

12. 造山帯前縁部の地質構造

造山帯の前縁部に位置する衝上断層帯は、多くの衝上断層とそれに伴う褶曲によって、地層が側方に著しく短縮している地帯である。衝上断層帯の地質構造とその形成過程を明らかにするためには、詳細な地質図とともに、地下構造を最もよく表す正確な断面図が必要となる。バランス断面図の作成は衝上断層帯の地質構造の解明に成功を収めてきた。ここではその概念について紹介し、衝上断層帯で最も重要なデュプレックス構造について、その形成過程とモイン衝上断層帯などでの実例を示し、衝上断層の形成順序について概説する。

12.1. バランス断面図の概念

バランス断面図 (balanced cross-section) (Darlstrom, 1969) は、断面図のなかに描かれている地層が、褶曲や断層などの変形を元にもどしたとき、変形前の地層が積み重なった状態に過不足なく復元できるようにつくられている。断層の形態や変位、褶曲のつき方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常に念頭において断面図を作成しなければならない。バランス (balanced) という言葉は作成された断面図内の地層と変形前の状態の地層とが、つり合っているという意味から使われている。バランス断面図の概要に関しては村田(1988)が簡単に紹介しており、研究史とその重要性に関しては中村(1989)がまとめている。

バランス断面図作成時の基本的な仮定は次の三つである。(1) 変形は平面歪である。これは、地層が断層や褶曲の変形を受けるとき、地層の移動が一つの平面にすべて平行であり、この面に直交する方向での歪はゼロであるという意味である。この仮定により、変形時の地層の動きを、褶曲軸や断層の走向に直交して切られた断面図内だけで考えればよいことになる。(2) 変形による地層の体積変化はない。これにより、変形前後の地層のバランスをチェックできる。(3) 褶曲は平行褶曲である。これは、褶曲した地層は層理面に直交した方向で厚さが変化しないとい

うことであり、衝上断層帯で観察される褶曲に対する経験則である。実際にはこれら三つの仮定にはずれる場合でもそれぞれの影響を見積もって断面図が作成される。

バランス断面図の作成時には、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、変形前の地層が積み重なった状態と同じ長さになるようにつくられる。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であるようにつくられる (Woodward・他, 1989; Marshak・Mitra, 1988)。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十分チェックされなければならない。バランス断面図は存立可能で容認しうる断面図であるが、真の地質構造を示すとは限らないことに注意する必要がある。

12.2. 衝上断層の階段状形態

衝上断層は傾斜が 45° 以下の断層で、断層の上側のブロック (上盤) が下側のブロック (下盤) に対して相対的に上方に移動する断層である。衝上断層に沿って、古い地層が新しい地層の上ののし上げて上下に重なり、地層は上方に厚化し側方に短縮する。衝上断層帯は造山帯の前縁に位置し、多くの衝上断層群が帯状に分布しており、地層が全体として側方に著しく短縮した地帯である。図 12.1 は北アメリカ、コルディレラ (Cordillera) 造山帯の構造図であり (Price, 1986)、衝上断層の上盤側つまり傾斜方向に鋸の歯のような模様がつけられている。ここではまず衝上断層の一般的な形態について述べる。

地層が水平に横たわっているとき、側方に圧縮を受けると、その結果形成される衝上断層は平面的でなく、一般的に地層に平行な平坦部 (flat) と、地層を斜めに約 30° 切り上がる傾斜部 (ramp) とが連なって階段状の形態をとる (図 12.2-a)。平坦部は泥岩層などのインコンピテント (incompetent) 層を利用し、傾斜部は砂岩・石灰岩層などのコンピテント (competent) 層を横切るときに形成される。これはさらに上位の層準のインコンピテント層で平坦部

