

Balanced Cross Section と Duplex

村田 明 広*

Balanced Cross Section and Duplex

Akihiro MURATA

I. はじめに

ナップの卓越する地帯に限らずどの地帯でも、地質構造を正しく理解するためには、より正確な断面図を作成する必要がある。地表で得られた地層や断層の走向・傾斜を地下深くまで外挿するだけでは、正しい断面図を描いているとは言えない。また、ある一定の深さまでの断面図を描き、その下を白く抜いた断面図も不完全であり、真に地質構造を表しているとは言えない。古くから利用されているバスク法と呼ばれる断面図作成法は、地層境界をすべて円弧に近似するものだが、地層の傾斜が極めてゆるい場合の地表付近においてしか有用でなく、ある一定より深くなると全く架空の断面図ができあがってしまう。

より正確な断面図を作成したいという要請は石油掘削を効率よく行いたいという石油会社から出された。掘削地点を決めるためには地質断面図が最も基礎的で重要なデータとなる。石油があたらなかった時の時間と経費の莫大な損失を考えると、正確な断面図を作成することは地質構造を正しく理解するだけでなく経費の節減につながる。

ここで紹介する Balanced Cross Section (DAHLSTROM 1969) という断面図の作成法 (WOODWARD *et al.* 1985) は、主に北米コルディレラで考え出されたもので、非常に成功を収めており、最近の一般的な構造地質学の教科書でも取り上げられている (SUPPE 1985; RAGAN 1985; RAMSAY & HUBER 1986)。これは断面図の中に描かれている褶曲や断層などの変形を元にもどした時に、変形前の層序断面図に過不足な

く復元できるように作成されている (第5図参照)。水平な地層が横たわっていた元の状態から現在の地質構造に至るまでには、断層の動きや変位量・褶曲のでき方などに多くの幾何学的な制約が存在する。それらを十分に考慮に入れないで断面図を作成すると、あり得ないような断層の動きがでてきたり、全く復元不可能な断面図になってしまいがちである。balanced という言葉は作成された断面図と変形前の層序断面図が、うまく釣合がとれているということから使われている。

Balanced Cross Section (以下 BCS と略) が最も威力を発揮したのはナップテクトニクスの分野であり、BCS を作成することによりナップ構造を再検討し、短縮量の最小値をより正確に計算したり (HOSSACK 1979)、幾何学的な制約のためにはならない構造で今まで見逃されていたものが認識されたりしている。特にナップの卓越する地帯にみられる duplex を正しく理解するためには BCS 作成の考えは非常に有効である。この duplex という構造は2つの衝上断層に挟まれた部分に、より小規模な衝上断層によるブロックが瓦を重ねたように積み重なっているものである。これは覆瓦状構造のでき方や、ある層準の地層を重ね合わせて衝上岩体の厚い集合体を作る機構として非常に注目されているものである。

BCS はナップテクトニクスだけでなく展張テクトニクスの分野でも適用され、その有効性が確かめられている (GIBBS 1983; COWARD & GIBBS 1986)。

ここでは BCS の作成法やその適用など一般的なことについて述べ、その考えを生かして duplex

* 東京大学理学部地質学教室 Geological Institute, University of Tokyo

について述べる。また、BCS といういわば map-pable なスケールの断面図に出てくる duplex に観という構造を正しく理解するために、露頭で実際察される小スケールの duplex について例を上げて説明し、duplex の重要性について述べる。

この紹介文および口絵写真の露頭の一部は在英中に Royal Holloway and Bedford College の Anthony J. BARBER 教授や地球科学総合研究所の西代 孝氏に教えていただいた。また、地質調査所の中村光一氏には種々議論していただいた。これらの方々に深く感謝する。

II. Balanced Cross Section

BCS を作成するにあたっては主に次の 3つの仮定をする。

- (1) 褶曲・断層形成時の変形は平面歪である。
- (2) 変形による地層の体積変化はない。
- (3) 褶曲は平行褶曲である。

(1) の仮定は褶曲軸や衝上断層・正断層の走向に平行な方向の歪はゼロであることを意味している。さらに、(2) を仮定することにより、褶曲軸・断層の走向に直交する方向に断面図を作成すると、地層の動きをすべて断面図内でとらえられ、変形前の層序断面図と変形後の断面図とは面積が同じであることになる。また、断面図内で地層境界を表す線の長さは変形の前後で変化しない。これにより、断面図内で各層準の地層の長さを計ることによって、すべての層準の地層が過不足なく層序断面図に復元できるかどうかチェックすることができる。(3) の仮定は経験則に基いている。これらの 3つの仮定は厳密に自然界で成り立つわけではないが、片理や劈開を伴う変成帯を除くとほぼ成り立つと考えてよいと思われる。もちろん、上にあげた 3つの仮定の成り立たない地帯では BCS を作成することではできない。

