. Spec. Pub., No. 88),McClay,K. R., "The geometries and kinematics of inverted fault systems: a review of analogue model studies",p. 97–118,Copyright (1995),with permission from the Geological Society of London.

大スケールのデュープレックスを正確に把握するためには、バランス断面図を作成しなければならない。北米コルディレラ造山帯(Mitra and Boyer, 1986)(図 1 はその一例),アパラチア造山帯(Boyer and Elliott, 1982),カレドニア造山帯のモイン衝上断層帯(Elliott and Johnson, 1980)その他の衝上断層帯においては、バランス断面図の作成により,衝上断層のランプやデュープレックスの存在が明らかになった例が非常に多い(Boyer, 1986;Suppe, 1983など)。また復元断面図の作成によって,衝上断層帯の短縮量の最小値が根拠に基づいた数値として議論できるようになった(Elliott and Johnson, 1980)。

3.3 伸張テクトニクス帯

伸張テクトニクス帯で卓越する正断層も、断面線の方向を断層の走向に直交する方向に設定すれば、衝上断層帯と同じく、バランス断面図作成法を活用できる(Gibbs, 1983; Woodward et al., 1989; Coward, 1996)。地表では高角にもかかわらず、地下では水平になるリストリック正断層の場合には、上盤にロールオーバー背斜などの地質構造が見られるため、逆に地表付近のデータを利用して、リストリック正断層がどの位置と深さで水平になるかを見積もることができる(Wood-

ward et al., 1989)。伸張テクトニクス帯では、現在も堆積場であることが普通であり、北海などでは反射法地震探査断面図を利用して、地質構造が解析されている。このような場合、正断層運動と堆積とが同時進行であるため、リストリック正断層で生じた上盤の凹みに周囲よりは厚く砕屑物が堆積することが多く、復元断面図は複雑なものとなる。

堆積時に正断層運動が起こっていたにもかかわらず、既存の正断層面を利用して、衝上断層運動が生じている場合があることが明らかになってきた。その典型的な例は、リストリック正断層活動時に上盤の表層の凹みに厚く堆積した syn-rift の地層に見られる(図 7)。この場合、syn-rift の地層の下限は正断層の変位を示しているにもかかわらず、上限は衝上断層の変位を示すことがある(図 7)(McClay, 1995)。図 7 では、正断層による総変位量よりも、衝上断層による変位量が小さいことを意味している。正断層の断層面を利用した衝上運動に伴って、下盤が削り取られたり(図 8)、下盤の障壁効果で上盤が褶曲したりすることが知られている(Cooper et al., 1989;Coward et al., 1991;McClay and Buchanan, 1992)。

既存の正断層面を利用した正断層運動から衝上断層運

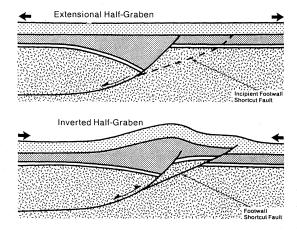


図8 正断層から衝上断層へのインバージョンの模式図

既存の正断層を利用してできた衝上断層が,下盤の一部をはぎ取って分岐する例である。 Reprinted from "Inversion Tectonics" (eds. by Cooper, M. A. and Williams, G. D.) (Geol. Soc. Spec. Pub., No. 44), Cooper *et al.*, "Inversion tectonics – a discussion", p. 97–118, Copyright (1989), with permission from the Geological Society of London.

動への転換、つまり伸張テクトニクスから短縮テクトニクスへの転換は、反転テクトニクス(Inversion tectonics)として知られ、この解析にはバランス断面図の考えが生かされている(McClay、1995; Coward、1996)。詳しい内容や海外での例については、Cooper and Williams (1989), Buchanan and Buchanan (1995), Buchanan and Nieuwland (1996) などを参照されたい。日本でも日本海東縁(岡村ほか、1992)や仙台湾(中村、1992)で、正断層が逆断層に反転したことが明らかになっている。特に中村(1992)では、反転テクトニクスに関する地質構造が分かりやすくまとめられている。

4. 九州四万十帯のデュープレックス

デュープレックスの形成機構は、海溝充塡堆積物が大陸斜面下底に付加される時の有力な機構と考えられ(Silver *et al.*, 1985; Sample and Fisher, 1986; Sample and Moore, 1987; Matsuda and Isozaki, 1991), 四万十付加体でも存在が報告されている(木村, 1989; 村田, 1991; Miyawaki and Hada, 1992; Tokunaga, 1992; 高橋・石井, 1992など)。