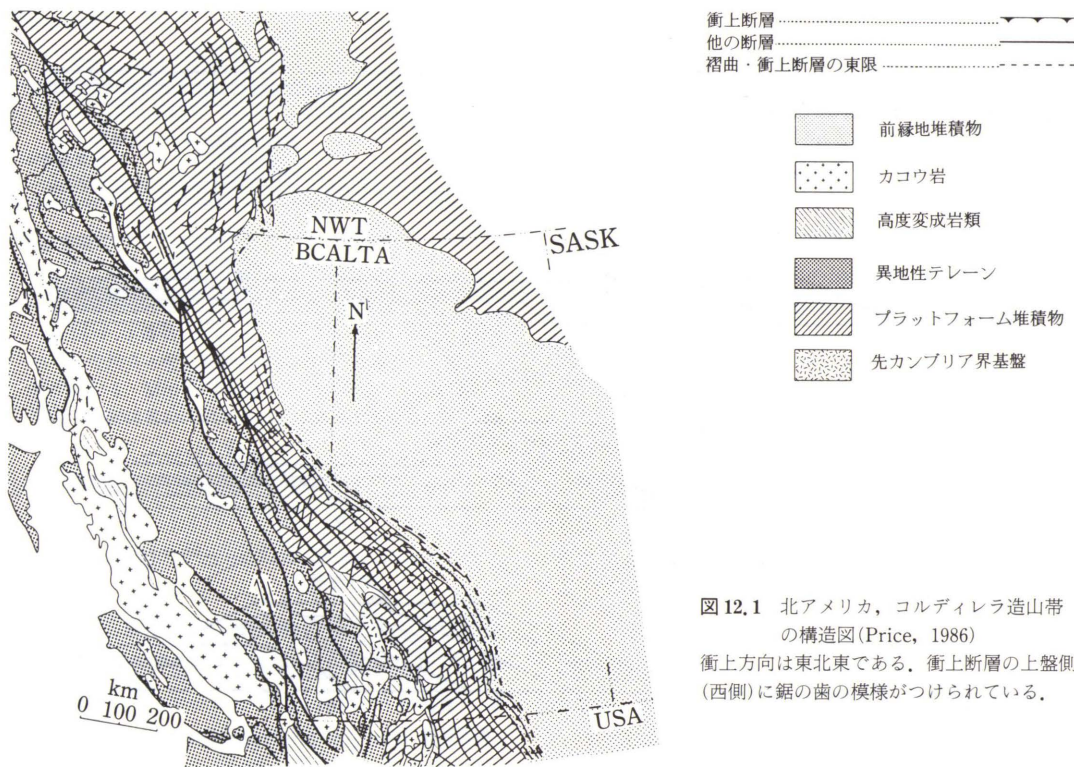


図 12.1 北アメリカ、コルディレラ造山帯の構造図(Price, 1986)
衝上方向は東北東である。衝上断層の上盤側(西側)に鋸の歯の模様がつけられている。

をつくる。このようにして、衝上断層はより上位の地層を切っていく、造山帯の外側へ延びていくことが経験的に知られている。

ひと続きの平坦部(低位)-傾斜部-平坦部(高位)の形態をもつ衝上断層があるとき、上盤の地層は階段状の衝上断層の上を移動することになる。このとき、上盤の地層は断層との間に空白をつくることなく移動し、また断層の上で重複することもない。その結果、衝上断層の形態と上盤の地層の下限の形態に制約されて、上盤に2向斜・2背斜を形成する(図 12.2 b)。これは全体として頂部の平らな背斜を示すため、傾斜部背斜(ramp anticline)とよばれている。衝上断層の下盤には変形の影響は現われない。

すでに述べたバランス断面図は、この逆の過程を

考えて元の状態に復元可能なようにつくられる。バランス断面図の作成とは、地表調査での地層や断層の走向・傾斜のデータから、上述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。実際には地表で観察される褶曲構造から、地下に階段状の形態をもつ衝上断層の存在が推定される場合が多い。

12.3. デュープレックスの形成過程

デュープレックス(duplex)という構造は、上下に重なった二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斜めに重ねたように配列しているものであり、衝上断層帯で多く確認されている。