BCS 作成の手順としては主に次の 4段階がある。

(1) 断面線を適切な位置に設定する。これは褶曲軸や衝上断層・正断層の走向に直交に断面を切ることを意味する。つまり褶曲や断層形成時に地層が移動する方向に平行に断面図を切るということである。こうすることにより、断面図内だけの

地層の動きを考えればよいことになる。衝上断層を平面図でみた時、中央部で変位量が最大になり両端に向かって小さくなっていくため、弓状の形態をとることが多い。このような場合は弓状の中央部を通る断面を切らなければならない。また、褶曲軸がプランジしている地域では、上述のことがみとされないため、BCS を作成することは極めて困難となる。同様に断面を横切るように横すべり断層がある時も BCS の作成は困難となる。

(2) 断面図の両端を層面すべりのないところに設定する。これは主要な背斜あるいは向斜のヒンジか、褶曲帯から相当離れて変形の影響のないところに設定する。

(3) 設定した断面図の両端の間で、すべての層準の地層の長さが一定であるようにする (line length balancing)。これはキルビメーターや糸を用いて曲線部を計ることによりチェックしていく。この時、侵食されてしまった地層も考慮に入れなければならない。もし長さが一定でない場合は、ある層準の地層が消滅したり長く付け加わったりしていることになり、あり得ない断面図となる。地下での断層の傾斜が間違っていないか、断層や褶曲が見落とされていないかなどの理由を考え、試行錯誤を繰り返して断面図を作成する。

(4) 断層・褶曲を変形前の状態にもどした時に過不足なく層序断面図に復元できるかどうか、また、地層の動きを考えに入れても合理的に元へもどせるかどうかを確認する。層序断面図にも後で形成される断層を描き入れ (第 5 図)、変形の前で断層によって囲まれた部分の面積が変わっていないかどうかをプランニメーターを用いてクロスチェックする (area balancing)。

これらの作業の過程で、扱っている地域で断層が地下でどのような形態をとっているかを予想することは非常に重要である。これは地表で得られる地層の走向・傾斜は、地下での断層の形態に依存することが多いことによる。特に衝上断層帯においては、地表付近で高角度の衝上断層は地下でほとんど水平になっていることや、この衝上断層が次項で述べるように階段状の形態を持つことが多い点など断面図を描く際に考慮されなければならない。

以上のようにして、すべての層準の地層が断面図上で同じ長さになり、表現されている層準・褶曲が合理的なものであれば、層序断面図に復元可能となりこの断面図はバランスしていると言える。この場合、侵食された地層の量の最小値しか見積れないため、復元された層序断面図は最小の長さのものとなる。このようにして得られたBCSは必ずしも真の断面図を表すとは限らず、あくまでも可能性のあるひとつの断面図に過ぎない。しかしながら、このプロセスを経していない断面図は、基本的な地質構造を表現しているにしても、元の状態に復元できない不完全な断面図であることを意味しており、明らかに多くの矛盾点を含んでいる。バスク法で描かれている褶曲した地層をそのままの長さでまっすぐにすると、層準により地層の長さが異なるため、決して元の層序断面図にはならない。