付加体である四万十帯の古第三系日向層群では、下位 より玄武岩質火山岩類、赤・緑色珪質泥岩、黒色泥岩、

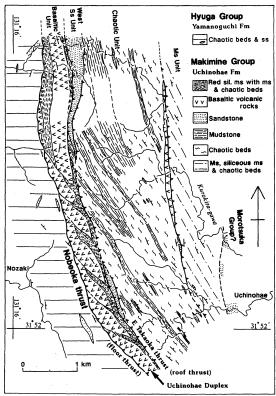


図9 宮崎市西方,四万十帯の内ノ八重デュープ レックス

延岡衝上断層(村田,1991では高岡衝上断層)の 上盤(東側)で、玄武岩質火山岩類とその上位の 赤色泥岩が断層で7回繰り返してデュープレック スを作っている。日本地質学会の許可により村田 (1991)から再版、一部修正。

砂岩および砂岩泥岩互層という基本層序は明らかになっている(村田、1995)が、メランジュの形成と衝上断層の発達により、詳しい層序や層厚を正確に把握できないため、バランス断面図の作成は難しい。しかしながら、その基本的な考えを地質調査に生かすことができ、また断面図作成に反映させることが可能である。

4.1 内ノ八重デュープレックス

九州の宮崎市西方の四万十帯では、古第三系日向層群の東側(大洋側)に、白亜系の内ノ八重層(竹下、1982;木野ほか、1984;宮崎県、1997-1998)が分布している。ここでは延岡衝上断層(大藪衝上断層)の上盤側に、地質図スケールの内ノ八重デュープレックスが見られ、玄武岩質火山岩類層とその上位の赤色泥岩層が、より小規模な衝上断層で繰り返している(図9)(村田、1991)。本来、断面図で見られる衝上性のデュープレックスの変

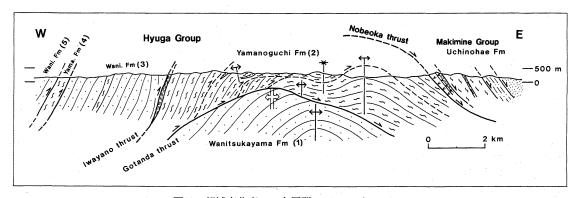


図10 都城市北東の日向層群のデュープレックス

中央部の山之口層(2)としたものは、デュープレックスの集合体。五反田衝上断層下盤の鰐塚山層(1)の層理面は、衝上断層に対して斜交している。延岡衝上断層の東側は、内ノ八重層(図9)のクリッペ。延岡衝上断層は、後で褶曲しているため正断層のような変位センスを示す。徳島大学総合科学部の許可により村田(1992)から再版、一部修正。

位パターンが図9のように地質図に表現されるのは、 デュープレックスがめくれ上がって斜めの断面図が見え ているからである(図10参照)(村田, 1991)。

4.2 都城北東の日向層群のデュープレックス

内ノ八重デュープレックスの下盤にある都城市北東の日向層群(木野・太田,1976,1977)では、砂岩が卓越する鰐塚山層と乱雑層が卓越する山之口層が、衝上断層を境として繰り返し分布している(図10)。両側を衝上断層で境された鰐塚山層の中で、地層の走向・傾斜が衝上断層と斜交していることが地質図上で確認され、より小規模な衝上断層によるデュープレックスの存在の可能性が示された(村田,1991,1992,1998 a)。この斜交性は、断面図でも、五反田衝上断層面の作る背斜のヒンジの位置と、その上下のデュープレックス中の地層で示されるヒンジの位置が異なることで明瞭に示されている(図10)。

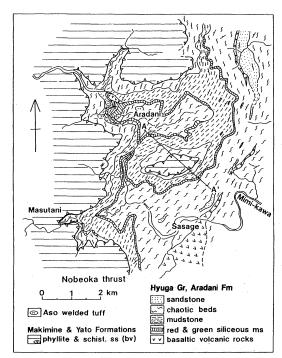
なお、図10において延岡衝上断層が背斜状に褶曲するのは、上述の日向層群あるいはその下位にさらに新期のデュープレックス、おそらく背斜状スタック(antiformal stack)が貼り付いた結果であることが示唆されている(村田、1991)。