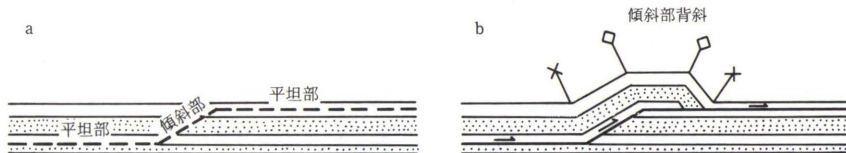


図 12.2 階段状の形態をもつ衝上断層と傾斜部背斜(村田, 1988)
上盤が移動すると2背斜・2向斜が形成され、全体として傾斜部背斜をつくる。

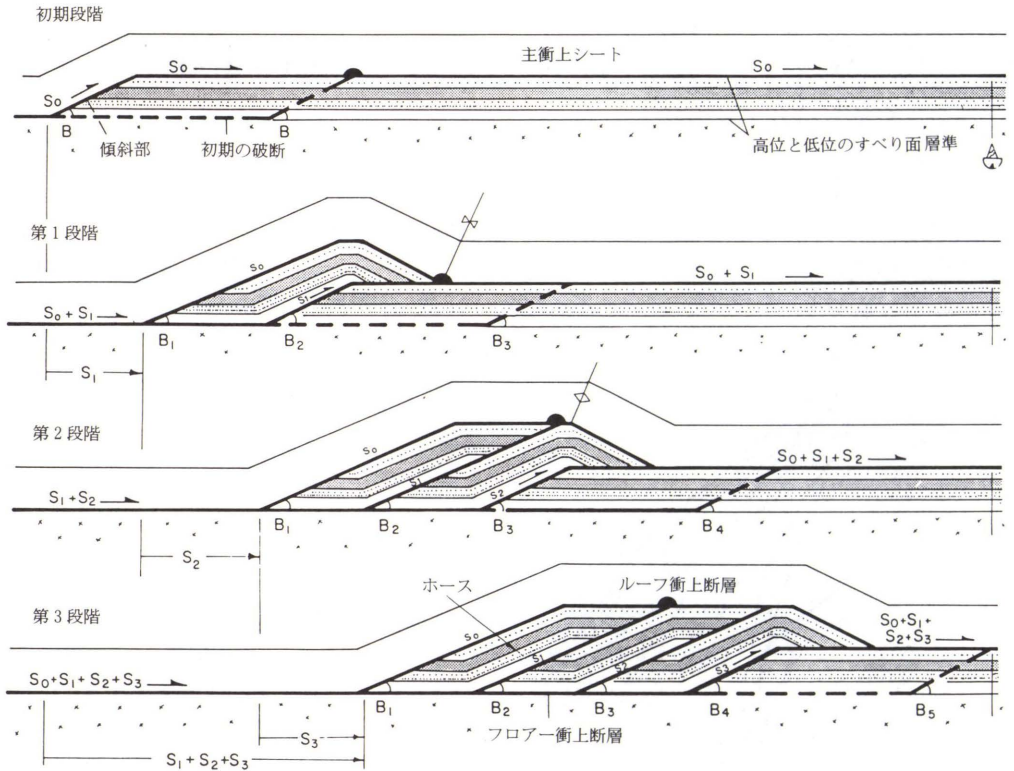


図 12.3 デュープレックスの形成過程 (Boyer・Elliott, 1982)

デュープレックスは階段状の形態をとる衝上断層が存在するときに形成される (Boyer・Elliott, 1982)。ひと続きの平坦部(低位)-傾斜部-平坦部(高位)の形態をもつ衝上断層で、上盤の地層が前項で述べた状態に衝上した後、低位の平坦部の衝上断層がまっすぐ前方に伸び、そこから新たな傾斜部を形成して高位の平坦部に合流する。このことによって新しい階段状の形態もつ衝上断層が形成される(図 12.3 初期段階)。このとき最初に形成された傾斜部とそれに続く高位の平坦部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より消滅してしまう(図 12.3 第1段階)。

このようにして次々と新しい傾斜部が形成され、地層が積み重なっていくと(図 12.3 第2, 3段階)、最終的に高位と低位の二つの衝上断層にはさまれて、断層で囲まれたブロックが瓦を重ねたように配

列する。これがデュープレックス構造で、高位の衝上断層はルーフ衝上断層(roof thrust)、低位のものがフローア衝上断層(floor thrust)、断層によって囲まれたブロックがホース(horse)とよばれる (Boyer・Elliott, 1982)(図 12.3)。ちなみにデュープレックスは北米の二階建ての集合住宅で、一階と二階がセットになっており、一戸に一つの屋根と一つの床があり、部屋(ホースにあたる)が二重に重なっているものである。