III. Duplex の形成過程

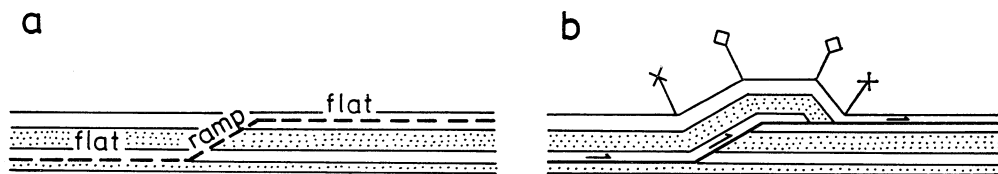
duplex の形成過程について述べる前に、成層した水平な地層があるところで形成される衝上断層の一般的な形態について述べなければならない。ここでは、衝上断層は地層に平行な部分と、それと約 30° 斜交する部分とがつながって階段状の形態を持ち、結果としてより上位の地層を切っていくことが知られている(第1図a)。地層に平行な部分の衝上断層は泥岩層などのインコンピテント層を利用し、砂岩・石灰岩層などのコンピテント層を横切る時に傾斜した部分の衝上断層が形成される。これはさらに上位の層準のインコンピテント層で水平な部分の衝上断層を作る。このような階段状の形態を持つ衝上断層で地層に平行な部分が flat、傾斜した部分が ramp と呼ばれている(第1図a)。ここでは ramp の前後につらなる flat を低位および高位の flat として

区別する。

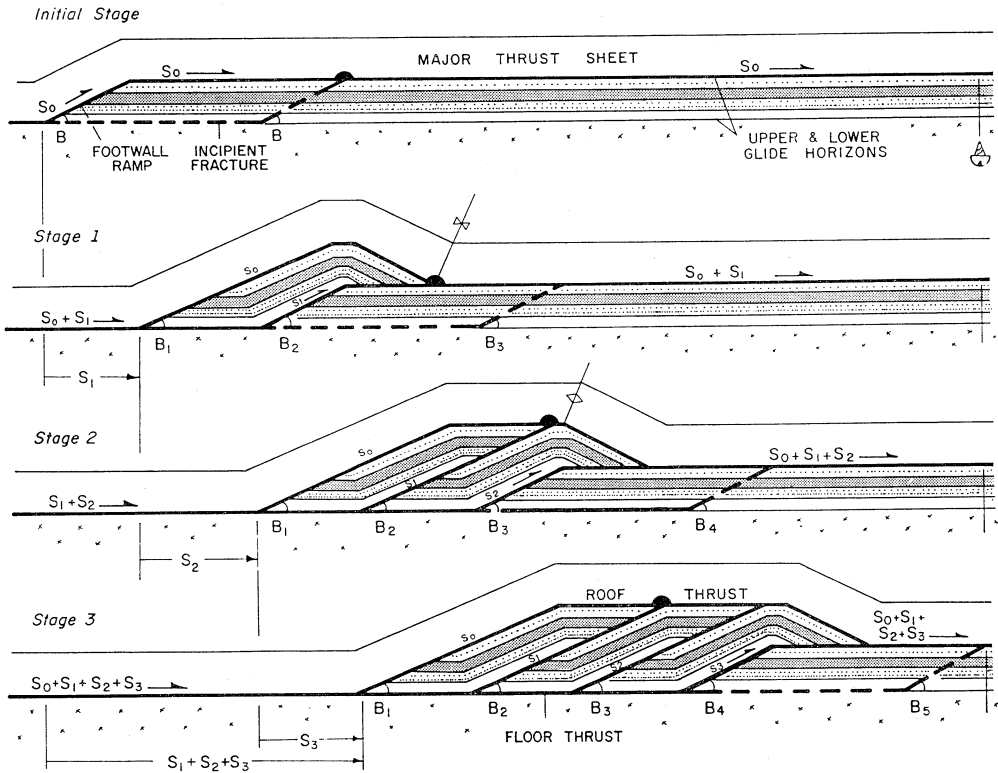
このような屈曲した衝上断層が存在する時、低位の flat 上の地層が ramp 上を衝上していくと、上盤の地層は低位の flat と ramp の境界のところにヒンジを持つ向斜を形成する(第1図b)。また、初め ramp の上盤に位置していた地層はウェッジ状の形態を持っているため、高位の flat 上に移動してきた時に衝上方向に傾斜することによって背斜・向斜が形成される(第1図b)。上盤がある一定以上動いた時には、この背斜は頂部が水平となり、軸面の傾斜の異なる2つの背斜となる。つまり、階段状の衝上断層が形成され上盤が移動することにより、幾何学的な制約から2向斜・2背斜が形成されることになる。このような断層の屈曲に伴う褶曲は fault-bend fold (SUPPE & CHANG 1983) と呼ばれている。