4.3 延岡南西の日向層群のデュープレックス

延岡市南西の耳川中流の四万十帯古第三系日向層群 荒谷層でも、デュープレックスの集合体が明らかにされている(村田、1995)。ここでは、構造的なブロックと 考えられていた赤・緑色珪質泥岩は(今井ほか、1979;坂井ほか、1984)、実際には層厚40m までの薄い層であり、約10°W の傾斜で1枚の衝上シートとして存在する(村田、1995;宮崎県、1997–1998)(図11)。この赤・緑色珪質泥岩の衝上シートの上に、100m の厚さの黒色泥

岩が同じく 10° W の傾斜で重なっている。しかしながら,個々の露頭では 30° ~ 60° 傾斜した黒色泥岩の層理面が観察され,層理面を下方へ延長すると珪質泥岩に切られ,上方へ延長すると乱雑層(メランジュ)に切られる。この黒色泥岩には,一部に衝上シートを作るものと同じ赤・緑色珪質泥岩が断層で挟み込まれている。これらのことから,黒色泥岩層の内部は整合一連ではなく,小規模な衝上断層によって瓦を斜めに積み重ねたように繰り返したデュープレックスを作ると考えられた(村田,1995,1998a,b)(図11)。

荒谷層の乱雑層に含まれるブロックの大半は砂岩であ り、一部に玄武岩質火山岩類や赤・緑色珪質泥岩が含ま れる。乱雑層中の面構造は、泥岩中の層理面と同様に中 角度で傾斜し, 乱雑層の上限の衝上断層と斜交すること から、乱雑層もデュープレックスを形成していると推定 された (村田, 1995)。 荒谷層の例では小規模な衝上断 層がルーフあるいはフロアー衝上断層に漸近するという 事実が確認されているわけではなく、覆瓦ファン(imbricate fan) が、後でアウトオブシーケンススラスト (Morley, 1988;木村, 1998) によって切られたものと 区別できない。しかしながら原層序を考えると、個々の 黒色泥岩は砂岩および砂岩泥岩互層を主とする地層の下 位に位置していたものであり、黒色泥岩と一部その下位 の赤・緑色珪質泥岩のみが覆瓦状構造に参加しているの で、黒色泥岩と砂岩および砂岩泥岩互層を主とする地層 の間にルーフ衝上断層が存在し、基本的にはデュープ レックスであった可能性が大きいと考えられている(村 ⊞, 1998a)_o



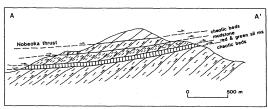


図11 日向層群のデュープレックス集合体 延岡市南西, 荒谷地域の日向層群の地質図(上) と模式断面図(下)。断面図の最上部を占めるの は,延岡衝上断層によるクリッペ。東京地学協会 の許可により村田(1995)から再版,一部修正。

5. おわりに

バランス断面図の基本的な考え方は、多くの公表された断面図を正しく評価するためや、複雑な地質構造の理解のために、欠くことのできないものである。一方で、バランス断面図は必ずしも真実を表していないことや、適用限界についても知っておく必要がある。実際にバランス断面図を作成しなくても、露頭観察や地質構造の把握に十分生かすことができるので、よく理解しておくことが必要であろう。

並 健

小論は、平成11年度石油技術協会春季講演会、地質・ 探鉱部門シンポジウム「油田構造形成とテクトニクス」 の講演内容の一部をまとめたものである。小鷹 長氏ほかシンポジウム世話人のかたがたには発表の機会を与えていただいた。また、匿名の査読者のかたには貴重なご意見を賜った。これらのかたがたに記して謝意を表します。

引 用 文 献

Boyer, S. E., 1986: Styles of folding within thrust sheets: examples from the Appalachian and Rocky Mountains of the USA and Canada. *J. Struct. Geol.*, 8, 325–339.

Boyer, S. E. and Elliott, D., 1982: Thrust systems. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, **66**, 1196–1230.

Buchanan, J.G., 1996: The application of cross-section construction and validation within exploration and production: a discussion. In Buchanan, P.G. and Nieuwland, D.A., eds.: Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling, Geol. Soc. Spec. Pub., 99, 41-50.

Buchanan, J. G. and Buchanan, P. G. (eds.), 1995: Basin Inversion. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, **88**, 600 p.

Buchanan, P. G. and Nieuwland, D. A. (eds.), 1996:
Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 99, 369 p.

Butler, R. W. H., 1983: Balanced cross-sections and their implications for the deep structure of the northwest Alps. *J. Struct. Geol.*, 5, 125–137.