デュープレックスは、ルーフ衝上断層の存在が最も重要な認定要素となる。ルーフ衝上断層の認定できないものは、衝上断層群が上方で発散する覆瓦ファン(imbricate fan)と区別できないため、単に覆瓦状構造(imbricate structure)とよばれる。デュープレックスをつくる小規模な衝上断層は、前方(衝上方向)に位置するものほど後になって形成される。つまり、フローア衝上断層は常に活動しているが、ルーフ衝上断層は後方側から次々に活動を停止する。これは上盤の地層が次々に下盤の地層をはぎ取って衝上することを意味している。

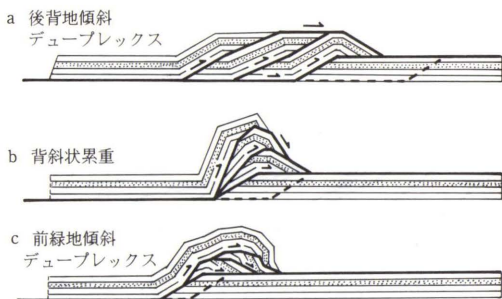


図 12.4 3種類のデュープレックス(村田, 1988)

ホースの長さや衝上断層の変位量により、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ホースの長さが異なる。

12.4. 3種類のデュープレックス

デュープレックスはホースの長さやそれぞれの衝上断層の変位量関係で、ホースの重なり方が異なるため3種類に分けられる。ホースの長さに対して変位量が小さいと、ホースが後方に傾斜する後背地傾斜デュープレックス(hinterland-dipping duplex)とよばれる(図 12.4 a)(Boyer・Elliott, 1982; Mitra・Boyer, 1986)。ホースの長さよりも変位量が大きいと、ホースが前方に傾斜するため、前縁地傾斜デュープレックス(foresland-dipping duplex)とよばれる(図 12.4 c)。これは、ルーフ衝上断層を

背斜状に褶曲させる。

ホースの長さや変位量がほぼ同じになると、ホースが同じ位置で次々と下方からはりつくため、背斜状累重(antiformal stack)を形成する。特に背斜状累重ではルーフ衝上断層とその上盤の地層は大きく背斜状に褶曲し、ルーフ衝上断層の前縁は前方に回転する。そのため、現在、ルーフ衝上断層の前縁は伸張断層のように、上盤の地層が傾斜方向に下降して変位する見かけを呈する(図 12.4 b)(Boyer・Elliott, 1982)。

12.5. 露頭スケールのデュープレックス

露頭スケールの小規模なデュープレックスは、その全体像を直接観察することができる。この形態を理解することは、バランス断面図内の大きなスケールのデュープレックスを解明するときに非常に役立つ。ここでは二つの露頭スケールの後背地傾斜デュープレックスについて、露頭写真を用いて紹介する。

フランス中央部(Murat)でみられるデュープレックスは、新第三紀の凝灰岩と凝灰岩質泥岩が、左から右に衝上している(村田, 1988)(図 12.5)。フロア衝上断層は凝灰岩質泥岩中にあり、破碎を伴わないことから、堆積後まもない時期に形成されたと考えられる。植生のためルーフ衝上断層はみられないが、この上位の玄武岩溶岩流の直下にルーフ衝上断層が位置していると考えられる(図 12.5)。この露頭

図 12.5 フランス中央部(Murat)で観察される露頭スケールのデュープレックス(村田, 1988)

フロア衝上断層は下部の凝灰岩質泥岩中に位置する。ルーフ衝上断層は植生のためみられない。

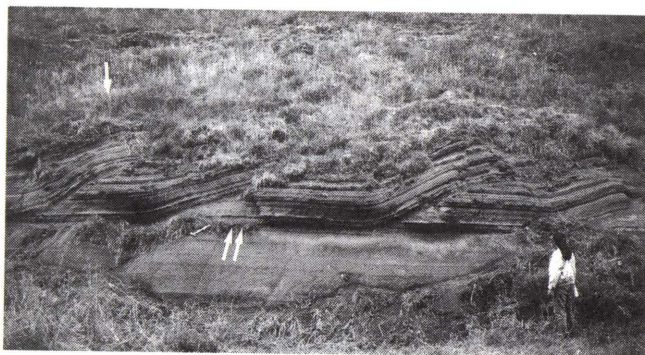


図 12.6 スコットランド北西部(Whiten-Head)で観察される露頭スケールのデュープレックス(村田, 1988)