BCS を作成するということは、このような幾何学的な制約による地質構造を見落とさずに認識することにより、より正確で真実に近い断面図を作成しようとするのである。実際には地表で観察される褶曲構造から、地下に階段状の衝上断層の存在が推定される場合が多い。

duplex は flat (低位)-ramp-flat (高位) の形態をとる衝上断層で形成される (BOYER & EL-LIOTT 1982)。この位置ですでに述べたような状態に衝上した後、低位の flat の衝上断層が前方に延び、そこから新たな ramp を形成して高位の flat に合流することによって新しい衝上断層が形成される(第2図初期段階)。この時最初に形成された ramp とそれに続く高位の flat の一部は活動をやめてしまい、新しい衝上断層の上盤の一部として移動する。新しい衝上断層に沿って上盤の地層が移動すると、新たに2向斜・2背斜が形成されるが、前の段階で形成されていた前方の背斜・向斜は地層が後方に回転させられることに



第1図 階段状の形態を持つ衝上断層。上盤が移動すると背斜・向斜が形成される。



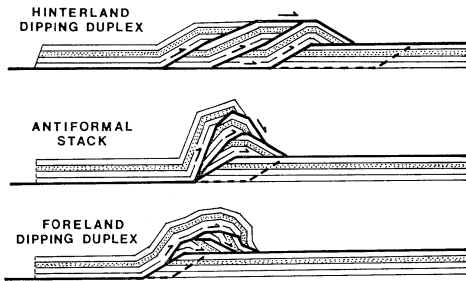
第2図 duplex の形成プロセス. BOYER & ELLIOTT (1982) による。

より消滅してしまう(第2図第1段階)。

このようにして次々に新しい ramp が形成され、地層が積み重なっていくと(第2図第2, 3段階), 2つの衝上断層の間に、より小規模な衝上断層によるブロックが瓦を重ねたように積み重なった構造が形成され、これが duplex と呼ばれている。高位と低位の衝上断層はそれぞれ roof thrust, floor thrust と呼ばれその間の小規模な衝上断層によって境されたブロックはそれぞれ horse と呼ばれている。floor thrust は duplex 形成時につねに活動しているが、roof thrust は手前側の部分から次々に活動をやめてしまう。また、roof thrustの方が floor thrust よりも変位量が大きいため、つまり主要な衝上断層であることが一般的で大規模な衝上断層の下に duplex を伴うことが多い。duplex を作る小規模な衝上断層は、前方つまり衝上方向に位置するものほど後になって形成されている。このような衝上の順序は、新しい衝

上断層が古い衝上断層の下盤側に形成され、新しい衝上岩体が古い衝上岩体の上に乗せて衝上することからピギーバック (piggy-back) スタイルと呼ばれている。

duplex は horse の長さそれぞれの衝上断層の変位量の関係で積み重なり方が違うため、hinterland-dipping duplex, antiformal stack, foreland-dipping duplex の3つに分けられる(第3図)(BOYER & ELLIOTT 1982)。これまで述べてきたものは hinterland-dipping duplex である。もし、それぞれの衝上断層の変位量が horse の長さにはほぼ等しくなると、horse が同じ位置に積み重なるため、antiformal stack が形成され、上盤の地層は大きい背斜構造を形成する。horse の長さに対してそれぞれの衝上断層の変位量が十分に大きいと foreland-dipping duplex が形成される(BOYER & ELLIOTT 1982; MITRA & BOYER 1986)。



第3図 3種類の duplex. horse の長さ
と衝上断層の変位量の関係により、形
態が異なる。MITRA & BOYER
(1986) の図より作成。この図では
変位量が一定で horse の長さが異
なる。

IV. 露頭で観察される小規模な duplex

duplex でも小スケールのものは、露頭でその全体像を観察することができる。露頭スケールの duplex の形態をよく理解することは、断面図のようないわば mappable なスケールの duplex を明らかにするうえで非常に役に立つ。ここではいくつかの露頭スケールの duplex について、露頭写真を利用して紹介する。ここに紹介するのはすべて hinterland-dipping duplex である。