Chamberlain, R. T., 1910: The Appalachian folds of Central Pennsylvania. *Jour. Geol.*, 18, 228-251.

Cooper, M. A. and Williams, G. D. (eds.), 1989: Inversion Tectonics. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 44, 375 p.

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. Spec. Pub., 44, 335–347.

Coward, M. P., 1996: Balancing sections through inverted basins. In Buchanan, P. G. and Nieuwland, D. A., eds.: Modern Developments in Structural Interpretation, Validation and Modelling, Geol. Soc. Spec. Pub., 99, 51-77.

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., **56**, 93–112.

Dahlstrom, C. D. A., 1969a: Balanced cross sections. Can. J. Earth Sci., 6, 743-747.

Dahlstrom, C. D. A., 1969 b: The upper detachment in concentric folding. *Bull. Canad. Petrol. Geol.*, 17, 326-346.

- Davis, G. H. and Reynolds, S. J., 1996: Structural Geology of Rocks and Regions. 2nd Ed., 776 p, John Wiley & Sons
- Elliott, D., 1983: The construction of balanced cross-section. *J. Struct. Geol.*, **5**, p.101.
- Elliott, D. and Johnson, M.R. W., 1980: Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt, NW Scotland. *Trans. R. Soc. Edinb., Earth Sci.*, 71, 69–96.
- Gibbs, A. D., 1983: Balanced cross-section constructions from seismic sections in areas of extensional tectonics. J. Struct. Geol., 5, 153-160.
- Hossack, J. R., 1979: The use of balanced crosssections in the calculation of orogenic contraction, a review. *J. Geol. Soc. Lond.*, 136, 705-711.
- 今井 功・寺岡易司・奥村公男・小野晃司, 1979: 神門 地域の地質. 地域地質研究報告 (5万分の1図幅), 44p, 地質調査所.
- 狩野謙一・村田明広, 1998: 構造地質学. 298 p, 朝倉 書店.
- 木村 学, 1989: 底づけされたユニットとしてのメランジー四万十帯の例一. 月刊地球, 11, 697-709.
- 木村克己, 1998: 付加体における out-of-sequence thrust. 地質学論集, no. 50, 131-146.
- 木野義人・影山邦夫・奥村公男・遠藤秀典・福田 理・ 横山勝三,1984:宮崎地域の地質(5万分の1図幅). 100p,地質調査所.
- 木野義人・太田良平, 1976: 野尻地域の地質. 地域地質 研究報告 (5万分の1図幅), 45p, 地質調査所.
- 木野義人・太田良平,1977:都城地域の地質.地域地質 研究報告(5万分の1図幅),45p,地質調査所.
- Marshak, S., and Mitra, G., 1988: Basic Methods of Structural Geology. 446p, Prentice Hall.
- Matsuda, T. and Isozaki, Y., 1991: Well-documented travel history of Mesozoic pelagic chert in Japan: from remote ocean to subduction zone. *Tectonics*, **10**, 475–499.
- McClay, K. R., 1995: The geometries and kinematics of inverted fault systems: a review of analogue model studies. *In* Buchanan, J. G. and Buchanan, P. G., eds.: *Basin Inversion*, Geol. Soc. Spec. Pub., 88, 97–118.
- McClay, K. R. and Buchanan, P. G., 1992: Thrust faults in inverted extensional basins. *In* McClay, K. R., ed.: *Thrust Tectonics*, 93-104, Chapman & Hall.
- Mitra, G. and Boyer, S. E., 1986: Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. *J. Struct. Geol.*, 8, 291–304.
- Miyawaki, M. and Hada, S., 1992: Sakihama Duplex: characteristic sequence of thrust and fold system in the Eocene Shimanto Belt. *Mem. Fac. Sci., Kochi Univ., Ser. E., Geology*, 13, 11–19.
- 宮崎県, 1997-1998: 20万分の1宮崎県地質図(第5版, 村田明広編)および宮崎県の四万十帯の地質. 44p.