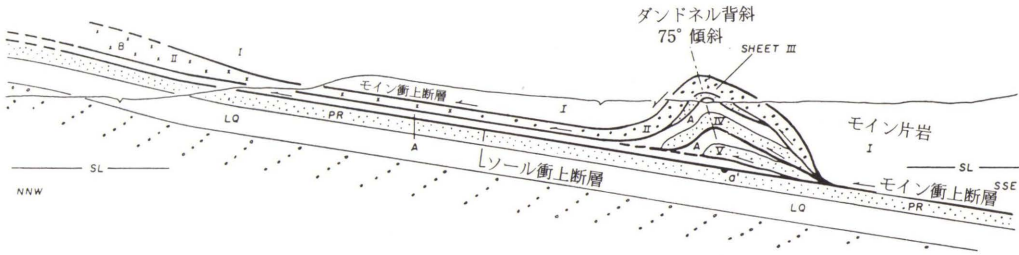


図 12.8 モイン衝上断層帯のダンドネル背斜状累重 (Elliott・Johnson, 1980)
I～Vの順に衝上岩体が形成された。

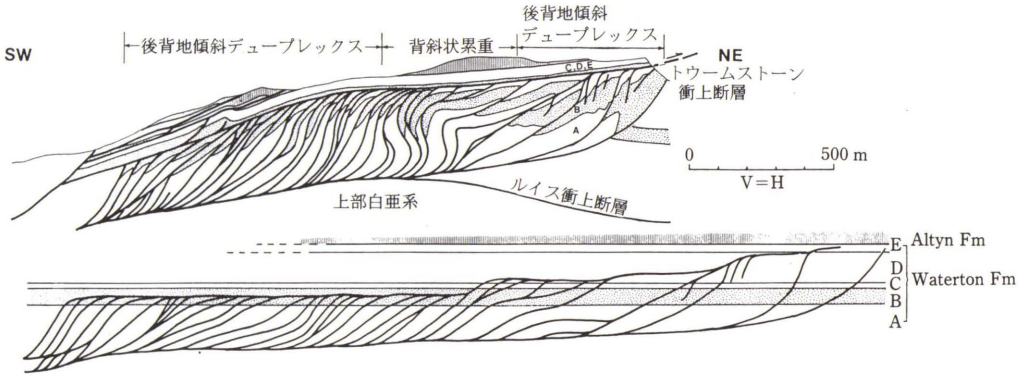


図 12.9 コルディレラ造山帯のヘイグブルック・デュープレックス (Mitra・Boyer, 1986)
復元された地層の積み重なった状態に後で形成される衝上断層が描かれている。

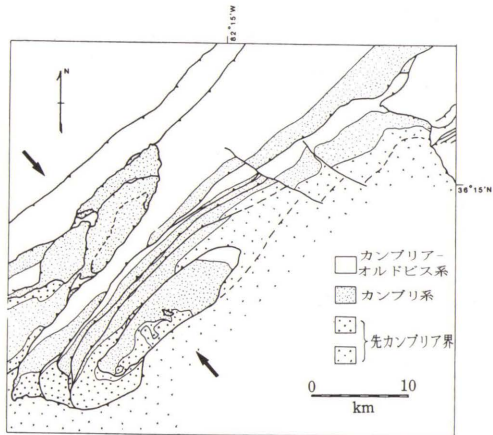
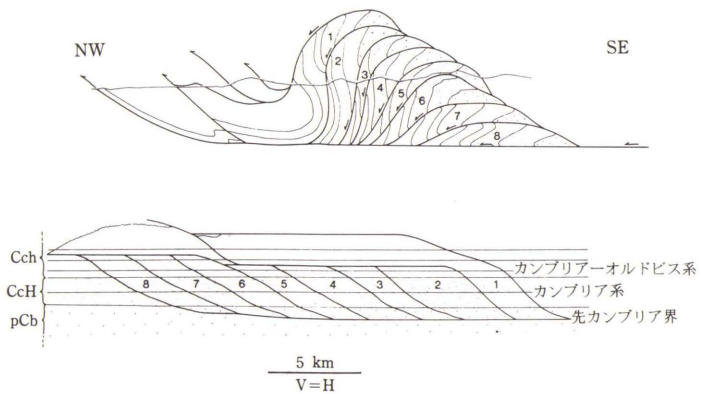