口絵写真1はフランス中央部 Murat の北東3 km で見られる duplex で新第三紀の凝灰岩と凝灰岩質泥岩とが覆瓦状構造を作っている。floor thrust は凝灰岩質泥岩中に見られるが、破碎はほとんど見られず、地層堆積後まもない時に形成されたような見かけを呈している。ramp の部分でも衝上断層は破碎を伴わない。本文写真1は口絵写真1の左方にあたり、左上部の黒っぽい部分は玄武岩の溶岩流で、この直下に roof thrust が位置していると思われる。この露頭で見られる ramp の傾斜は flat に対していずれも約30°であり、それに伴う向斜構造が典型的に見てとれる。また ramp から flat に移行するところで背斜構造が見られる(本文写真1)。flat と ramp の移行部では断層が徐々にその傾斜を変えるため、いわば角のとれた階段状になっており、それに伴う褶曲もヒンジ部は曲面を呈する。その結果それぞれの horse は引き延ばしたS字状の形態を持

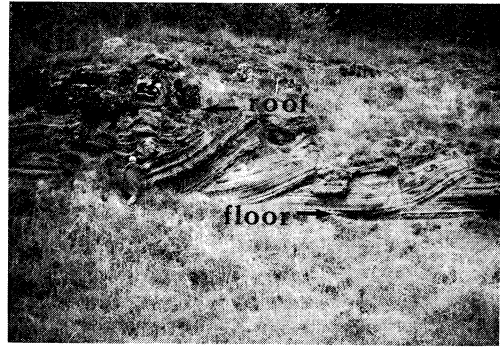


写真1 Murat の duplex 口絵写真の左側

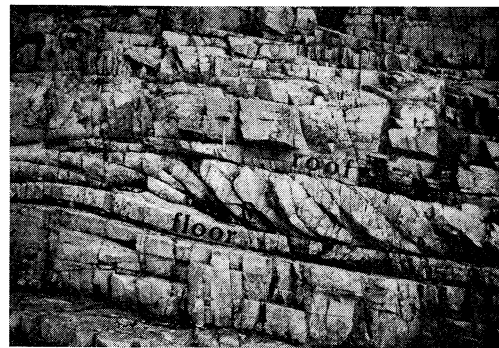


写真2 Whiten Head の duplex

ている。この duplex の分布する地域全体は衝上断層帯に位置するわけではない。それゆえこの duplex は玄武岩流が冷却した後、重力滑動するに伴って形成されたものと考えられる。

口絵写真2はスコットランド北西部 Whiten Head の南南西2.5km の Moine thrust zone で見られるもので、同一層準のカンプリア系コーツァイトが少なくとも10数回繰り返して積み重なっている。roof thrust, floor thrust はもともと薄い泥岩層中に位置していたと考えられる。horse の境をなす小規模な衝上断層は、roof thrust, floor thrust に対して約30°の傾斜を持ち、それらに漸近して合流しているが、それらが形成された時 ramp は flat に対して約15°から20°傾斜していたと考えられる。それぞれの horse は断面でレンズ状の形態を持っており、わずかに逆S字状になっているのが認められる。写真ではそれぞれの horse の中の層理面が見にくいのははっきりしないが、flat-ramp の移行部に伴う向斜・

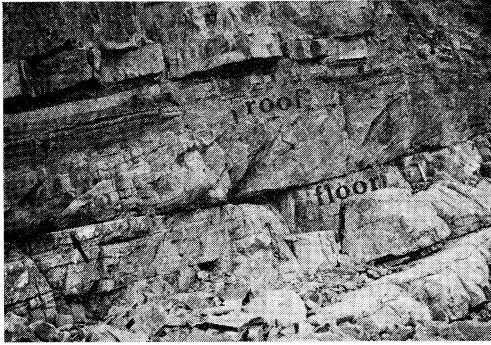


写真3 Bude の duplex 左方へ向かって duplex が消滅する

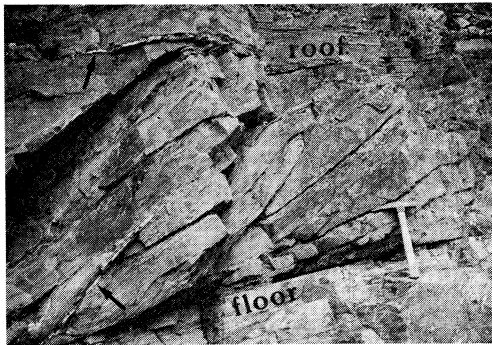


写真4 Bude の duplex 中央部のクローズアップ

背斜が認められる。horse の大きさはほぼそろっているが、horse によっては floor thrust と接していないものがある（口絵写真2 中央部やや右側）。口絵写真2の左側では horse が長くなり、また衝上断層の変位量も小さくなることにより、duplex が消滅していくのが観察される。結果的に duplex の部分だけがゆるやかにふくらんでいるのがよくわかる（本文写真2）。