- Morley, C. K., 1988: Out-of-sequence thrusts. *Tectonics*, 7, 539-561.
- Mosar, J. and Suppe, J., 1992: Role of shear in fault-propagation folding. *In* McClay, K. R., ed.: *Thrust Tectonics*, 123–132, Chapman & Hall.
- 村田明広, 1988: Balanced Cross SectionとDuplex. 地学雑誌, **97**, 504-512.
- 村田明広, 1991: 九州四万十帯, 内ノ八重層の作る デュープレックス構造と内ノ八重クリッペ. 地質学雑 誌、97、39-52.
- 村田明広,1992:九州四万十帯,日向層群の作るデュー プレックス構造.徳島大学教養部紀要(自然科学), 26,59-75.
- 村田明広,1995:九州四万十帯日向層群の赤・緑色珪質 泥岩とデュープレックス. 地学雑誌,104,82-93.
- 村田明広, 1998a: 四万十帯のデュープレックスと低角 ナップ構造. 地質学論集, no. 50, 147-158.
- 村田明広,1998b:デュープレックスとメランジュ―造 山帯にみられる特徴的な地質構造と地質体―. 土と基 礎,46(2),13-16.
- 中村光一, 1989: Balanced cross-section 法と GGT. 月刊海洋, **21**, 85-89.
- 中村光一, 1990: '90年代前半の Extensional Tectonics. 月刊地球, **12**, 741-762.
- 中村光一, 1992: 反転テクトニクス (inversion tectonics) とその地質構造表現. 構造地質, no. 38, 3-45.
- 岡村行信・佐藤幹夫・渡辺真人・山本博文,1992:日本 海東部のインバージョン・テクトニクス. 構造地質, no.38,47-58.
- Park, R. G., 1997: Foundations of Structural Geology, 3 rd Ed., 202 p, Chapman & Hall.
- Ragan, D. M., 1985: Structural Geology An Introduction to Geometrical Techniques . 3rd Ed., 393p, John Wiley & Sons.
- Ramsay, J.G., 1992: Some geometric problems of ramp-flat thrust models. *In* McClay, K.R., ed.: *Thrust Tectonics*, 191–200, Chapman & Hall.
- Ramsay, J. G. and Huber, M. I., 1986: The Techniques of Modern Structural Geology, Vol. 2, Folds and Fractures. 309-700, Academic Press.
- 坂井 卓・西 弘嗣・斎藤常正・中世古幸次郎・西村明子,1984:九州四万十帯古第三系の微化石層序.斉藤常正・岡田尚武・海保邦夫編:日本の古第三系の生層序と国際対比,総合研究成果報告書,95-112,山形大学理学部.
- Sample, J. C. and Fisher, D. M., 1986: Duplex accretion and underplating in an ancient accretionary complex, Kodiak Islands, Alaska. *Geology*, 14, 160–163.
- Sample, J. C. and Moore, J. C., 1987: Structural style and kinematics of an underplated slate belt, Kodiak and adjacent islands, Alaska. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **99**, 7–20.
- シェリング, D.D. (在田一則訳),1991:前縁褶曲一衝上 帯におけるバランス断面の作成. 構造地質, no. 37,

75-87.

- Silver, E. A., Ellis, M. J., Breen, N. A. and Shipley, T. H., 1985: Comments on the growth of accretionary wedges. *Geology*, 13, 6-9.
- Suppe, J., 1983: Geometry and kinematics of faultbend folding. *Amer. Jour. Sci.*, 283, 684-721.
- Suppe, J., 1985: Principles of Structural Geology. 537 p, Prentice-Hall.
- 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.
- 高橋 修・石井 醇,1992:関東山地四万十帯の大滝層 群一関東山地四万十帯白亜系の変形過程とデュープ レックス構造一.埼玉県立自然史博物館研究報告, 10,11-28.
- 竹下 徹, 1982: 宮崎県南那珂山地北部の四万十層群の

層序と構造、地質学雑誌、88、1-18、

- Tanner, P. W. G., 1992: The duplex model: Implications from a study of flexural-slip duplexes. In McClay, K. R., ed.: Thrust Tectonics, 201-208, Chapman & Hall.
- Tokunaga, T., 1992: Duplexing and intraprism deformation of the Paleogene Shimanto Supergroup in western Shikoku, Southwest Japan. *Tectonics*, 11, 1168–1179.
- Williams, G. and Chapman, T., 1983: Strains developed in the hangingwalls of thrusts due to their slip/propagation rate: a dislocation model. *J. Struct. Geol.*, 5, 563-571.
- Woodward, N. B., Boyer, S. E. and Suppe, J., 1989: Balanced Geological Cross-sections: An essential technique in geological research and exploration. *IGC Short Course*, **6**, 144 p, Amer. Geophys. Union.