図 12.10 アパラチア造山帯、マウンテンシティー地窓の前縁地傾斜デュープレックス (Diegel, 1986)
復元図がつけられている。



層帯である(図 12.1)。そこでみられるヘイグブルック・デュープレックス (Haig Brook Duplex) では先カンブリア界 (Waterton Formation) が何回も繰返し積み重なっている (Mitra・Boyer, 1986) (図 12.9)。それぞれのホースは断面図でほぼ同じ長さをもっており、南西部で後背傾斜デュープレックスをつくっている。中央部では小規模な衝上断層の変位量がホースの長さと同じ程度に大きいために背斜状累重をつくっている。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、後背地傾斜デュープレックスに移り変わる。これには復元された地層の積み重なった状態を表す図が付けられており、それに後で形成される階段状の衝上断層が示されている (図 12.9)。

3) アパラチア造山帯のバレーアンドリッジ帯

アパラチア造山帯の衝上断層帯はバレーアンドリッジ帯 (Valley and Ridge Province) とよばれており、北東トレンドで北西方に向かう衝上断層帯である。このマウンテンシティ地窓 (Mountain City window) でみられるデュープレックスは、ホースの長さに対してそれぞれの衝上断層の変位量が大きいために、前縁地傾斜デュープレックスとなっている (Diegel, 1986; Mitra・Boyer, 1986) (図 12.10)。なお、地窓は、地質図上で衝上断層の下盤の地層が上盤の地層に周りを取囲まれて分布する範囲を示し、この地域ではルーフ衝上断層が背斜状に褶曲し、それが削剝されたことによって形成されている (図 12.10)。

12.7. 衝上断層帯の衝上順序

衝上断層帯の衝上順序 (thrust sequence) については古くから議論されてきた。カレドニア造山帯のモイン衝上断層帯では、Peach・他 (1907) 以来、前縁地から後背地へ、つまり新しい衝上岩体が古い衝上岩体の上に乗る踏み越し型 (overstep) の考えが支配的であった (図 12.11 b)。これは、より後背地側にあ

る衝上断層が前縁地側にある衝上断層を覆い隠していることから、前者が後者を切断しているとみなしたことによる。一方、Elliott・Johnson (1980) は現在みられる衝上断層同士の幾何学的配置だけからは、上位の方が必ずしも下位の衝上断層を切断していることにはならないと指摘した。

ルーフ衝上断層が、下にはりついたデュープレックスによって褶曲して背斜状の高まりを形成すると、ルーフ衝上断層の上盤にも背斜状の高まりを形成する。モイン衝上断層帯のダンドネル背斜状累重では、ルーフ衝上断層であるモイン衝上断層が褶曲し、平面的なソール衝上断層の上位に位置している (図 12.8)。この事実は衝上順序が上盤から下盤つまり後背地から前縁地であることを示す (Elliott・Johnson, 1980)。このようにデュープレックスをつくる衝上運動は、新しい衝上岩体が古い衝上岩体の上に乗せたまま衝上することから、ピギーバック型 (piggy-back) (背中におんぶするという意味で、鉄道で車を運ぶとき用いられる) とよばれている (図 12.11 a)。

モイン衝上断層帯だけでなく、コルディレラ造山帯やアパラチア造山帯の褶曲・衝上断層帯でも多くのデュープレックスが形成されており、ルーフ衝上断層が褶曲していることから基本的にはピギーバック型の衝上順序で説明される。大規模な造山帯では衝上断層群は後背地から前縁地に向かって新しく形成されるのが一般的であり、この順序にできるものは順序内衝上断層 (in-sequence thrust) とよばれる。この場合、最も前縁地側の衝上断層は規模が小さく褶曲に移り変わっていることが多く、それよりも前縁地側では変形はみられない (図 12.1 参照)。

一方、すでに形成されていたデュープレックスが後の衝上断層で切断されている例も多く見いだされており、この事実は、踏み越し型によるものが含まれることを示す (Butler・Coward, 1984)。これは、衝上方向は同じであるが順番からはずれる順序外衝