口絵写真3はイングランド南西部 Bude の南南西2.5km のもので石炭紀の砂岩卓越層中に位置し、砂岩層が少なくとも10数回繰り返している。duplex の最も厚い部分でも約1m である。本文写真3は口絵写真3のもう少し左側の部分が示されているが、それぞれの horse が右側より大きくなり、変位量も小さくなっている。duplex のでき初めも、消滅する時と同じように徐々に horse の大きさ・衝上断層の変位量が変化しているようである。duplex は全体として細長いレン

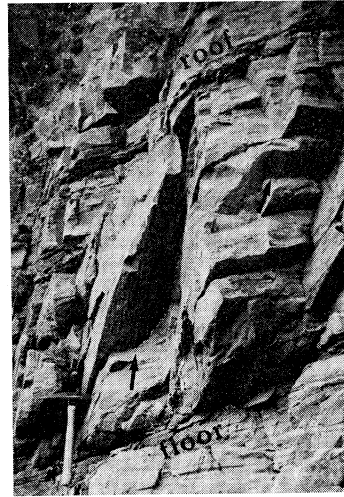


写真5 Bude の duplex 小規模な衝上断層面にみられる条線（写真4を下側からみたもの）

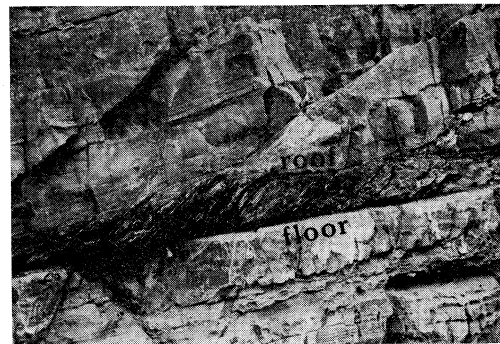


写真6 Bude の duplex の floor thrust に伴う小規模な duplex（写真3矢印）

ズ状の形態をとっている。それぞれの horse は、もともとの floor thrust と roof thrust にはさまれた地層の厚さ（本文写真3の左部分）よりも薄くなっている（本文写真4）。このことは、厚い horse がさらに断層でいくつかの薄い horse に分かれたことを示している。roof thrust や floor thrust それに horse を境する小規模な断層には破碎がみられ、石英細脈を伴ったり（本文写真4 矢印）、本文写真5のように断層面に明瞭な条線（矢印）も観察される。floor thrust の一部では、石英細脈を伴った破碎岩が、より小規模な du-

plex を作っている(本文写真6)。floor thrust は duplex 形成中はつねに活動しているため、初期の段階で形成された砕砕帯が、後になってそれ自身が duplex を作ったものと考えられる。

本文写真7, 8は同じく Bude の南南西3.2km において箱形背斜構造の翼部に形成された duplex で、層厚約30cmの砂岩層が少なくとも4回繰り返し重なっている。これは翼部で生じた層面すべりに起因するものと考えられ、変位量が小さいために何回も繰り返す duplex を作ることはない。

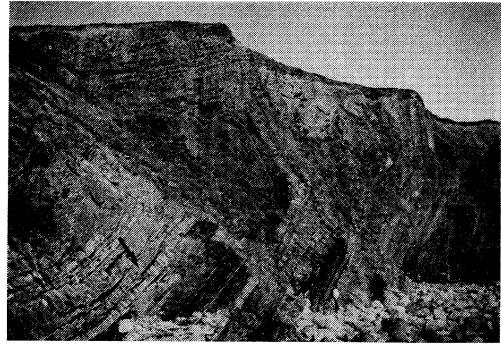


写真7 Bude の箱形褶曲

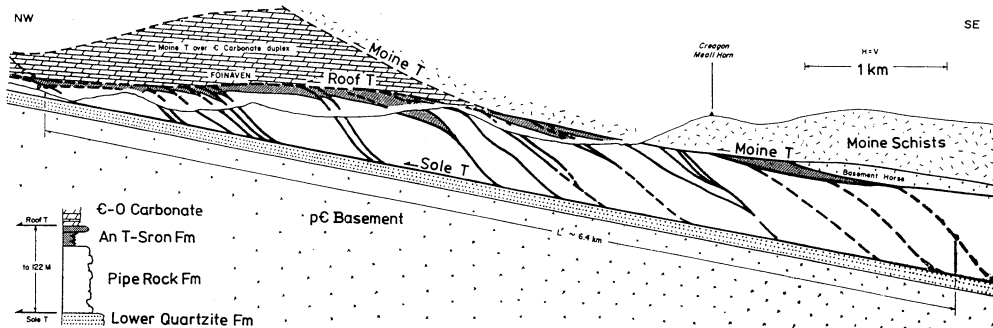
V. 大スケールの duplex

断面図を作成してみても分かる大スケールの duplex もカレドニアやアパラチア、北米コルディセラなどの衝上断層帯で確認されている。すでに露頭スケールの duplex で明らかとなったように、2つの衝上断層の間で空間が生じてしまったり、余分な地層が付け加わったりすることはない。大スケールの duplex でも同様のことが起こっていると考えられるため、その全体像を明らかにするための断面図は変形前に復元可能ということがよくチェックされた BCS でなければ正しく理解されているとは言えない。

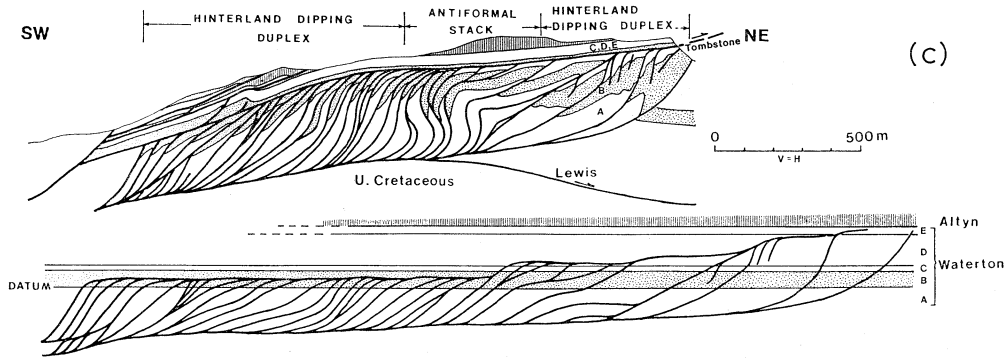
Moine thrust zone の Foinaven duplex (ELLIOTT & JOHNSON 1980) は古くから覆瓦状構造として記載されていたものである(第4図)。floor thrust は Sole thrust と呼ばれており、roof thrust は一部 Moine thrust であり、一部は



写真8 褶曲に伴う duplex
写真7の下部左側矢印



第4図 Moine thrust zone の Foinaven duplex. BOYER & ELLIOTT (1982) の図を一部簡略してある。



第5図 北米コルディレラの Haig Brook Duplex. MITRA & BOYER (1986) による。復元された層序断面図に後で形成される衝上断層が描かれている。

Moine thrust の下盤のカンブリア-オールドビス紀の石灰岩層の直下の断層にあたる。この duplex ではカンブリア紀の Pipe Rock Formation などのコアタイトとその上の泥質岩が繰り返し積み重なっている。

北米コルディレラの Haig Brook Duplex では Waterton Formation が何回も繰り返し積み重なっている (MITRA & BOYER 1986) (第5図)。それぞれの horse は断面図でほぼ同じ長さを持っており、南西部で hinterland-dipping duplex を作っている。中央部では horse の長さに変化はないが、小規模な衝上断層の変位量が horse の長さと同じ程度に大きいために antiformal stack を作っている。これはさらに北東方向へ行くと変位量が減少するために hinterland-dipping duplex に移り変わっている。これに復元された層序断面図が付けられており、それに後になって形成された衝上断層が描かれている (第5図)。

アパラチアの Mountain City Window でみられる duplex は、horse の長さに対してそれぞれの衝上断層の変位量が十分に大きいために、foreland-dipping duplex となっている (MITRA & BOYER 1986)。