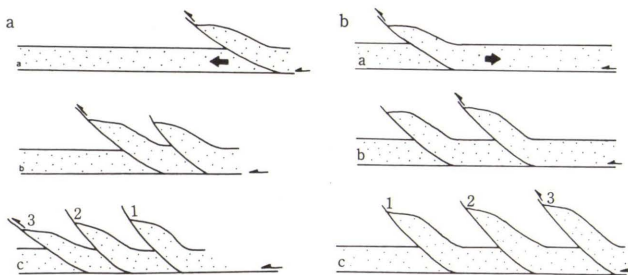


図 12.11 ピギーバック型 (a) と踏み越し型 (b) の衝上順序 (Butler, 1982)

太い矢印は衝上断層が若くなっていく方向を示す。

上断層(out-of-sequence thrust)の存在を意味する。

また、衝上断層帯ではそれぞれの衝上断層は変位量が側方に変化することは普通であり、移動方向に平行な横すべり断層が衝上岩体だけを変位させているティア断層(tear fault)が存在する。さらに、逆方向に衝上する後方衝上断層(back-thrust)や、衝上運動に伴って正断層の存在も露頭観察から得られており(Butler, 1987; Coward, 1988), 実際はかなり複雑な構造をもっている。

まとめ

バランス断面図の作成によって、大きなスケールの地質構造を合理的に判断することができる。これは造山帯前縁部の衝上断層帯の地質構造とその形成過程を解明するのに貢献した。デュープレックスは衝上断層帯での基本構造の一つであり、上下に重なりあったルーフ・フロアー衝上断層の間に、同一層準の地層を累重させる構造である。これは階段状の形態をもつ衝上断層が存在するとき、上盤の地層が下盤の地層を次々とはぎ取っていくことにより形成される。デュープレックスの一種である背斜状累重はルーフ衝上断層を背斜状に褶曲させるため、衝上断層帯でのピギーバック型の衝上順序のよい証拠となる。

(村田 明広)

参考書

- Boyer, S. E.・Elliott, D.(1982) : Thrust systems. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, vol. 66, p.p. 1196-1230.
- Butler, R. W. H.(1982) : The terminology of structures in thrust belts. *Jour. Struct. Geol.*, vol. 4, p.p. 239-245.
- Butler, R. W. H.(1987) : Thrust sequences. *Jour. Geol. Soc. Lond.*, vol. 144, p.p. 619-634.
- Coward, M. P.(1988) : The Moine thrust and the Scottish Caledonides. In "Geometries and mechanisms of thrusting, with special reference to the Appalachians (eds. G. Mitra・S. Wojtal)". *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, no. 222, p.p. 1-16.
- Dahlstrom, C. D. A.(1969) : Balanced cross-sections. *Canad. Jour. Earth Sci.*, vol. 6, p.p. 743-757.
- Diegel, F. A.(1986) : Topological constraints on imbricate thrust networks, examples from the Mountain City window, Tennessee, U. S. A. *Jour. Struct. Geol.*, vol. 8, p.p. 269-279.
- Elliott, D.・Johnson, M. R. W.(1980) : Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt of NW Scotland. *Trans. Roy. Soc. Edin.(Earth Sci.)*, vol. 71, p.p. 69-96.
- Hossack, J. R.(1979) : The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction : a review. *Jour. Geol. Soc. Lond.*, vol. 136, p.p. 705-711.
- Marshak, S.・Mitra, G.(1988) : Basic Methods of Structural Geology. 446 p. Prentice Hall.
- Mitra, G.・Boyer, S. E.(1986) : Energy balance and deformation mechanisms of duplexes. *Jour. Struct. Geol.*, vol. 8, p.p. 291-304.
- 村田明広(1988) : Balanced Cross Section と Duplex. 地学雑誌, vol. 97, p.p. 504-512.
- 中村光一(1989) : Balanced cross-section 法と GGT. 月刊海洋, vol. 21, p.p. 85-89.
- Peach, B. N., Horne, J., Gunn, W., Clough, C. T., Hinxman, L. W.・Teall, J. J. H.(1907) : The geological structure of the north-west Highlands of Scotland. *Mem. Geol. Surv. G. B.*
- Price, R. A.(1986) : The southeastern Canadian Cordillera : thrust faulting, tectonic wedging, and delamination of the lithosphere. *Jour. Struct. Geol.*, vol. 8, p.p. 239-254.
- Woodward, N. B., Boyer, S. E.・Suppe, J.(1989) : Balanced geological cross-sections. *IGC Short Course*, vol. 6, 144 p., Amer. Geoph. Union.