VI. おわりに

Balanced Cross Section は作成の仮定が問題ない地帯に有効であり、変形前の層序断面図に復

元可能でなければならないという考えは、非常に理にかなったものであろう。しかしながら、厳密に平面歪の変形が起こるところは自然界にはそうあるとは思われず、また、地層の体積も変化することが知られている。褶曲も平行褶曲だけが起こるとは考えにくい。さらに、できあがった BCS はあくまでもひとつの可能性のある断面図であり、バランスしているからと言ってそれが真の地質構造を表現しているとは限らないことをつねに頭にとどめておく必要がある。また、BCS が適用される範囲をこえた地質体で作成されている場合が多く、どこでも似たような断面図ができあがってしまっているが、これは手法による同一性によるもので、地質条件が同一ではないという痛烈な批判もある (RAMSAY & HUBER 1986, p. 557)。

しかしながら、最初の仮定が許される範囲の地帯で、BCS を作成することは duplex の認定などのように地下構造の推定に非常に役に立つことは明らかである。この仮定が成り立つ地質体かどうかは、つねに露頭でチェックを行い、また露頭で観察される褶曲や断層の幾何学を断面図作成に生かさねばならない。逆に、BCS 作成の考えは露頭観察にも生かされ、例えば衝上断層の flat-ramp の形態から必然的に生じる地質構造などを観察する時に理解の手助けとなる。日本でも変成帯を除く多くの地帯でこの手法を用いて断面図を再検討してみる必要があると思われる。特に、チ

ャート・碎屑岩層が衝上断層で繰り返している美濃-丹波帯や秩父帯・三宝山帯について再検討する必要がある。

BCS の考えが生かされる例としてあげた duplex は、カレドニア・北米コルディレラ・アパラチアなどの衝上断層帯だけでなく、現在のサブダクション帯などでもその存在が推定されている (COWAN 1985; SILVER *et al.* 1985)。これは海溝にたまった大量の堆積物を大陸斜面下底に集積させる機構として duplex 形成が非常にありそうなことによっている。従来の付加体モデルで説明しきれなかったことも、この考えによりうまく説明されることがあるかもしれないが、その存在を認定するのは地震波断面図に頼らざるを得なく、非常に困難である。加賀美ほか (1983) の多重階層デホルマンは検討してみる必要があろう。

文 献

- BOYER, S. C. and ELLIOTT, D. (1982) : Thrust systems. *Am. Assoc. Petr. Geol.*, **66**, 1196-1230.
- COWAN, D. S. (1985) : Structural styles in Mesozoic and Cenozoic melanges in the western Cordillera of North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **96**, 451-462.
- COWARD, M. P. and GIBBS, A. D. (1986) : Structural interpretation with emphasis on extensional tectonics. JAPCC Course Notes, no. 49, 362p.
- DAHLSTROM, C. D. A. (1969) : Balanced cross sections. *Can. J. Earth Sci.*, **6**, 743-747.
- 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 cross-sections in the calculation of orogenic contraction, a review. *J. Geol. Soc. Lond.*, **136**, 705-711.
- 加賀美英雄・塩野清治・平 朝彦 (1983) : 南海トラフにおけるプレートの沈み込みと付加体の形成. *科学*, **53**, 429-438.
- MITRA, G. & BOYER, S. E. (1986) : Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. *J. Struct. Geol.*, **8**, 291-304.
- RAGAN, D. M. (1985) : *Structural Geology, An Introduction to Geometrical Techniques*, 3rd edn., John Wiley & Sons, New York, 393p.
- RAMSAY, J. G. and HUBER, M. I. (1986) : *The techniques of Modern Structural Geology, Vol. 2, Folds and Fractures*. Academic Press, London, 700p.
- 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. (1985) : *Principles of Structural Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 537p.
- SUPPE, J. and CHANG, Y. L. (1983) : Kink method applied to structural interpretation of seismic sections, western Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, **19**, 29-49.
- WOODWARD, N. B., BOYER, S. E. and SUPPE, J. (1985) : *An outline of balanced cross-sections*. In "Studies in Geology", 2nd edn. University of Tennessee, Department of Geological Science, 170p.

後記 : スコットランドの Whiten Head の duplex は最近 BUTLER (1987), *J. Geol. Soc. Lond.*, **144**, 619-634. により紹介されたものと同じ duplex である。

(63年1月30日受付, 2月26日受理)